

Разработка термоэлектрических систем охлаждения и термостатирования с помощью компьютерной программы KRYOTHERM

В статье «Современные решения термоэлектрического охлаждения для радиоэлектронной, медицинской, промышленной и бытовой техники», вышедшей двумя частями в последнем номере за 2009 год и в первом номере этого года, было дано представление о термоэлектрическом охлаждении, основных областях его применения, а также приведены наиболее интересные примеры реализации приборов и устройств с применением термоэлектрических модулей Пельтье. Как было отмечено в статье, номенклатура выпускаемых компанией «КРИОТЕРМ» термоэлектрических модулей (ТЭМ) превышает 250 типов. В этой связи у разработчиков устройств термоэлектрического охлаждения возникает много вопросов при выборе конкретного модуля для решения задачи и способа его применения. Ответить на большинство вопросов разработчиков позволяет компьютерная программа KRYOTHERM.

Пётр ШОСТАКОВСКИЙ
info@kryotherm.ru

Краткий обзор возможностей программы KRYOTHERM

Первая версия программы вышла больше 10 лет назад. За это время программа была модернизирована, а ее возможности расширены. В программу постоянно включается информация о новых модулях, разработанных компанией «КРИОТЕРМ». (Обновленная версия программы всегда доступна на сайте компании www.kryotherm.ru.)

Термоэлектрические системы охлаждения и термостатирования (ТСОТ) позволяют обеспечить поддержание заданной температуры объекта статирования на уровне как выше, так и ниже температуры окружающей среды.

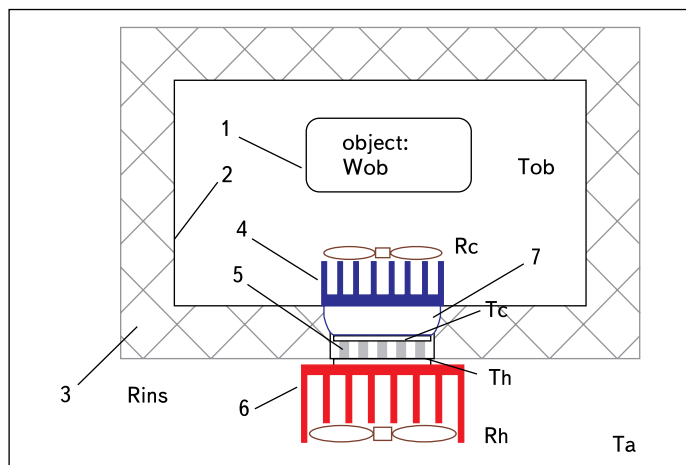


Рис. 1. Модель термоэлектрической системы охлаждения

Любую термоэлектрическую систему можно разделить на три основные части: собственно термоэлектрический модуль и его холодную и горячую стороны (рис. 1).

Холодная сторона включает в себя термостатируемый объект 1 при температуре $T_{об}$ и с выделяемой объектом тепловой мощностью $W_{об}$, помещаемый в камеру 2.

Камера окружается теплоизоляцией 3 с тепловым сопротивлением изоляции $R_{инс}$. Тепло от объекта при помощи теплообменника 4 передается к холодной стороне термоэлектрического модуля 5. Теплообменник обычно представляет собой пластинчатый радиатор, обдуваемый вентилятором.

Отвод теплоты с горячей стороны термоэлектрического модуля осуществляется при помощи горячего теплообменника 6. Для передачи отводимого тепла сквозь слой теплоизоляции служит теплопровод 7, устанавливаемый между холодной стороной модуля и холодным теплообменником. Для уменьшения контактного теплового сопротивления между сторонами модуля и поверхностями теплообменников наносится слой теплопроводной пасты, например КПТ-8.

Прежде чем перейти к описанию программы, отметим некоторые особенности, присущие термоэлектрическим системам, на примере термоэлектрического холодильника, приведенного на рис. 1, с некоторыми численными значениями режимов и перепадов температуры:

1. Термоэлектрические устройства, так же как и модули, могут работать как в режиме максимальной экономичности по питанию (максимального холодильного коэффициента COP), так и в режиме максимальной холодопроизводительности Q_c . Для режима максимума COP характерно меньшее, для режима максимума Q_c — большее значение напряжения питания. На практике обычно выбирается некоторое промежуточное значение напряжения, составляющее около 70–80% от U_{max} термоэлектрического модуля (например, 12 В для 127-парных модулей с $U_{max} \sim 16$ В).

2. Разность температур на модуле несколько меньше максимальной ($T_h - T_c = 60$ К, в соответствии с величиной напряжения питания) и складывается из следующих составляющих:

- потерь по горячей стороне ($T_h - T_a = 26$ К, или 43%);
- полезной составляющей ($T_a - T_{ob} = 25$ К, или 42%);
- потерь по холодной стороне ($T_{ob} - T_c = 9$ К, или 15%).

3. Большие мощности ТЭМ и, как следствие, высокие плотности тепловых потоков в термоэлектрических устройствах требуют обеспечения эффективного теплоотвода.

Первоочередным способом улучшения характеристик TCOT является уменьшение тепловых потерь по горячей стороне.

На основе многолетнего общения с клиентами специалистами компании «КРИОТЕРМ» были выделены следующие ключевые вопросы, ответы на которые необходимы для создания высокоэффективных термоэлектрических систем охлаждения:

- Как выбрать нужный модуль или модули для оптимального решения охлаждения?
- Какое число модулей оптимально для существующей задачи?
- Как создать наиболее эффективную и надежную систему охлаждения и температурной стабилизации?

Руководствуясь желанием максимально полно ответить на эти вопросы для разработчиков термоэлектрических систем охлаждения, специалисты компании «КРИОТЕРМ» создали компьютерную программу KRYOTHERM, которая состоит из трех частей:

- Performance Graphs (графическое представление термоэлектрических характеристик ТЭМ).
- Choice of modules (выбор ТЭМ по термоэлектрическим характеристикам).
- Thermoelectric system calculation (расчет термоэлектрической системы охлаждения).

Каждый последующий раздел программы базируется на информации, получаемой пользователем из предыдущего. Это позволяет изучить основы проектирования термоэлектрических систем охлаждения от простого к сложному.

Все разделы снабжены подробным описанием (HELP), вызываемым нажатием клавиши F1. Приведенные примеры расчета позволяют пользователю быстрее освоить основные возможности программы.

Система обозначений и опции просмотра, примененные в программе KRYOTHERM

В связи с тем, что в программе осуществляется связь различных по своей сути параметров (теплофизические параметры модулей и окружающей среды, электрические параметры модулей, показатели их эффективности и др.), целесообразно привести определение этих

параметров и их группировку по свойствам. Приведем основные термины и обозначения, примененные в программе KRYOTHERM.

Потребительские параметры модулей:

- dT_{max} — максимальная разность температур между сторонами модуля при определенной температуре горячей стороны ($T_h = 300$ К).
- I_{max} — ток, при котором достигается разность температур dT_{max} (А).
- U_{max} — напряжение, соответствующее току I_{max} и разности температур dT_{max} (В).
- Q_{max} — холодопроизводительность при токе $I = I_{max}$ и разности температур $dT = 0$ (Вт).

Количество модулей:

- n — суммарное количество модулей;
- ns и np — число последовательно соединенных модулей в группе и число параллельных групп (в случае последовательно-параллельного соединения модулей), $ns \times np = n$.

Энергетические характеристики:

- I — ток (А);
- U — напряжение (В);
- $W = I \times U$ — потребляемая электрическая мощность (Вт);
- Q_c — холодопроизводительность (Вт);
- $Q_h = Q_c + W$ — тепловая энергия, выделяющаяся на горячей стороне модуля (Вт);
- $COP = Q_c / W$ — холодильный коэффициент;
- W_{ob} — тепловая энергия, выделяющаяся в объекте (Вт).

Тепловые сопротивления:

- $R_c = (T_{ob} - T_c) / Q_c$ — тепловое сопротивление между объектом и холодной поверхностью (холодными спаями) термоэлектрического модуля (К/Вт);
- $R_h = (T_h - T_a) / Q_h$ — тепловое сопротивление между горячей поверхностью (горячими спаями) термоэлектрического модуля и средой (К/Вт);
- R_{c1} и R_{h1} — промежуточные тепловые сопротивления по холодной и горячей сторонам термоэлектрической системы, включающие в себя сопротивление керамики и теплопроводящей пасты (К/Вт);
- R_{c2} и R_{h2} — тепловые сопротивления теплообменников на один модуль по холодной и горячей сторонам термоэлектрической системы (К/Вт);
- R_{ins} — тепловое сопротивление изоляции (К/Вт).
- Температуры:
- T_{ob} — температура охлаждаемого объекта (К);
- T_a — температура окружающей среды (К);
- T_h — температура горячей поверхности (горячих спаев) термоэлектрического модуля (К);
- T_c — температура холодной поверхности (холодных спаев) термоэлектрического модуля (К);
- $dT = T_h - T_c$ — разность температур между сторонами (спаями) модуля (К).

Характеристики потока:

- T_{cf0} и T_{hf0} — температура потока (жидкости или газа) на входе в холодную и в горячую стороны термоэлектрической системы (К);
- T_{cf1} и T_{hf1} — температура потока на выходе из холодной и горячей стороны (К);
- T_{cfa} и T_{hfa} — среднее значение температуры потока по холодной и горячей сторонам (К);
- $dT_{cf} = T_{cf0} - T_{cf1}$ — разность температур холодного потока между входом и выходом (К);
- $dT_{hf} = T_{hf1} - T_{hf0}$ — разность температур горячего потока между выходом и входом (К);
- $W_c = Q_c / dT_{cf}$ — эквивалент потока по холодной стороне (Вт/К);
- $W_h = Q_h / dT_{hf}$ — эквивалент потока по горячей стороне (Вт/К).

Опции просмотра

В первых двух частях программы (Performance Graphs и Choice of Modules) программы KRYOTHERM любой из стандартных или детальных графиков можно расширить на весь экран. Для этого необходимо подвести курсор мыши к интересующему графику и дважды нажать левую кнопку мыши. Возврат к предыдущему окну осуществляется нажатием комбинации клавиш Alt+C.

Любой из графиков можно рассмотреть более подробно, если выделить интересующую область с помощью мыши. Для этого необходимо нажать клавишу Shift и левую кнопку мыши и, не отпуская ее, выделить прямоугольную рамку. Возврат к графику нормальных размеров осуществляется нажатием клавиши Shift и левой кнопки мыши. Это позволяет производить расчеты с требуемой точностью.

В части программы Choice of Modules предусматривается вывод дополнительной информации по каждому варианту решения задачи охлаждения. Дополнительная информация вызывается двойным щелчком левой кнопки мыши на таблице результатов.

При наличии установленного принтера программа предоставляет возможность печати исходных данных, графиков, результатов расчета.

Первый раздел программы: графическое представление термоэлектрических характеристик ТЭМ (Performance Graphs)

Представленные на сайте и в каталоге компании «КРИОТЕРМ» технические спецификации на выпускаемые модули дают представление об основных технических характеристиках и их соотношениях. Программа KRYOTHERM содержит каталог термоэлектрических модулей, подразделенный по областям применения (закладки во второй строке: микромодули, стандартные однокаскадные, высокоэффективные, специальные и многокаскадные ТЭМ).

Module	I _{max} (Amps)	Q _{max} (Watts)	U _{max} (Volts)	dT _{max} (K)	A	B	C	D	H
SNOWBALL-71	3.6	36	16.1	71	30.0	30.0	30.0	30.0	3.6
STCFM	3.6	34.5	15.7	69	40.0	40.0	40.0	40.0	3.6
STCFM-71	3.6	36	16.1	71	40.0	40.0	40.0	40.0	3.6
RIME-74	3.8	39	16.7	74	40.0	40.0	40.0	40.0	4.0
FROST-71	6.1	61	16.1	71	40.0	40.0	40.0	40.0	3.9
FROST-72	6.2	62	16.3	72	40.0	40.0	40.0	40.0	3.9
FROST-73	6.2	64	16.5	73	40.0	40.0	40.0	40.0	3.9
FROST-74	6.3	65	16.7	74	40.0	40.0	40.0	40.0	3.9
FROST-75	6.3	66	16.8	75	40.0	40.0	40.0	40.0	3.9
ICE-71	8.0	80	16.1	71	40.0	40.0	40.0	40.0	3.4
HAL	7.9	76	15.7	69	40.0	40.0	40.0	40.0	3.4
H&T-71	8.0	80	16.1	71	40.0	40.0	40.0	40.0	3.4

Рис. 2. Окно каталога ТЭМ

При выборе конструкции модуля следует принять во внимание, что многокаскадные модули целесообразно применять только в случае необходимости получения перепадов температур, не обеспечиваемых однокаскадными модулями. Это становится понятно при сравнении графиков холодильных коэффициентов однокаскадных и многокаскадных модулей.

Пример представления параметров ТЭМ приведен на рис. 2.

Стандартные графики

Окно со стандартными графиками появляется после выбора модуля и нажатия кнопки Standard. Название модуля находится в верхней строке слева. Далее приводятся потребительские параметры модуля — I_{max}, Q_{max}, U_{max}, dT_{max}. Потребительские параметры зависят от температуры горячей стороны Th. Значение температуры Th вводится в окне внизу слева. При температуре Th = 300 К эти параметры соответствуют данным, приведенным в каталоге и на сайте компании «КРИОТЕРМ».

Стандартные графики представляют собой четыре универсальные зависимости (рис. 3), которыми следует пользоваться для определения характеристик термоэлектрических модулей. Это зависимости холодопроизводительности, напряжения и COP от разности температур между сторонами модуля (графики № 1–3), а также зависимость напряжения от тока (график № 4).

Стандартные графики № 1–3 строятся при четырех определенных значениях тока. Токи приводятся в процентах от I_{max}. В легенде расширенного графика эти значения приводятся в амперах.

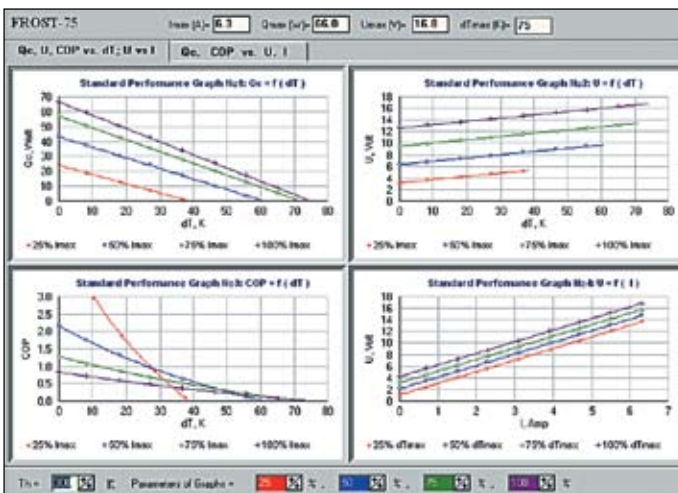


Рис. 3. Графики холодопроизводительности, напряжения и COP от разности температур между сторонами модуля (графики № 1–3), а также зависимость напряжения от тока (график № 4)

Стандартный график № 4 строится при четырех определенных значениях разности температур. Разности температур приводятся в процентах от dT_{max}. В легенде укрупненного графика эти значения приводятся в градусах Кельвина.

Стандартный график № 1 — график зависимости холодопроизводительности от разности температур между горячей и холодной сторонами

Данная зависимость строится при фиксированных значениях тока. Это наиболее важный график (рис. 4). С его помощью можно определить, сколько тепловой энергии может отвести модуль от охлаждаемого объекта при заданной разности температур между сторонами модуля.

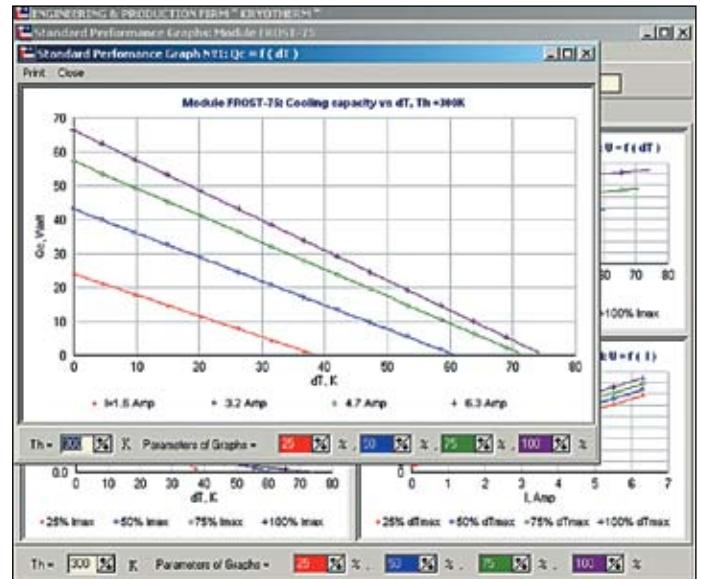


Рис. 4. График зависимости холодопроизводительности от разности температур между горячей и холодной сторонами

При подводе тепловой нагрузки на термоэлектрический модуль данная тепловая энергия подогревает холодную сторону, в результате чего разность температур между сторонами модуля уменьшается. При отсутствии тепловой нагрузки модуль развивает максимальную разность температур.

По мере увеличения тока эффект Пельтье проявляется сильнее, и графики смещаются в сторону больших значений разностей температур и больших значений холодопроизводительности.

Стандартный график № 2 — зависимость разности температур от напряжения, подаваемого на модуль

Данная зависимость (рис. 5) строится при фиксированных значениях тока. Напряжение, прикладываемое к модулю, складывается из двух составляющих — омического напряжения и напряжения, затрачиваемого на преодоление термоЭДС, возникающей в результате эффекта Зеебека.

При фиксированном значении тока омическая составляющая постоянна, а напряжение Зеебека линейно зависит от разности температур между сторонами модуля. Для достижения большей разности температур к модулю необходимо прикладывать большее напряжение.

Стандартный график № 3 — зависимость холодильного коэффициента от разности температур между горячей и холодной сторонами

Эта зависимость также строится при фиксированных значениях тока (рис. 6). Холодильный коэффициент представляет собой отношение холодопроизводительности к электрической энергии, потребляемой модулем. При фиксированном значении тока электрическая энергия, потребляемая термоэлектрическим модулем, немного увеличивается при возрастании разности температур, а холодопроизво-

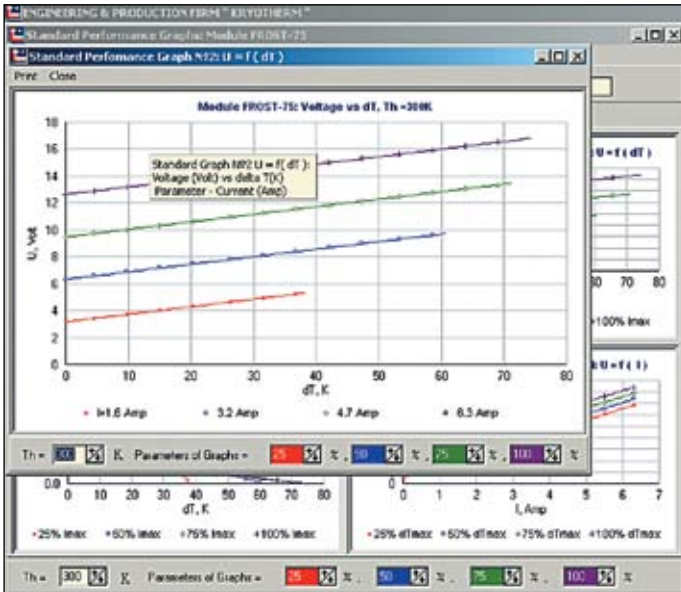


Рис. 5. Зависимость разности температур от напряжения, подаваемого на модуль

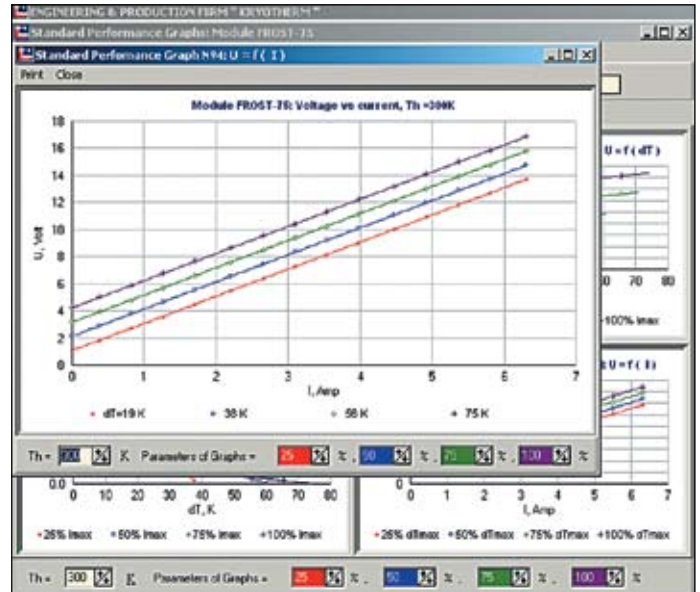


Рис. 7. Зависимость напряжения, подаваемого на термоэлектрический модуль, от тока

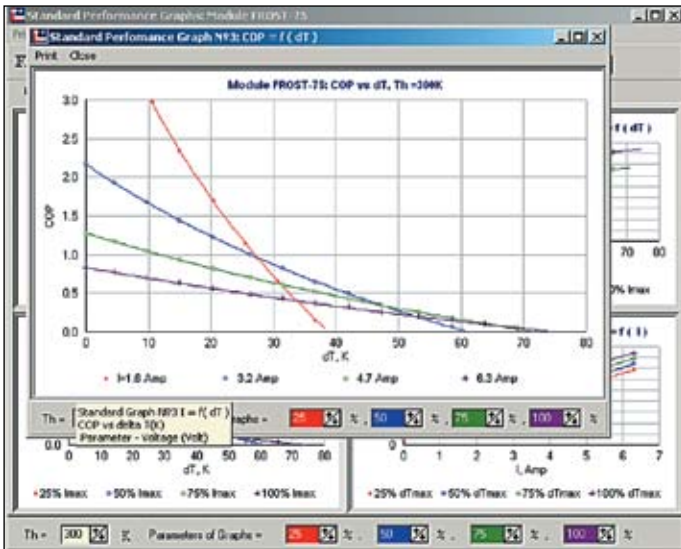


Рис. 6. Зависимость холодильного коэффициента от разности температур между горячей и холодной сторонами

Дополнительные стандартные графики

Для получения дополнительной информации о ключевых параметрах модулей COP и холодильной мощности от подаваемого напряжения или протекающего тока служат стандартные графики № 5–8 (рис. 8). Эти графики построены при фиксированных значениях холодной и горячей сторон.

Открытие графиков осуществляется нажатием второй закладки, значения перепада температур могут изменяться в соответствующем данному модулю интервале. Таким образом, представленные графики позволяют получить дополнительную информацию о взаимных зависимостях ключевых параметров в различных условиях. Как и в первой группе графиков (№ 1–4), температура горячей стороны также может быть задана пользователем произвольно.

Каждый график может быть представлен укрупненно, отдельно от других, для этого необходимо навести курсор на интересующий график и дважды кликнуть по нему. Также может быть выделена и увеличена до требуемых размеров интересующая часть графика в соответствии с порядком, описанным выше.

дительность линейно падает при увеличении разности температур. В результате COP падает при увеличении разности температур.

При малых токах модуль потребляет небольшое количество электрической энергии, поэтому эффективность его работы (COP) оказывается выше, чем при больших токах. Однако при больших токах сильнее проявляется эффект Пельтье и может быть достигнуто более глубокое охлаждение.

Стандартный график № 4 — зависимость напряжения, подаваемого на термоэлектрический модуль, от тока

Эта зависимость (рис. 7) строится при фиксированных значениях разности температур между сторонами модуля.

Напряжение, прикладываемое к модулю, складывается из двух составляющих — омического напряжения и напряжения, затрачиваемого на преодоление ЭДС, возникающей в результате эффекта Зеебека. При фиксированном значении разницы температур составляющая Зеебека постоянна, а омическая составляющая прямо пропорциональна току. В результате напряжение линейно увеличивается в зависимости от тока.

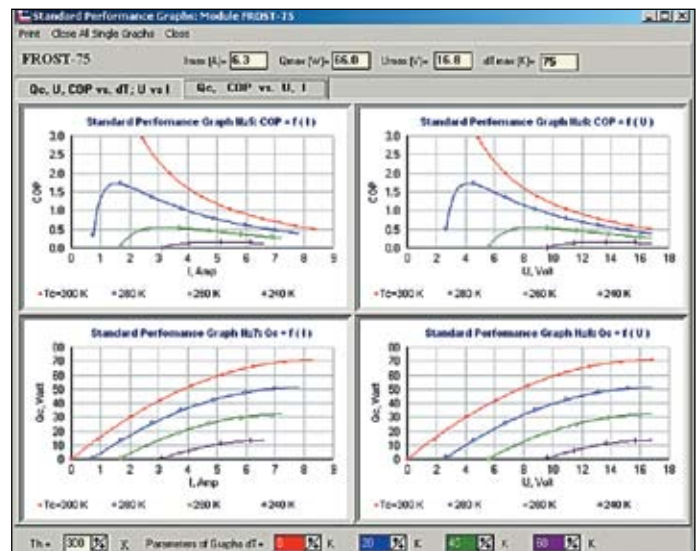


Рис. 8. Стандартные графики зависимости холодильного коэффициента и холодильной мощности от величины напряжения и тока

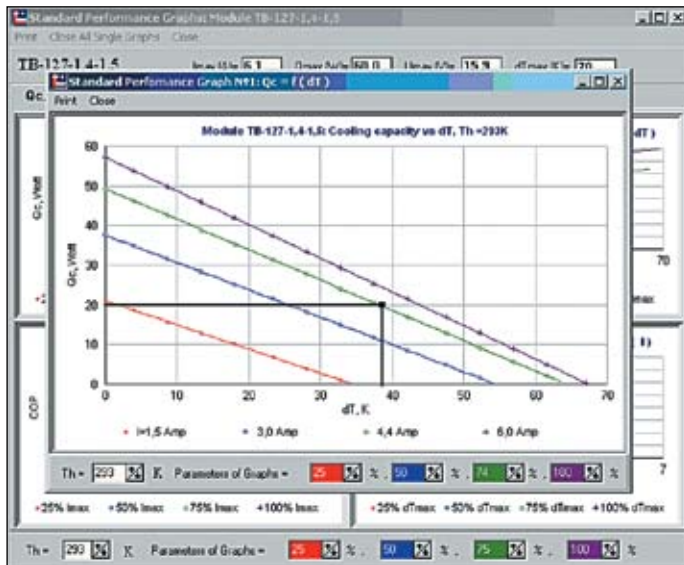


Рис. 9. Выбор тока, обеспечивающего на заданном перепаде температур необходимую холодильную мощность

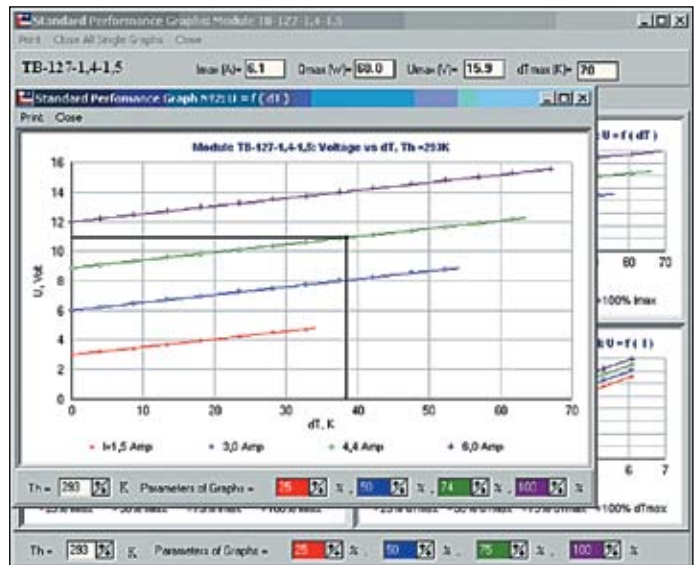


Рис. 10. Определение напряжения питания, соответствующего выбранным режимам ($dT = 38 \text{ K}$, $I = 0,74I_{max}$)

Пример определения характеристик модуля по стандартным графикам

При необходимости охладить объект с помощью термоэлектрического модуля оптимальным образом, необходимо знать тепловую мощность, выделяющуюся в объекте, температуру, до которой следует охладить объект, а также температуру среды. Зная эти величины, можно оценить требуемую холодопроизводительность для данной ТСОТ и температуры горячей и холодной сторон термоэлектрического модуля.

Для охлаждения до заданной температуры и отвода теплоты необходимо приложить к модулю определенное напряжение (пропустить через него определенный ток). Также полезно знать холодильный коэффициент.

Возьмем для примера следующие исходные данные: $Q_c = 20 \text{ Вт}$, $T_h = 293 \text{ К}$ ($20 \text{ }^\circ\text{C}$), $T_c = 255 \text{ К}$ ($-18 \text{ }^\circ\text{C}$), модуль — ТВ-127-1,4-1,5.

Задача: определить рабочий ток, рабочее напряжение и холодильный коэффициент для выбранных условий.

Для решения поставленной задачи:

1. В каталоге ТЭМ выбираем модуль ТВ-127-1,4-1,5 и нажимаем кнопку Standard.
2. В нижнем левом углу экрана выставляем температуру горячей стороны модуля $T_h = 293 \text{ К}$.
3. Вычисляем разницу температур — $dT = T_h - T_c = 293 - 255 = 38 \text{ К}$.
4. С помощью стандартного графика № 1 выбираем величину тока такой, чтобы при разности температур $dT = 38 \text{ К}$ обеспечить холодопроизводительность $Q_c = 20 \text{ Вт}$ (рис. 9). Этот ток равен $I = 0,74I_{max}$ или $I = 4,4 \text{ А}$.
5. С помощью стандартного графика № 2 (или стандартного графика № 4) находим напряжение, которое соответствует току $I = 4,4 \text{ А}$ и разности температур $dT = 38 \text{ К}$. Это напряжение равно $U = 10,9 \text{ В}$ (рис. 10).

6. С помощью стандартного графика № 3, представленного на рис. 11, можно найти COP, соответствующий току $I = 0,74I_{max}$ и разности температур $dT = 38 \text{ К}$. Холодильный коэффициент равен $COP = 0,42$. Таким образом, были определены основные параметры системы ТСОТ с применением модуля ТВ-127-1,4-1,5.

Детальные графики

Окно с детальными графиками появляется после выбора модуля и нажатия кнопки Detailed. Название модуля находится в верхней строке слева. Далее приводятся потребительские параметры модуля — I_{max} , Q_{max} , U_{max} , dT_{max} , вычисленные при температуре $T_h = 300 \text{ К}$.

Детальные графики представляют собой набор зависимостей характеристик выбранного модуля при двух фиксированных параметрах.

Фиксированными параметрами являются T_c , T_h , Q_c , W . В соответствии с возможным выбором двух параметров детальные графики подразделяются на следующие типы:

- тип № 1 — $Q_c = \text{const}$, $T_h = \text{const}$;
- тип № 2 — $Q_c = \text{const}$, $T_c = \text{const}$;
- тип № 3 — $T_c = \text{const}$, $T_h = \text{const}$;
- тип № 4 — $T_c = \text{const}$, $W = \text{const}$;
- тип № 5 — $T_h = \text{const}$, $W = \text{const}$.

Выбор типа осуществляется в верхней части окна с детальными графиками. Значения параметров задаются в правом нижнем углу.

В каждом типе детальных графиков существует по четыре группы графиков, описывающих различные характеристики.

Следует иметь в виду, что на некоторых графиках для большей наглядности зависимости характеристик представлена информация в широком диапазоне, превышающем допустимый техническими условиями

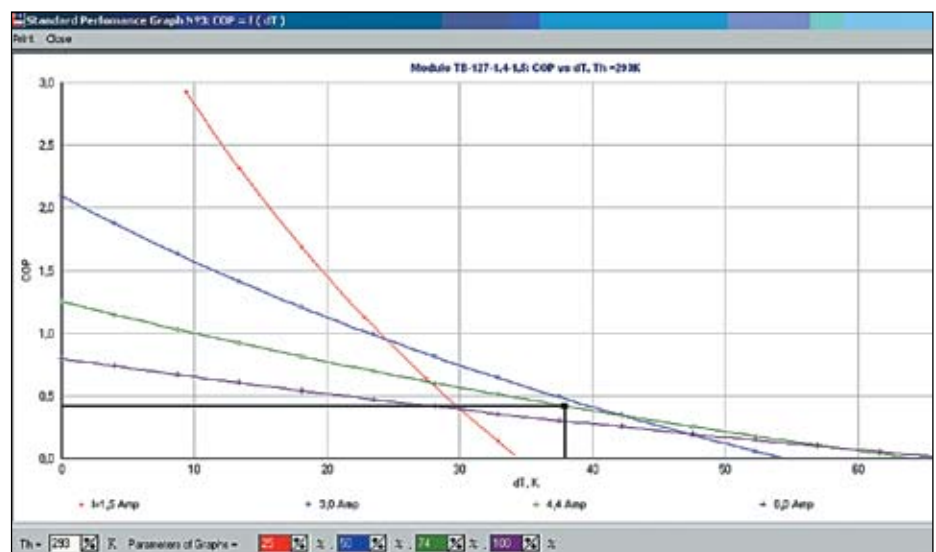


Рис. 11. Определение величины холодильного коэффициента COP

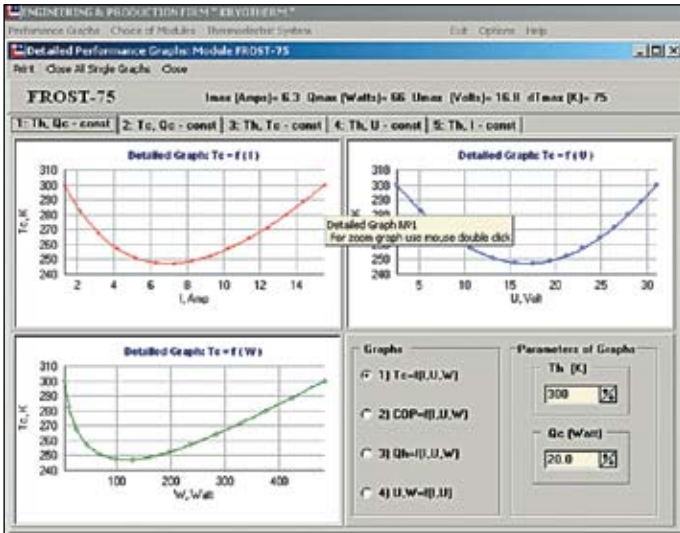


Рис. 12. Детальные графики при фиксированных значениях холодопроизводительности Qc и температуры горячей стороны Th (представлена первая из четырех групп: Tc = f(I, U, W))

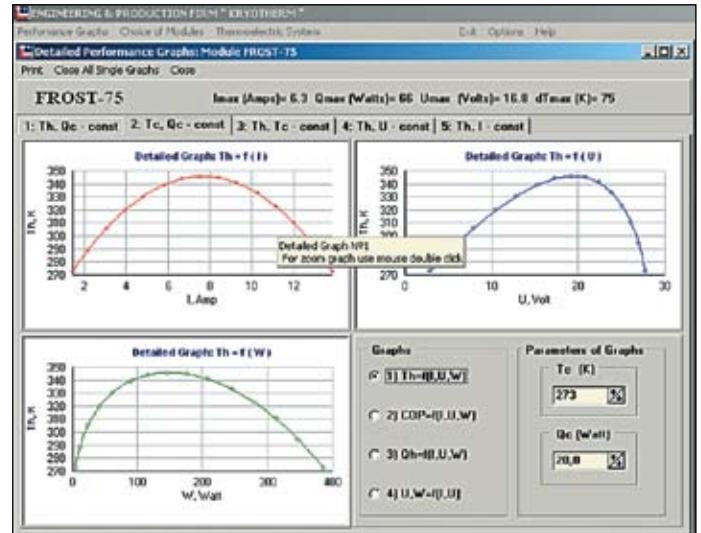


Рис. 13. Детальные графики при фиксированных значениях холодопроизводительности Qc и температуры холодной стороны Tc (представлена первая из четырех групп: Th = f(I, U, W))

и спецификацией. При окончательном выборе модуля следует проверить соответствие выбранных характеристик предельно допустимым условиям эксплуатации модуля.

Детальные графики группы № 1 — значения холодопроизводительности фиксированы

Детальные графики типа № 1 строятся при фиксированных значениях холодопроизводительности Qc и температуры горячей стороны Th. Эта ситуация возникает, когда охлаждаемый объект имеет постоянную мощность тепловыделений и когда известна температура среды. Исходя из мощности тепловыделений и температуры среды, можно оценить требуемую холодопроизводительность и температуру горячей стороны модуля. Задавая численные значения Qc и Th, можно получить графики следующих зависимостей:

- группа № 1 — Tc от I, U, W;
- группа № 2 — COP от I, U, W;
- группа № 3 — Qh от I, U, W;
- группа № 4 — U от I, W от I, W от U.

Основным графиком типа № 1 является график группы № 1 — Tc = f(I) (приведен на рис. 12). Он позволяет определить, какой ток следует пропускать через модуль, чтобы охладить объект до определенной температуры.

На графике (рис. 12) видно, что существует ток, при котором достигается максимальное охлаждение. При значениях тока меньше оптимального эффект Пельтье не проявляется в достаточной мере, и охлаждение меньше максимально возможного. При больших значениях тока температура холодной стороны увеличивается из-за большого выделения джоулевой энергии.

Детальные графики группы № 2 — зависимость напряжения, подаваемого на ТЭМ, от разности температур между горячей и холодной сторонами при фиксированном значении тока

Детальные графики типа № 2 строятся при фиксированных значениях холодопроизводительности Qc и температуры холодной стороны Tc. Эта ситуация возникает, когда охлаждаемый объект ТСОТ необходимо поддерживать при определенной температуре, и он имеет постоянную мощность тепловыделений. Исходя из мощности тепловыделений и требуемой температуры объекта, можно оценить требуемую холодопроизводительность и температуру холодной стороны модуля. Задавая численные значения Qc и Tc, можно получить графики следующих зависимостей:

- группа № 1 — Th от I, U, W;

- группа № 2 — COP от I, U, W;
- группа № 3 — Qh от I, U, W;
- группа № 4 — U от I, W от I, W от U.

Основным графиком типа № 2 является график зависимости Th = f(I) (приведен на рис. 13). Он позволяет оценить, какой должна быть температура горячей стороны, чтобы можно было обеспечить заданные условия. Высокое значение температуры горячей стороны позволяет добиться значительного перегрева над средой, что способствует лучшему отводу тепловой энергии с горячей стороны термоэлектрического модуля.

На графике видно, что существует ток, при котором достигается максимальная температура горячей стороны. При значении тока, меньшем оптимального, модуль не развивает максимально возможной разности температур из-за недостаточного проявления эффекта Пельтье. При большом значении тока разность температур меньше максимальной из-за значительного выделения джоулевой энергии.

Детальные графики группы № 3 — строятся при фиксированных значениях температур холодной Tc и горячей Th сторон модуля

Эта ситуация возникает, когда известна температура, при которой необходимо поддерживать охлаждаемый объект, и температура среды. Исходя из этих температур, можно оценить температуру сторон модуля. Задавая численные значения Tc и Th, можно получить графики следующих зависимостей:

- группа № 1 — Qc от I, U, W;
- группа № 2 — COP от I, U, W;
- группа № 3 — Qh от I, U, W;
- группа № 4 — U от I, W от I, W от U.

Основными графиками типа № 3 являются график группы № 1 — Qc = f(I) (приведен на рис. 14) и график группы № 2 — COP = f(I). Они позволяют оценить, какой ток необходимо пропускать через термоэлектрический модуль, чтобы обеспечить максимальную холодопроизводительность или максимальный холодильный коэффициент. На графиках видно, что существуют такие значения тока, при которых эти параметры имеют максимальные значения.

Детальные графики группы № 4 — строятся при фиксированных значениях температуры холодной стороны Tc и потребляемой мощности W

Эта ситуация возникает, когда известны температура, при которой необходимо поддерживать охлаждаемый объект, и потребляемая

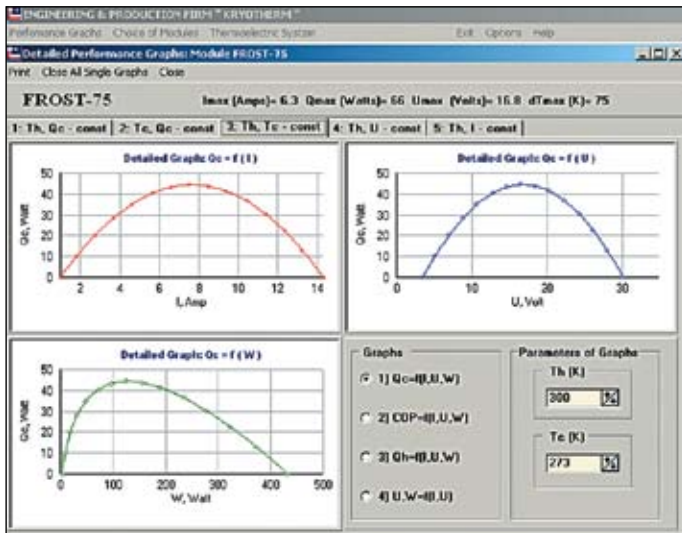


Рис. 14. Детальные графики при фиксированных значениях температуры холодной и горячей сторон, T_c и T_h const (представлена первая из четырех групп: $Q_c = f(I, U, W)$)

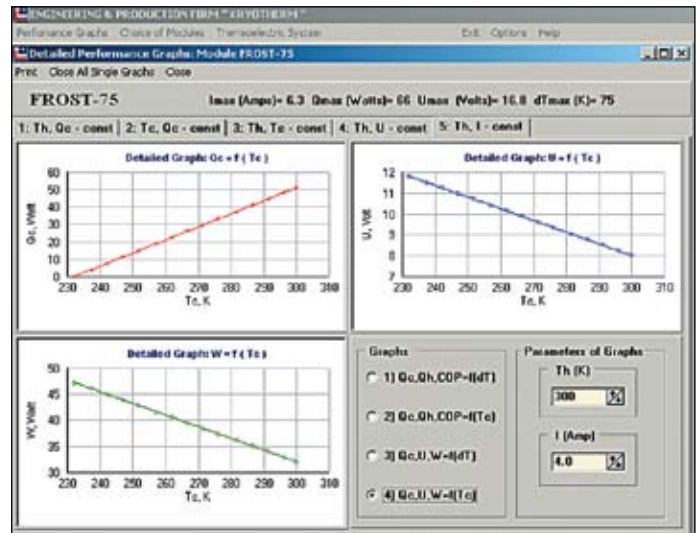


Рис. 16. Детальные графики при фиксированных значениях температуры горячей стороны и протекающего тока (представлена четвертая группа: $Q_c, U, W = f(T_c)$)

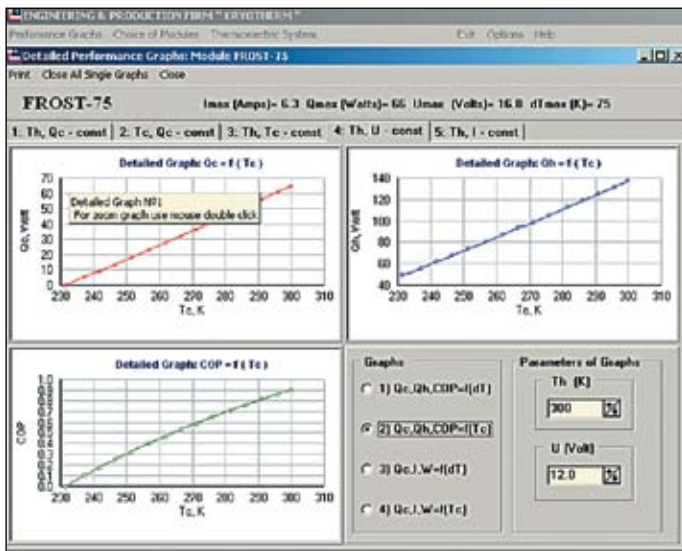


Рис. 15. Детальные графики при фиксированных значениях температуры горячей стороны и напряжения питания (представлена вторая из четырех групп: $Q_c, Q_h, COP = f(T_c)$)

мощность (например, существует ограничение относительно источника питания). Задавая численные значения T_c и W , можно получить графики следующих зависимостей:

- группа № 1 — T_h от I, U, Q_h ;
- группа № 2 — Q_c от I, U, dT ;
- группа № 3 — Q_h от I, U, dT ;
- группа № 4 — COP от I, U, dT .

Основным графиком типа № 4 является график группы № 2 — $Q_c = f(dT)$ (приведен на рис. 15). Он позволяет оценить холодопроизводительность, которую можно обеспечить при заданных температурах сторон модуля и потребляемой мощности. На графике видно, что при увеличении разности температур dT (то есть возрастании температуры горячей стороны) холодопроизводительность уменьшается.

Детальные графики группы № 5 — значения температуры холодной стороны T_h и потребляемой мощности W фиксированы

Эта ситуация возникает, когда известны температура среды и потребляемая мощность (например, существует ограничение относи-

тельно источника питания). Задавая численные значения T_h и W , можно получить графики следующих зависимостей:

- группа № 1 — T_c от I, U, Q_c ;
- группа № 2 — Q_c от I, U, dT ;
- группа № 3 — Q_h от I, U, dT ;
- группа № 4 — COP от I, U, dT .

Основным графиком является график группы № 5 — $T_c = f(Q_c)$ (представлен на рис. 16). Он позволяет оценить температуру холодной стороны в зависимости от холодопроизводительности. На графике видно, что при увеличении разности температур (то есть при уменьшении температуры холодной стороны) холодопроизводительность падает.

Пример расчета по детальным графикам

Для того чтобы охладить объект с помощью термоэлектрического модуля оптимальным образом, необходимо знать тепловую мощность, выделяющуюся в объекте, температуру, до которой следует охладить объект, а также температуру среды. Зная эти величины, можно оценить требуемую холодопроизводительность, и температуры горячей и холодной сторон термоэлектрического модуля.

Для охлаждения до заданной температуры и отвода теплоты необходимо приложить к модулю определенное напряжение (пропустить через него определенный ток). С помощью графиков можно определить холодильный коэффициент и другие характеристики термоэлектрического модуля.

Для примера возьмем следующие исходные данные: $T_h = 293$ К (20°C), $T_c = 255$ К (-18°C), модуль — ТВ-127-1.4-1.5.

Задача: определить максимальный COP и соответствующие ему характеристики.

Последовательность определения:

1. Выбираем модуль ТВ-127-1.4-1.5 и нажимаем кнопку Detailed.
2. На основании исходных данных выбираем тип графиков. В данном случае следует воспользоваться детальными графиками типа № 3.
3. Вводим исходные данные: $T_c = 255$ К, $T_h = 293$ К.
4. На графике $COP = f(I)$ (рис. 17) группы № 2 находим максимальный COP = 0,48 и соответствующий рабочий ток $I = 3,2$ А.
5. На графике $Q_c = f(I)$ группы № 1 находим холодопроизводительность $Q_c = 13$ Вт, которая соответствует рабочему току $I = 3,2$ А (рис. 18).
6. На графике $Q_c = f(U)$ группы № 1 (рис. 19) находим рабочее напряжение $U = 8,5$ В, которое соответствует холодопроизводительности $Q_c = 13$ Вт.
7. На графике $Q_c = f(W)$ (рис. 20) группы № 1 находим потребляемую мощность $W = 27$ Вт, которая соответствует холодопроизводительности $Q_c = 13$ Вт.

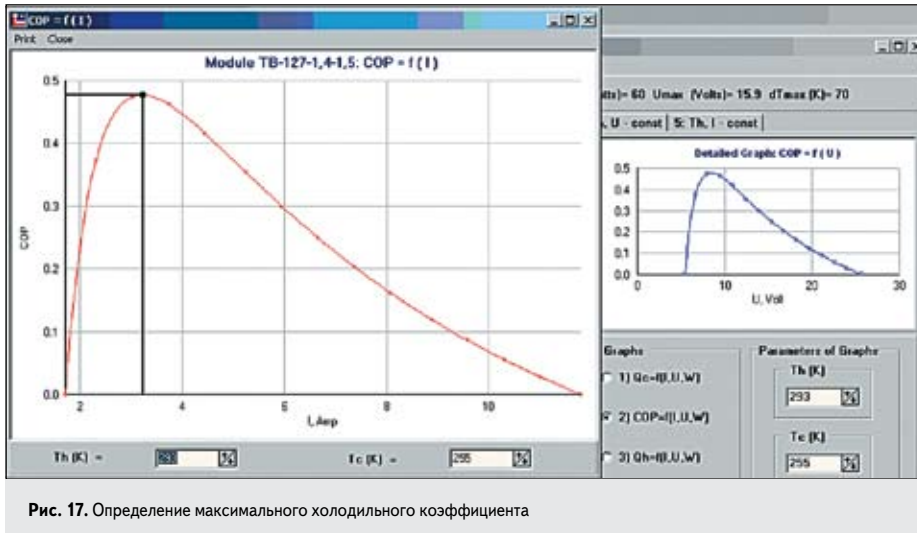


Рис. 17. Определение максимального холодильного коэффициента

Как это видно из приведенных примеров, стандартные графики позволяют рассмотреть общие закономерности изменения основных характеристик (например, зависимость холодопроизводительности от разности температур между сторонами модуля). Детальные графики позволяют оценить характер изменения различных характеристик модуля при некоторых фиксированных параметрах.

Данная часть программы позволяет понять особенности и возможности конкретных типов модулей в различных режимах, оценить возможности того или иного термоэлектрического модуля с помощью графиков характеристик, подобрать, в случае необходимости, аналог уже применяемого модуля.

В следующей части статьи будут рассмотрены разделы программы, предназначенные для выбора термоэлектрических модулей по характеристикам и расчета TCOT.

8. На графике $Q_h = f(I)$ группы № 3 (рис. 21) находим теплопроизводительность

$Q_h = 40$ Вт, которая соответствует рабочему току $I = 3,2$ А.

Окончание следует

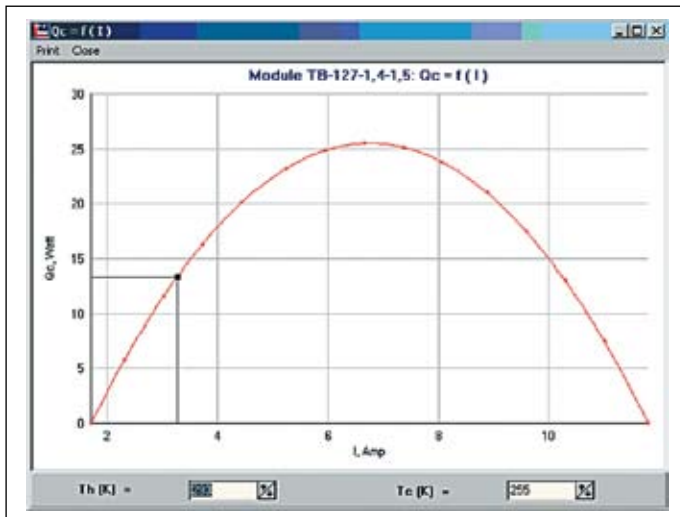


Рис. 18. Определение рабочего тока по значению требуемой холодильной мощности

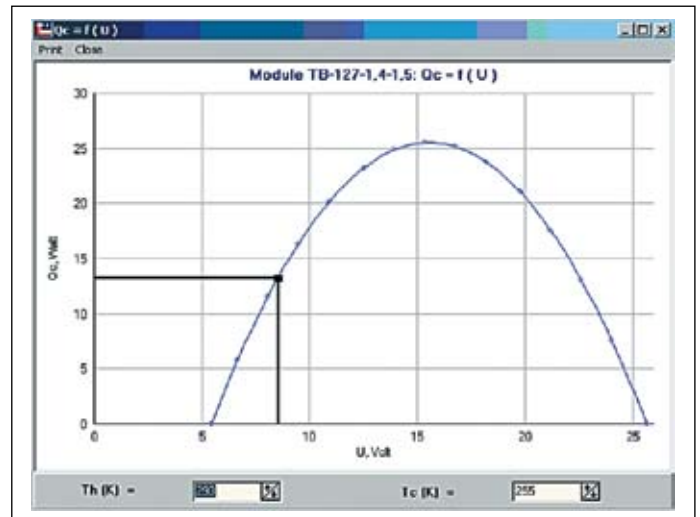


Рис. 19. Определение рабочего напряжения по значению требуемой холодильной мощности

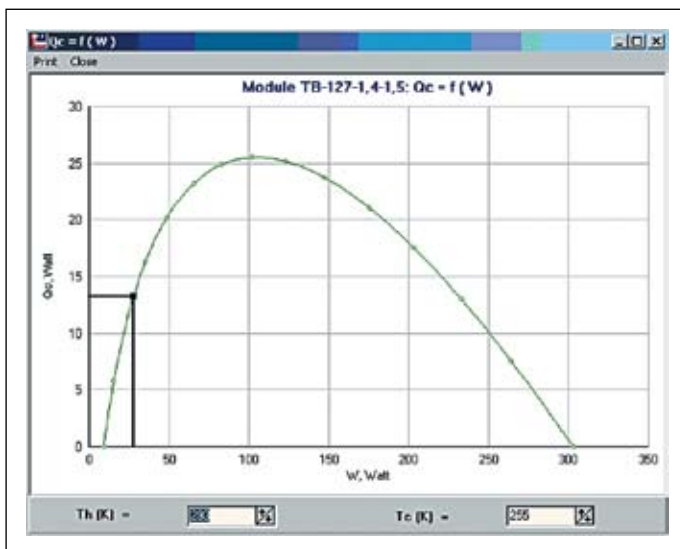


Рис. 20. Определение потребляемой мощности по значению требуемой холодильной мощности

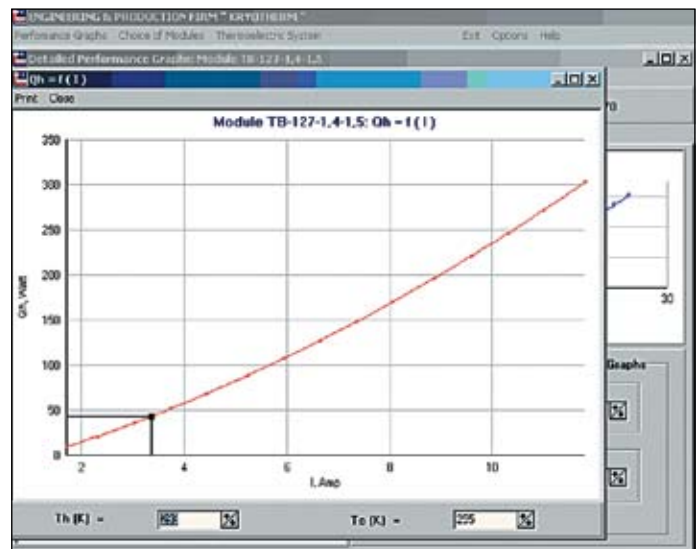


Рис. 21. Определение теплопроизводительности (рассеиваемой на горячей стороне мощности) по значению протекающего тока

Окончание. Начало в № 8`2010

Разработка термоэлектрических систем охлаждения и термостатирования с помощью компьютерной программы KRYOTHERM

Петр ШОСТАКОВСКИЙ
info@kryotherm.ru

В первой части статьи был дан краткий обзор возможностей программы для расчета термоэлектрических систем охлаждения и термостатирования (ТСОТ) на основе термоэлектрических модулей (ТЭМ), приведены применяемые в программе обозначения, подробно рассмотрен первый раздел программы «Графическое представление термоэлектрических характеристик ТЭМ» “Performance Graphs”. Здесь будут представлены оставшиеся два наиболее интересных с точки зрения разработчиков раздела программы KRYOTHERM, помогающие выбрать необходимые для создания системы модули и произвести расчет конкретного устройства с применением термоэлектрического охлаждения.

Выбор модуля по термоэлектрическим характеристикам (Choice of Modules)

Эта часть программы позволяет рассчитать, какие характеристики будет обеспечивать заданная система охлаждения. Главная цель состоит в определении температуры охлаждаемого объекта (температуры внутри камеры термоэлектрического холодильника).

Ввод исходных данных для выбора модулей

После запуска программы KRYOTHERM и выбора раздела Choice of Modules появляется окно, приведенное на рис. 22. В верхней строке размещены кнопки, позволяющие реализовывать дополнительные функции. Так, пользователю предоставляется возможность произвести установку исходных данных для решаемой задачи, выбрать вариант построения системы: способ отвода тепла от горячей стороны модуля (Hot side cooling), значения температур окружающей среды (T_a) и охлаждаемого объекта (Object) и др. Холодильная мощность (Q_c) может быть установлена произвольно или рассчитана в отдельном подразделе программы, переход в которую осуществляется нажатием кнопки Calculate Q_c (рис. 23). Следует иметь в виду, что при открытии данного раздела в него уже введены некоторые исходные параметры по умолчанию.

На начальном этапе проектирования термоэлектрической системы необходимо определить, в каких условиях она будет эксплуатироваться. К таковым условиям относятся температура окружающей среды и охлаждаемого объекта, а также необходимая холодопроизводительность системы.

Базируясь на информации, полученной в результате работы с первым разделом программы, к моменту начала расчетов разработчик может определить основные параметры элементов конструкции системы охлаждения. В программу необходимо ввести такие величины, как:

- температура среды и температура охлаждаемого объекта;
- мощность тепловыделения в объекте (Load Active-Wob);
- тепловое сопротивление или материал изоляции (Material Insulation);
- тип охлаждения (Natural — конвекционный, Forced — обдуваемый, Flow — жидкостный) по горячей и холодной сторонам и максимально допустимые значения теплового сопротивления для каждой из сторон.

Программа позволяет произвести подбор наиболее подходящих модулей для конкретной ТСОТ. Для этого необходимо выбрать критерии оптимизации (наибольшая эффективность — COP max или минимальная цена — COST min), ввести определенный набор входных данных: температуру окружающей среды (T_a), температуру охлаждаемого объекта (T_{ob}), холодопроизводительность

(Q_c), а также тепловое сопротивление на холодной стороне системы охлаждения (R_c).

Величина холодопроизводительности Q_c — это полная тепловая энергия, которая поглощается на холодной стороне термоэлектрических модулей. Если точное значение холодопроизводительности неизвестно, но известны параметры объекта и режим его работы, то можно воспользоваться соответствующими пунктом меню или кнопкой для расчета данной величины.

Величина R_c характеризует полное тепловое сопротивление между объектом и холодной стороной термоэлектрических модулей. В качестве первого приближения можно принять, что тепловое сопротивление на холодной стороне равняется нулю. Если определен способ передачи тепла от объекта к модулям, то следует ввести суммарную величину теплового сопротивления выбранных радиаторов.

Также разработчик может указать, каким способом будет охлаждаться горячая сторона системы (Hot side cooling). Теплопередача от горячей стороны термоэлектрических модулей может осуществляться путем естественной или вынужденной конвекции, а также при помощи потока жидкости и определяется требуемой величиной теплового сопротивления R_h . Проще всего использовать воздушное охлаждение, однако при таких условиях перепад температуры на радиаторе может оказаться значительным и эффективность работы модулей уменьшится. Для эффективной работы ТСОТ перепад температур

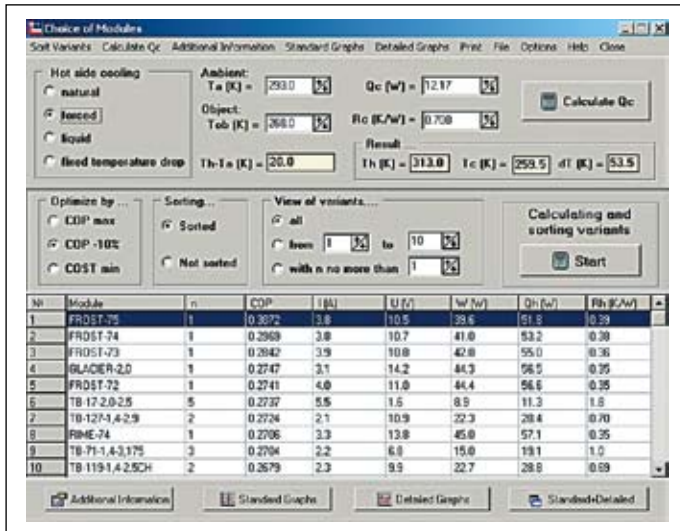


Рис. 22. Выбор исходных данных для расчета TCOT и список соответствующих решению модулей

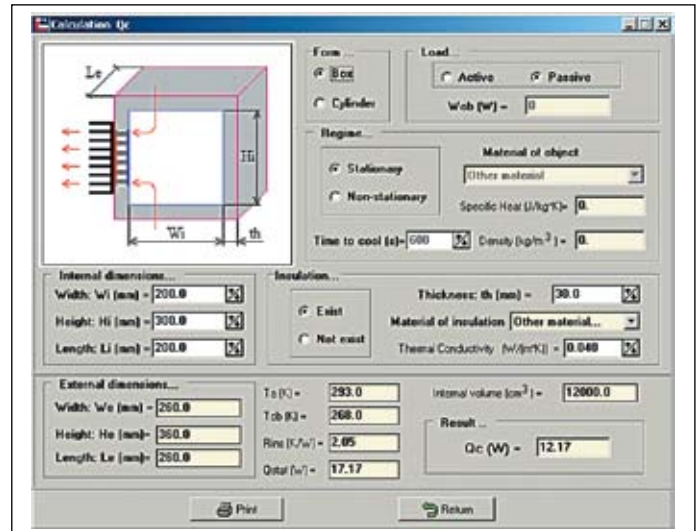


Рис. 23. Раздел программы, позволяющий выбрать форму термостата, параметры тепловой изоляции, осуществить расчет необходимой холодильной мощности

на радиаторе не должен превышать 10–15 К. В случае выбора потока жидкости (Flow) по любой из сторон необходимо также установить расход и температуру потока на входе. Дополнительные встроенные в программу алгоритмы могут быть использованы не только для вычислений термоэлектрических систем, но и как удобное средство для чисто тепловых расчетов параметров теплоизоляции.

На основе исходных данных будут рассчитаны температуры горячей T_h и холодной T_c сторон модуля. В окне Results выводятся расчетные значения температур TCOT.

Определение геометрии объекта

Для определения холодопроизводительности необходимо задать геометрию TCOT и ввести предполагаемые размеры.

Программа позволяет выбрать одну из форм (Form) — параллелепипед (Box) или цилиндр (Cylinder), наиболее соответствующую форме объекта. Затем необходимо ввести внутренние размеры объекта. Если это коробка, то это будут ширина W_i , высота H_i и длина L_i , если же цилиндр, то это будут высота H_i и диаметр D_i .

Тепловая нагрузка

Под нагрузкой W_{ob} понимается выделяющаяся в объекте тепловая энергия, которая должна быть отведена с помощью термоэлектрических модулей. Если в объекте тепловыделение отсутствует, следует выбрать пассивную нагрузку (Passive). В противном случае нужно выбрать активную нагрузку (Load active) и задать численное значение тепловой энергии, которая выделяется в охлаждаемом объекте.

Термоизоляция (Insulation)

Для того чтобы температура объекта была ниже, чем температура окружающей среды, необходимо применять тепловую изо-

ляцию объекта (Insulation exist). Программа выводит список материалов, которые обычно используют в качестве теплоизоляции. В случае необходимости применения иных материалов следует ввести значение коэффициента теплопроводности данного материала. Также необходимо ввести толщину изоляции (th).

Режим охлаждения (Regime)

Довольно часто возникает необходимость охлаждения объекта до определенной температуры за какое-то время, то есть речь идет о нестационарном режиме (Non-stationary). В этом случае необходимо указать время, за которое объект должен понизить свою температуру от T_a до T_{ob} , а также ввести характеристики материала объекта: его плотность и удельную теплоемкость. Для наиболее распространенных материалов в программе приведен список данных характеристик.

Результаты расчета холодопроизводительности, стационарный и нестационарный режимы

В результате расчета можно определить требуемую холодопроизводительность Q_c . На основе этого значения для системы охлаждения будут предложены подходящие термоэлектрические модули.

В стационарном режиме значение холодопроизводительности Q_c необходимо поддерживать постоянным во времени. В нестационарном режиме значение холодопроизводительности Q_c нужно поддерживать в течение заданного времени охлаждения. По истечении этого времени объект достигает температуры T_{ob} , и в дальнейшем требуется поддерживать меньшее значение холодопроизводительности: холодопроизводительность в стационарном режиме Q_{stat} . В нестационарном режиме значение Q_c стре-

мится к значению Q_{stat} , если время охлаждения стремится к бесконечности.

В качестве результатов расчета в данном разделе приводится величина теплового сопротивления между объектом и окружающей средой R_{ins} , а также внутренний объем камеры TCOT.

Оптимизация, сортировка и просмотр вариантов

В результате расчета программа выводит список всех термоэлектрических модулей, с помощью которых можно обеспечить заданные требования к системе охлаждения, и их оптимальные характеристики. Задача подбора варианта для термоэлектрической системы охлаждения решается при одном из трех условий: при максимальном холодильном коэффициенте (COP max), при холодильном коэффициенте на 10% ниже максимального (COP-10%) или при минимальной стоимости модулей (COST min).

Основной чертой режима максимального COP является повышенная экономичность работы, но при этом требуется достаточно большое количество модулей. В режиме минимальной стоимости задача может быть решена при использовании меньшего количества модулей, однако значения холодильного коэффициента оказываются заниженными (рис. 24). Из группы графиков зависимости COP от разности температур можно выделить три наиболее характерные области:

- область максимального холодильного коэффициента (1);
- область оптимального соотношения холодильного коэффициента и разности температур (2);
- область максимальной разности температур (3).

При любой выбранной оптимизации имеется возможность просмотреть варианты в том порядке, в котором они расположены

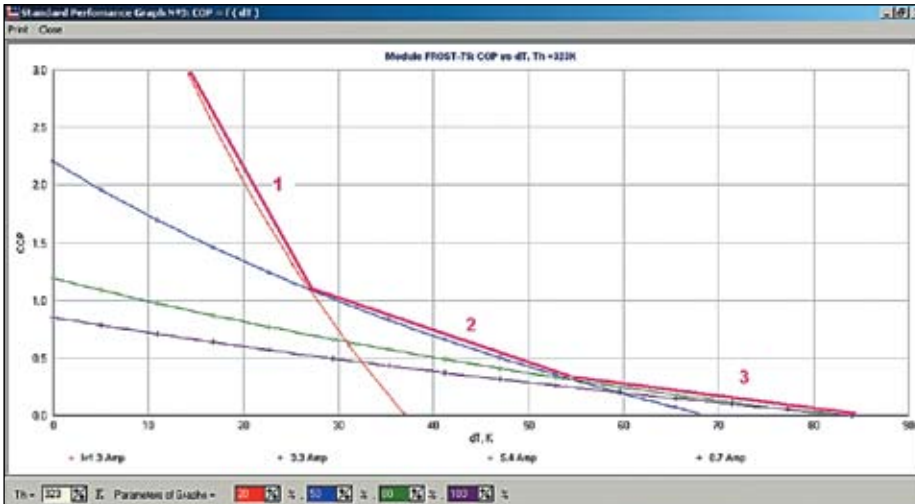


Рис. 24. Характерные области зависимости COP от разности температур для различных задач построения TCOT

в каталоге компании «КРИОТЕРМ» (Not sorted), либо отсортировать (Sorted) по оптимизируемому параметру (холодильному коэффициенту или стоимости модулей).

В зависимости от желания можно просмотреть первые 5, 10 или все варианты решения задачи охлаждения. Также предоставляется возможность вывести на экран и на печать произвольное количество вариантов. В этом случае необходимо задать начальную и конечную позиции списка решений. Использование несортированного списка позволяет просматривать отдельные группы модулей.

Варианты решения задачи охлаждения

Программа предлагает варианты применения всех термоэлектрических модулей компании «КРИОТЕРМ», которые могут соответствовать заданным условиям охлаждения (рис. 22).

Каждый модуль следует использовать в количестве n штук, причем для случаев опти-

мизации по холодильному коэффициенту и по минимальной стоимости модулей будут предложены различные значения n. В каждом варианте приводится значение холодильного коэффициента COP.

К каждому модулю необходимо прикладывать рабочее напряжение U (В), и через каждый модуль должен протекать рабочий ток I (А). W (Вт) — электрическая мощность, потребляемая модулем от источника питания.

Qh (Вт) — это тепловая энергия, выделяющаяся на горячей стороне термоэлектрического модуля. Для отвода этой энергии рекомендуется иметь на каждый модуль устройство теплообмена с тепловым сопротивлением ≤Rh (К/Вт).

Графики для выбора модулей

В разделе Choice of Modules программа KRYOTHERM предусматривает построение графиков, аналогичных тем, что использу-

ются в разделе Performance Graphs. Для каждого варианта могут быть построены стандартные и детальные графики.

Стандартные графики

Эти зависимости вычисляются исходя из параметров выбранного модуля. После перехода в этот раздел (рис. 25) пользователь получает графические зависимости Qc, U, COP от разности температур и вольт-амперную характеристику, при этом все графики строятся при фиксированном значении температуры горячей стороны Th. Стандартные графики № 1–3 строятся при одном, фиксированном значении тока I, а стандартный график № 4 строится при одном, фиксированном значении разности температур между горячей и холодной сторонами модуля.

При нажатии на вторую закладку выводятся дополнительные графики № 5–8 зависимости холодильной мощности Qc и холодильного коэффициента COP от прикладываемого к ТЭМ напряжения и протекающего через него тока (рис. 26).

Все характеристики, вне зависимости от того, сколько модулей предполагается использовать в TCOT, приведены для одного модуля.

Детальные графики

Эти графики представляют собой набор зависимостей характеристик выбранного модуля при двух фиксированных параметрах. Фиксированными параметрами являются Tc, Th, Qc, W. В соответствии с возможным выбором двух параметров детальные графики подразделяются на следующие типы:

- тип № 1 — Qc = const, Th = const;
- тип № 2 — Qc = const, Tc = const;
- тип № 3 — Tc = const, Th = const;
- тип № 4 — Tc = const, W = const;
- тип № 5 — Th = const, W = const.

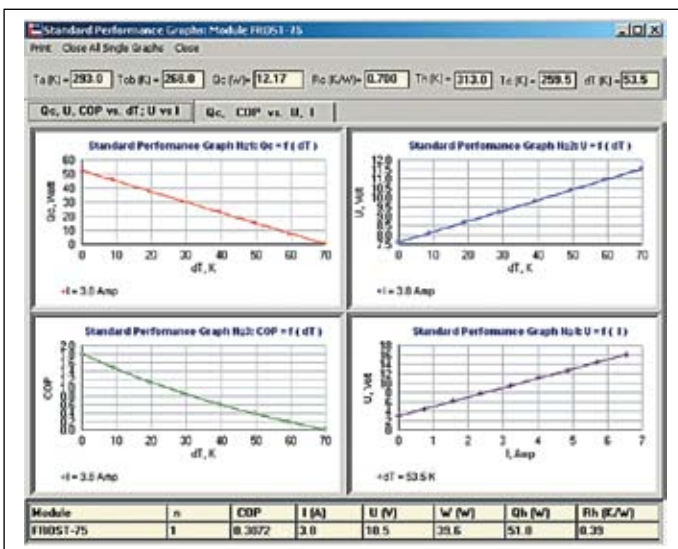


Рис. 25. Стандартные графики № 1–4 характеристик ТЭМ из раздела Choice of Modules

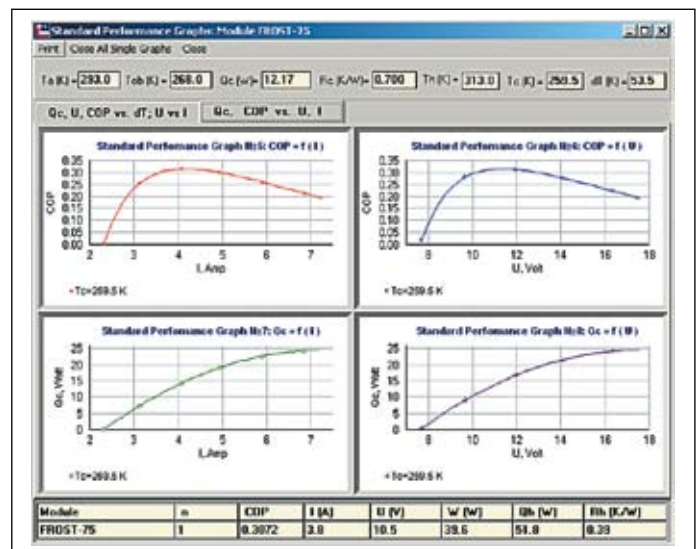


Рис. 26. Стандартные графики № 5–8 характеристик ТЭМ из раздела Choice of Modules

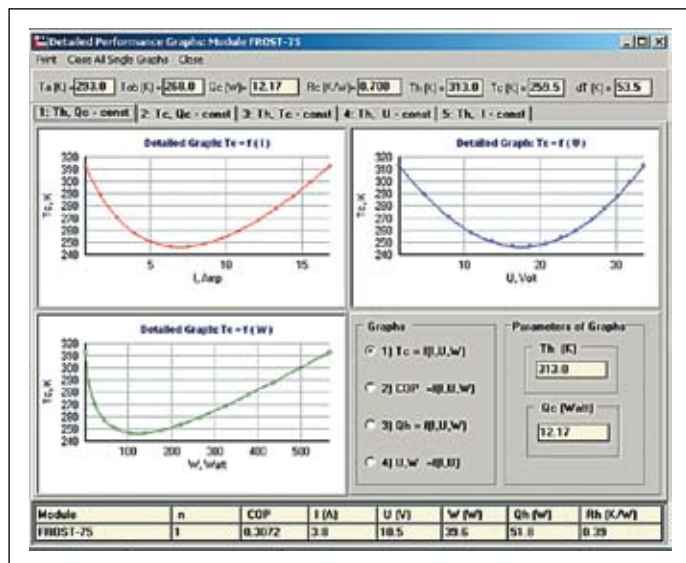


Рис. 27. Детальные графики, тип № 1 — Q_c и $T_h = \text{const}$ из раздела "Choice of Modules"



Рис. 28. Спецификация расчетных параметров TCOT

Выбор типа осуществляется в верхней части окна с детальными графиками. Значения параметров задаются в правом нижнем углу.

В каждом типе детальных графиков существует по четыре группы графиков, описывающих различные характеристики.

Как было уже отмечено в первой части статьи, крайне важно иметь в виду, что на некоторых графиках для большей наглядности зависимостей характеристик представлена информация в широком диапазоне, превышающем допустимый техническими условиями и спецификацией. Например, графики, иллюстрирующие изменение температуры холодной стороны от подводимого тока, напряжения и мощности на рис. 27, приведены для областей, где возрастающее джоулево тепло будет преобладать над эффектом Пельтье, и дальнейшее увеличение тока, напряжения и подводимой мощности не будет приводить к повышению разности температур (на графиках — справа от точки перегиба). Применение модулей в данных областях недопустимо. При окончательном выборе модуля следует проверить соответствие выбранных характеристик предельно допустимым условиям эксплуатации модуля. В остальном стандартные и детальные графики разделов «Графическое представление характеристик ТЭМ» и «Выбор модуля» программы аналогичны друг другу.

Дополнительная информация

Дополнительная информация вызывается двойным нажатием левой кнопки мыши или нажатием кнопки Additional Information. В окне содержатся сведения по каждому варианту применения термоэлектрических модулей компании «КРИОТЕРМ» (рис. 28).

На экран выводится спецификация с блоками информации об исходных данных, введенных пользователем, режимом работы выбранного модуля (или модулей), параметрами те-

пловых потоков на охлаждаемой и горячей сторонах с указанием значения допустимого теплового сопротивления на каждой из сторон.

Так, в блоке Initial Data of Task and Temperatures приводятся исходные параметры задачи: температуры окружающей среды T_a и охлаждаемого объекта T_{ob} , холодопроизводительность Q_c , тепловое сопротивление R_c , а также вид охлаждения, режимы сортировки и оптимизации вариантов. На основе исходных данных вычисляются температуры горячей T_h и холодной T_c сторон модуля, а также их разность.

В блоке Solution приводится название модуля и номер его позиции в списке решений и оптимальное количество модулей n .

В блоке Thermoelectric Module Parameters приводятся оптимальные параметры для одного и для n модулей: холодопроизводительность Q_c , потребляемая энергия, рабочий ток и рабочее напряжение, а также холодильный коэффициент COP.

В блоке Parameters for Heat Exchangers Design приводятся характеристики, необходимые для проектирования радиаторов. Выводятся значения теплового сопротивления на холодной стороне системы охлаждения в расчете на каждый и на все (n) модули. Дается рекомендация использовать на горячей стороне системы радиатор с определенной величиной теплового сопротивления. Приводится количество тепловой энергии, которую надо отвести (Heat Removal) с горячей стороны модулей, а также площадь модулей и плотность теплового потока (Heat Flux Density) на горячей поверхности. Выводится величина эффективного коэффициента теплоотдачи (Heat Emission Effective Coefficient). Эффективный коэффициент теплоотдачи численно равен величине коэффициента теплоотдачи, которую необходимо обеспечить, чтобы отвести тепловой поток с горячих поверхностей модулей.

Максимальные значения коэффициентов теплоотдачи могут быть приняты для естественной конвекции в воздухе примерно равными $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$, для вынужденной конвекции в воздухе — $100 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$, для вынужденной конвекции в воде — $3000 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$. Сопоставляя данные значения и величину эффективного коэффициента теплоотдачи, можно сделать вывод о возможности использования того или иного вида охлаждения. Необходимо учесть также тот факт, что площадь оребренной поверхности радиатора существенно больше площади основания радиатора и тем более больше площади рабочей поверхности модуля. Соответственно, реальная величина коэффициента теплоотдачи на оребренной поверхности может быть на порядок меньше расчетной величины эффективного коэффициента теплоотдачи.

Выбор радиатора для охлаждения горячей стороны следует делать исходя из двух характеристик — площади модулей и величины теплового сопротивления. Из каталогов поставщиков необходимо подобрать радиаторы с площадью, равной или несколько большей площади модулей, и из них выбрать те, которые имеют наименьшую величину теплового сопротивления.

Полученные результаты подбора модулей, а также соответствующие графики и варианты решений могут быть распечатаны.

Расчет термоэлектрической системы

Последовательность расчета термоэлектрической системы

Раздел программы Thermoelectric System Calculation предназначен для вычислений характеристик работы конкретной термоэлектрической системы охлаждения в стационарном режиме. Предполагается, что параметры конструкции системы уже заданы,

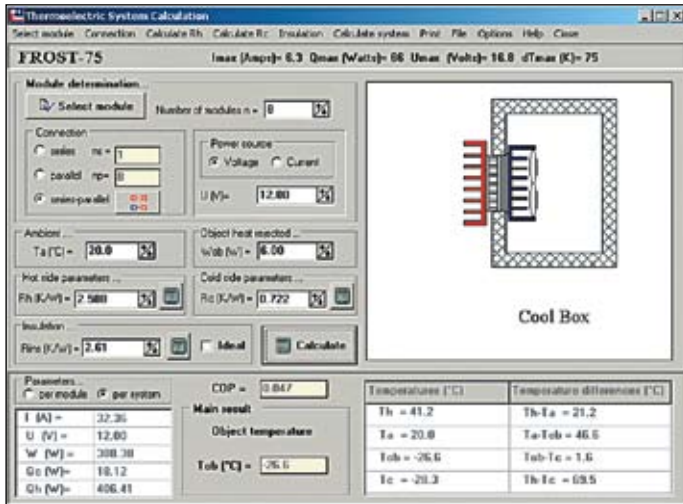


Рис. 29. Главное окно раздела «Расчет термоэлектрической системы»

и основная цель расчетов состоит в нахождении значения температуры охлаждаемого объекта, а также других значений температуры и энергетических характеристик системы (рис. 29).

Любую термоэлектрическую систему можно условно разделить на три части: модули, холодная сторона, горячая сторона (пример изображения представлен на рис. 28). Такое разделение позволяет независимо рассматривать характеристики каждого элемента системы охлаждения, что существенно упрощает расчет конструкции.

В начале расчета необходимо задать тип и количество используемых модулей (при нажатии клавиши Select Modules открывается каталог модулей). Для несложных термоэлектрических систем достаточно использовать 1–2 модуля. Если выбраны несколько модулей, то, в зависимости от их количества, можно ввести схему их соединения. Также следует задать ток или напряжение источника питания для всей системы охлаждения, исходя из параметров модулей, их числа и схемы соединения.

Термоэлектрический модуль в системе охлаждения работает как тепловой насос, перекачивающий тепло от объекта в окружающую среду. Термоэлектрический модуль не является поглотителем тепла, так как на его горячей поверхности выделяется энергия, которая должна быть отведена с помощью теплообменника.

Передача тепла от объекта к холодной поверхности модулей и от горячей поверхности модулей к среде осуществляется с помощью теплообменников. Они характеризуются определенными тепловыми сопротивлениями. Для определения характеристик модуля в термоэлектрической системе необходимо задать параметры холодной и горячей сторон. Следует определить тип охлаждения и тепловые сопротивления горячей и холодной сторон. В программу включены следующие типы охлаждения: естественная конвекция (Natural) — охлаждение при помощи радиатора, вынужденная конвекция (Forced) — охлаждение при помощи радиатора и вентилятора и поток (Flow) жидкости или газа. Выбор осуществляется в разделах Calculate Rh и Calculate Rc, в которых производится определение параметров холодной и горячей сторон.

Под параметрами сторон, прежде всего, понимаются тепловые сопротивления теплообменников. Тепловые сопротивления горячей и холодной сторон R_h и R_c рассчитываются на один модуль и складываются из промежуточных тепловых сопротивлений (R_{h2} и R_{c2}) и тепловых сопротивлений теплообменников на один модуль (R_{h1} и R_{c1}). Программа позволяет ввести или рассчитать промежуточное тепловое сопротивление (Intermediate heat resistance), при этом учитываются особенности крепления модулей (через теплопроводную пасту и теплопровод). Также имеется возможность ввести или рассчитать тепловое сопротивление теплообменника (радиатора). Исходя из заданного количества теплообменников и модулей, программа рассчитает тепловые сопротивления R_{h1} и R_{c1} (рис. 30).

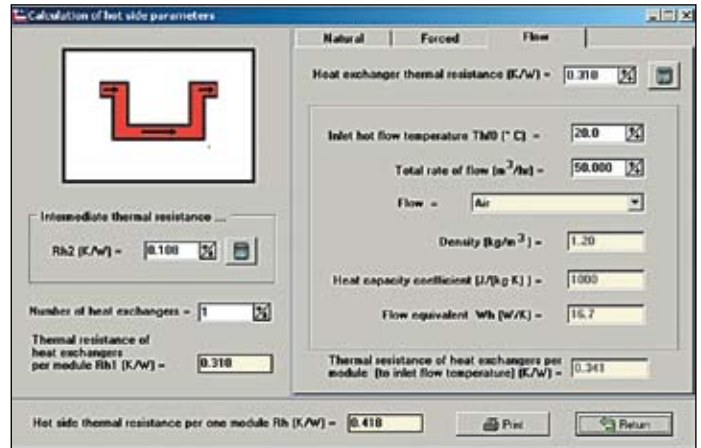


Рис. 30. Расчет параметров горячей стороны системы (закладка Calculate Rh)

Для случая потока (жидкости или газа) дополнительно должны быть введены расход и температура потока на входе, а также свойства потока (плотность и теплоемкость).

При задании потока по холодной стороне (закладка Calculate Rc) основной целью работы термоэлектрической системы является охлаждение потока от входной температуры T_{cf0} до определенной температуры на выходе T_{cf1} . Степень охлаждения определяется эквивалентом потока W_c (Вт/К). Он характеризует количество теплоты, которое необходимо отвести от потока, чтобы охладить его на один градус.

В программе предусмотрен специальный алгоритм, позволяющий вычислить значение коэффициента теплоотдачи.

Остается задать температуру среды и мощность тепловыделений в объекте, и можно начинать расчет и подбор характеристик термоэлектрической системы. Для этого необходимо нажать на кнопку Calculate system, после чего появятся подробные результаты расчета: температурное поле в термоэлектрической системе и энергетические характеристики, соответствующие выбранным условиям.

Если получен результат расчета, который не соответствует ожидаемому (например, недостаточно низкая температура объекта), то расчет всегда можно повторить с измененными исходными данными. Необходимо проанализировать результаты расчета и определить, какой из элементов конструкции термоэлектрической системы следует улучшить прежде всего. Например, если разность температур между горячей поверхностью модуля и средой $T_h - T_a$ больше 25 К, то тепловое сопротивление по горячей стороне слишком велико и необходимо внимательно отнестись к выбору теплообменника.

При необходимости произвести наиболее точные расчеты программа KRYOTHERM предоставляет возможность ввести параметры керамики в рамке Heat conductor раздела расчета промежуточного теплового сопротивления. Значения тепловой проводимости стандартной керамики (BK96), применяемой при производстве модулей, равно 25 Вт/м·К. В особых случаях применяется керамика, изготовленная из нитрида алюминия (AlN), имеющая теплопроводность 180 Вт/м·К.

Выбор модулей, схемы соединения и источника питания

Программа позволяет проводить расчеты систем охлаждения и термостатирования с использованием полупроводниковых термоэлектрических модулей. Программа KRYOTHERM дает возможность посмотреть, как поведет себя любой модуль в конкретной конструкции TCOT. Для выбора модуля необходимо нажать на кнопку Select Module и выбрать одну из закладок с типом модуля: микромодуль, стандартный, высокоэффективный или многокаскадный.

После того как выбран тип модуля, необходимо определить их количество. Для обычных термоэлектрических систем (например, автомобильные холодильники) достаточно использовать 1–2 модуля. Если планируется использовать модуль небольшой холодильной мощности или камера охлаждения имеет значительные размеры,

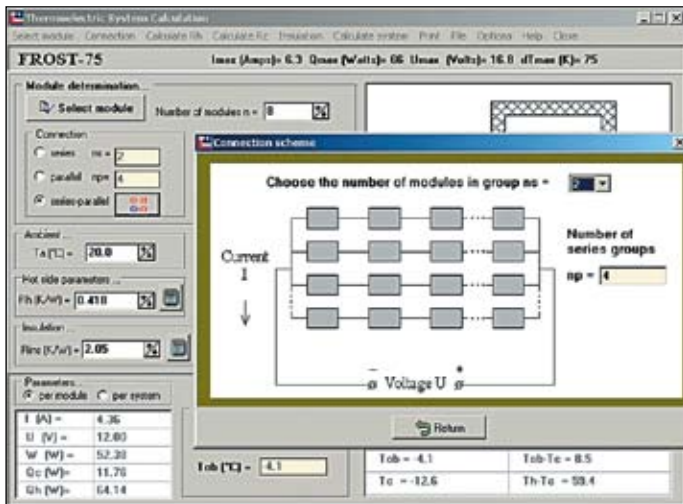


Рис. 31. Окно выбора схемы соединения ТЭМ

то целесообразно установить большее количество термоэлектрических модулей. Это позволяет повысить эффективность термоэлектрической системы охлаждения.

Если выбрано несколько модулей, то в зависимости от их количества они могут быть соединены различными способами: последовательно, параллельно или последовательно-параллельно (рис. 31).

Выбор схемы соединения не влияет на характеристики модулей, но он бывает необходим, когда разработчику необходимо ориентироваться на определенный источник питания. Предположим, что в системе необходимо использовать два термоэлектрических модуля ICE-71. К каждому такому модулю обычно подается напряжение питания 12 В. Если имеется источник питания напряжением 12 В, то модули соединяются параллельно, а при использовании источника на 24 В модули следует соединять последовательно. В случае, если разработчик не ограничен параметрами источника питания, предпочтительным является параллельное соединение модулей.

Расчет теплового сопротивления изоляции

Для эффективной работы термоэлектрической системы (камеры охлаждения) особенно важно применять высококачественные теплоизоляционные материалы. Охлаждаемый объект должен быть окружен слоем теплоизоляции достаточной величины.

Если выбрано естественное (Natural) или вынужденное (Forced) охлаждение по холодной стороне, то с помощью программы KRYOTHERM можно рассчитать, какое тепловое сопротивление будет иметь заданная теплоизоляция. Тепловое сопротивление изоляции означает, какая разница температур между объектом и средой будет достигнута при определенной холодильной мощности термоэлектрических модулей. В случае, когда на холодной стороне задан поток (Flow) жидкости или газа, также необходимо использовать надежную теплоизоляцию. Однако программа не учитывает натекание тепла через изоляцию для этого режима. Предполагается, что тепловое сопротивление изоляции достаточно велико.

Чтобы вычислить сопротивление изоляции (Insulation), прежде всего необходимо ввести размеры объекта (камеры охлаждения): длину L_i , ширину W_i , высоту H_i для объекта в форме коробки или диаметр D_i и высоту H_i для объекта цилиндрической формы (как в примере на рис. 32).

Затем следует выбрать из предлагаемого списка теплоизоляционный материал и ввести его толщину. Для бытовых холодильников с объемом от 10 до 40 л толщина изоляции 20–50 мм из пенополиуретана будет достаточной. Если в списке нужный теплоизоляционный материал отсутствует, можно самостоятельно ввести коэффициент его теплопроводности.

Теплопередача от среды к объекту осуществляется не только через слой изоляционного материала. Тепло передается путем естественной

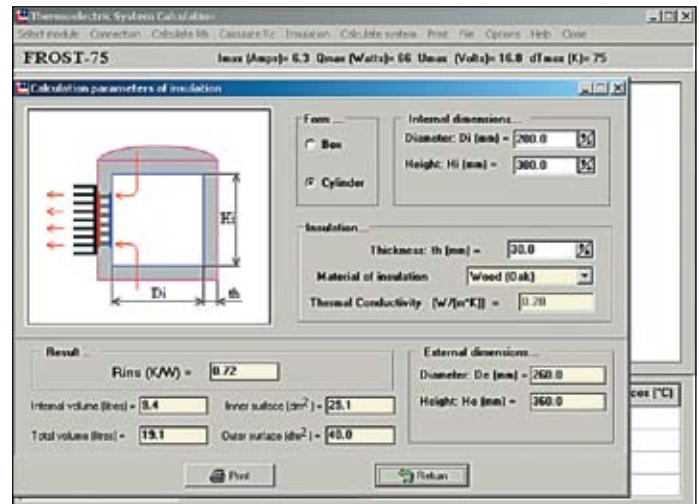


Рис. 32. Окно выбора параметров теплоизоляции

конвекции воздуха на внешнюю поверхность термоэлектрической системы. В опциях можно ввести соответствующий коэффициент теплоотдачи, и для обычных условий его можно принять равным 5–10 Вт/(м²·К).

На основе исходных данных программа рассчитает тепловое сопротивление изоляции, а также объем объекта (камеры охлаждения), суммарный объем и площадь внутренней и внешней поверхностей камеры.

Расчет промежуточного теплового сопротивления

В термоэлектрических системах крепление модулей к теплообменникам обычно осуществляется с применением специального вещества, служащего для уменьшения контактного термического сопротивления (термоинтерфейс). Чаще всего это теплопроводная контактная паста, имеющая коэффициент теплопроводности около 0,8 Вт/(м·К) (рис. 33).

Теплопроводную пасту равномерно наносят тонким слоем на поверхность модуля и теплообменника. Перед нанесением пасту желательно подогреть. В этом случае она заполняет все микронеровности контактирующих поверхностей. В термоинтерфейсе на слое пасты толщиной около 100 мкм перепад температур по горячей стороне может составить 2–4 К и более. Поэтому необходимо ответственно относиться к операции нанесения пасты и использовать ТЭМ и теплообменники, поверхность которых имеет

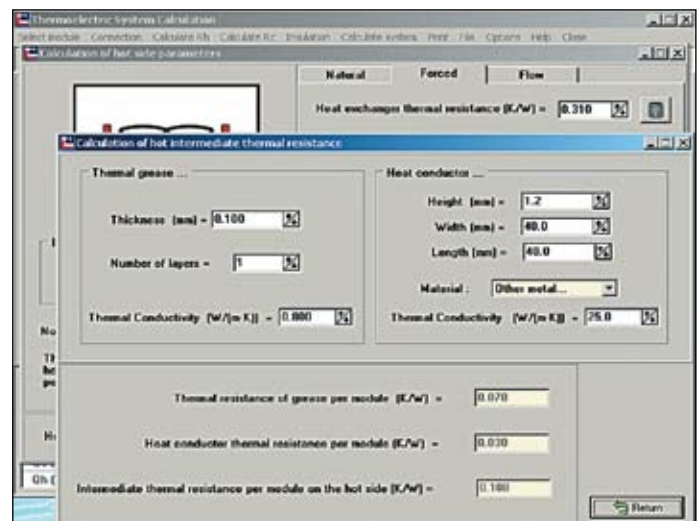


Рис. 33. Окно расчета параметров термоинтерфейса между радиатором и ТЭМ

наилучшее сочетание плоскостности и параллельности. В случае применения нескольких ТЭМ, устанавливаемых на общий радиатор, они должны быть отшлифованы в одну высоту (обычно это выполняет предприятие-изготовитель). Следует помнить, что прямой контакт горячей поверхности модуля с радиатором всегда эффективнее, чем тепловой контакт через теплопроводящую пасту. С подробными рекомендациями по установке модулей можно ознакомиться на сайте компании «КРИОТЕРМ».

Между теплообменником и модулем может располагаться теплопровод (Heat Conductor). Он изготавливается из алюминия или другого металла и обычно устанавливается между холодной стороной термоэлектрического модуля и холодным радиатором, высота теплопровода определяется толщиной теплоизоляции. По холодной стороне плотность теплового потока и перепады температуры меньше, чем по горячей стороне (рис. 1. КиТ. 2010. № 8).

Программа KRYOTHERM позволяет учесть наличие теплопровода (Heat Conductor) и теплопроводной пасты (Thermal Grease) в термоэлектрической системе и рассчитать тепловые сопротивления пасты и теплопровода, которые в сумме дают промежуточное тепловое сопротивление: Rh2 по горячей стороне и Rc2 по холодной стороне.

Расчет теплового сопротивления теплообменника

Для передачи тепла от горячей поверхности термоэлектрического модуля к среде и от объекта к холодной поверхности модуля используют теплообменники. Теплообменники обычно представляют собой пластинчатые радиаторы, изготавливаемые из алюминия или меди.

Тепловое сопротивление радиатора (рис. 34) зависит от его габаритов (длины L, ширины L2, высоты ребра h и толщины основания h2), от количества ребер, толщины ребра th, коэффициента теплопроводности материала и коэффициента конвективной теплоотдачи к поверхности радиатора.

Коэффициент теплоотдачи определяется типом теплопередачи (естественная или вынужденная конвекция) и средой (газ или жидкость). Программа KRYOTHERM позволяет рассчитать коэффициент теплоотдачи, когда теплопередача осуществляется вынужденной конвекцией или когда задан поток. Если теплопередача происходит путем естественной конвекции, то для воздуха коэффициент теплоотдачи следует задавать в диапазоне от 2 до 10 Вт/(м²·К), а для воды — в диапазоне 200–600 Вт/(м²·К).

На основе исходных данных программа рассчитает тепловое сопротивление оребренной поверхности теплообменника (пример приведен на рис. 34).

Кроме того, необходимо учесть передачу тепла от оребренной поверхности к термоэлектрическим модулям по основанию радиатора. Обычно площадь радиатора в несколько раз превышает площадь термоэлектрического модуля, поэтому по основанию радиатора существует заметная неравномерность температурного поля.

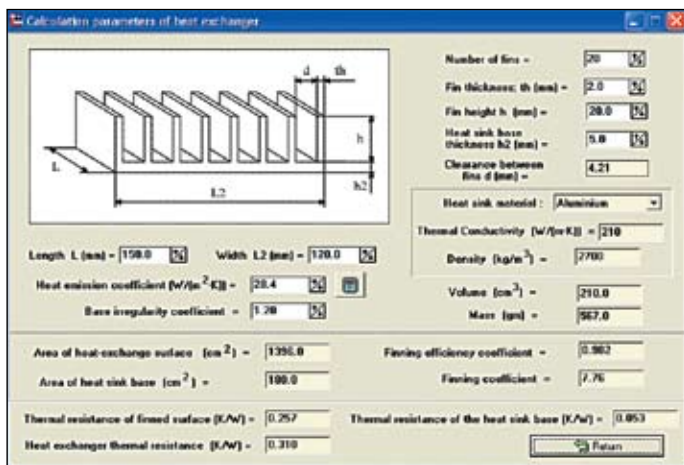


Рис. 34. Пример расчета параметров радиатора безотносительно к ТЭМ

Программа дает возможность ввести значение соответствующего коэффициента неравномерности. Данный коэффициент показывает, во сколько раз разность значений температуры среды и оребренной поверхности радиатора в центральной части (над местом крепления модуля) отличается от средней разности значений температуры среды и поверхности радиатора. Нахождение точного значения коэффициента неравномерности представляет собой сложную задачу, выходящую за рамки представленной программы. Однако в качестве первого приближения значение коэффициента можно задать равным 1,2. Его минимальное значение равно 1, а максимальное определяется отношением площадей радиатора и модуля.

Зная тепловое сопротивление оребренной поверхности радиатора, размеры основания и коэффициент неравномерности, можно определить тепловое сопротивление основания радиатора.

В сумме тепловые сопротивления основания и оребренной поверхности радиатора дают общее тепловое сопротивление радиатора по горячей или холодной стороне. Эта величина во многом будет определять эффективность работы термоэлектрической системы.

Следует отметить, что самостоятельные разделы третьей части программы могут быть использованы разработчиками для теплофизических расчетов безотносительно к термоэлектрическому охлаждению.

Расчет коэффициента теплоотдачи

Тепловое сопротивление теплообменника в значительной степени зависит от величины коэффициента теплоотдачи. С помощью программы KRYOTHERM (рис. 35) разработчик может рассчитать данное значение для случая теплопередачи путем вынужденной конвекции либо когда по любой из сторон задан поток.

Коэффициент теплоотдачи зависит от расхода и свойств жидкости или газа. Необходимо также определить место крепления нагнетателя. Нагнетателем может служить вентилятор (для воздуха и других газов) либо насос (для жидкостей). При креплении нагнетателя сверху теплообменника (On the top of the heat exchanger), например компактного осевого вентилятора, величина расхода делится на две части.

Скорость движения теплоносителя (Speed of flow) определяется расходом жидкости/газа и площадью поперечного сечения радиатора. Важную роль в процессе теплоотдачи играет определяющий размер (Characteristic dimension) — гидравлический диаметр, который вычисляется исходя из высоты ребер и зазора между ними. Одним из важных свойств теплоносителя является его вязкость (Kinematic viscosity).

Характер течения — ламинарный или турбулентный — определяется безразмерным числом Рейнольдса (Re), которое рассчитывается по следующей формуле:

$$Re = (\text{Speed of flow}) \times (\text{Characteristic dimension}) / (\text{Kinematic viscosity}).$$

При значениях числа Рейнольдса менее 2000 наблюдается ламинарный режим течения. При ламинарном режиме жидкость или газ дви-

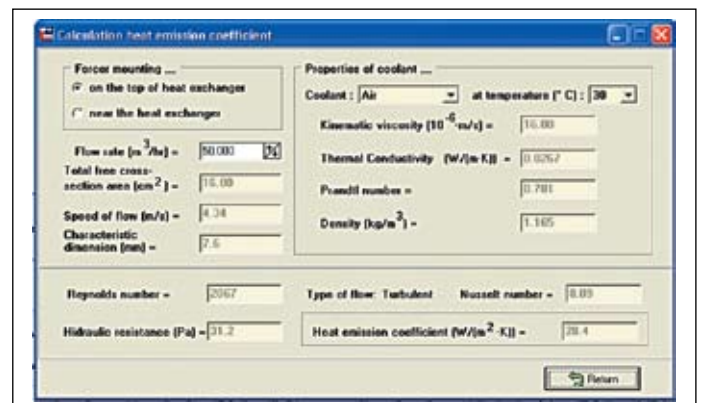


Рис. 35. Окно расчета параметров тепловой эмиссии

жуются слоями, без перемешивания. При повышении числа Рейнольдса (Reynolds number) начинается переходный, а затем и турбулентный режим течения. Они характеризуются интенсивным перемешиванием теплоносителя.

Интенсивность теплоотдачи определяется безразмерным числом Нуссельта, причем при турбулентном течении оно зависит от чисел Рейнольдса и Прандтля (Prandtl number), а при ламинарном определяется высотой ребра и зазором между ребрами.

Зная число Нуссельта (Nusselt number, Nu), можно рассчитать коэффициент теплоотдачи по следующей формуле:

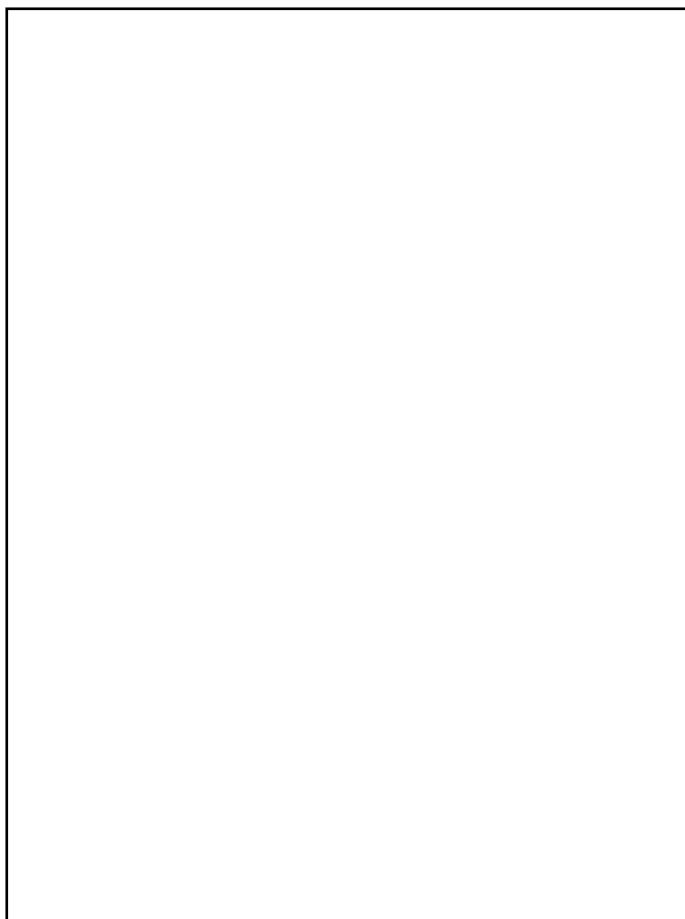
$$\text{Heat emission coefficient} = \text{Nu} \times (\text{Thermal conductivity}) / (\text{Characteristic dimension}).$$

Помимо коэффициента теплоотдачи, программа позволяет также оценить гидравлическое сопротивление (Hydraulic resistance) теплообменника. Знание этой величины необходимо для подбора вентилятора или насоса, который смог бы обеспечить заданный расход теплоносителя.

Окружающая среда и тепловыделение в объекте

Для того чтобы проводить вычисления любой термоэлектрической системы, необходимо задать значение температуры окружающей среды. В программе предустановлена температура среды (Ta) +20 °С, однако имеется возможность задавать другие значения, в том числе и отрицательные (рис. 29).

Часто разработчик сталкивается с необходимостью охлаждения объекта, внутри которого выделяется тепло. Это может быть объект любой природы — электронная схема, по которой течет ток, электрическая лампочка, биологический объект, сосуд, в котором происходит экзотермическая реакция, и т. д. Для того чтобы учесть данное свойство объекта, программа KRYOTHERM позволяет ввести значение выделяющейся тепловой мощности (Object heat rejected-Wob, Вт).



Если в системе охлаждения нет подобных объектов, то величину тепловыделения следует задавать равной нулю.

Программа учитывает выделение тепла только в том случае, когда по холодной стороне задано естественное или вынужденное охлаждение. При потоке программа не учитывает тепловыделение. Такие системы встречаются крайне редко.

Результаты вычислений термоэлектрической системы

Основной результат

Основной целью и результатом вычислений является определение температуры объекта Tobj в конкретной TCOT. При охлаждении потока основной целью вычислений является определение температуры Tcf1. Это температура потока на выходе из холодной стороны термоэлектрической системы.

Температурное поле

В качестве результатов расчета приводится распределение температурного поля в системе охлаждения (рис. 29 — Temperatures, Temperature differences). В обычной термо-электрической системе самая высокая температура — это температура горячей поверхности (горячих спаев) термоэлектрического модуля Th, самая низкая — температура холодной поверхности (холодных спаев) модуля Tc.

Разность температур $dT = Th - Tc$, развиваемая термоэлектрическим модулем, состоит из трех составляющих:

- перепада температур по горячей стороне $Th - Ta$;
- охлаждения объекта относительно среды $Ta - Tobj$;
- перепада температур по холодной стороне $Tobj - Tc$.

Однокаскадные модули разработки и производства компании «КРИОТЕРМ» позволяют достигать разности температур до 76 К, однако из-за наличия тепловой нагрузки Qc рабочая разность температур на сторонах модуля несколько меньше и обычно равна 50–60 К. В бытовых термоэлектрических устройствах охлаждение объекта относительно среды, как правило, составляет 20–30 К, перепад температур по горячей стороне — 15–25 К, перепад температур по холодной стороне — 10–15 К.

При задании потока по горячей или холодной стороне вычисляется температура потока на выходе Thf1 или Tcf1 при известном значении температуры потока на входе (Thf0 или Tcf0). Предполагается, что изменение температуры потока жидкости или газа носит экспоненциальный характер по отношению к длине радиатора. Программа позволяет найти среднее значение температуры потока Thfa и Tcfa по его длине.

Энергетические характеристики

Помимо распределения температур, программа позволяет вычислить характеристики работы модулей в TCOT. Этими характеристиками являются: ток через модуль I (А), напряжение на модуле U (В), электрическая мощность, потребляемая модулем, $W = I \times U$ (Вт), холодопроизводительность Qc (Вт) и тепловая мощность, выделяющаяся на горячей поверхности модуля $Qh = Qc + W$ (Вт).

При желании данные характеристики можно посмотреть как для одного модуля (per module), так и для всей термоэлектрической системы охлаждения (per system).

Как было уже отмечено ранее, одним из наиболее важных показателей работы термоэлектрической системы является холодильный коэффициент COP. Он характеризует экономичность работы термоэлектрической системы и численно равен мощности охлаждения (Вт) при потреблении энергии 1 Вт:

$$\text{COP} = Qc/W.$$

Заключение

Программа размещена для свободного копирования на сайте компании, по мере появления новых модулей в нее вносятся соответствующие дополнения. ■