

1. Современное состояние в области разработки и исследования термоэлектрических преобразователей энергии и устройств на их основе

1.1. Краткий обзор развития термоэлектрической техники

Термоэлектрические явления были обнаружены и исследованы более ста лет назад Зеебеком, Пельтье и Томсоном. Практическое использование полупроводниковых термоэлектрических охлаждающих и нагревающих устройств в промышленности берет свое начало с разработки академиком А.Ф. Иоффе теории энергетических применений полупроводниковых термоэлементов в начале 50-х годов нашего столетия. Дальнейшее развитие теории энергетического применения термоэлектричества получила в трудах Л.С. Стилбанса, Е.К. Иорданишвили, В.С. Мартыновского, В.А. Наера, А.И. Бурштейна, Н.С. Лидоренко, Л.И. Анатычука, Н.В. Коломойца, Е.С. Курылева, Е.А. Коленко, М.А. Каганова, Ю.Н. Цветкова, М.Р. Привина, А.Л.Вайнера, а также в работах зарубежных ученых Г. Голдсмита, Т. Хармана, П. Грея и др. [3, 5, 14, 23, 31].

К настоящему времени по термоэлектричеству накоплен большой теоретический и экспериментальный материал, разработано и внедрено огромное количество разнообразных аппаратов, устройств и приборов, основанных на эффекте Пельтье. По ряду направлений сведения систематизированы и опубликованы в монографиях [11, 15, 23].

Проанализированы режимы работы термоэлектрических устройств (ТЭУ): с минимальной температурой холодных спаев, максимальной холодопроизводительностью, максимальной энергетической эффективностью, минимальным током, при ограничении числа термоэлементов и другие.

Ряд исследований посвящен изучению характеристик термобатарей при работе в условиях тепло- и массообмена, при использовании их в качестве

интенсификатора теплопередачи и теплоизоляторов. Исследованы вопросы влияния на работу и показатели термоэлектрических устройств пульсаций тока, контактных электрических и тепловых сопротивлений. Широкие исследования проведены в области влияния теплообмена на энергетические и другие показатели охладителей и нагревателей, интенсификации теплоотдачи. Много работ посвящено оптимизации параметров термоэлектрических устройств, повышению эффективности их использования, рациональному выбору полупроводниковых материалов [6, 7, 30]. Большой цикл исследований проведен по изучению динамических характеристик и переходных процессов в термоэлектрических устройствах в нестационарных режимах работы термоэлементов.

Перспективы развития, рациональные области применения, новые направления в использовании термоэлектричества нашли в работах [2, 26, 27]. Широкое практическое применение и серийное производство ТЭУ и термобатарей-модулей описано в источниках [1, 15, 23, 29].

1.2. Классификация термоэлектрических устройств и основные режимы их работы

Тип термоэлектрического устройства и режим его работы определяются комбинацией трех факторов: направлением потока теплоты, направлением потока электрической энергии и температурным уровнем объекта теплового воздействия относительно температуры среды.

Вектор потока теплоты в ТЭУ может либо совпадать с вектором потока теплоты процесса естественной теплопередачи, т.е. быть направленным от больших температур к меньшим, либо направлен навстречу вектору естественной теплопередачи, т.е. от меньших температур к большим.

Вектор потока электроэнергии может быть направлен либо к ТЭБ, что соответствует подключению ее к внешнему источнику питания, либо от

термоэлектрической батареи, которая в этом случае является электрическим генератором.

Термобатарея, разделяющая две среды с различными температурами будет находится в потоке теплоты естественного направления, если электрическая цепь разомкнута. Наличие перепада температур обуславливает появление разности потенциалов на клеммах ТЭБ. ТЭБ в этом случае является ТЭГ. При замыкании ТЭБ в ней возникает ток, который в свою очередь, порождает эффект Пельтье, т.е. поглощение тепла на спаях с низкой температурой и выделение тепла на спаях с высокой температурой.

Поглощение тепла обусловлено переносом электрическим током зарядов из вещества, где они имеют низкую энергию, в вещество с более высокой энергией зарядов. Перешедшие заряды повышают свою энергию за счет энергии кристаллической решетки вещества, вызывая поглощение тепла. В противоположном спая заряды с высокой энергией передают избыток энергии кристаллической решетке вещества, в которую они перешли, а это в свою очередь вызывает выделение теплоты. Таким образом, тепловой поток увеличивается между теплообменивающимися средами и термобатарей. В самом материале термобатареи перенос тепла осуществляется кондуктивной теплопроводностью и электронами проводимости.

С помощью внешнего источника э.д.с. можно изменить ток в ТЭБ и повлиять на тепловой поток. При этом внешний источник э.д.с. может вызвать в цепи ток, направленный противоположно току Зеебека или совпадающий с ним. Комбинации направлений потоков тепловой и электрической энергии, реализуемых в устройстве, и определяют возможные типы ТЭУ. Направления тепловых потоков ориентированы вниз или иную сторону между объектом теплового воздействия и окружающей средой, причем расположение объекта теплового воздействия на схеме выше линии температуры среды означает, что он имеет большую температуру, и наоборот, расположение объекта ниже этой линии означает, что температура

объекта ниже температуры среды. Таким образом, направление вектора потока теплоты сверху вниз совпадает с направлением естественного процесса теплопередачи.

Размещение ТЭБ в потоке теплоты естественного направления (сверху вниз) определяет ее функционирование либо в режиме генератора с отводом электроэнергии потребителю, либо в режиме интенсификатора теплопередачи при подводе электроэнергии к ТЭБ от внешнего источника.

Изменение направления вектора потока теплоты в устройстве на противоположное направлению естественной теплопередачи, вследствие подвода электроэнергии необходимой полярности, определяет его функционирование либо в режиме теплового насоса с нагреванием объекта до температуры большей, чем температура среды, либо в режиме холодильной машины с охлаждением объекта до температуры меньшей, чем температура среды.

При всем разнообразии конструкций общим признаком всех ТЭУ является наличие в них ТЭБ, состоящей из ряда последовательно соединенных ТЭ. Конструктивно такие ТЭ выполняются из двух полупроводниковых ветвей, одна из которых обладает электронной, а другая - дырочной проводимостью, соединенных между собой посредством металлических (обычно медных) коммутационных пластин (рис.1.1) [11].

При подводе теплоты к одним коммутационным пластинам и отвода теплоты от других, возникает разность температур, которая обуславливает появление термо-э.д.с. Так работает ТЭГ. В случае эксплуатации ТЭБ в режиме охлаждения (нагрева) через нее пропускается постоянный электрический ток.

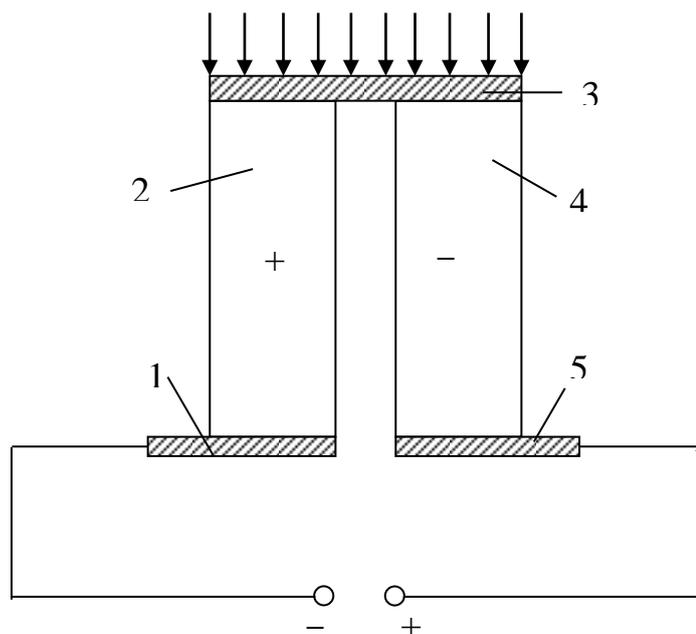


Рис.1.1. Схема полупроводникового ТЭ (1, 5 – горячие спаи, 2, 4 – ветви ТЭ, 3 – холодный спай)

В настоящее время ТЭБ рассчитывают и проектируют в зависимости от назначения и предполагаемых условий работы. При этом исходят из того, что одна или несколько основных характеристик устройства должны иметь экстремальные или приемлемые значения. В свою очередь, режимы работы ТЭБ определяются величиной (и направлением) обтекающего ТЭ тока. Эта особенность позволяет оптимизировать термоохладители в зависимости от предъявляемых требований и определяет чрезвычайную гибкость конструкции приборов термоэлектрического охлаждения.

Ввиду встречающегося на практике разнообразия рабочих условий число возможных режимов работы достаточно велико. Краткие характеристики некоторых из них приведены ниже [30].

Режим максимальной энергетической эффективности характеризуется наименьшими затратами мощности для выработки заданного количества холода и представляет наибольший практический интерес при

проектировании устройств средней и большой холодопроизводительности, поскольку параметры современных ТЭ еще не обеспечивают столь высокий холодильный коэффициент, чтобы им можно было поступиться в пользу экономии материала. Режим максимальной энергетической эффективности является универсальным в том смысле, что его реализация благоприятствует оптимизации различных характеристик охлаждающих ТЭУ.

Режим максимальной холодопроизводительности может применяться лишь тогда, когда для ускорения процесса охлаждения или достижения более низкой температуры можно допустить повышенный расход электроэнергии. Это же относится к различного рода малогабаритным охладителям и термостатам, где требования экономичности отступают на второй план. В этом режиме максимум холодопроизводительности (при фиксированной температуре холодного спая) не зависит от разности температур на сторонах ТЭБ. Рабочий ток режима максимальной холодопроизводительности имеет наибольшую величину, поскольку его дальнейшее увеличение приводит к снижению холодопроизводительности и темпа охлаждения. Режим максимальной холодопроизводительности можно реализовать, хотя и не всегда в полной мере, в любом устройстве, а также легко зафиксировать по минимальной температуре.

Режим минимального тока является промежуточным относительно режимов максимальной холодопроизводительности и максимального холодильного коэффициента. Этот режим определяет наименьший ток при обеспечении заданных разности температур и холодопроизводительности. Расчетные соотношения этого режима предполагают высоту ТЭ не менее 5 мм, при которых характеристики реального ТЭ близки к идеальным.

Режим тепловой изоляции (тепловой ключ) применяется в качестве промежуточного при регулировании температурных условий ТЭБ. В этом режиме полезная холодопроизводительность отсутствует, а величина тока достаточна лишь для компенсации внешних теплопритоков к объекту охлаждения.

Принудительный режим охлаждения имеет место, когда температура объекта, от которого отводится тепло, выше температуры горячих спаев ТЭБ. В этом режиме ТЭБ работает как термогенератор. Поэтому и при отсутствии напряжения на внешнем источнике питания ток в ее цепи будет отличен от нуля. В этом случае имеет место значительная интенсификация теплообмена охлаждаемого объекта с охлаждаемой средой.

Режим минимальной температуры соответствует отсутствию тепловой нагрузки на холодные спаи ТЭБ (например, вакуум) и рабочему току режима максимальной холодопроизводительности (при $\Delta T = \Delta T_{\max}$ режимы максимальной энергетической эффективности и максимальной холодопроизводительности совпадают и их токи становятся равными). Максимальное снижение температуры, достигаемое в режиме минимальной температуры, определяется параметрами ТЭ при оптимальном соотношении сечения их ветвей. Особое значение этот режим имеет для глубокого охлаждения, в том числе при употреблении каскада, поскольку любая однокаскадная ТЭБ обладает определенным пределом снижения температур.

Исследование зоны, лежащей в промежутке от режима максимального холодильного коэффициента до режима максимальной холодопроизводительности показывает, что работа охлаждающих ТЭУ в экстремальных режимах не всегда может считаться оправданной. Применение этих режимов должно ограничиваться случаями, когда по условию задачи требуется обязательное выделение только одного параметра, а для остальных допускаются практически любые значения. Следует также помнить, что при создании ТЭБ для работы их в режиме максимального значения одной из величин (холодильного коэффициента, холодопроизводительности) приходится чрезмерно увеличивать либо их размеры и, следовательно, расход полупроводникового вещества, либо величину потребляемой ими мощности.

Часто, когда приходится находить компромисс между экономичностью и другими параметрами термоохладителей, выбор оптимального варианта

решения вызывает значительные затруднения. В таких случаях удовлетворительное решение задачи достигается иногда применением одного из промежуточных режимов.

Режим $\varepsilon = -10$ отличается, например, от режима ε_{\max} снижением холодильного коэффициента не более, чем на 10 % [3]. Вместе с тем в наиболее употребительном диапазоне перепадов температур (от $\Delta T = 0,3 \Delta T_{\max}$ до $\Delta T = 0,7 \Delta T_{\max}$) количество ТЭ, а следовательно, вес и габариты ТЭБ могут быть уменьшены при этом режиме примерно на 30 % за счет увеличения на такую же величину холодопроизводительности каждого ТЭ.

Выбор этого режима не аргументируется какими-либо математическими критериями, однако для его обоснования может быть привлечен учет целого ряда существенных факторов: стоимость полупроводникового вещества и габаритные характеристики, трудоемкость изготовления ТЭБ и т. д.

1.2. Методы исследования термоэлектрических преобразователей энергии и устройств на их основе

В настоящее время для моделирования, расчета и исследования ТЭУ различных типов применяется большое разнообразие методов, опирающихся на аналитические, номографические, графоаналитические, а также численные способы анализа.

Одним из эффективных методов расчета ТЭУ является метод последовательных приближений. Он предполагает, во-первых, проведение термоэлектрического расчета ТЭБ с определением размеров и числа ТЭ, ее площади, силы тока и напряжения питания при заданной холодопроизводительности. Термоэлектрическому предшествует конструктивная проработка ТЭБ. Во-вторых, выполняется теплотехнический расчет, которому также предшествует конструктивная проработка, а именно, - выбор характеристик теплообменных поверхностей и их характеристик. Затем определяются перепады температур между теплоносителями и спаями

ТЭ, в результате чего уточняется значение температур последних. При несовпадении полученных значений температуры с принятыми в термоэлектрическом расчете вводится поправка, и вычисления проводятся далее для уточненных температур спаев. Этот метод является весьма трудоемким для инженерного расчета, так как требует многократного повторения приближений.

Исключить последовательные приближения при расчете ТЭБ позволяют зависимости, полученные в [2]. Здесь в расчетных выражениях исключены температуры спаев, что достигнуто, однако, в ущерб простоте соотношений, которые представлены сложными непараболическими функциями тока питания. Это затрудняет их аналитическое исследование на экстремальные режимы работы ТЭБ.

Сложность аналитического исследования точных соотношений, описывающих режимы работы ТЭБ как функции температур сред, затрудняет их практическое применение. Получены зависимости для нагрузочных характеристик батарей в квадратичной функции тока питания. Здесь принят ряд упрощающих допущений, снижающих точность полученных выражений.

При другом подходе к расчету термоэлектрических преобразователей учитывается изменение температур на теплопоглощающих и тепловыделяющих поверхностях. При этом ТЭБ представляется как совокупность ТЭ, работающих в разных температурных условиях. Расчетные зависимости для этого случая получены в работе [9] при пренебрежении термическими сопротивлениями.

Получены соотношения для оптимальных по энергетической эффективности параметров ТЭ при различных режимах работы. Разработан алгоритм для расчета на ЭВМ оптимальных параметров ТЭБ. Предложенная программа может быть использована для расчета ТЭБ при различных заданных геометрических ограничениях.

В [27] описан подход к расчету термоэлектрических охладителей, основанный на возможности повышения эффективности работы ТЭБ за счет оптимизации работы каждого отдельного ее элемента. Оптимизация достигается за счет подбора для каждого ТЭ такой плотности питающего тока, которая соответствовала бы экстремальному режиму. Для достижения этого при сохранении последовательной электрической коммутации, ТЭБ должна быть собрана из ТЭ различной площади токового сечения. Обоснованными режимами работы таких устройств являются только экстремальные режимы, для обеспечения которых при конкретных условиях рассчитывается сила питающего тока и геометрия элементов.

Зависимости для холодопроизводительности, потребляемой мощности и холодильного коэффициента подобных ТЭБ получены при допущении бесконечно больших коэффициентов теплообмена и постоянства температуры теплоотводящей среды. В работе [4] при аналогичных допущениях получены зависимости для теплопроизводительности ТЭБ.

Основные направления исследований динамических режимов работы охлаждающих термоэлектрических приборов могут быть охарактеризованы следующим образом:

1. Расчет изменения температуры в устройстве при включении и ступенчатом скачке значения тока питания.
2. Определение закона изменения тока питания, обеспечивающего заданный или экстремальный ход температуры в устройстве.
3. Расчет изменения температуры в устройстве вследствие воздействия возмущающих факторов.

К настоящему времени наиболее полно исследованы нестационарные режимы в ТЭУ, состоящих из ТЭ, которые работают в одинаковых температурных условиях. Для данных устройств исследование работы ТЭБ можно проводить на примере одного ТЭ [5].

При построении моделей устройства выделяются два подхода. В первом случае математическая модель в виде уравнения теплопроводности учитывает распределение температуры по высоте ТЭ. Уравнение теплопроводности решается совместно с граничными условиями, математическая запись которых соответствует реальным тепловым процессам на спаях с большей или меньшей степенью точности.

Получены выражения для изменения температуры в присоединенной к холодному спаяю массе с бесконечной теплопроводностью после включения тока для условия стабилизированной температуры горячего спая.

Связь в общем виде между температурой адиабатно изолированного холодного спая и формой питающего тока получена в работе [5] в виде интегрального уравнения для модели ТЭ с полубесконечными ветвями.

Тепловая нагрузка также не учитывалась при решении уравнения теплопроводности для ТЭ в работе [3], а в работе [29] учтена только теплоемкость коммутационной пластины и присоединенной к ней массы.

Решение задачи с граничными условиями, учитывающими тепловую нагрузку и конвективный теплообмен на охлаждающей стороне, получено для температурного поля в ТЭ после включения тока, как при условии стабилизированной температуры тепловыделяющего спая, так и при условии конвективного теплообмена при нем.

Большое внимание в последнее время в практике проектирования ТЭУ уделяется поискам путей замены разветвленных и весьма громоздких расчетных многослойных моделей приближенными математическими описаниями, в которых влияние коммутационных пластин и теплообменников учитывается с помощью введения в граничные условия задачи соответствующих величин тепловых емкостей. В [23] рассматривается задача определения зависимости питающего тока от времени, обеспечивающего оптимальный ход температуры в охлаждаемом объекте и показано, что реальное поведение температуры холодного спая ТЭУ при его квазистационарном регулировании током питания и введении в граничные

условия соответствующих величин емкостей, описывается конечной формулой.

Зависимость температуры холодного спая от постоянного напряжения питания после включения ТЭ получена с учетом присоединенной массы бесконечной теплопроводности, тепловой нагрузки и конвективного теплообмена на охлаждающей стороне для условия стабилизированной температуры горячего спая.

Расчет температурного поля в ТЭ можно проводить также на основании принципа сложной суперпозиции, «конструируя» определенным образом решения поставленной задачи из решений известных задач. Разработан алгоритм численного решения данного метода задачи на включение тока в ТЭ.

Безинерционностью эффекта поглощения и выделение тепла Пельтье на спаях ТЭ объясняется возможность достижения при нестационарном процессе более глубокого охлаждения холодного спая, чем максимальное охлаждение в стационарном режиме. Эти нестационарные процессы широко исследованы экспериментально и теоретически. Результаты исследований систематизированы в [11], где дана единая методика расчета и описаны области практического применения данного явления. Задача снижения инерционности термоэлектрического охлаждения может быть решена также применением в ТЭ ветвей переменного сечения.

Теория нестационарной работы ТЭ (кроме «сверхглубокого» охлаждения) при включении тока питания подробно изложена в работе [3] с приведением анализа полученных выражений.

Отметим, что во всех работах, посвященных решению уравнения теплопроводности ТЭ, за математическую модель ветви принята однослойная пластина, так как теплопроводность присоединенных ТЭ принята бесконечной, что позволяет не учитывать изменение температуры по их толщине.

Другим, более простым подходом в определении математической модели ТЭ является рассмотрение уравнений теплового баланса на спаях. При этом холодо- и теплопроизводительность ТЭУ определяется по зависимостям для стационарного режима, т.е. распределение температуры по высоте ТЭ принято независимым от времени.

На основании указанной модели получены зависимости для определения времени охлаждения массы, обладающей бесконечной теплопроводностью, после включения тока питания, как в предположении абсолютных тепловых контактов, так и при учете термических сопротивлений теплоотдаче по охлаждающей и нагревающим сторонам. В работе [24] время охлаждения и нагрева также изотермичного по толщине тела и потребляемая при этом мощность получены, как функции напряжения питания. Там же приведены упрощенные зависимости для инженерного расчета процесса.

Приведен метод расчета нестационарных процессов в ТЭБ, основанный на допущениях квазиостационарности режима и линейной зависимости холодо- и теплопроизводительности ТЭБ от разности температур нагреваемого и охлаждаемого объектов.

Проводится анализ, какими достоинствами могут обладать нестационарные и комбинированные режимы работы охлаждающих ТЭУ для достижения более глубокого охлаждения. Изучению подобных вопросов также посвящена работа [30]. Однако во многих случаях в этих работах формулы для расчета температуры получены в виде бесконечных рядов, которыми неудобно пользоваться для коротких импульсов рабочего тока, обеспечивающих заметное дополнительное охлаждение реальных систем. Указанный недостаток можно обойти методом асимптотических оценок, позволяющим определять температурное поле нестационарного охлаждающего ТЭУ с учетом теплоемкости контактных слоев и объекта охлаждения, тепловыделения этим объектом, контактного электрического сопротивления, теплообмена с окружающей средой при малых временах воздействия.

Получены передаточные функции для ТЭ, горячие спаи которого теплостабилизированы, при возмущении по напряжению питания. Передаточные функции получены как для случая «ненагруженного» холодного спая, так и при условии конвективного теплообмена на нем.

При применении ТЭБ для решения некоторых специальных теплотехнических задач, также используются нестационарные режимы их работы. Например, возможно использование ТЭБ в качестве теплопередающей стенки между двумя средами с различными температурами для варьирования тепловых потоков. При этом регулирование мощности теплового потока может осуществляться в широких пределах, включая режимы тепловой изоляции теплового насоса. Возможность программного изменения температуры тела с помощью ТЭ исследована в работе [3] при условии стабилизации температуры холодного спая и с учетом влияния конвективной теплоотдачи на охлаждаемом теле. Приведены зависимости для хода тока питания, при которых обеспечивается воспроизведение заданных температурных функций.

При расчете ТЭБ проточного типа заданным на входе являются температуры хладо- и теплоносителя, которые отличаются от температур спаев на величину, определяемую условиями теплообмена. Приведены результаты экспериментальной, а также аналитической оценки влияния интенсивности теплоотдачи на режим работы ТЭМ, из которых следует, что интенсифицировать теплообмен на спаях целесообразно вплоть до достижения значений чисел Био 15...20.

При использовании в расчете проточных ТЭБ зависимостей, выражающих энергетические показатели ТЭМ через температуры спаев, термоэлектрический и тепловой расчеты следует проводить поочередно методом последовательных приближений, который в общем случае включает и аэродинамический расчет.

Метод последовательных приближений предполагает, проведение термоэлектрического расчета батареи с целью определения размеров и числа

ТЭМ, площади батареи, силы тока и напряжения питания при заданной холодопроизводительности. Конструктивная проработка ТЭБ должна предшествовать термоэлектрическому расчету. Во-вторых, выполняется теплотехнический расчет, которому также предшествует конструктивная проработка, а именно выбор характеристик теплообменных поверхностей. Затем определяются перепады температур между теплоносителями и спаями, в результате чего уточняется значение температур спаев. При несовпадении этих температур с принятыми в термоэлектрическом расчете значениями вводится поправка, и расчет повторяется для уточненных температур спаев. Этот метод является весьма трудоемким для инженерного расчета, так как требует многократного повторения приближений.

Зависимости, полученные в работе [23], позволяют исключить последовательные приближения и использовать при расчете проточных ТЭБ температуры хладо- и теплоносителя и коэффициенты теплоотдачи. Здесь в расчетных выражениях исключены температуры спаев, что достигнуто, однако, в ущерб простоте соотношений, которые представлены сложными непараболическими функциями тока питания. Это затрудняет их аналитическое исследование на экстремальные режимы работы ТЭБ. Сложность аналитического исследования точных соотношений, описывающих режимы работ ТЭБ как функции температур сред, затрудняет также и их практическое применение.

При другом подходе к расчету ТЭБ учитывается изменение температуры вдоль теплопоглощающих и тепловыделяющих поверхностей. При этом ТЭБ необходимо представить как совокупность ТЭМ, работающих в разных температурных условиях. Расчетные зависимости для этого случая получены в работе [10] при пренебрежении термическими сопротивлениями теплоотдачи и предположении постоянной температуры охлаждающей среды по длине батареи. Здесь наряду с точными (в рамках данной модели) получены приближенные формулы для определения параметров ТЭБ при заданной температуре выхода хладоносителя.

Влияние величины коэффициентов теплоотдачи при допущении монотонности изменения температур потоков (площадь отдельных элементов мала по сравнению с площадью батареи) учтено в работе [15], где получены соотношения для изменения температур потоков при прямо- и противоточном их движении в устройстве. Аналитически показана возможность возникновения периодически меняющегося температурного поля в режиме противотока при определенной совокупности параметров как следствие противоположно действующих факторов (тепла Пельтье и кондуктивных тепловых потоков в ветвях), соотношение между которыми меняется вдоль батареи.

Режим максимальной энергетической эффективности аналитически исследован в работе [15] при условии достаточно малого изменения температур потоков. Получены соотношения для определения оптимальных по энергетической эффективности параметров ТЭБ при различных вариантах постановки задачи.

Соотношения для изменения температур хладо- и теплоносителя в случае прямо- и противоточного движения с учетом конечных значений коэффициентов теплоотдачи получены в работе [1], где также выведены уравнения для расчета нагрузочных характеристик проточной ТЭБ. Здесь же получены приближенные выражения для определения необходимого числа ТЭМ в батарее, в случае интенсивного теплообмена с теплоносителями.

Следующий подход к расчету охлаждающих ТЭУ проточного типа основан на том, что эффективность работы проточной ТЭБ может быть повышена за счет оптимизации работы каждого ТЭМ.

Внешняя необратимость процесса теплопереноса в ТЭБ (т.е. термические сопротивления теплоотдачи) учтена в работе [3], где получены выражения, связывающие температуры входа и выхода при проточном и противоточном движении теплоносителей. С помощью полученных зависимостей могут быть рассчитаны нагрузочные характеристики устройства при известных значениях водяных эквивалентов потока.

Также получены уравнения, описывающие изменение температур сред вдоль поверхностей батарей с учетом величин коэффициентов теплоотдачи. Здесь исследованы энергетические характеристики ТЭБ с ТЭМ оптимальной площади.

На основании выше рассмотренных работ отметим, что ТЭБ, в которых температуры хладо- и теплоносителя изменяются незначительно из-за больших расходов, выполняются из одинаковых ТЭМ. При этом наиболее простым, но приближенным является метод расчета по средним температурам потоков.

Исследования динамических режимов работы ТЭБ проточного типа, выполненные к настоящему времени, сводятся к получению передаточных функций этих устройств.

Получен вид передаточных функций для возмущения по температурам теплоносителей без учета изменения температур спаев вдоль ТЭБ, а также выражения для передаточных функций при возмущениях по току питания, температурам и расходам теплоносителей с учетом изменения температур спаев вдоль ТЭБ. Функции представляют собой сложные трансцендентные выражения, практическое применение которых на практике затруднено.

2. Конструкции и разновидности термоэлектрических преобразователей и генераторов электрической энергии, построенных на их основе

2.1. Краткая характеристика термоэлектрических модулей выпускаемых в Российской Федерации и за рубежом

В настоящее время разработка различных ТЭУ ведется на основе освоенных и выпускаемых промышленно стандартных ТЭМ. Имеется значительное число публикаций [3, 5, 33-42], в которых содержатся сведения о параметрах таких ТЭМ.

Данные, приведенные в работе [11], характеризуют ранние тенденции в развитии термоэлектричества - упор на создание относительно мощных охлаждающих ТЭМ для массового потребителя. Холодопроизводительность этих ТЭМ относительно велика и колеблется в пределах 12...40 Вт, ТЭМ сильноточные, размеры спаев 4x4 ... 9x9 мм², высота ТЭ 3...5 мм. Главными причинами, определяющими столь значительные размеры ТЭ и высокие значения токов питания, являлись технологические трудности, с которыми сталкивались разработчики при создании ТЭ относительно малых размеров. Широкое применение в зарубежной практике получили ТЭМ, называемые фригисторами. Ведущие зарубежные фирмы освоили и наладили серийное производство ТЭМ, которые оформлены как законченные конструктивные элементы, помещенные в защитные оправки и снабженные собственными токовыми выводами.

В работе [15] описана технология сборки ТЭМ, производимых в США. Отличительной чертой применяемой технологии является то, что используемые ветви одного типа проводимости располагаются в одном ряду, а их последовательное соединение осуществляется с помощью медных коммутационных пластин, ориентированных относительно ветвей ТЭ.

Французские фирмы осуществляют сборку ТЭМ из отдельных ветвей ТЭ с припаиванием к их торцам металлических пластин и последующей

фрезеровкой или пропиловкой по схеме, обеспечивающей последовательное соединение ветвей.

Для ТЭБ, изготавливаемых у нас в стране, разрабатывается индивидуальная технология применительно к каждому прибору. В большинстве случаев отдельные ветви ТЭ соединяются друг с другом коммутационными пластинами с помощью ручного электропаяльника. Этот способ сборки сложен, трудоемок, требует высокой квалификации и может быть оправдан при изготовлении единичных экземпляров уникальных приборов.

В ГСКБ ТФП разработана технология по созданию ряда серийных унифицированных ТЭМ типа «Селен» [23]. Параметры этих ТЭМ приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Характеристики термоэлектрических модулей типа «Селен»

Модуль	Площадь горячих и холодных спаев модуля, мм ²	Рабочее напряжение, В	Оптимальный ток, А	Холодопроизводительность, Вт	Число термоэлементов	Токовое сечение ветвей, мм ²	Толщина модуля, мм	Масса, г
1	2	3	4	5	6	7	8	9
С1-16	56,2x67,0	1,65	86+9,0	16	15	10x10	7	116
С1-7	39,5x39,5	2,0	31+3,0	6,6	18	6x6	7	52
С3-4	32,0x27,5	2,3	14+1,5	4,0	21	4x4	7	27
С4-2	23,0x19,0	1,1	14+1,5	2,0	10	4x4	7	13
С5-1	19,0x14,5	0,65	14+1,5	1,0	6	4x4	7	8
С6	14,5x14,5	0,8			18	2x2	10	

Предприятием п/я Г-1015 (г. Глухов) разработаны модули типа ТЭМО [12]. Они предназначены для локального охлаждения и стабилизации температуры малогабаритных элементов РЭА. Основные характеристики ТЭМ приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2

Характеристика микромодулей типа ТЭМО

Микромодуль	Минимальная температура холодных спаев, °С	Максимальный ток, А	Максимальное напряжение, В	Максимальная холодопроизводительность, Вт	Площадь холодных спаев, мм ²	Толщина модуля, мм
1	2	3	4	5	6	7
ТЭМО-2	-35	15	4	30	40x40	13
ТЭМО-3	-35	3,5	2,6	4,5	15x20	10
ТЭМО-4	-35	9	5,5	20	30x40	10
ТЭМО-5	-35	7,5	2,8	9	15x20	5,6
ТЭМО-6	-35	7,5	3,5	16	10x30	58

Решение прикладных задач, связанных с применением термоэлектрического охлаждения в научных исследованиях, технике, биологии, медицине и в других отраслях народного хозяйства, в настоящее время требует создания миниатюрных и сверхминиатюрных ТЭМ.

Американской фирмой «NSJ» разработаны и выпускаются миниатюрные ТЭМ, характеристики которых приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3

Характеристики микромодулей, выпускаемых фирмой «NSJ» (США)

Микро модуль	Оптимальный ток, А	Максимальный перепад температур, К	Падение напряжения, В	Отводимая мощность от горячих спаев, Вт	Площадь холодных спаев, мм ²	Толщина модуля, мм
1	2	3	4	5	6	7
1AB	1,0	60	1,0	2,5	4,75x6	4,5
1A	2,0	60	1,0	3,5	4x4	3,25
5AB	5,0	60	0,9	8,0	4x4	2,5
5A	5,0	60	1,1	10	7,75x10,7	4,5
5H	5,0	60	5,0	40	18,75x18,75	4,5
5K	7,0	60	5,5	65	17,9x19,25	3,0

В Одесском технологическом институте холодильной промышленности (ОТИХП) разработана перспективная малооперационная технология

изготовления миниатюрных ТЭМ для охлаждения и термостабилизации элементов РЭА [16]. ТЭМ содержат большое число ТЭ с размерами спаев $0,47...0,7 \text{ мм}^2$ и высотой $1,2...2,3 \text{ мм}$. Ветви ТЭМ изготовлены из пресованного или экструдированного полупроводникового вещества с добротностью $Z=2,2 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$. В таблице 1.4 и 1.5 приведены данные разработанных миниатюрных ТЭМ.

Таблица 1.4

Характеристики термоэлектрических микромодулей, разработанных в
ОТИХП

Микромодуль	Количество ветвей в микромодуле	Оптимальный ток, J, А	Рабочее напряжение, U, В	Холодопроизводительность, Q Вт	Токовое сечение ветвей, мм ²	Толщина микромодуля, δ мм	Максимальный перепад, ΔT, К
1	2	3	4	5	6	7	8
I	64	2	3,88	7,76	0,84x0,84	1,2	61,6
II	64	1	3,62	3,64	0,84x0,84	2,2	61
III	16	0,5	0,708	0,354	0,69x0,69	2,2	56,2

Таблица 1.5

Конструктивные параметры микроохладителей для элементов
полупроводниковой квантовой электроники

Тип микроохладителя	Размеры микроохладителя			Масса, г	Количество термоэлементов	Размеры термоэлемента	
	Теплопоглощающая поверхность	Тепловыделяющая поверхность	Высота			Сечение	Высота
1	2	3	4	5	6	7	8
МДС20-0,7-0,06	0,8x3,1	0,8x4,0	1,8	0,020	20	0,2x0,3	0,72
МДС20-0,6-0,06	÷	÷	1,7	0,019	÷	÷	0,63
МДС20-0,5-0,06	÷	÷	1,6	0,018	÷	÷	0,52
МДС20-0,4-0,06	÷	÷	1,5	0,017	÷	÷	0,43
МДС20-0,3-0,06	÷	÷	1,3	0,016	÷	÷	0,33
МДС20-0,2-0,06	÷	÷	1,2	0,015	÷	÷	0,22

МДС20-0,1-0,06	÷	÷	1,1	0,014	÷	÷	0,11
----------------	---	---	-----	-------	---	---	------

В Государственном специальном конструкторском бюро теплофизического приборостроения (ГСКБ ТФП) разработан технологический процесс, который позволил решить вопрос о повышении микроминиатюризации ТЭМ. Созданный ряд ТЭМ предназначен для обеспечения заданных температурных режимов радиоэлектронных схем, элементов ЭВМ, объектов медико-биологического исследования в тех случаях, когда мощность тепловыделения объектов невелика и по условиям работы необходим малый рабочий ток для питания ТЭУ.

Характеристика ТЭМ, разработанных и серийно выпускаемых ГСКБ ТФП, приведена в таблице 1.6.

Таблица 1.6

Характеристики микромодулей, разработанных в ГСКБ ТФП

Микромодуль	Количество термоэлементов	Габаритные размеры, мм	Сопротивление, Ом	Коэффициент преобразования В/Вт	Масса, г
1	2	3	4	5	6
ТМО	8	5,1x5,1x1,4	0,7	0,045	0,8
ТБО	18	7,7x7,7x2,4	1,4	0,200	1,0
МТС-11	32	5,0x5,0x2,0	8,5+1,5	0,8	0,3
МТС	32	5,0x5,0x4,0	14,0+3		0,5

Основные данные о некоторых других стандартных типах ТЭМ выпускаемых отдельными организациями в нашей стране и за рубежом, приведены в таблицах 1.7...1.5.

Таблица 1.7

Характеристики термоэлектрических модулей типа ТЭМО

Типоразмер микрохолодильника	Падение напряжения, U, В	Потребляемая мощность W, Вт	Максимальный перепад температуры, ΔT макс, К не менее		Максимальная холодопроизводительность (при температуре теплоотвода 300К) Q_0 Вт, не менее
			при температуре теплоотвода T=300 К	при температуре теплоотвода T=313 К	
1	2	3	4	5	6
ТЭМО-4-10	18,0+1,8	54,0+11,0	110	130	0,8
ТЭМО-3-10	3,0+0,3	9,0+1,8	90	110	0,8
ТЭМО-3-24	18,0+1,8	54,0+11,0	90	110	3,2
ТЭМО-2-10	1,0+0,1	3,0+0,6	75	90	0,8
1	2	3	4	5	6
ТЭМО-2П-10	3,6+0,4	3,0+0,6	75	90	0,8
ТЭМО-2-24	18,0+1,8	10,8+2,1	75	90	3,5
ТЭМО-2-49	0,9+0,1	54,0+11,0	75	90	11,5
ТЭМО-2-24	0,9+0,1	2,7+0,5	55	65	2,3
ТЭМО-1П-24	1,0+1,0	2,7+0,5	55	65	2,3
ТЭМО-1-49	3,9+0,3	10,0+2,0	55	65	10,0
ТЭМО-1-95	13,0+1,3	39,0+0,8	55	65	27,0

Таблица 1.8

Параметры термоэлектрических модулей типа КР

Количество термоэлементов	Модуль			
	КР-1	КР-1а	КР-1б	КР-2
	63	63	63	128
1	2	3	4	5
Сечение ветвей, мм	13x8	13x8	13x8	6x10
Длина ветвей, мм	3,8	3,8	3,8	3,8
Габаритные размеры, мм	240x105x111	240x105x111	240x105x111	100x285x98
Масса, кг	3,4	3,0	3,4	3,8
Вид коммутации	последовательная	последовательная	последовательная	параллельно - последовательная
Тип радиатора	паяный	паяный	литой	паяный
Размеры радиатора, мм высота x ширина	50x14,5x17,5	50x14,5x17,5	50x14,5x17,5	-

х длина				
Толщина ребер	0,5	0,5	1,0	-
Зазор между ребрами	1,0	1,0	0,9	-
Холодопроизводительность, Вт	110	110	120	130
Температура воздуха, подаваемого на спаи: горячие холодные	50 36	50 36	50 36	50 40
Холодильный коэффициент	0,55	0,55	0,66	0,7
Интенсивность отказов	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$

Таблица 1.9

Параметры термоэлектрических модулей, выпускаемых фирмой NSI (США)

Модуль	T ₀ , К	I _{опт} , А	ΔT _{макс} , К	Q, Вт	S _x , мм ²	S _T , мм ²	L _M , мм ²
1	2	3	4	5	6	7	8
1AB	300	1,0	60	2,5	4,75x6,0	-	4,5
2A	300	2,0	60	3,5	4x4	-	3,25
5A	300	5,0	60	8,0	4x4	-	2,5
5AB	300	5,0	60	10,0	8,75x10,7	-	4,5
5H	300	5,0	60	40,0	18,75x18,75	-	4,5
8H	300	7,5	60	65,0	17,5x19,25	-	3,0
5AB8	300	4,0	90	5,0	4,5x6,5	8,75x10,7	8,75
5H2	300	4,0	87	13,0	8,75x10,7	18,75x18,75	8,75
2H 89087	300	1,5	116	12,0	12,5x19	12,5x19	13,5
EK89828A	300	2,0	120	15,0	13,25x18,75	13,25x18,75	9,75
4 HO259	300	4,0	120	25,0	17,0x19,0	17,0x19,0	12,75
5H28	300	4,0	113	15,9	4,5x6,5	18,75x18,75	13,5

Таблица 1.10

Параметры термоэлектрических модулей, выпускаемых французскими фирмами

Модуль	T ₀ , К	I _{опт} , А	ΔT _{макс} , К	Q _{омакс} , Вт	R·10 ³ , Ом	N _{TЭ}	S ₀ , мм ²	L ₀ , мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9

PTI8/4	300	7	45	6.5	180	18	3x3	4
PTI8/9	300	18	50	20	75	18	4x4	4
PT60/21	300	12	50	42	320	60	35x35	4
8-2	373	3	100	1.8	230	-	-	-
8-2	298	3	75	1.35	-	-	-	-
при 40°C								
8-4	373	10	100	5.6	8	-	-	-
8-4	298	10	75	4.2	-	-	-	-
при 40°C								
31	298	9	75	19	-	-	-	-
8-17	373	60	100	32	12	-	-	-
8-17	298	60	75	24	-	-	-	-
при 40°C								
P8	373	3	80	20	-	-	-	-

Таблица 1.11

Параметры термоэлектрических модулей, выпускаемых фирмами Германии

Модуль	T ₀ , К	I _{опт} , А	U _{опт} , В	ΔT _{макс} , К	Q _{макс} , Вт	g _{0макс} , Вт/см	Q ₀ , Вт/см
1	2	3	4	5	6	7	8
PT48/1	293	5,5	4,8	48	13,5	-	0,24
PT47/5	293	5,5	4,7	51	16,0	-	-
PT11/20	293	22	1,1	51	16,0	-	0,37
PT20/20	293	20	2,0	45	23,0	-	0,32
PT60/10	293	10	6,1	45	30,0	-	0,47
PT72/10	293	10	7,4	45	35,0	-	0,49
PKEI8 024	313	20	-	43	16,0	1,8	1,0
PKEI8 025	313	20	-	50	12,0	2,2	1,2
PKE36E026	313	9	3,5	63	23,0	-	1,6
PKEI8T026	313	18	1,8	63	23,0	2,5	1,4
Модуль	K ⁻¹	R·10 ³ , Ом	N _{TЭ}	S, мм	L, мм	S _x , мм ²	L _m , мм
PT48/6	1,63	-	48	-	-	70x80	14
PT47/5	1,75	-	47	-	-	-	-
PT11/20	1,75	45	11	-	-	75x75	30
PT20/20	1,46	80	20	-	-	60x120	15
PT60/10	1,46	-	60	-	-	80x80	11
PT72/10	1,46	-	72	-	-	90x80	11
PKEI8 0240	1,2	90	18	5x5	5	40x40	8
PKEI8 0250	1,5	90	18	5x5	5	40x40	8
PKE36E0260	2,0	370	36	-	-	27,5x5	6,5

						3	
PKEI8T0260	2,0	90	18	5	5	40x40	7,5

Таблица 1.12

Параметры термоэлектрических модулей фирмы «M.C.P.» (Англия)

Модуль	T ₀ , К	I _{опт} , А	U _{опт} , В	ΔT _{макс} , К	Q _{0макс} , Вт	Z·10 ⁻³ , К ⁻¹
1	2	3	4	5	6	7
ТО404	373	3,2	16	55-80	1,2-1,7	1,0-1,9
ТО606	373	3,1	36	55-80	3,0-3,8	1,0-1,9
ТО818	373	2,0	36	55-80	7-10	1,0-1,9

Таблица 1.13

Параметры термоэлектрических модулей фирмы «Frigistors Ltd» (Канада)

Модуль	T ₀ , К	I _{опт} , А	U _{опт} , В	ΔT _{макс} , К	Q ₀ , Вт/см ²	Z·10 ⁻³ , К ⁻¹	N _{ТЭ}	S _x , мм ²	L _m , мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I B-04-015-EI	300	15	0,36	63	1,8/2,0	2,2	4	9,5x19,1	6,3
I B-06-015-EI	300	15	0,56	63	1,7/2,1	2,2	6	9,5x28,6	6,3
I B-08-015-EI	300	15	0,75	63	1,0/2,1	2,2	8	19,1x29,1	6,3
I B-12-015-EI (12-15)	300	15	1,13	63	1,8/2,1	2,2	12	19,1x28,6	6,3
I B-32-015-EI (32-15)	300	15	3,0	63	1,7/2,0	2,2	32	38,1x38,1	6,3
I B-04-030-EI	300	30	0,36	63	0,81/1,0	2,2	4	19,1x38,1	7,9
I B-06-030-EI	300	30	0,56	63	0,88/1,0	2,2	6	19,1x57	7,9
I B-08-030-EI	300	30	0,75	63	0,88/1,0	2,2	8	38,1x38,1	7,9
I B-12-030-EI (12-30)	300	30	1,30	63	0,88/1,0	2,2	12	38,1x57,1	7,9
I B-04-060-EI	300	60	0,36	63	0,91/1,1	2,2	4	26,2x53,2	6,3
I B-06-060-EI	300	60	0,56	63	0,97/1,1	2,2	6	26,2x80,2	6,3
I B-08-060-EI	300	60	0,75	63	0,91/1,0	2,2	8	53,2x53,2	6,3
I B-12-060-EI	300	60	1,13	63	0,91/1,0	2,2	12	53,2x80,2	6,3

Таблица 1.14

Параметры термоэлектрических модулей предприятия

«DKK Scharfenstein» (Германия)

Модуль	T ₀ , К	I _{опт} , А	U _{опт} , В	ΔT _{опт} , К	Q ₀ , Вт/см ²	Z·10 ⁻³ , К ⁻¹	N _{ТЭ}	R·10 ⁻³ , Ом	S _x , мм ²	L _m , мм
--------	--------------------	----------------------	----------------------	-----------------------	-------------------------------------	--------------------------------------	-----------------	-------------------------	----------------------------------	---------------------

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
P22	-	-	-	-	-	-	-	20,5	-	-
P23	-	-	-	-	-	-	-	26,0	-	-
P24	343/313	35	1.1	70/80	0.53	2.0	8	30,0	50x60	8
P32	-	-	-	-	-	-	-	20,5	-	-
P33	-	-	-	-	-	-	-	26,0	-	-
P34	343	35	1.1	67	-	1.8	8	30,0	-	-
PE52	313	-	-	52	-	1.5	-	-	-	-
PE62	313	36	-	62	-	2.0	-	-	-	-
PE67	313	42	-	67	-	2.2	-	-	-	-

Таблица 1.15

Параметры термоэлектрических модулей, выпускаемых в Чехии НИИ
порошковой металлургии.

Модуль	T ₀ , К	I _{опт} , А	U _{опт} , В	ΔT _{макс} , К	Q _{0макс} , Вт	Z·10 ⁻³ , К ⁻¹	N _{ТЭ}	S _x , S _r , мм ²	L _m , мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T4-20	300	20-25	0,40	50-55	5,0	1,6-1,8	4	27x13	6
T8-20	300	20-25	0,80	50-55	10,0	1,6-1,8	4	27x27	6
T12-20	300	20-25	1,20	50-55	15,0	1,6-1,8	12	27x41	6

Из приведенных данных следует, что к сегодняшнему дню существенно изменились параметры промышленно изготавливаемых ТЭМ. По сравнению с первыми образцами сила тока питания снижена на два-три порядка. На пять-шесть порядков уменьшены удельные затраты (на единицу холодопроизводительности) полупроводниковых материалов. Современный ТЭМ для микроэлектроники представляет собой миниатюрное изделие с керамическими коммутационными платами, содержащими до 10 спаев на 1см², с ТЭ высотой до 1 мм [2]. Это объясняется не только улучшением параметров ТЭМ, но и появлением нового класса объектов, которые по своим характеристикам в наибольшей степени соответствуют возможностям термоэлектрического преобразования энергии. Это объекты электронной техники и электронной оптики, характеризующиеся малыми массой и размерами, небольшими собственными тепловыделениями и умеренно

низкими температурами охлаждения – около 150...298 К: инфракрасные (ИК) датчики, приборы с зарядовой связью (ПЗС-матрицы), фотоприемные устройства, фотоумножители, полупроводниковые светодиоды и лазеры, параметрические усилители, усилители на полевых транзисторах, модуляторы света, преобразователи изображения, микропроцессоры, элементы ракетонаводящей электроники и электроники для наземных и космических исследований и др. В последние годы заметно снизилась стоимость термоэлектрической продукции. Этому способствовали стандартизация ТЭМ, унификация их размеров и электрических параметров. Освоен массовый выпуск ТЭМ размером 30×30 и 40×40 мм, а также стандартизированных термоэлектрических сборок общего назначения. По оценкам экспертов, рынок термоэлектрической продукции в настоящее время приближается к 100 млн. долл. при выпуске в несколько миллионов охладителей в год.

Все это свидетельствует о том, что термоэлектрическое приборостроение на сегодняшний день превратилось в одну из развитых отраслей мирового производства. Отсюда следует, что использование охлаждающих ТЭУ признано перспективным и необходимым.

2.2. Элементы конструкции термоэлектрических преобразователей

Термоэлектрическое устройство состоит из трех основных узлов: собственно термоэлектрической батареи; системы теплоотвода от горячих спаев термобатареи; системы теплоподвода к холодным спаям термобатареи [14]. Особенностью подобных устройств является непосредственный контакт горячих и холодных спаев термобатареи с системами теплоотвода и теплоподвода, что обуславливает тесную взаимозависимость термоэлектрических и теплотехнических характеристик и требует комплексного нахождения оптимальных конструктивных вариантов.

Основа любого термоэлектрического охлаждающего или нагревательного устройства - отдельные термоэлементы, соединяемые между собой по последовательной или параллельно-последовательной схеме. Отдельный (единичный) термоэлемент состоит из двух полупроводниковых ветвей, одна из которых обладает дырочной, а другая электронной проводимостью. Соединение ветвей в термоэлемент происходит посредством коммутационной пластины [5]. Классификацию ветвей термоэлементов целесообразно проводить по форме их «токового» сечения. (Под «токовым» сечением подразумевается сечение, перпендикулярное направлению движения тока.) Практически формы ветвей и сечений могут быть любыми, но в настоящее время получили распространение ветви с прямоугольным, круглым, секторным и кольцевым сечениями площадью от 0,05 до 4 см². Наиболее широко применяются ветви с прямоугольным сечением, технология изготовления которых хорошо освоена и не вызывает особых затруднений [6].

Возможны различные варианты выполнения ветвей с прямоугольным сечением: плоского типа, в форме параллелепипеда и куба. Выбор того или другого варианта обусловлен необходимостью обеспечить требования, касающиеся компактности, весогабаритных показателей, экономичности, допустимых величин тока и т. д. Применение ветвей с прямоугольным сечением ограничивает возможности конструктивного выполнения термобатарей, так как в этом случае обычно требуются плоские системы теплоотводов и теплоподводов, но позволяет получить высокую компактность за счет минимально возможных зазоров между ветвями.

Применение ветвей с круглым сечением плоского типа или в форме цилиндра не позволяет получить высоких значений коэффициента заполнения, представляющего собой отношение площади всех полупроводниковых ветвей к общей площади термобатареи ($\eta_{\text{зап}} = S/S_{\text{ТЭБ}}$). Это вызывает дополнительный тепловой поток от горячих спаев к холодным

через изоляцию в зазорах между ветвями и уменьшает величину полезной холодопроизводительности термобатареи.

В ряде конструкций термоэлектрических устройств нашли применение ветви термоэлементов с кольцевым или секторным сечением. Несмотря на трудности технологического и конструктивного порядка применение кольцевых термокомпонентов для судовых устройств следует признать наиболее перспективным, так как они позволяют использовать в качестве теплообменных поверхностей трубчатые компоненты и получать компактные малогабаритные устройства.

Для демпфирующих прокладок применяют свинцовые пластины толщиной 0,3-0,7 мм [7]. Технология подготовки ветвей к коммутации в этом случае несколько усложняется. Ветвь термоэлемента залуживают специальным и легкоплавким припоем. Тем же легкоплавким припоем покрывают одну из сторон свинцовой пластины, другую ее сторону покрывают припоем, обладающим меньшей температурой плавления. После этого пластину припаивают к ветви.

Под коммутацией обычно понимают соединение ветвей р- и n-типов с помощью коммутационной пластины в термокомпонент. Выбранная схема коммутации и сама коммутация должны обеспечивать:

- незначительное переходное электрическое сопротивление от одной ветви к другой;
- незначительное тепловое сопротивление от спая к теплообменной поверхности;
- достаточную механическую прочность соединения; снятие или уменьшение тепловых, ударных, вибрационных и других нагрузок на ветви термокомпонента; технологичность сборки.

В качестве материала для коммутационных компонентов в настоящее время применяют в основном медь, которая имеет высокую теплопроводность и низкое удельное электрическое сопротивление, а коммутацию

производят методом непосредственной пайки коммутационных компонентов к ветвям р- и п-типов с использованием легкоплавких припоев [13].

Конструкция коммутационных компонентов весьма разнообразна. Наиболее проста обычная медная пластина, применяемая для коммутации ветвей с прямоугольным или круглым сечением. Предварительно коммутационная пластина залуживается тем же легкоплавким припоем, что и ветви термокомпонентов. Подобная конструкция термокомпонента является жесткой и не устраняет в достаточной степени возникающих при работе механических напряжений. Чаще обычные медные пластины применяют со свинцовыми демпфирующими прокладками, которые, вследствие своей эластичности, разгружают ветви от напряжений. При небольших перепадах температур иногда оказывается достаточным применение разрезных коммутационных пластин, тонкая перемычка которых обладает упругостью и небольшим электрическим сопротивлением благодаря ее малой длине.

В ряде конструкций нашли применение компенсированные коммутационные пластины и пластины с различной длиной по холодной и горячей сторонам термокомпонента [4].

В термоэлектрических устройствах, предназначенных для охлаждения или нагрева воздуха, теплообменной поверхности часто придают функции коммутационного компонента.

Разобранные примеры не исчерпывают всех возможных конструктивных соединений ветвей в термокомпонент и типов коммутации. Наряду с широко распространенным способом коммутации - залуживанием специальными припоями, существует ряд других методов - диффузионное сращивание, жидкая или полужидкая коммутация, использование затвердевающих сплавов галлия с медью, никелем и другими металлами, метод прижимной коммутации и т. д. В термоэлектрических охлаждающих или нагревательных устройствах указанные типы коммутации применяются крайне редко.

Для изоляции токоведущих компонентов термобатареи от теплообменных поверхностей применяют электроизолирующие прослойки

(электроизолирующие теплопереходы). Название predeterminedено требованиями, которым должна удовлетворять прослойка - высокие изоляционные свойства и малое тепловое сопротивление. Первое требование обеспечивает надежность работы, а второе - низкие рабочие перепады температур и, следовательно, более высокое значение холодильного коэффициента.

Помимо того, электроизолирующий теплопереход должен быть механически прочным. Конструкция единичных (применяемых для изоляции одного термокомпонента) прослоек весьма разнообразна [13]. Наиболее простым является теплопереход, состоящий из двух медных, оксидированных с одной стороны пластин, склеенных между собой эпоксидным компаундом. В данном случае медные пластины выполняют функции коммутационных компонентов. Слой оксидной пленки обычно не превышает 0,1-0,2 мкм, и его механическая прочность невелика. Кроме того, слой эпоксидной смолы порядка 10-15 мкм обладает достаточно высоким тепловым сопротивлением. При величине теплового потока в 1 Вт/см² перепад температур превышает 3,5°.

Улучшить механические и изоляционные свойства клеенных эпоксидным компаундом теплопереходов можно за счет применения кабельной бумаги толщиной 5-10 мкм вместо оксидной пленки [3]. Для уменьшения теплового сопротивления надо поверхности медных пластин притирать, что значительно усложняет технологию их изготовления, но зато перепад температур не превышает 2,5°. В ряде устройств нашел применение теплопереход аналогичной конструкции, в котором одна из медных пластин заменена свинцовой.

Наиболее полно удовлетворяют всем требованиям керамические теплопереходы, обладающие высокими электроизоляционными свойствами, хорошей теплопроводностью и механической прочностью. В качестве керамики применяют чаще всего алунд Al_2O_3 , реже окись бериллия BeO , хотя теплопроводность последней значительно выше [26]. Это объясняется

чрезвычайно большой токсичностью окиси бериллия при ее обработке. Присоединение медных пластин производят либо путем пайки к предварительно металлизированной керамике, либо путем диффузионной сварки.

В термоэлектрических устройствах используются два типа систем теплоподвода и теплоотвода - радиаторная (с принудительной или естественной циркуляцией воздуха) и жидкостная. Теплообменные поверхности должны обеспечивать минимально возможный перепад температур между теплоносителем и спаями термокомпонентов за счет интенсивного теплообмена, развитой поверхности и небольшого теплового сопротивления.

Одновременно поверхности должны быть компактными и не нагружать значительно. Оребрение системы может выполняться как отдельно для каждого термокомпонента, так и для термобатареи в целом. В последнем случае требуется установка теплопереходов. Широкое распространение в термоэлектрических устройствах, предназначенных для тепло-влажностной обработки воздуха, получили пластинчато-ребристые поверхности с гладкими, волнистыми, перфорированными и стерженьковыми ребрами.

Данный тип оребрения позволяет сосредоточить в единице объема большую поверхность теплообмена и иметь практически любую необходимую геометрию ребер - толщину, высоту, длину, шаг и т. д.

Наиболее просты в конструктивном и технологическом отношении поверхности с гладкими ребрами, у которых сечение каналов для прохода воздуха может быть прямоугольным, треугольным или со скругленными углами. Ребра могут изготавливаться отдельно или из одной ленты и припаиваться к основанию. Часто для уменьшения теплового сопротивления оребрения в основании фрезеруют специальные канавки, куда устанавливаются, а потом припаивают ребра. С целью интенсификации теплообмена ребра изготавливают волнообразными или перфорируют. Весьма высоким значением коэффициента теплоотдачи характеризуются пластинчато-стерженьковые поверхности, у которых ребра могут иметь шахматное или коридорное расположение. К числу недостатков последнего

типа оребрения следует отнести значительные величины коэффициентов аэродинамического сопротивления.

Пластинчато-ребристые поверхности применяются в основном в термобатареях плоского типа с термокомпонентами прямоугольного или круглого сечения. Теплообменная поверхность по горячей стороне в этом случае обычно выполняется в виде плиты со сверлеными или фрезерованными каналами для прохода воды. Выбор того или другого типа поверхности и геометрии ребер должен производиться в каждом конкретном случае с учетом многих факторов. К ним, прежде всего, следует отнести допустимые величины потерь напора, требования к весовым и габаритным показателям, технологичность изготовления и др. Стремление иметь развитую поверхность за счет увеличения высоты ребер и малого шага может привести к недопустимым нагрузкам на термокомпонент при вибрациях и ударных сотрясениях. С другой стороны, применение поверхностей с невысоким значением степени оребрения резко сказывается на энергетических затратах вследствие увеличения рабочих перепадов температур.

Пластинчато-ребристые поверхности другой конфигурации также находят применение в конструкциях термобатарей неплоского типа. Например, в термоэлектрических устройствах с теплоотводящей системой, выполненной в виде трубы.

В подобных схемах для придания всей конструкции определенной жесткости и разгрузки термокомпонентов от напряжений стали применять ребра с охватом всех термокомпонентов по периметру. Такая конструкция оребрения, хотя и требует наличия теплопереходов по холодной стороне, зарекомендовала себя положительно в ряде устройств с довольно жесткими условиями эксплуатации. В кольцевых термокомпонентах применяют обычные трубчатые (оребренные и неоребренные) компоненты.

Краткое рассмотрение термоэлектрических устройств безусловно не исчерпывает всех возможных вариантов их конструктивного выполнения и

использования. Существующие конструкции промышленно изготавливаемых термоэлектрических преобразователей приведены в [16-21, 23, 29].

2.3. Разновидности современных термоэлектрических генераторов электрической энергии

Мощность современных ТЭГ колеблется от нескольких микроватт до нескольких десятков киловатт, КПД преобразования - от 2 до 10%, срок службы - от 1 года до 25 лет, стоимость установленной мощности - от \$12 до \$190 на 1 Вт.

ТЭГ для дачников, рыбаков, охотников, геологов, туристов, альпинистов, предлагаются ТЭГ мощностью от 4,5 до 12 Вт выполненные в виде настольной лампы или походных котелков, являющихся источниками постоянного тока. Их можно использовать для освещения, подзарядки аккумуляторов, питания радиоприемников, телевизоров, радиостанций, магнитофонов, компьютеров. Источниками тепла для них являются газовая горелка или плита, примус, печка, костер и т.д. Для катодной защиты магистральных нефтепроводов и газопроводов от коррозии и для питания различно контрольно-регулирующей аппаратуры используются ТЭГ мощностью до 150 Вт, работающие на природном и попутном газе. Для коттеджей и загородных домов разрабатывается ТЭГ мощностью 200 Вт. Он представляет собой газовый котел, вырабатывающий, одновременно, тепло для отопления и электроэнергию. Это позволяет обеспечить бесперебойное электропитание системы отопления (автоматики, циркуляционных насосов), что делает ее полностью независимой от внешней электросети. Кроме того, это устройство может являться резервным источником электропитания для широкого спектра бытовых приборов.



Рис.2.1. Внешний вид ТЭГ ГТУ-12-12

На рис.2.1. изображен ТЭГ ГТУ-12-12 Генератор предназначен для питания бытовой радиотелеаппаратуры, средств связи, освещения и подзарядки аккумуляторов. Он преобразует тепло бытовых источников (корогаза, примуса, газовой горелки, печки, костра) в электрическую энергию.

В условиях, удаленных от постоянного электроснабжения, генератор может быть использован для: подзарядки аккумуляторов мобильного телефона, радиостанции, видеокамеры, эхолота, навигатора, ноутбука, автомобиля; обеспечения электроэнергией маломощных потребителей - радиоприемника, магнитофона, миникомпьютера, телевизора; локального освещения (источниками теплоты могут служить газовая или бензиновая горелка, корогаз, примус, печь с конфорками, угли костра и любые другие источники с открытым пламенем).

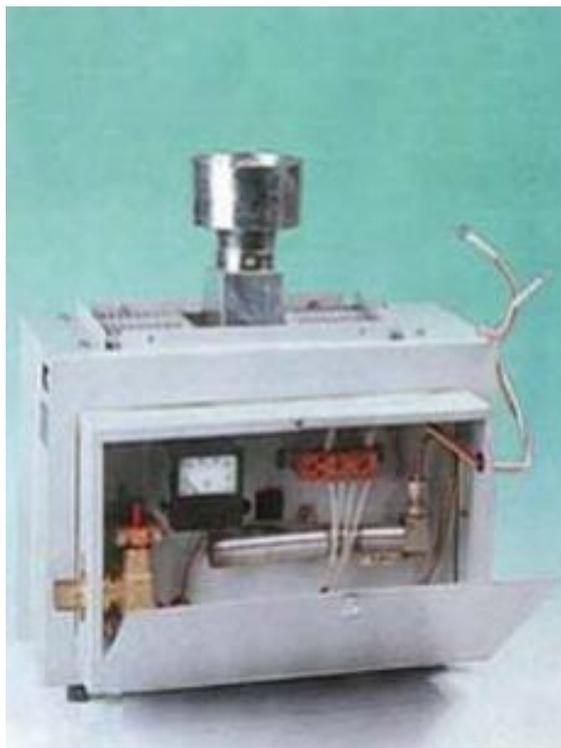


Рис.2.2. Внешний вид ТЭГ ГТГ-30-12

ТЭГ газовый ГТГ-30-12 (рис.2.2) предназначен для обеспечения электроэнергией маломощных потребителей. Он преобразует тепло продуктов сгорания природного газа, пропана, пропанбутановой смеси в электрическую энергию. Генераторы эксплуатируются под навесом или в проветриваемых помещениях при температуре от -30 до + 50 град. С и относительной влажности до 90 %.

ТЭГ ГТГ-150Н (рис.2.3) применяется для комплектации автономных источников электроэнергии мощностью от 150 до 900 Вт, которые используются для питания средств радиорелейной связи и катодной защиты газопроводов. Топливом для генератора служат: природный газ, пропан, пропан-бутановая смесь.

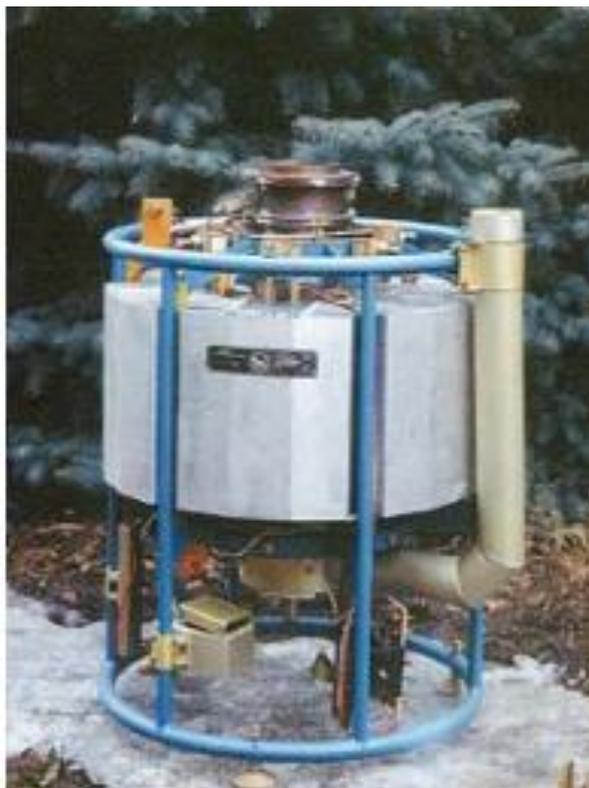


Рис.2.3. Внешний вид ТЭГ ГТГ-150Н

ТЭГ ГТ-4,5-12 (рис.2.4) предназначен для использования в качестве источника постоянного тока и освещения. Он преобразует тепло продуктов сгорания керосина лампы в электрический ток. Генератор эксплуатируется в помещениях, защищенных от прямого воздействия ветра и осадков.



Рис.2.4. Внешний вид ТЭГ ГТ-4,5-12

В настоящее время растет интерес к использованию термоэлектрических генераторных модулей в бытовых устройствах. В первую очередь это касается возможности питания маломощных потребителей электроэнергии - радиоприемники, сотовые и спутниковые телефоны, переносные компьютеры, устройства автоматики и т.п. от имеющихся источников тепла. ТЭГ, в котором отсутствуют вращающиеся, трущиеся и какие-либо другие изнашиваемые части, позволяет непосредственно получать электричество из любого источника тепла: выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания, горячей воды геотермальных источников, "бросового" тепла ТЭЦ и т.п. На рис. 2.5. изображен внешний вид генератора 1TG-8, изготавливаемого ИПФ Криотерм (г. Санкт-Петербург) [33]. Конструктивно генератор выполнен в

виде алюминиевого ковшика с внутренним объемом около 1 л, в донной части которого установлены генераторные модули.



Рис.2.5. Внешний вид ТЭГ 1TG-8

Необходимый для работы генератора перепад температур достигается при разогреве ковшика, например, пламенем костра. Вода, нагреваемая внутри ковшика может идти на приготовление пищи или на другие цели. Данный генератор в первую очередь предназначен для использования в глухих, труднодоступных местах для подзарядки элементов питания индивидуальных средств связи и навигации, освещения и т.п. Он незаменим для охотников, туристов, моряков, сотрудников спасательных и специальных служб, вынужденных долгое время находиться вдали от источников центрального энергоснабжения. Преимуществом генератора является малый вес и объем, высокая удельная генерируемая мощность, функциональность и высокая надежность. Конструкция генератора исключает возможность его перегрева при правильном использовании. В качестве дополнительной опции к генератору предлагается ступенчатый стабилизатор напряжения с диапазонами 3 В - 6 В - 9В -12 В и переходники для зарядных устройств.

Почвенные термоэлектрические генераторы (ПТЭГ) (рис.2.6) предназначены для обеспечения питанием небольших автономных наземных и подземных дистанционных систем, которые включают в себя различные

датчики и устройства связи. Перспективным является использование ПТЭГ для питания сигнальных устройств на неэлектрифицированных участках дорог, для обеспечения работы автономных агрометеорологических комплексов в отдаленных и пустынных районах.



Рис.2.6. Внешний вид ПТЭГ

Особенно эффективным является применение ПТЭГ в системах охранной сигнализации. Термоэлектрический источник электрической энергии работает на основе прямого преобразования тепловой энергии почвы в электрическую. Корпус почвенного термоэлектрического генератора выполнен из био- и гидроустойчивого теплоизолирующего материала, концентраторы защищены антикоррозионным покрытием.

На рис.2.7. представлен ТЭГ Altec 8020 [35].



Рис.2.7. Внешний вид Altec 8020

Он предназначен для преобразования в электрическую энергию промышленных тепловых отходов и отходов тепла от тепловых машин (двигателей внутреннего сгорания, газовых турбин и др.). Является дополнительным источником энергии, которая может быть использована как для внутренних потребностей, так и для передачи ее во внешнюю электрическую сеть. Использование таких генераторов обеспечивает экономию топливных ресурсов на 5-7%.

Принцип работы ТЭГ основывается на прямом преобразовании тепловой энергии в электрическую путем использования термоэлектричества. В состав ТЭГ входят ТЭМ и теплообменники горячего и холодного контуров. Теплообменники горячего контура передают тепло к ТЭМ высокотемпературной силиконовой жидкостью. Теплообменники холодного контура отводят тепло от ТЭМ проточной водой. В корпусе ТЭГ предусмотрены штуцеры входа и выхода холодной проточной воды и

штуцеры для подключения теплоносителя. Внешняя нагрузка подключается к клеммам, размещенным на передней панели термогенератора.

Мощность современных ТЭГ колеблется от нескольких микроватт до нескольких десятков киловатт, КПД преобразования - от 2 до 10%, срок службы - от 1 года до 25 лет, стоимость установленной мощности - от \$12 до \$190 на 1 Вт. В России и США разработаны перспективные проекты ядерных термоэлектрических установок, мощность которых достигает сотен и тысяч киловатт.

ТЭГ на органическом топливе нашли наибольшее практическое применение в области электро- и теплоснабжения автономных объектов в нефтегазовой промышленности, метеорологии, навигации, сельском хозяйстве, армии и в быту. В качестве источника теплоты в них используются продукты сгорания твердого, жидкого и газообразного топлива. С середины 70-х гг. по настоящее время на магистральных газопроводах России успешно эксплуатируется свыше 12 тыс. газовых низкотемпературных ТЭГ первого поколения (УГМ-80, УГМ-80М) и двухкаскадных ТЭГ второго поколения (ГТГ-150) с инфракрасными горелками мощностью от 80 до 150 Вт, разработанных НПО "Квант" и серийно выпускаемых ОАО "Позит". Канадская фирма "Global Thermoelectric" выпустила в 90-е гг. более 4 тыс. газовых среднетемпературных ТЭГ мощностью от 30 до 550 Вт, работающих более чем в 40 странах мира. Низкотемпературные генераторы с каталитическими горелками мощностью от 10 до 90 Вт серийно выпускаются в России НПП БИАТОС и в США компанией "Teledyne Energy Systems". На базе генераторов ГТГ-150 и ГТЖ-160 АО "Саратовгазавтоматика" в начале 90-х гг. освоило серийный выпуск автономных источников питания (АИП) мощностью 400, 750 и 900 Вт напряжением 27 В. За рубежом аналогичные АИП с ТЭГ на газовом топливе созданы в Канаде ("Global Thermoelectric"), а АИП на жидком топливе - в Японии. В начале 90-х гг. в России были созданы на предприятии АИТ и выпускаются серийно ОАО "Позит"

низкотемпературные бытовые ТЭГ мощностью от 4,5 до 30 Вт и напряжением от 6 до 12 В (ГТГ-4,5-12, ГТУ-15-12 и ГТГ-30-12).

Требуемые уровни электрической мощности ТЭГ - от единиц до нескольких сотен и тысяч киловатт - могут быть обеспечены только в сочетании с ядерными реакторами в качестве источника теплоты. По способу теплопередачи от ядерных реакторов к горячим спаям ТЭГ можно разделить на три типа: вынесенные, в которых ТЭГ размещен вне ядерного реактора, а теплопередача осуществляется циркуляционными теплоносителями; встроенные, в которых ядерный реактор и ТЭГ совмещены в едином блоке, ТЭБ размещены на оболочках ТВЭЛ или на отражателе, а теплопередача осуществляется теплопроводностью; и промежуточные, в которых отвод теплоты от ядерного реактора осуществляется тепловыми трубами. Отвод теплоты от холодных спаев ТЭГ всех типов осуществляется хладагентом или излучением. Начиная с 60-х гг. и по настоящее время, ведущими предприятиями бывшего СССР (РНИЦ Курчатовский институт" Обнинского физико-энергетического института, НПО "Красная Звезда" и "Квант", Сухумский ФТИ), а также такими компаниями США как "Atomic Internation", "Martin Marietta", "Westinghouse Electric Co.", "General Electric Co." создан и опробован в эксплуатации ряд уникальных ядерных термоэлектрических энергоустановок.

2.4. Термоэлектрические генераторы проточного типа

ТЭГ проточного типа характеризуются наличием теплообменных аппаратов с протекающими в них холодными и горячими теплоносителями, контактирующими со спиями термоэлементов. В качестве охлаждающего теплоносителя может использоваться проточная вода при комнатной температуре, либо охлажденная посредством каких-либо средств до более низкого значения, а в качестве нагревателя применяется теплоноситель, нагретый от различных источников (газовых горелок, изотопов, солнечным излучением, от термоядерного реактора). Типовая конструкция такого ТЭГ изображена на рис.2.8, а внешний вид на рис.2.9.

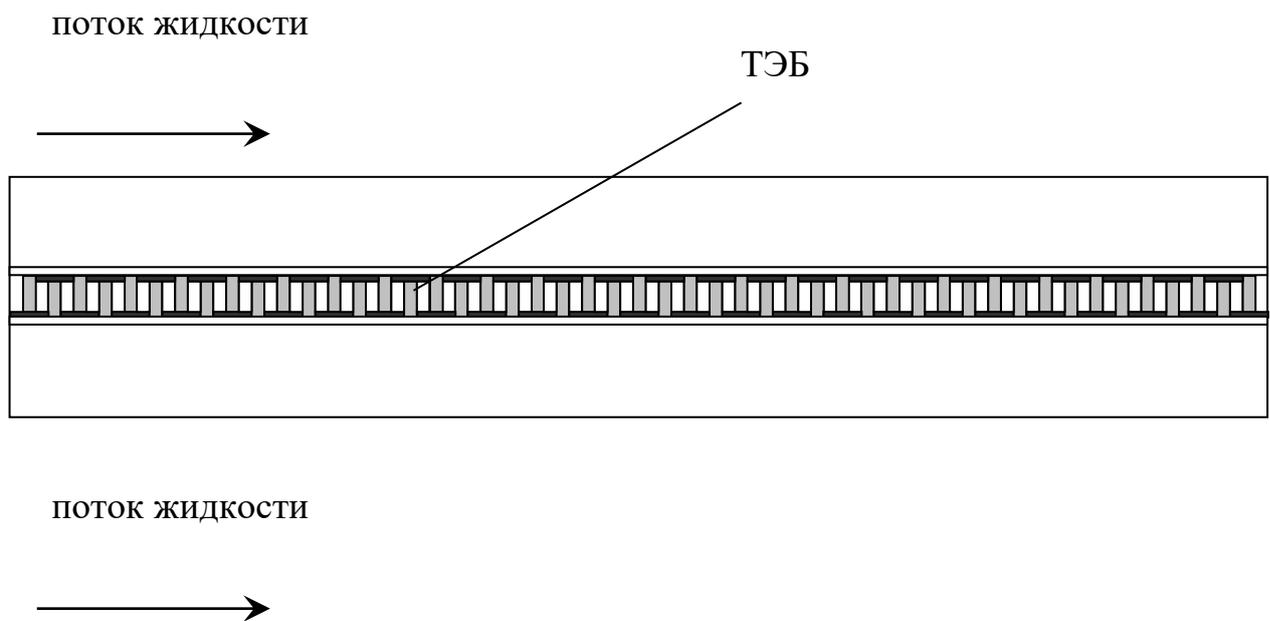


Рис.2.8. Конструкция ТЭГ проточного типа

Преимущества данной конструкции - более высокие коэффициенты теплообмена между спиями термоэлементов и охлаждающими и нагревающими средами, следствием чего является более интенсивный приток и отток теплоты к спиям ТЭГ, увеличение перепада температур между спиями генератора, повышение КПД прибора.



Рис.2.9. Внешний вид типового ТЭГ проточного типа

Типовая нагрузочная характеристика ТЭГ данного типа представлена на рис.2.10.

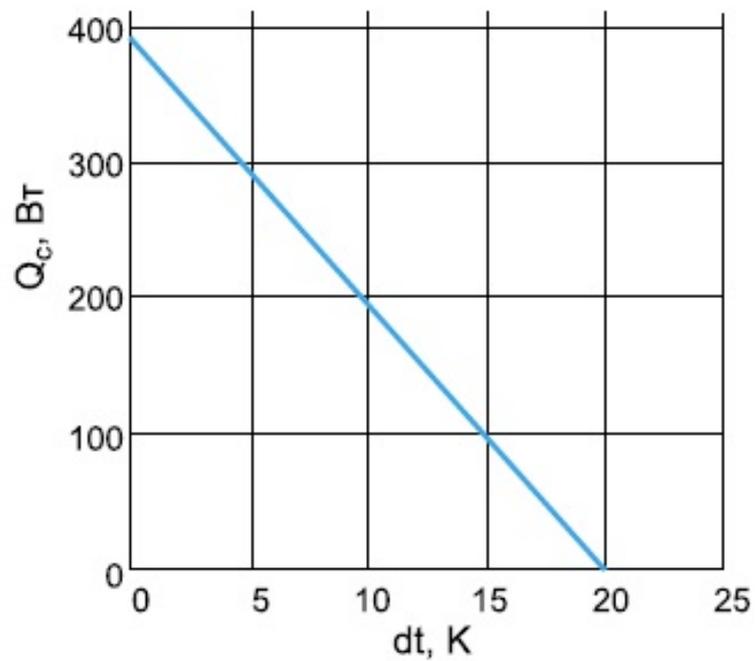


Рис.2.10. Типовая нагрузочная характеристика ТЭГ проточного типа

3. Моделирование термоэлектрического генератора проточного типа

Задача моделирования ТЭГ состоит в определении его выходных электрических параметров, в частности значения генерируемой ЭДС, а также коэффициента полезного действия. При этом основными исходными данными являются термоэлектрические свойства применяемого полупроводникового материала и температурные ограничения, относящиеся к термоэлектрическому материалу или отдельным конструктивным деталям ТЭГ. Первым этапом моделирования ТЭГ является расчет жидкостных теплообменных аппаратов, в которых протекают холодный и горячий теплоносители и определение их усредненной температуры. Далее производится расчет электрических параметров генератора.

3.1. Расчет жидкостного теплообменного аппарата с теплоносителями

При решении данной задачи необходимо выполнить конструктивный тепловой и гидродинамический расчет теплообменного аппарата, который заключается в определении величины его поверхности теплообмена и мощности, необходимой для перемещения каждого теплоносителя в теплообменнике [28].

Тепловой расчет теплообменного аппарата.

Тепловой расчет основан на совместном решении уравнений теплового баланса и теплопередачи.

Уравнение теплового баланса имеет вид:

$$Q = G_1 \Delta i_1 = G_2 \Delta i_2, \quad (3.1)$$

где Q – тепловая мощность теплообменника (количество теплоты, передаваемого в единицу времени), G_1 и G_2 – расходы первичного (горячего)

и вторичного (холодного) теплоносителей, Δi_1 и Δi_2 – изменение энтальпии первичного и вторичного теплоносителей.

Уравнению (3.1) можно придать различную форму в зависимости от конкретных условий протекания процесса. При теплообмене без фазовых превращений, например, оно может быть записано в виде:

$$\Delta i = c_{pm}(T' - T''), \quad (3.2)$$

где T' и T'' – начальная и конечная температуры теплоносителя, c_{pm} – средняя удельная теплоемкость теплоносителя в интервале температур $(T''-T')$.

Уравнение теплопередачи для расчета теплообменников имеет вид:

$$Q = kFAT_{cp}, \quad (3.3)$$

где k – коэффициент теплопередачи, F – поверхность теплообмена, ΔT_{cp} – средний температурный напор.

Для теплового расчета теплообменного аппарата необходимо определение температурного напора, коэффициента теплопередачи, а также коэффициента теплоотдачи от теплоносителей к стенке теплообменного аппарата.

Вид расчетной формулы для определения среднего температурного напора зависит от направления движения теплоносителей, которые могут двигаться по схеме: прямотока, противотока, перекрестного тока и смешанного тока. При прямотоке и противотоке средний температурный напор определяется как средний логарифмический:

$$\Delta T_{cp} = \frac{\Delta T_{\delta} - \Delta T_{\mu}}{\ln \frac{\Delta T_{\delta}}{\Delta T_{\mu}}}, \quad (3.4)$$

где ΔT_{δ} и ΔT_{μ} - больший и меньший температурные напоры между теплоносителями на входе и выходе из теплообменника.

Если толщина стенок труб невелика по сравнению с диаметром ($d_2/d_1 \leq 2$), то для определения коэффициента теплопередачи может использоваться формулой для плоской стенки:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (3.5)$$

где α_1 и α_2 – коэффициенты теплоотдачи с внешней и внутренней сторон стенки, δ – толщина стенки теплообменного аппарата, λ – коэффициент теплопроводности материала стенки.

Загрязнение поверхности теплообмена учитывается коэффициентом использования поверхности теплообмена. В этом случае коэффициент теплопередачи определяется с учетом поправочного коэффициента ψ :

$$k_1 = k\psi, \text{ где } \psi = 0,7 \div 0,8.$$

Соотношения для определения коэффициентов теплоотдачи зависят от характера теплообмена теплоносителей со стенкой теплообменного аппарата, а также его конструктивного исполнения. Возможны следующие случаи.

1. Теплоотдача при течении жидкости в гладких трубах:
- для ламинарного режима течения средний коэффициент теплоотдачи определяется по формуле [32]:

$$Nu = 0,15 Re^{0,33} Pr^{0,33} (Gr \cdot Pr)^{0,1} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_\ell, \quad (3.6)$$

- для турбулентного режима течения средний коэффициент теплоотдачи определяется по формуле:

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} (Gr \cdot Pr)^{0,1} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_\ell, \quad (3.7)$$

где $Re = \frac{vd}{\nu}$ – критерий Рейнольдса, $Pr_{ж} = \frac{\nu}{a}$ – критерий Прандтля при средней температуре жидкости, $Pr_{ст}$ – критерий Прандтля при средней температуре стенки, $Gr = \frac{g\beta\Delta T d^3}{\nu^2}$ – критерий Грасгофа при средней температуре жидкости.

Входящие в критерий величины обозначают:
 d – определяющий размер, м; v – средняя скорость движения жидкости, ν – коэффициент кинематической вязкости жидкости, α – коэффициент температуропроводности жидкости, g – ускорение свободного падения, β – температурный коэффициент объемного расширения, $\Delta T = T_{ж} - T_c$ – температурный напор между средней температурой жидкости и средней температурой стенки, ε_ℓ – коэффициент, учитывающий изменение среднего коэффициента теплоотдачи по длине трубы.

2. Теплоотдача при вынужденном поперечном омывании труб:
 - теплоотдача при поперечном омывании одиночной круглой трубы может быть рассчитана по соотношениям [22]:

$$\begin{aligned} Nu &= 0,5 Re^{0,5} Pr^{0,38} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25} \quad \text{при } 5 < Re < 10^3, \\ Nu &= 0,25 Re^{0,6} Pr^{0,38} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25} \quad \text{при } 10^3 < Re < 2 \cdot 10^5, \quad (3.8) \\ Nu &= 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,37} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25} \quad \text{при } 2 \cdot 10^5 < Re < 2 \cdot 10^6. \end{aligned}$$

В данных формулах за определяющий линейный размер принят внешний диаметр трубы, а за определяющую температуру – средняя температура жидкости. Исключение составляет $Pr_{ст}$, выбираемый по средней температуре стенки трубы.

Вышеприведенные соотношения справедливы, если угол ϕ , составленный направлением потока и осью трубы, называемый углом атаки, равен 90° . Если угол $\phi < 90^\circ$, теплоотдача уменьшается. Для оценки ее уменьшения при $\phi = 30 \dots 90^\circ$ применяется зависимость:

$$\alpha_\phi = \alpha_{\phi=90} (1 - 0,54 \cos^2 \phi),$$

где α_{ψ} , $\alpha_{\psi=90}$ – коэффициенты теплоотдачи соответственно при $\phi < 90^\circ$ и $\phi=90^\circ$.

- теплоотдача при поперечном омывании пучков труб. Чаще всего встречаются два основных типа трубных пучков: шахматный и коридорный. Выделяют три основных режима омывания и теплоотдачи в поперечно-омываемых трубных пучках: ламинарный, смешанный и турбулентный. На основании исследований теплоотдачи сделан ряд общих выводов: средняя теплоотдача первого ряда различна и определяется начальной турбулентностью потока; начиная примерно с третьего ряда, средняя теплоотдача стабилизируется, так как в глубинных рядах степень турбулентности потока определяется компоновкой пучка, являющегося системой турбулизирующих устройств. Теплоотдача пучков труб зависит от расстояния между трубами. Это расстояние принято выражать в виде безразмерных характеристик S_1/d и S_2/d , называемых соответственно относительными поперечным и продольным шагами.

При смешанном режиме ($Re \cong 10^3 \dots 10^5$) средний коэффициент теплоотдачи определенного ряда пучка определяется по формуле:

$$Nu = c Re^n Pr^{0,33} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25} \varepsilon_i \varepsilon_s, \quad (3.9)$$

где $c=0,41$ и $n=0,6$ – для шахматных пучков; $c=0,26$ и $n=0,65$ – для коридорных пучков.

Определяющим размером является внешний диаметр трубок пучка. За определяющую температуру принимается средняя температура жидкости. Скорость жидкости, входящая в критерий Re , подсчитывается по самому узкому поперечному сечению ряда пучка. Поправочный коэффициент ε_s учитывает влияние относительных шагов. Для глубинных рядов коридорного пучка $\varepsilon_s = (S_2/d)^{-0,15}$, для шахматного при $S_1/S_2 < 2$ $\varepsilon_s = (S_1/S_2)^{\frac{1}{6}}$, при $S_1/S_2 \geq 2$ $\varepsilon_s = 1,12$; ε_i – поправочный множитель, учитывающий изменение

теплоотдачи в начальных рядах труб. При $S_2/d \leq 4$ поправку ε_i можно определить по диаграмме, приведенной в [12].

Для определения коэффициента теплоотдачи всего пучка в целом необходимо произвести осреднение средних значений $\bar{\alpha}$, полученных для отдельных

рядов:

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{\alpha}_i F_i}{\sum_{i=1}^n F_i}, \quad (3.10)$$

где: α_i – средний коэффициент теплоотдачи i -го ряда, F_i – суммарная поверхность теплообмена трубок i -го ряда, n – число рядов в пучке.

Если $F_1=F_2=\dots=F_n$ формула упрощается:

$$\bar{\alpha} = \frac{\bar{\alpha}_1 + \bar{\alpha}_2 + (n-2)\bar{\alpha}_3}{n}, \quad (3.11)$$

где $\alpha_1=\varepsilon_1\alpha_3$, $\alpha_2=\varepsilon_2\alpha_3$.

Для чисел $Re=10\dots 200$ – для шахматных пучков и $Re=10\dots 150$ – для коридорных пучков формула имеет вид:

$$Nu = c Re^{\frac{1}{3}} Pr^{\frac{1}{3}} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{ст}} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (3.12)$$

где $c=1,8$ – для шахматного пучка; $c=1,2$ – для коридорного пучка.

При $Re > 2 \cdot 10^5$ теплоотдача глубинных рядов шахматного и коридорного пучков рассчитывается по формуле:

$$Nu = 0,021 Re^{0,84} Pr^{0,36} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}. \quad (3.13)$$

Для определения среднего коэффициента теплоотдачи при ламинарном режиме течения используют уравнение:

$$Nu = 0,66 Re^{0,5} Pr^{0,33} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}. \quad (3.14)$$

При турбулентном режиме течения средний коэффициент теплоотдачи определяется по формуле:

$$Nu = 0,037 Re^{0,8} Pr^{0,43} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25} . \quad (3.15)$$

Для воздуха $Pr=0,71$, и поэтому расчетные формулы для средней теплоотдачи упрощаются [8]:

- для ламинарного режима течения

$$Nu = 0,57 Re^{0,5} , \quad (3.16)$$

- для турбулентного режима течения

$$Nu = 0,032 Re^{0,8} . \quad (3.17)$$

Эти формулы применимы для условий, когда температура пластины постоянна, т.е. не изменяется по длине. В качестве определяющей температуры выбирают температуру набегающего потока, а определяющего размера – длину пластины.

При решении критериальных уравнений (3.6) и (3.7) необходимо знать среднюю температуру стенки. Вычислить температуру стенки можно, предварительно определив величины коэффициентов теплоотдачи, которые по условию не заданы. Поэтому поставленную задачу решают методом последовательных приближений, задаваясь значением температуры стенки. Если условные эквиваленты W_1 и W_2 одного порядка, что имеет место в

лучае водоводяных теплообменников (где $W=G \cdot c \cdot p$), то можно задаться $T_{ст.ср}=(T_1+T_2)/2$, где T_1 и T_2 - средние температуры теплоносителей. Затем находят коэффициенты теплоотдачи по критериальным уравнениям и по ним температуры стенок со стороны первичного теплоносителя $T_{ст1}$ и со стороны вторичного теплоносителя $T_{ст2}$ по равенствам:

$$T_{ст1} = T_1 - \frac{q}{\alpha_1} \text{ а } T_{ст2} = T_{ст1} - q \frac{\delta}{\lambda} , \text{ где } q = k \cdot \Delta T_{ср} = \alpha_1 |T_1 - T_{ст}| .$$

Средняя температура стенки равна $T_{ст.ср} = \frac{T_{ст1} + T_{ст2}}{2}$.

Гидравлический расчет теплообменного аппарата.

Цель этого расчета теплообменника состоит в определении затрат механической энергии на перемещение теплоносителей в аппарате. При гидравлическом расчете теплообменника необходимо учитывать сопротивление трения, местные сопротивления и тепловое сопротивление.

Последнее сопротивление обусловлено ускорением потока вследствие изменения объема теплоносителя при постоянном сечении канала, что связано с изменением температуры. Для капельных жидкостей этим сопротивлением можно пренебречь.

Сопротивление трения при движении теплоносителя в каналах определяется по формуле:

$$\Delta P_{\tau} = \xi \frac{\rho v^2}{2} \ell, \quad (3.18)$$

где ℓ и d – длина и гидравлический диаметр канала; ξ – коэффициент сопротивления трения.

При неизотермическом течении жидкости величина коэффициента ξ зависит не только от критерия Re , но и от критериев Gr и Pr . Так, при турбулентном режиме течения имеем

$$\xi = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{ст}} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (3.19)$$

Местные сопротивления определяют по формуле:

$$\Delta P_m = \xi \frac{\rho v^2}{2}, \quad (3.20)$$

в которой коэффициент ξ зависит от вида местного сопротивления (внезапное сужение, поворот и т. п.). При продольном омывании пучков труб вдоль оси сопротивление подсчитывается по формулам для прямых каналов, где в формулы подставляется эквивалентный гидравлический диаметр

$d_{\text{эКВ}}=4f/u$. При поперечном омывании пучков значение коэффициента сопротивления определяется формулами:

для шахматных пучков при $\frac{x_1}{d} < \frac{x_2}{d}$, $\xi = (4 + 6,6m)Re^{-0,28}$,

для шахматных пучков при $\frac{x_1}{d} > \frac{x_2}{d}$, $\xi = (5,4 + 3,4m)Re^{-0,28}$,

для коридорных пучков $\xi = (6 + 9m)\left(\frac{x_1}{d}\right)^{-0,23} Re^{-0,26}$.

В этих формулах скорость отнесена к самому узкому сечению пучка, физические свойства – к средней температуре потока; m – число рядов в пучке в направлении движения.

Тепловое сопротивление можно подсчитать как удвоенную разность скоростных напоров в конце и в начале канала:

$$\Delta P_{\text{тепл}} = 2 \left(\frac{\rho_2 v_2^2}{2} - \frac{\rho_1 v_1^2}{2} \right), \quad (3.21)$$

где ρ – плотность, v – средняя скорость течения.

Общее сопротивление каждого теплоносителя определяется как сумма всех видов сопротивления в элементах теплообменника [25]:

$$\Delta P = \sum \Delta P_m + \sum \Delta P_M + \sum \Delta P_{\text{тепл}}. \quad (3.22)$$

Мощность, необходимая для перемещения каждого теплоносителя в теплообменнике, определяется формулой:

$$N = \frac{\Delta P G}{1000 \rho \eta}, \quad (3.23)$$

где: G и ρ – массовый расход и средняя плотность теплоносителя; η – КПД устройства (насоса) для перемещения теплоносителя ($\eta=0,4...0,6$).

В соответствие с рассмотренной методикой расчета жидкостных теплообменных аппаратов, используемых для прокачивания холодного и горячего теплоносителя вдоль спаев ТЭБ, получены графики зависимости изменения коэффициента теплопередачи между ними и спаями ТЭ при разных скоростях жидкостей, а также подводимой к последним мощности

при фиксированном значении коэффициента теплопередачи от разности температур с окружающей средой (рис.3.1-3.2). Предполагалось что материал теплообменных аппаратов – алюминий (для рис.3.2 также медь), его длина-ширина: 400 мм -100 мм.

Согласно представленным графикам следует, что для обеспечения необходимой разности температур между спаями ТЭГ могут быть использованы типовые жидкостные теплообменные аппараты. При этом очевидно, что повышение скорости протекания в них теплоносителя является более выгодным с точки зрения уровня отвода теплоты. Так, при скорости протекания теплоносителя 1,5 м/с при перегреве 30 К значение коэффициента теплоотдачи составляет 24 Вт/(м²·К), что соответствует 90 Вт отводимой мощности. Данное обстоятельство подтверждает и рис.3.3, где представлена зависимость коэффициента теплопередачи от скорости движения теплоносителя.

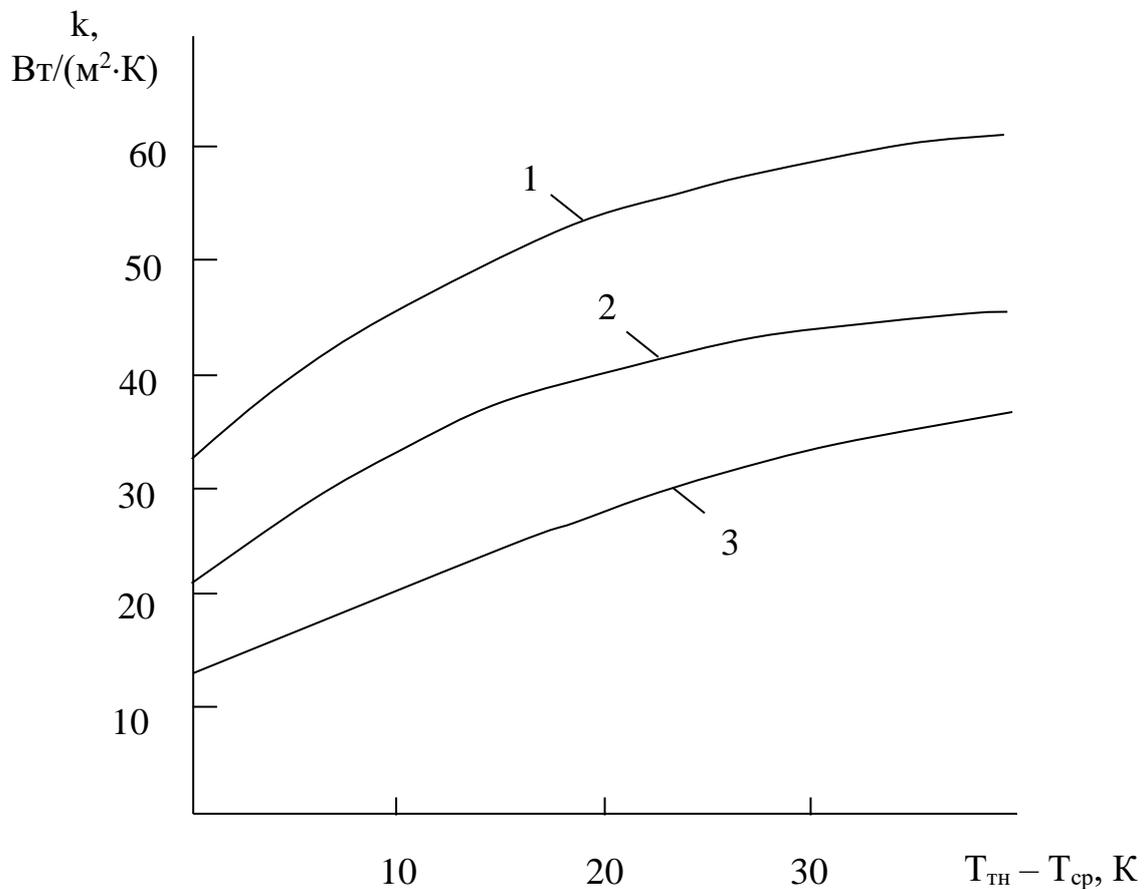


Рис.3.1. Зависимость коэффициента теплоотдачи от перегрева тракта при различных скоростях движения морской воды
 1 - 1,5 м/с; 2 - 1 м/с; 3 - 0,5 м/с

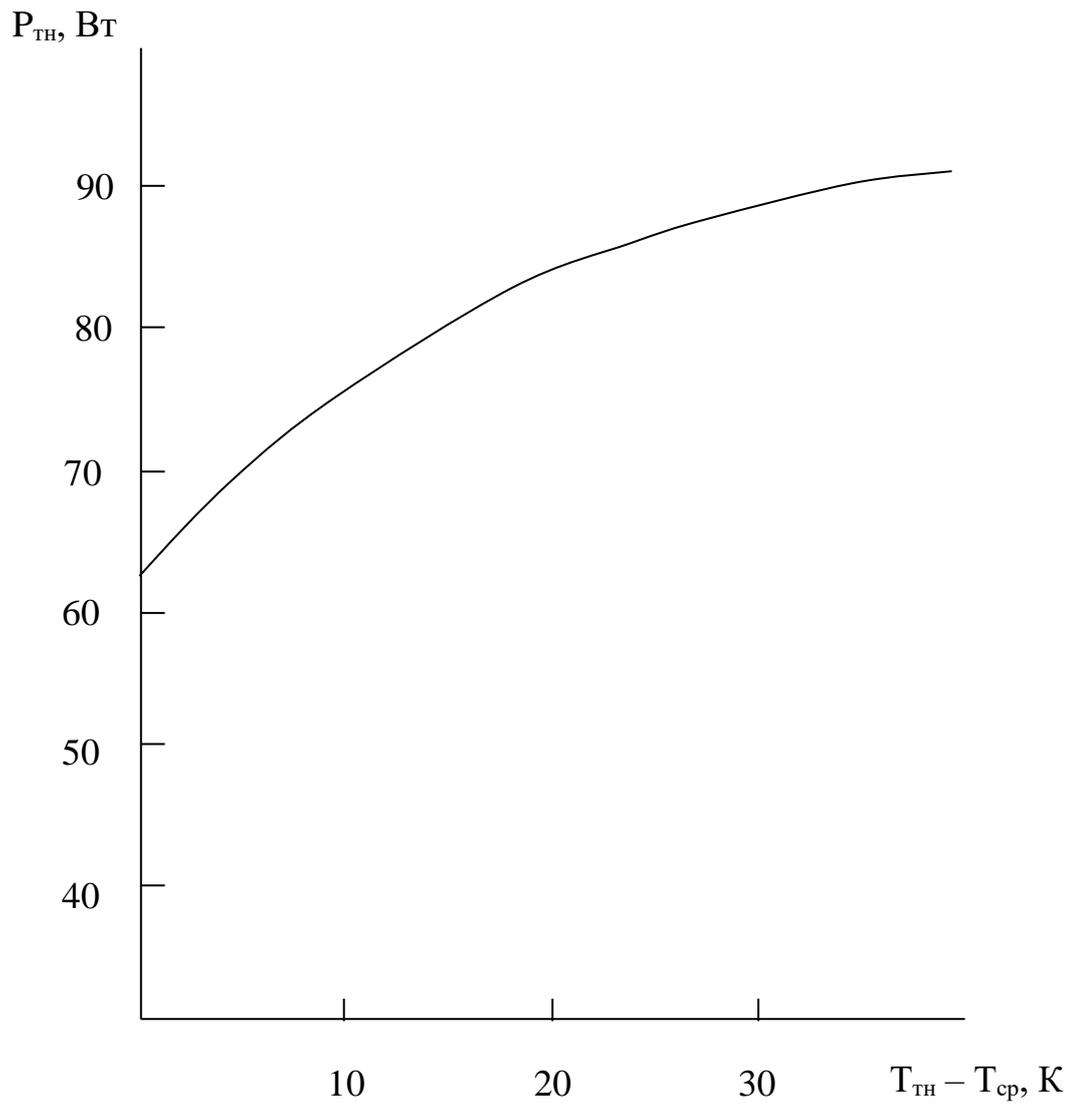


Рис.3.2. Зависимость мощности, рассеиваемой жидкостным теплоотводом от перегрева тракта при $k=24$ Вт/(м²·К)

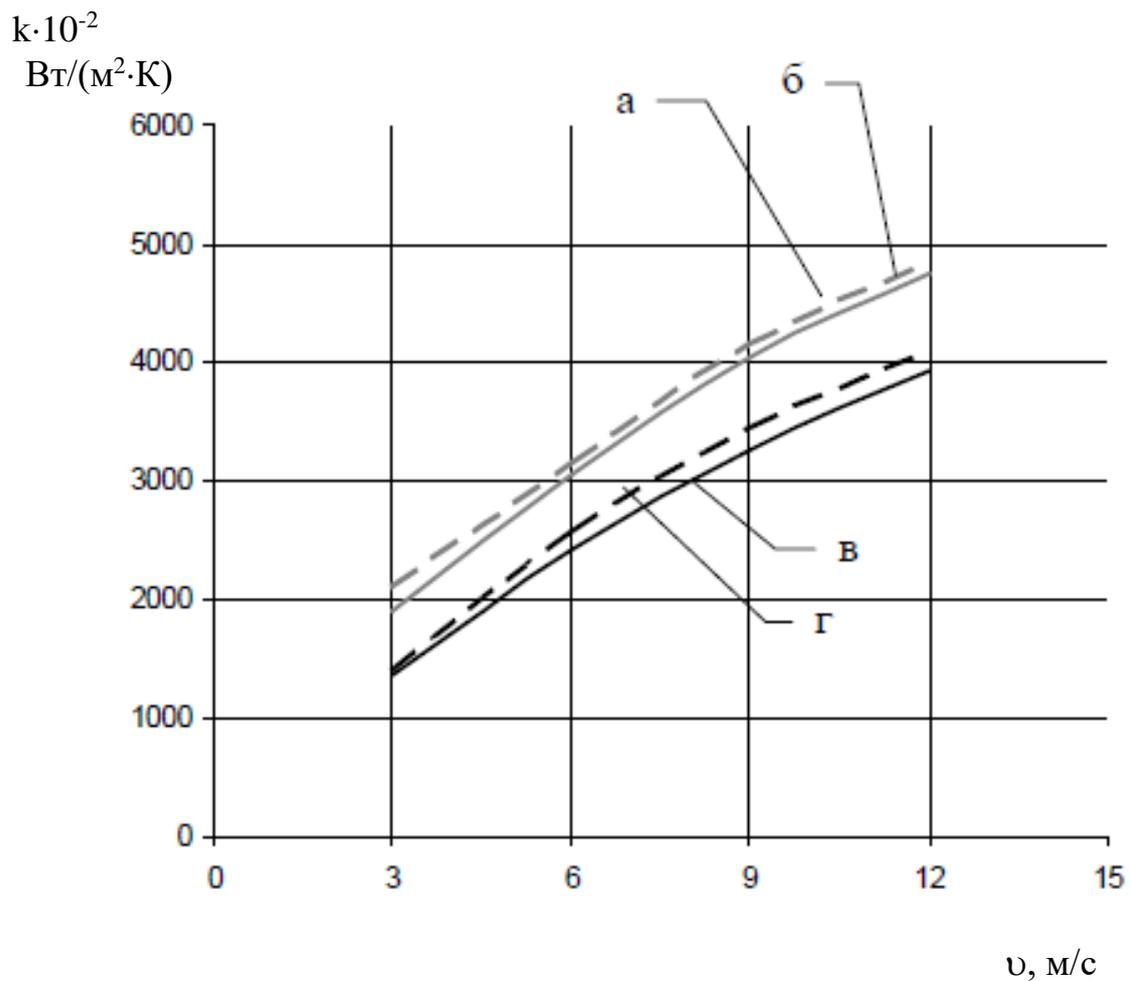


Рис.3.3 Зависимость коэффициента теплопередачи от скорости движения теплоносителя

а – среднее ребро, материал радиатора медь;

б – крайнее ребро, материал радиатора медь,

в – крайнее ребро, материал радиатора алюминий,

г – среднее ребро, материал радиатора алюминий

3.2. Расчет генератора электрической энергии

Теплоэнергетические приборы, основанные на использовании термоэлектрических эффектов Зеебека, Пельтье и Томсона, предназначенные для непосредственного преобразования теплоты в электрическую энергию и обратно, называются термоэлектрическими устройствами. В их состав входят термоэлектрические преобразователи энергии (термоэлементы), состоящие из ветвей, выполненных из полупроводниковых материалов и коммутационных элементов. Термоэлектрическое устройство, содержащее более двух последовательно соединенных термоэлектрических преобразователей, называется ТЭБ. Термоэлектрическое устройство, предназначенное для преобразования тепловой энергии в электрическую называется ТЭГ.

ТЭГ состоит из блока термоэлементов электрически соединенных между собой и образующих ТЭБ, нагревателя, обеспечивающего приток теплоты, к горячим спаям, и системы охлаждения холодных спаев, который в комплексе называется ТЭМ. Положительные ветви термоэлементов изготавливаются из сплава сурьмы с цинком или сплава сурьмы, теллура и висмута. Отрицательные ветви изготавливают либо из сплава висмута с сурьмой, либо из константановой проволоки. В настоящее время разработано и исследовано многочисленное количество других материалов для ветвей термоэлементов.

Рассмотрим работу термоэлемента, работающего в режиме генерации электрической энергии (рис.3.10) [15]. Классический термоэлемент состоит из двух ветвей, которые электрически с помощью коммутационных элементов соединены последовательно. Ветви изготавливаются из полупроводникового термоэлектрического материала: один р-, а другой n-типа проводимости. Наличие ветвей разных типов проводимости дает возможность складывать их термо-э.д.с. с помощью коммутационных элементов, которые непосредственно припаиваются к ветвям термоэлемента. К коммутационным элементам на холодном спае термоэлемента подсоединяется нагрузка R.

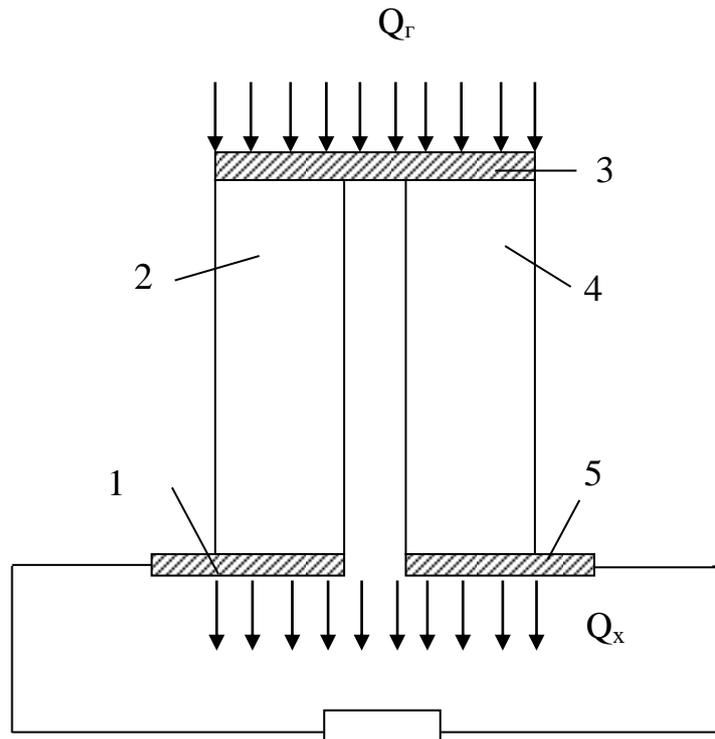


Рис.3.10. Схематический разрез термоэлемента, работающего в режиме ТЭГ

Если к горячему спаю термоэлемента подвести некоторый поток теплоты Q_g при температуре T_g , а от холодного спаю отвести некоторый поток тепла Q_x при температуре T_x , то под действием перепада температур на спаях термоэлемента ΔT , согласно эффекту Зеебека, возникнет термо-э.д.с. $E_{тэ}$. При условии независимости термоэлектрических свойств от температуры

$$E_{тэ} = (\alpha_p + \alpha_n) \Delta T, \quad (3.24)$$

где α_p и α_n – абсолютные величины коэффициентов термо-э.д.с. ветвей р- и n-типов соответственно.

Под действием термо-э.д.с. E по замкнутой цепи термоэлемента, включающей полезную нагрузку R , потечет электрический ток I .

Внутреннее сопротивление термоэлемента $r_{тэ}$ состоит из сопротивлений ветвей соответственно r_p и r_n , и сопротивления коммутационного элемента r_k :

$$r_{тэ} = r_p + r_n + r_k.$$

Представим сопротивление коммутационного элемента в виде относительной величины

$$k = \frac{r_k}{r_p + r_n},$$

а величины сопротивлений ветвей представим через их геометрические размеры и удельные сопротивления термоэлектрических материалов.

Тогда

$$r_{тэ} = \left(\rho_p \frac{\ell}{S_p} + \rho_n \frac{\ell}{S_n} \right) (1 + m), \quad (3.25)$$

где S_p и S_n - площади поперечных сечений ветвей соответственно р- и п-типов, ρ_p и ρ_n - удельные сопротивления ветвей термоэлемента соответственно р- и п-типов; ℓ - длина ветвей; .

Полное сопротивление термоэлектрической цепи равно $r_{тэ} + R$. Представим также полезную нагрузку в виде относительной величины $K = R/r_{тэ}$, которая называется относительной полезной нагрузкой. Тогда общее сопротивление цепи будет равно $r_{тэ} (1 + K)$. Таким образом, согласно закону Ома, ток в цепи ТЭБ будет определяться выражением:

$$I = \frac{E_{тэ}}{(1 + K)r_{тэ}}, \quad (3.26)$$

а напряжение на нагрузке

$$U = \frac{K}{1 + K} E_{тэ}. \quad (3.27)$$

Полезная электрическая мощность, вырабатываемая ТЭГ будет определяться по формуле

$$W_{тэ} = UI = \frac{K}{(1 + K)^2} \frac{E_{тэ}^2}{r_{тэ}} = \frac{K}{(1 + K)^2} \frac{(\alpha_p + \alpha_n)^2 \Delta T^2}{\left(\rho_p \frac{\ell}{S_p} + \rho_n \frac{\ell}{S_n} \right) (1 + k)}. \quad (3.28)$$

Отношение $\frac{E_{тэ}^2}{r_{тэ}}$ является максимальной электрической мощностью, вырабатываемой в цепи термоэлемента, когда сопротивление этой цепи

минимально, т. е. при $R=0$. Указанный случай соответствует режиму короткого замыкания.

Значение $\frac{K}{(1+K)^2}$ определяет уменьшение электрической мощности из-за необратимых джоулевых потерь на внутреннем сопротивлении термоэлемента. Вместе с потерями теплоты за счет конечной теплопроводности термоэлектрических материалов, джоулевы потери являются основными необратимыми процессами в термоэлементе.

Энергетические свойства ТЭГ определяются его коэффициентом полезного действия ε - отношением выходной полезной электрической мощности P к тепловой входной мощности:

$$\varepsilon = P/Q. \quad (3.29)$$

КПД ТЭГ зависит от:

- свойств полупроводниковых материалов (коэффициента теплопроводности, удельного сопротивления и коэффициента термо-э.д.с.;
- разности температур между спаями ТЭБ;
- отношения сопротивления нагрузки к внутреннему сопротивлению термоэлемента.

Максимальное значение КПД термоэлемента определяется по формуле:

$$\varepsilon_{\max} = \frac{(T_1 + T_2)\sqrt{1 + ZT_{\text{ср}}} - 1}{T_2\sqrt{1 - ZT_{\text{ср}}} + (T_1 / T_2)}, \quad (3.30)$$

где $T_{\text{ср}} = (T_1 + T_2)/2$, $Z = (a_1 + a_2)^2 / (\sqrt{\lambda_1 \rho_1} \sqrt{\lambda_2 \rho_2})$

Смысл параметра Z может быть понят исходя из следующих соображений. Термо-э.д.с. ε при разности температур ΔT тем больше, чем больше коэффициент термо-э.д.с. α , а наибольшая мощность на нагрузке пропорциональна величине α^2 / ρ , что то же самое α^2 / σ , где σ - удельная проводимость вещества. Разность температур ($\Delta T = T_r - T_x$) определяется теплопроводностью ветвей ТЭБ λ_1 и λ_2 . Чем меньше значение λ , тем больше к.п.д. преобразователя.

Вышеприведенные формулы дают возможность вычислить все электрические параметры ТЭГ, а также его КПД, если известны его размеры, свойства материалов, а также количество теплоты, подводимой к его спаям.

Основываясь на найденные ранее значения подводимой и отводимой мощности к спаям термоэлектрического генератора, а также предполагая следующие параметры термоэлектрического материала: теплопроводность - $1,5 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, удельное электрическое сопротивление - $10,65\cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$, теплоемкость - $123 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$, коэффициент термо-э.д.с. - $0,2\cdot 10^{-3} \text{ В/К}$, и размеры ветвей термоэлементов - $2\cdot 2\cdot 2 \text{ мм}$ – на рис3.4-3.5 приведены основные характеристики исследуемого прибора.

E, В

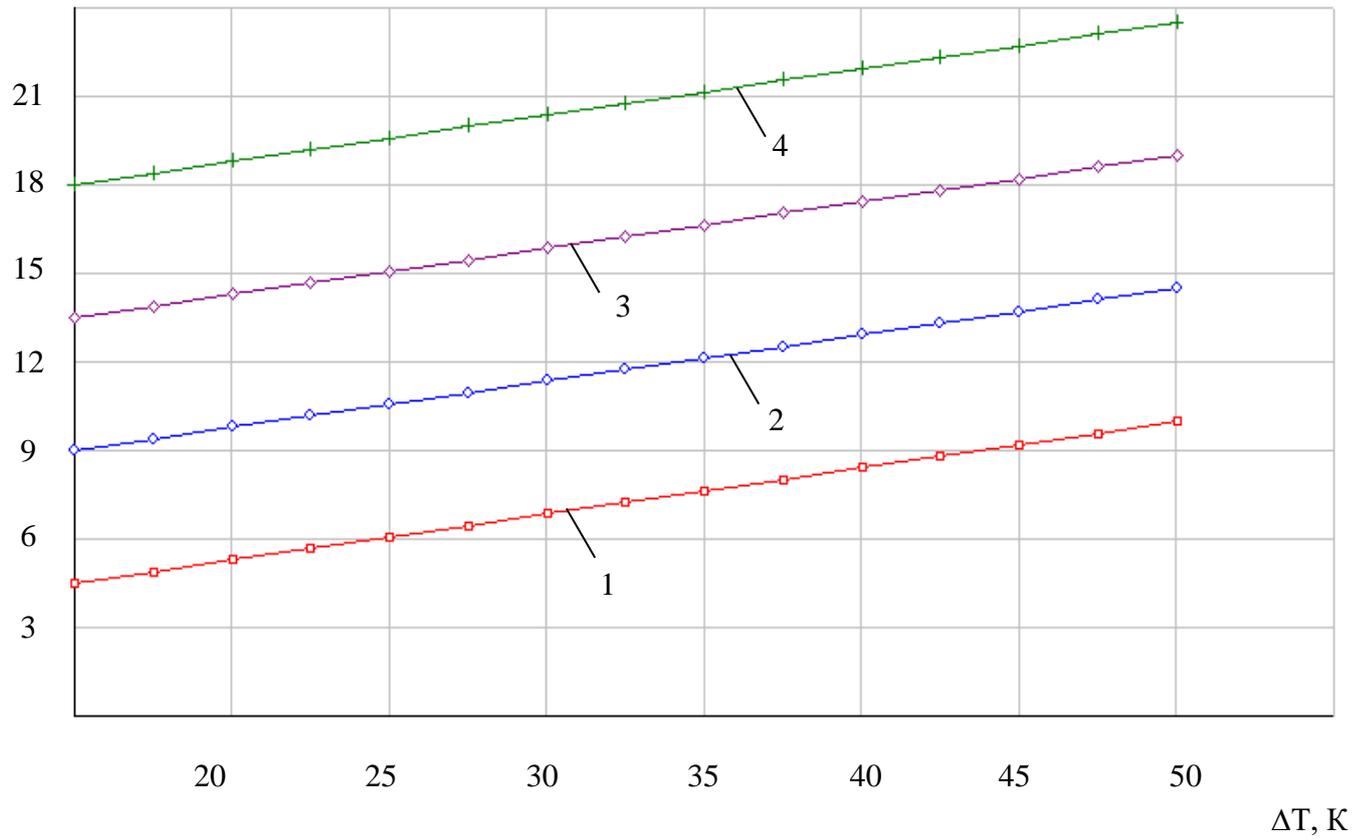


Рис.3.4. Зависимость изменения величины ЭДС от перепада температур между саями ТЭГ при различных коэффициентах теплообмена с окружающей средой

1 – $\alpha_{cp}=1,5$ Вт/м²·К, 2 – $\alpha_{cp}=2,5$ Вт/м²·К, 3 – $\alpha_{cp}=3,5$ Вт/м²·К, 4 – $\alpha_{cp}=4,5$ Вт/м²·К,

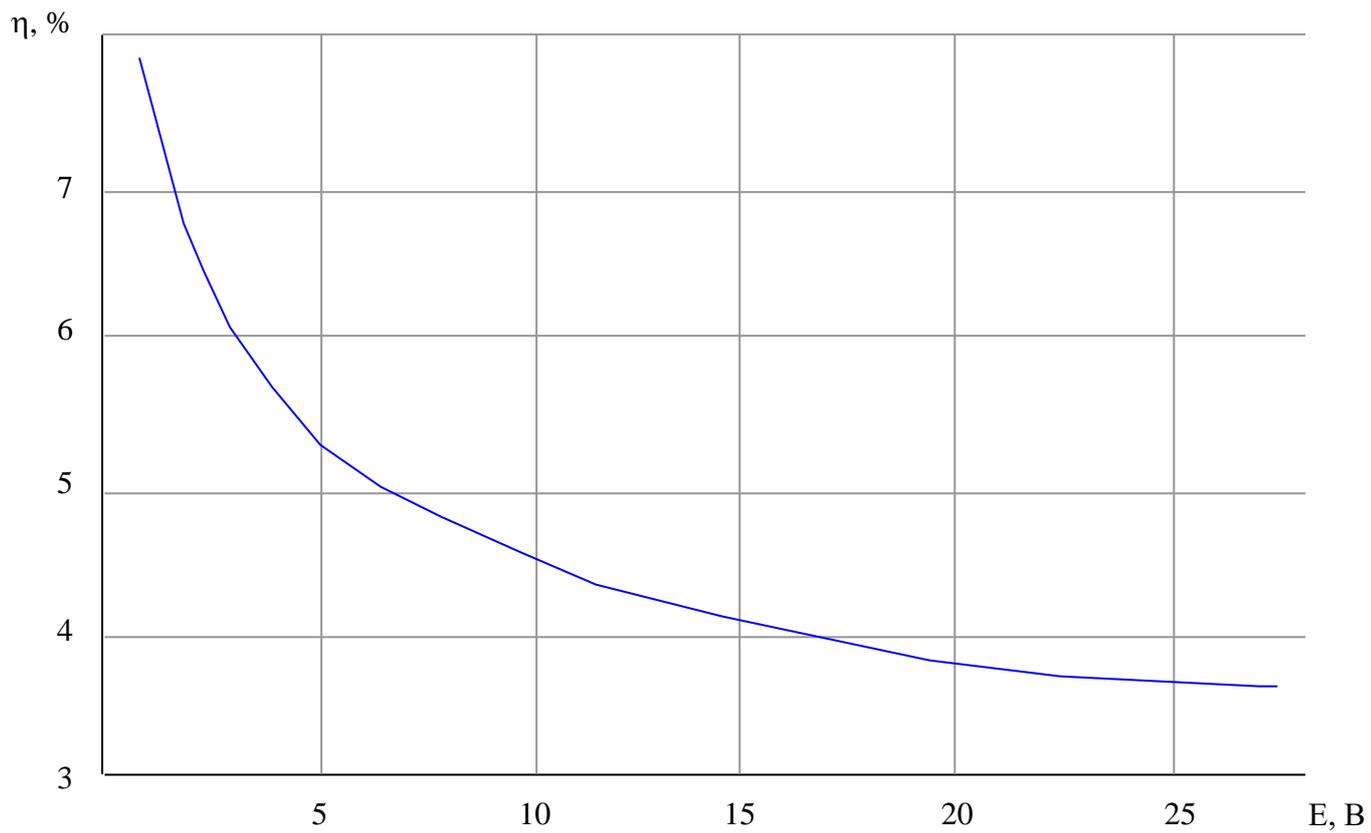


Рис.3.5. Зависимость изменения КПД ТЭГ от термо-э.д.с.

4. Конструкции термоэлектрических генераторов проточного типа

4.1. Конструкция термоэлектрического генератора проточного типа с продольными ребрами

В настоящее время задача разработки эффективных генераторов электрической энергии, отличающихся высокой надежностью и значительным ресурсом работы является все более необходимой и актуальной. Это связано с возрастающими требованиями к тактико-техническим, энергетическим и надежностным параметрам теплообменных аппаратов в приборах и комплексах различного назначения.

Среди существующих в настоящее время большого многообразия генераторов электрической энергии, функционирующих на основе различных физических эффектов, значительными преимуществами при мощностях в пределах 100-300 Вт обладают ТЭГ. Генераторы на их основе обладают следующими достоинствами:

- практически неограниченный ресурс работы;
- не имеют изнашивающихся и трущихся элементов, а значит, бесшумны в работе, характеризуется низким уровнем вибраций;
- экологически безопасны;
- высокая функциональная гибкость;
- исключительно высокая надежность;
- выгодные массогабаритные характеристики и т. п.

Предлагаются к рассмотрению конструкции трубчатых ТЭГ с продольными и поперечными ребрами. Конструктивно такие аппараты представляют собой трубу многогранного сечения, на гранях которой первыми спаяны смонтированы ТЭБ, ко вторым спаями которых припаяны ребра. В зависимости от типа и способа размещения ребер на

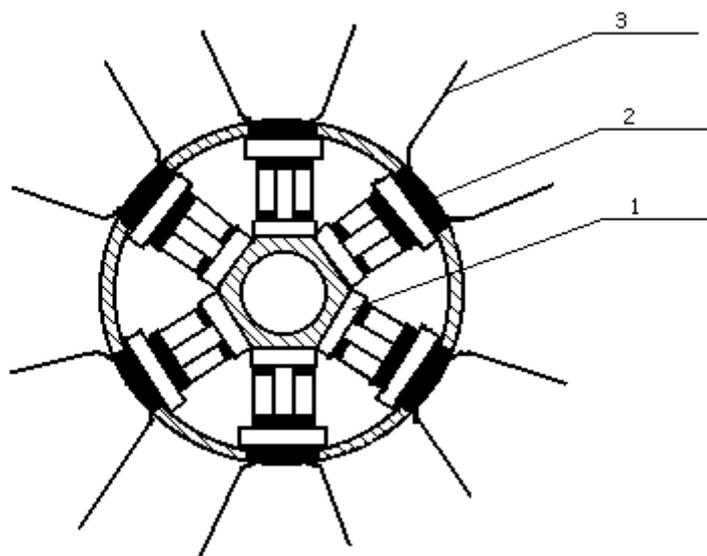
тепловыделяющих саях ТЭБ ТЭГ выполняются с продольными и поперечными ребрами.

Данные устройства предназначены для применения в энергетическом комплексе для выработки электроэнергии с использованием низкопотенциальных источников теплоты и других приборах аналогичного назначения.

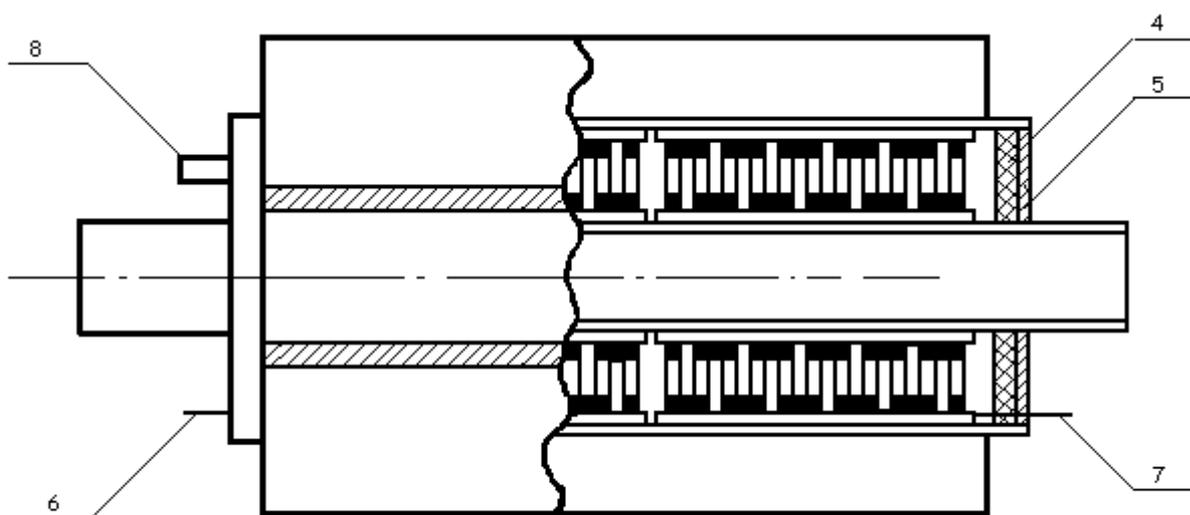
Конструкция трубчатого ТЭГ с продольными ребрами изображена на рис.4.1.

ТЭГ содержит две выполненные из высокотеплопроводного материала и коаксиально установленные трубы: внешнюю, снабженную радиальными отверстиями в виде прорезей, и внутреннюю, выполненную в виде многогранника. Устройство также содержит собранные из ТЭ ТЭБ, электрически соединенные между собой посекционно - последовательно (рис.4.2). ТЭБ установлены своими первыми саями на гранях внутренней трубы по всей ее длине. Вторые спаи ТЭМ, расположенные в радиальных отверстиях внешней трубы на уровне ее поверхности, снабжены продольными ребрами, присоединенными у основания к поверхности внешней трубы.

Через торцы герметизированного межтрубного пространства выведены электрические клеммы и патрубок для откачки воздуха.



а)



б)

Рис.4.1. Конструкция термоэлектрического теплообменного аппарата с продольными ребрами. а) вид сбоку; б) вид спереди в разрезе

ТЭГ состоит из шестигранной медной трубы 1, на гранях которой по всей длине установлены 36 унифицированных ТБ 2 (каждая батарея состоит из 16 ТЭ), электрически соединенных между собой посекционно - последовательно. К холодным срям батарей, установленных на каждой из граней, припаяна медная фольга 3. После установки этой конструкции в трубу с отверстиями 4 фольга 3 распрямляется и припаивается к наружной поверхности трубы 1, а оставшаяся часть фольги сгибается под углом 90° к поверхности трубы. Для герметизации и последующего вакуумирования межтрубного пространства в концы батареи вставлены резиновые прокладки 5, сверху залитые эпоксидной смолой 6, через которые выведены клеммы питания 7 и 8 и патрубков для откачки воздуха 9.

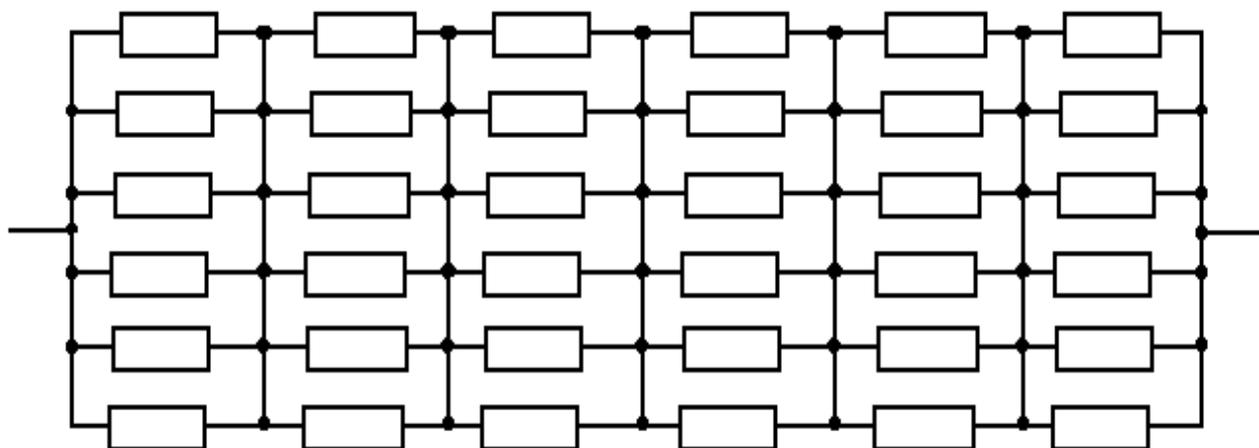


Рис.4.2. Электрическая схема последовательно посекционного соединения ТЭБ

4.2. Конструкция термоэлектрического генератора проточного типа с поперечными ребрами

Модификацией рассмотренного в предыдущем параграфе термоэлектрического теплообменного аппарата является термоэлектрический теплообменный аппарат проточного типа с поперечными ребрами. Главным отличительным признаком данного теплообменного аппарата является изменение ориентации ребер радиатора, располагаемого на горячем спае ТЭБ, в пространстве. Если в приборе, рассмотренном в параграфе 4.1, ребра радиатора располагались вдоль длины ТЭБ, то в данном случае ребра радиатора выполнены в поперечном направлении по отношению к ТЭБ. Использование радиатора на внешнем спае ТЭБ подобного типа определяет новую область применения ТЭГ. В данном случае эта область – использование теплообменного аппарата при охлаждении или нагреве потоков жидкости, движение которых происходит в направлении, перпендикулярном теплообменному аппарату. Если рассмотренный выше ТЭГ проточного типа с продольными ребрами был более эффективен при охлаждении и нагреве потоков воздуха или жидкости, направленных только вдоль его длины, то данный аппарат проточного типа с поперечными ребрами в данном случае может быть еще использован еще и для случая радиального направления потока жидкости или газа по отношению к ТЭБ. Это обстоятельство объясняется улучшением теплообмена радиатора с воздушным потоком за счет увеличения коэффициента теплоотдачи с ребренной подобным образом поверхности.

Конструкция проточного типа с поперечными ребрами приведен на рис.4.3.

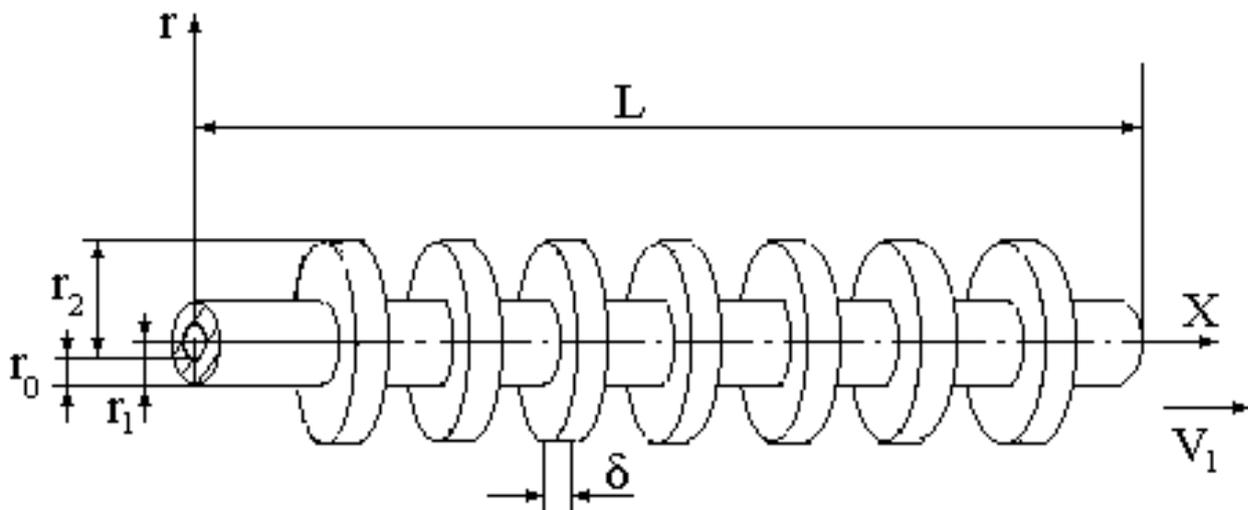


Рис.4.3. Конструкция термоэлектрического теплообменного аппарата с поперечными ребрами

В ТЭГ ТЭБ состоит из 48 ТЭ высотой 5 мм и диаметром столбиков полупроводникового вещества 7,8 мм, скоммутированных последовательно. Несущим элементом ТЭБ является восьмигранная труба, выполненная из материала с высоким удельным коэффициентом теплопроводности (меди), на гранях которой через электроизолированные теплопереходы установлены на легкоплавком припое ТЭ. К внешним саям ТЭБ присоединен радиатор, выполненный из алюминия, и имеющий ребра, расположенные в поперечном направлении. Радиатор изготовлен из цельного алюминиевого бруска цилиндрической формы путем проточки его в радиальном направлении через равные промежутки по всей длине. Для защиты от влаги ТЭ и теплопереходы залиты теплоизолирующим материалом.

4.3. Конструкция термоэлектрического генератора проточного типа с поперечными ребрами, выполненными сегментарно

Для улучшения энергетических, массогабаритных и надежностных характеристик ТЭГ с поперечными ребрами разработана его модифицированная конструкция с ребрами радиатора, выполненными сегментарно (рис.4.4.).

ТЭГ проточного типа состоит из медной трубы с квадратным сечением, на каждую грань которой установлены двенадцать ТЭ, где использованы полупроводниковые ветви круглого сечения диаметром 7,8 мм и высотой 4 мм, соединенные между собой последовательно. К другим саям ТЭ, расположенных на одной грани, припаян сектор ребер высотой 15 мм и толщиной 1 мм, выполненных из меди. Изоляция ТЭ от окружающей среды осуществлена посредством эпоксидного компаунда. Подводящие провода выведены из ТЭГ и подключаются к потребителю постоянного электрического напряжения.

С целью увеличения надежности и технологии сборки разработан ТЭГ трубчатой конструкции с поперечными ребрами, выполненными сегментарно, в котором вместо отдельных ТЭ использованы ТЭМ, состоящие из 16 ветвей. Для удобства регулирования и повышения надежности, все 24 ТЭМ в ТЭБ, используемой в теплообменнике, были секционированы на 4 секции по 6 модулей, расположенных на одной грани.

Отличительным признаком данного типа конструктивного исполнения ТЭГ проточного типа является возможность использования его для случаев, когда потоки жидкости перемещающегося как вдоль его длины, так и в радиальном направлении. Использование данного варианта ТЭГ при изменении температуры потоков теплоносителей, как в продольном, так и в радиальном направлении возможно за счет специальной конструкции радиатора на внешнем спае ТЭБ, выполненным с сегментарными ребрами.

Кроме того, конструкция ТЭГ с подобным радиатором отличается лучшими массогабаритными и надежностными характеристиками.

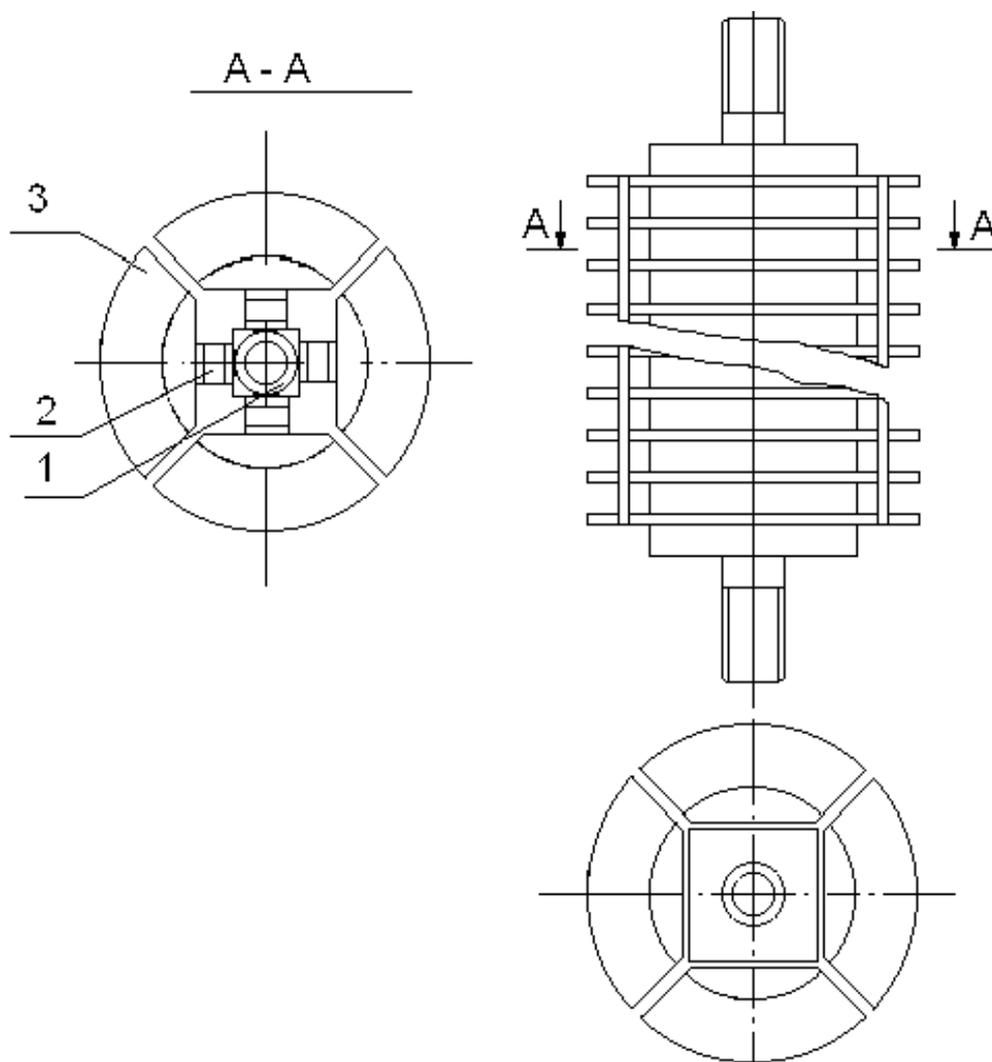


Рис.4.4. Конструкция термоэлектрического теплообменного аппарата с поперечными ребрами, выполненными сегментарно

Заключение

При выполнении магистерской диссертационной работы предложена конструкция ТЭГ проточного типа, характеризующаяся наличием теплообменных аппаратов с протекающими в них холодными и горячими теплоносителями, контактирующих со спаями термоэлементов.

В диссертации на основе критического обзора литературных источников рассмотрены прикладные аспекты термоэлектрического преобразования энергии, указаны достоинства и преимущества существующих ТЭГ. Рассмотрены основные тенденции развития термоэлектрического приборостроения, уровень промышленного производства термоэлектрических преобразователей энергии и приборов на их основе, существующие проблемы, ограничивающие практическое использование термоэлектрической техники.

Рассмотрены непосредственно конструкции термоэлектрических преобразователей и ТЭГ. Особое внимание уделено существующим возможностям повышения энергетической эффективности ТЭГ. Изучены их конструктивные варианты и приложение в технике.

При моделировании ТЭГ определены его выходные электрические параметры, в частности значения генерируемой ЭДС, а также коэффициент полезного действия. Моделирование генератора произведено в два этапа. Первым этапом явился расчет жидкостных теплообменных аппаратов, в которых протекают холодный и горячий теплоносители и определение их усредненной температуры. Далее производился расчет электрических параметров ТЭГ.

Совокупность результатов проведенных исследований дает возможность использовать их в качестве научной основы в дальнейшем при создании новых высокоэффективных ТЭГ.

Литература

1. Анатычук Л.И. Рациональные области исследований и применений термоэлектричества // Термоэлектричество, 2000. - № 4.
2. Анатычук Л.И. Современное состояние и некоторые перспективы термоэлектричества // Термоэлектричество. – 2007. - №2.
3. Анатычук Л.И. Термоэлектричество. Т. 2. Термоэлектрические преобразователи энергии. – Киев, Черновцы: Институт термоэлектричества, 2003.
4. Белик В.Д., Урюков Б.А., Фролов Г.А. Ткаченко Г.В. Численно-аналитический метод решения нелинейного нестационарного уравнения теплопроводности // Инженерно-физический журнал. - 2008. - №6.
5. Булат Л.П. Прикладные исследования и разработки в области термоэлектрического охлаждения в России // Холодильная техника. - 2009. - № 7.
6. Булат Л.П. Нанотехнологии в холодильной технике // Холодильная техника. - 2010. - №2.
7. Баукин В. Е., Вялов А. П., Гершберг И. А., Муранов Г. К., Соколов О. Г., Тахистов Ф. Ю. Оптимизация термоэлектрических генераторов большой мощности // Термоэлектрики и их применения. Доклады VIII Межгосударственного семинара. - СПб: ФТИ, 2002.
8. Дилевская Е.В., Станкевич И.В., Попков-Мелентьев А.А. Численное решение нелинейных задач теплопроводности // Вестник МАХ. - 2009. - №2.
9. Дударев Ю.И., Максимов М.З., Сабо Е.П., Хагба Г.С., Дударева С.Ю. Температурное поле термоэлектрических охлаждающих систем в двумерном нестационарном случае // Доклады VIII Межгосударственного семинара «Термоэлектрики и их применение». - Санкт-Петербург, 2002.

10. Дульнев Г.Н. Теория тепло- и массообмена. - СПб.: СПбНИУИТМО, 2012.
11. Исмаилов Т.А. Термоэлектрические полупроводниковые устройства и интенсификаторы теплопередачи. - СПб.: Политехника, 2005.
12. Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. - М.: Высшая школа, 2001.
13. Кондратьев Г.М., Дульнев Г.Н., Платунов Е.С., Ярышев Н.А. Теплообмен в приборостроении. - СПб.: ГУИТМО, 2004.
14. Малкович Б.Е.-Ш. Термоэлектрические модули на основе сплавов теллурида висмута // Доклады XI Межгосударственного семинара «Термоэлектрики и их применение». - Санкт-Петербург, 2008.
15. Охотин А. С., Ефремов А. А., Охотин В. С., Пушкарский А. С. Термоэлектрические генераторы. - М.: Атомиздат, 1971.
16. Патент РФ на изобретение № 2347916 Комбинированная система теплоэнергоснабжения // Колпаков В.И., Колпаков А.В., Вареница Е.В., опубл. 27.02.2009, бюл. № 63.
17. Патент РФ на изобретение № 2298655 Способ работы тепловой электрической станции // Шарапов В.И., Кубашов С.Е., опубл. 10.05.2007, бюл. № 13.
18. Патент РФ № 2425297 Теплообменник / Алексеев В.А. - 2011.
19. Патент РФ № 2282274. Термоэлектрическая батарея / Исмаилов Т.А., Вердиев М.Г., Евдулов О.В., 2006.
20. Патент РФ № 2543697. Термоэлектрическое устройство / Лимбек З., Брюкк Р., 2015.
21. Патент РФ № 2563550. Полупроводниковый элемент для термоэлектрического модуля и способ его изготовления / Брюкк Р., 2015.
22. Пилипенко Н. В., Гладских Д. А. Решение прямых и обратных задач теплопроводности на основе дифференциально – разностных моделей // Известия вузов. Приборостроение. - 2007. - т. 50, № 3.

23. Поздняков Б.С., Коктейлев Е.А. Термоэлектрическая энергетика. - М.: Атомиздат, 1974.
24. Рубан С.С. Нетрадиционные источники энергии. - М.: Энергия. - 2003.
25. Самарский А.А., Вабшцевич П.Н. Вычислительная теплопередача. - М.: Едиториал УРСС. - 2003.
26. Сергиенко О.И., Булат Л.П., Копыльцова С.Е., Староверова В.А., Гужва М.Е., Виноградов А.С. Экологические аспекты термоэлектрического охлаждения // Термоэлектричество. - 2010. - № 4.
27. Струтинский М.Н. Компьютерные технологии в термоэлектричестве // Термоэлектричество, 2009. - № 4.
28. Сухов В.В., Казаков Г.М. Основы конструирования и расчета теплообменных аппаратов. - Нижний Новгород: НГАСУ. - 2009.
29. Такенобу Кадзикава, Риодзи Фунахами Новейшие разработки в области технологии термоэлектрического генерирования электроэнергии в Японии // Термоэлектричество. - 2016. - № 1.
30. Филин С.О., Закшевский Б. Современное состояние и перспективы разработки и производства стационарных термоэлектрических холодильников // Термоэлектричество, 2008. - № 2.
31. Шарков А.В., Тахистов Ф.Ю., Кораблев В.А. Прикладная физика. Термоэлектрические модули и устройства на их основе. / Под ред. проф. А. В. Шаркова. - СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2003.
32. Шило Г.Н., Гапоненко Н.П., Огренич Е.В. Проектирование радиаторов с оптимальными массогабаритными параметрами // технология и конструирование в электронной аппаратуре. - 2011. - №1-2.
33. <http://www.kryotherm.spb.ru>.
34. <http://www.ostrm.ru>.
35. <http://ite.inst.cv.ua>.
36. <http://www.rifcorp.ru>.
37. <http://www.marlow.com>.
38. <http://www.termiona.ru>.

39. <http://www.melcor.com>.
40. <http://www.adv-engineering.ru>.
41. <http://thermointech.ru>.
42. <http://www.thermat.jp>.