



А.Б. Сулин

**СХЕМНЫЕ РЕШЕНИЯ И ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ И  
ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ**

Санкт-Петербург  
2020

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

А.Б. Сулин

**СХЕМНЫЕ РЕШЕНИЯ И ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ И  
ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ  
УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ**

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ  
ИТМО

по направлению подготовки 16.03.03 Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения, 16.03.03 Низкотемпературная энергетика, 16.04.03 Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения в качестве учебно-методического пособия для реализации

основных профессиональных образовательных программ высшего образования бакалавриата, магистратуры

 УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург  
2020

Сулин А.Б. Схемные решения и принципы проектирования термоэлектрических систем охлаждения и термостатирования – СПб: Университет ИТМО, 2020 г. – 40 с.

Рецензенты:

Пронин Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор, профессор (квалификационная категория "ординарный профессор") факультета низкотемпературной энергетики, Университета ИТМО.

Учебное пособие посвящено предметной области прямого преобразования энергии, а именно – термоэлектрическим системам охлаждения и термостатирования, реализующим эффект Пельтье в электрических цепях из полупроводников «р» и «n» типа проводимости. Информация структурирована в виде семантических сетей, описывающих такие понятия, как «термоэлектрические системы охлаждения и термостатирования», «термоэлектрическая батарея» и «теплообменник». Приведен пример анализа необратимых потерь в термоэлектрической системе, на основе которого разработана альтернативная тепловая схема системы на базе двухфазных гравитационных термосифонов с измененным направлением тепловых потоков. По каждому разделу пособия предложены контрольные вопросы для самостоятельного усвоения материала.

 УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

**Университет ИТМО** – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2020  
© Сулин А.Б., 2020

## Содержание

Введение	4
Раздел I. ТЭСОиТ как предметная область знаний	6
Выводы по разделу	11
Контрольные вопросы по разделу	11
Раздел II. Структурирование информации в области ТСОиТ	11
Выводы по разделу	16
Контрольные вопросы по разделу	17
Раздел III. Схемные решения и анализ необратимых потерь в ТЭСОиТ	17
Выводы по разделу	24
Контрольные вопросы по разделу	25
Раздел IV. Построение альтернативной тепловой схемы	25
Выводы по разделу	29
Контрольные вопросы по разделу	30
Раздел V. Методология проектирования ТЭСОиТ	30
Выводы по разделу	36
Контрольные вопросы по разделу	37
Заключение	37
Литература	37

## Введение

Учебное пособие посвящено предметной области прямого преобразования энергии, а именно – термоэлектрическим системам охлаждения и термостатирования, направленное на такие дисциплины как: проектирование систем кондиционирования и жизнеобеспечения, тепловые насосы в системах жизнеобеспечения, тепловые насосы в системах кондиционирования, тепловые насосы и термоэлектрические устройства. Открытие эффектов Пельтье и Зеебека заложило основу термоэлектрической трансформации тепловой и электрической энергии в твердотельных устройствах, не использующих жидких и газообразных рабочих тел и не имеющих движущихся частей. Развитие твердотельных преобразователей, которое сдерживалось низкой эффективностью термоэлектрических явлений в металлах, получило мощный импульс благодаря работам А.Ф. Иоффе и учеников его школы в области синтеза высокоэффективных полупроводниковых материалов (1950-е годы). Бурный рост исследований в области термоэлектрических преобразователей в 60-е – 70-е годы был обусловлен новыми прикладными проблемами, возникающими перед техникой и энергетикой в тот период (освоение космического пространства и труднодоступных регионов планеты, развитие радиоэлектронной промышленности, исследования в области медико-биологических проблем и др.) [1-4].

Несмотря на то, что стоимость холода, получаемого методом термоэлектрического охлаждения, снизилась с начала 60-х годов более чем на порядок, термоэлектрическое преобразование теплоты все еще имеет ограничения по применению в связи с относительно низкой термодинамической эффективностью. Термодинамические ограничения применимости термоэлектриков должны учитываться в практике проектирования наряду со следующими преимуществами твердотельных термоэлектрических преобразователей.

1. Отсутствие токсичных рабочих тел.
2. Отсутствие шума и вибрации (кроме побудителей расходов)
3. Простота управления и возможность реверсирования теплового потока.
4. Быстрый выход на режим
5. Теоретически неограниченный ресурс работы.
6. Гравитационная независимость.
7. Простота агрегатирования и взаимозаменяемость.
8. Высокая конструктивная пластичность.
9. Хорошие массогабаритные характеристики.
10. Эффективность при малых тепловых нагрузках

К настоящему времени термоэлектрические трансформаторы теплоты (охладители, тепловые насосы, интенсификаторы теплопередачи, теплоизоляторы) представляют собой обширную предметную область знаний. На рисунке 1 приведена структура понятия термоэлектрическая система охлаждения и термостатирования (ТЭСОиТ).

<b>ТЭСОиТ</b>	
<b>назначение</b>	воздухоохладитель, льдогенератор, хл.машина, криостат , термостат, замораживающая панель
<b>область применения</b>	бытовая, транспортная, промышленная, лабораторная, медицинская, биологическая, космическая, специального назначения
<b>составные части</b>	термоэлектробатарея, охлаждаемый и нагреваемый теплообмен. охл. и нагр. среда, побудители расхода
<b>энергетические параметры</b>	холодо - и теплопроизводительность, потребляемая мощность, коэффициент преобразования, эксергетическая эффективность
<b>массогабаритные характеристики</b>	масса, габаритные размеры
<b>режим работы</b>	стационарный, нестационарный, квазистационарный

Рисунок 1 – Структура понятия "ТЭСОиТ"

Характерной особенностью ТЭСОиТ являются высокие плотности тепловых потоков (десятки кВт/м<sup>2</sup>), что объясняется поверхностным характером эффекта Пельтье. В этой связи температурные поля в элементах конструкции являются существенно неодномерными, поэтому их проектирование должно строиться на основе соответствующих математических моделей, учитывающих локальный характер источников и стоков теплоты. Таким образом, проектирование ТЭСОиТ должно вестись в направлении снижения технических потерь, с учетом многомерности

процессов теплопередачи в элементах конструкции и в соответствии с тенденцией к повышению производительности данных систем.

## I. ТЭСОиТ как предметная область знаний

*В данном разделе пособия приведены диаграммы тепловых потоков в термоэлектрических трансформаторах теплоты, на основании которых они классифицированы в соответствии с целевым назначением.*

*Приведены тепловые схемы систем при их работе в режимах охлаждения и нагрева для случаев контактного и бесконтактного теплового воздействия.*

Термоэлектрические системы охлаждения и термостатирования (ТЭСОиТ) представляют собой устройства, в которых реализуется эффект Пельтье и обеспечивается поддержание заданной температуры в объекте на уровне ниже или выше температуры окружающей среды. Направления потоков теплоты в ТЭСОиТ различных типов показаны на рисунке 2. В зависимости от требуемого температурного уровня объекта термостатирования и в зависимости от направления потоков тепловой энергии ТЭСОиТ классифицируются следующим образом [5]:

- 1 Охлаждающие устройства
- 2 Тепловые насосы
- 3 Интенсификаторы теплопередачи
- 4 Теплоизоляторы

К первому типу устройств относятся охлаждающие устройства, которые поддерживают температуру в объекте на уровне ниже температуры окружающей среды. При этом в соответствии с законами термодинамики теплота от объекта отводится в теплообменном аппарате, имеющем температуру ниже температуры термостатирования, а в окружающую среду теплота отводится в теплообменном аппарате с температурой выше температуры окружающей среды. Следует отметить, что температурные перепады в теплообменных аппаратах являются необратимыми потерями, которые снижают термодинамическую эффективность устройства и должны быть минимизированы на этапе его проектирования.

Второй тип устройств относится к классу тепловых насосов, в которых обеспечивается поддержание температуры объекта на уровне выше температуры окружающей среды. При этом теплота отводится от окружающей среды и после повышения термодинамического потенциала (температуры) в устройстве передается объекту термостатирования.

Третий класс рассматриваемых ТЭСОиТ называется интенсификаторами теплопередачи. Они предназначены для охлаждения объекта, температура которого выше температуры окружающей среды.

Данные устройства применяются в тех случаях, когда естественного теплообмена вследствие разности температур объекта и окружающей среды недостаточно для обеспечения процесса термостатирования. В интенсификаторах теплопередачи наблюдается совпадение направления естественного потока теплоты от объекта термостатирования к окружающей среде и потока теплоты в ТЭСОиТ. Примером интенсификатора теплопередачи может служить термоэлектрическое устройство охлаждения процессора компьютера.

Используя термоэлектрическое устройство, может быть обеспечен режим теплоизоляции объекта от окружающей среды. На рисунке 2 приведен пример теплоизолятора для случая охлажденного объекта. Режим теплоизоляции достигается за счет поддержания температуры ограждений объекта термостатирования на уровне, равном температуре объекта. При этом не происходит процесс теплообмена между объектом и его ограждениями, что соответствует режиму теплоизоляции.

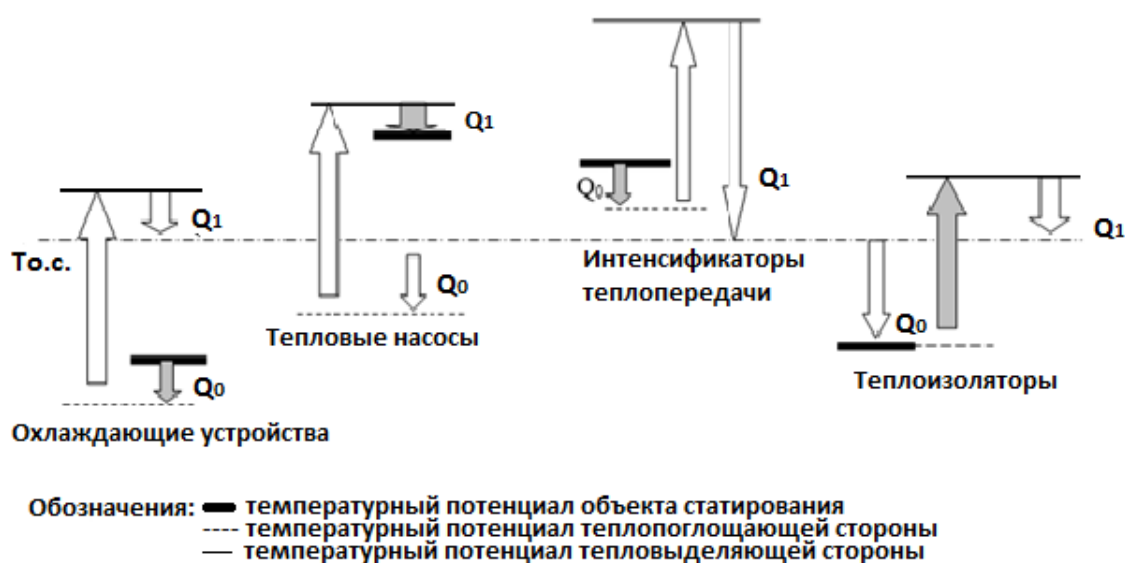


Рисунок 2 - Тепловая диаграмма вариантов ТЭСОиТ

Рассмотрим тепловые схемы ТЭСОиТ, в которых реализуется непосредственный тепловой контакт термоэлектробатареи и объема или элемента термостатирования. В таких схемах промежуточные теплоносители не применяются.

На рисунках 3 и 4 приведены соответственно тепловые схемы для термостатирования объема или элемента. В объеме обеспечивается температура  $T_1$  при температуре среды в районе теплообменника  $T_2$ . Отметим, что в общем случае температура окружающей среды  $T_{22}$  и температура среды в районе теплообменника могут отличаться.



Производительность термоэлектробатареи должна обеспечивать ассимиляцию тепловой нагрузки от внутренних тепловыделений  $W$  и теплопритоков (теплопотерь)  $QT$  со стороны окружающей среды. В частном случае, как приведено на рисунке, теплообменниками, подводщими и отводящими теплоту от термоэлектробатареи, являются радиаторы с соответствующими коэффициентами теплоотдачи. Термоэлектробатарея обеспечивает отвод от объема термостатирования в режиме охлаждения или подвод в объем в режиме нагрева теплового потока  $qb$ .

В случае термостатирования элемента (рисунок 4.6) он находится в тепловом контакте с термоэлектробатареей. Условия теплового контакта в расчете удобно задавать как бесконечно большой (например,  $10^5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$ ) коэффициент теплоотдачи. Величина тепловой нагрузки  $W$  на термоэлектробатарею определяется с учетом возможного рассеивания части выделяемой (поглощаемой) объектом мощности за счет теплообмена с окружающей средой.

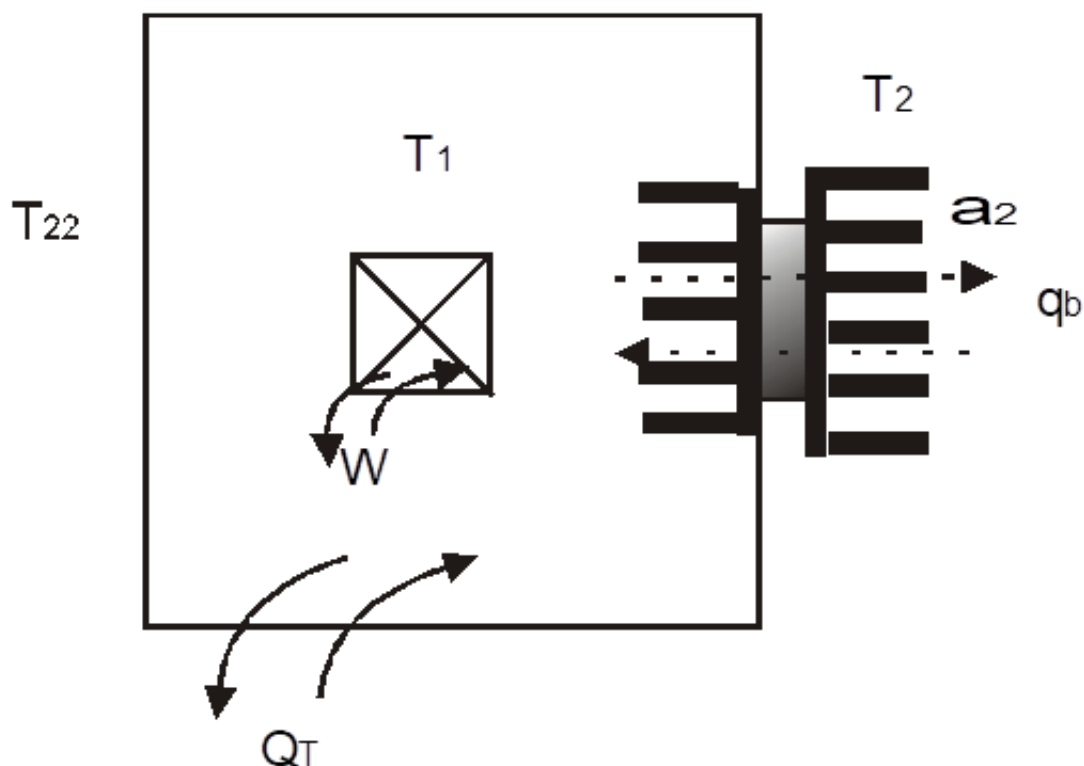


Рисунок 3 - Тепловая схема режима статирования объема

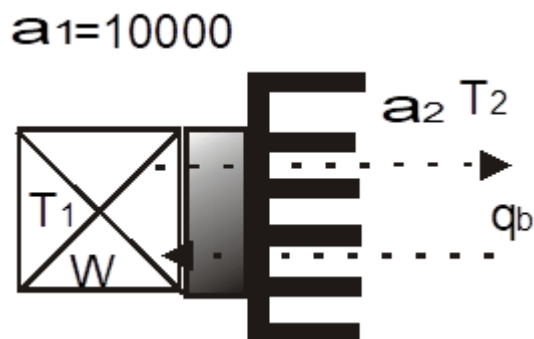


Рисунок 4 - Тепловая схема режима статирования элемента

Рассмотрим шесть характерных режимов работы термоэлектрических устройств. Три режима обеспечивают охлаждение объема (элемента) статирования, и три режима обеспечивают его нагрев.

Тепловые схемы, соответствующие режиму охлаждения, приведены на рисунке 5. При температуре статирования ниже температуры окружающей среды, а также в случае равенства этих температур, термоэлектробатарея работает как охладитель, отводя теплоту от объекта в окружающую среду с использованием того или иного типа теплообменных устройств.

Частным случаем режима охлаждения объекта является режим интенсификации теплопередачи, когда естественный температурный напор способствует отводу теплоты от объема (элемента) статирования ( $T_1 > T_2$ ). При этом за счет термоэлектробатареи развивается дополнительная холодопроизводительность, обеспечивающая требуемый уровень температуры статирования.

Возможным вариантом термостатирования в режиме охлаждении объекта является "блокировка" теплового потока для обеспечения заданного теплового режима в объеме (элементе). Данный режим возможен при значительных величинах разности температур объекта и окружающей среды ( $T_1 \gg T_2$ ) и при большой площади термоэлектробатареи, когда теплопередача через нее даже при отсутствии тока питания может превысить требуемую холодопроизводительность.

Функционирование термоэлектрического устройства в режиме нагрева также может выполняться как в режиме нагревателя, так и в режиме интенсификатора (рисунок 6). Кроме того, по аналогии с режимом охлаждения также может возникнуть необходимость в блокировке избыточные теплопритоков, для чего реверсируется ток питания термоэлектробатареи.

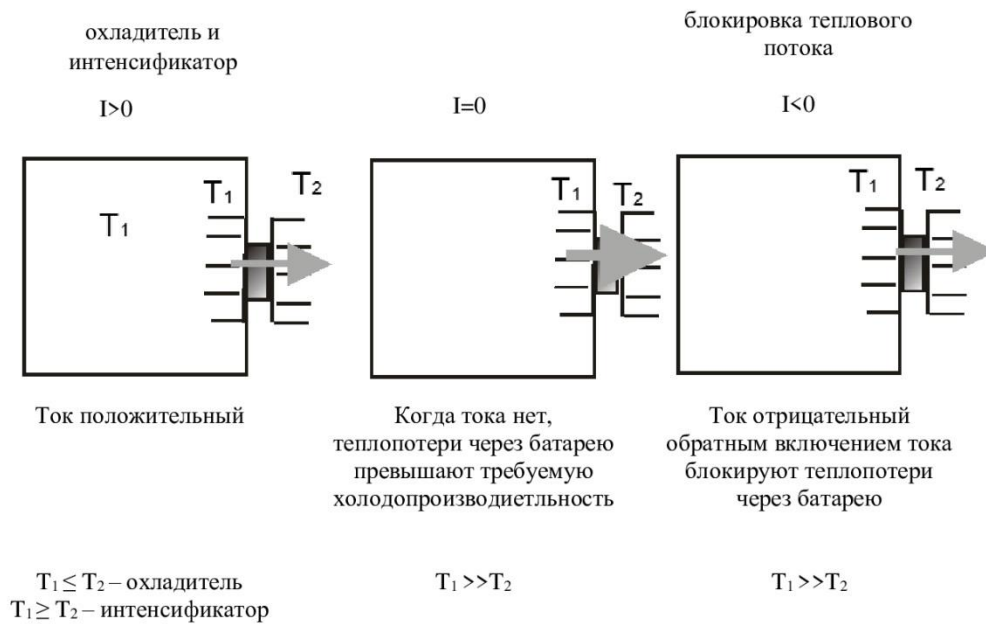


Рисунок 5 - Тепловая схема режимов охлаждения

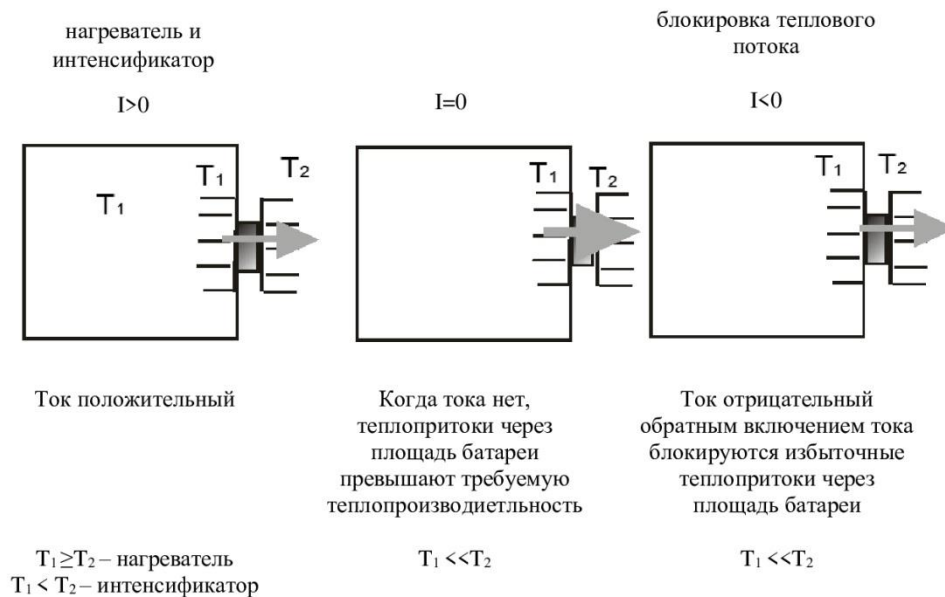


Рисунок 6 – Тепловые схемы режимов нагрева

## **Выводы по разделу**

*В зависимости от назначения, от направления тепловых потоков и от температурного уровня объекта термостатирования ТЭСОиТ классифицируются как охлаждающие устройства, тепловые насосы, интенсификаторы теплопередачи и теплоизоляторы. Реализуемые в устройствах тепловые режимы определяются направлением питающего тока и условиями сопряжения объекта статирования с теплообменником.*

## **Контрольные вопросы по разделу**

- 1. Перечислите типы ТЭСОиТ по назначению.*
- 2. Как типы ТЭСОиТ различаются по направлению потоков энергии?*
- 3. Приведите тепловые схемы режимов термостатирования объема и элемента.*
- 4. Опишите тепловую схему режима охлаждения для трех вариантов подключения термоэлектробатареи к источнику питания.*
- 5. Опишите тепловую схему режима нагрева для трех вариантов подключения термоэлектробатареи к источнику питания.*

## **II. Структурирование информации в области ТСОиТ**

*В данном разделе пособия приведены семантические сети (структурные схемы со смысловыми связями) понятий в предметных областях «ТЭСОиТ», «термоэлектрическая батарея» и «теплообменник».*

*В схемах представлены элементы, входящие в рассматриваемую область, а также их функциональное назначение и конструктивные особенности.*

Термоэлектрические системы охлаждения и термостатирования как предметная область имеют большое количество вариантов исполнения в зависимости от назначения, конструктивных реализаций и уровней температур статирования. Однако при этом они в общем случае имеют сходную структуру, которая может быть представлена с использованием понятия «семантическая сеть» [6, 7]. На рисунке 7 приведена иерархическая структура строения ТЭСОиТ с использованием классических семантических (смысловых) связей типа «has a part» (имеет частью) и «is a» (является) [8].

Основными структурными элементами данной семантической сети являются: термоэлектробатарея, теплообменные устройства на сторонах

хлаждения и нагрева, побудители расхода (насосы и вентиляторы), системы регулирования и энергопитания.

На рисунке 8 приведена дальнейшая детализация области знаний ТЭСОиТ в виде семантической сети понятия «Термоэлектробатарея». Структура учитывает число каскадов, которое увеличивается с увеличением развиваемой разности температур. Термоэлемент, являющийся основным элементом термоэлектробатареи, представляет собой электрически скоммутированные ветви из разнородных полупроводников различного типа проводимости. Ветви термоэлемента, в свою очередь, изготавливаются постоянного токового сечения (чаще в виде параллелепипеда) или, в редких случаях при специальных разработках, - кольцевой или конической формы. Термоэлементы устанавливаются в тепловом контакте (чаще на пайке) на подложке (теплопереходе) из теплопроводного материала. Во избежание короткого замыкания материал подложки должен быть неэлектропроводным (например, из окиси бериллия или окиси алюминия). Имеются разработки термоэлектробатарей на металлических теплопереходах при выполнении мероприятий по их электроизоляции. В некоторых случаях при использовании неэлектропроводящих теплоносителей электрическая коммутация осуществляется посредством элементов теплообменников.

Передача тепловых потоков от теплопоглощающей и тепловыделяющей сторон термоэлектробатареи к окружающей среде, объекту статирования или промежуточным теплоносителям осуществляется в теплообменных устройствах. При этом в ТЭСОиТ применяются все известные из теории теплообмена механизмы теплопередачи и конструктивные решения теплообменников. Структура понятия «Теплообменник» в виде семантической сети приведена на рисунке 9.

Процесс теплопереноса определяется прежде всего конструкцией теплообменников. Теплопроводность в материале теплообменника определяется его материалом (чаще всего применяются высокотеплопроводные металлические сплавы). Если развитие поверхности теплообмена не обеспечивает требуемых характеристик, применяют промежуточный жидкий теплоноситель и дополнительный теплообменник. Теплоноситель внутри системы может перемещаться как с помощью насоса (насосная схема), так и вследствие естественной конвекции (однофазный термосифон).

Наибольшая эффективность теплопереноса реализуется в устройствах с фазовым превращением теплоносителя (тепловые трубы и двухфазные термосифоны). Отметим, что двухфазные термосифоны являются гравитационно зависимыми, в которых возврат конденсата в зону кипения осуществляется под действием силы тяжести. Тепловые трубы работают

независимо от гравитации и, в отличие от двухфазных термосифонов функционируют, например, в условиях невесомости. Возврат конденсата теплоносителя в зону кипения осуществляется под действием капиллярных сил в специальной структуре, установленной на внутренних стенках тепловой трубы.

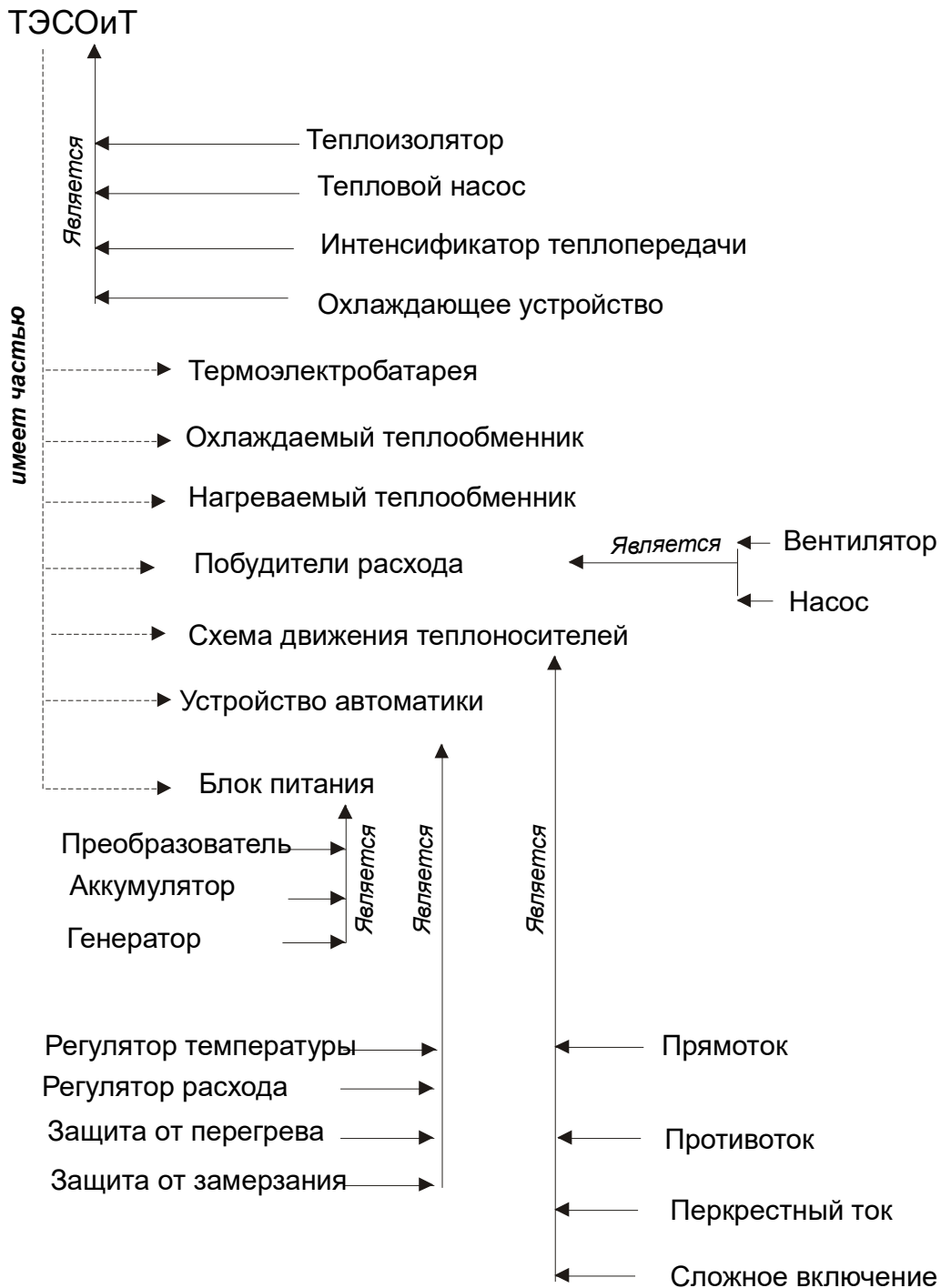


Рисунок 7 – Семантическая сеть понятия ТЭСОиТ

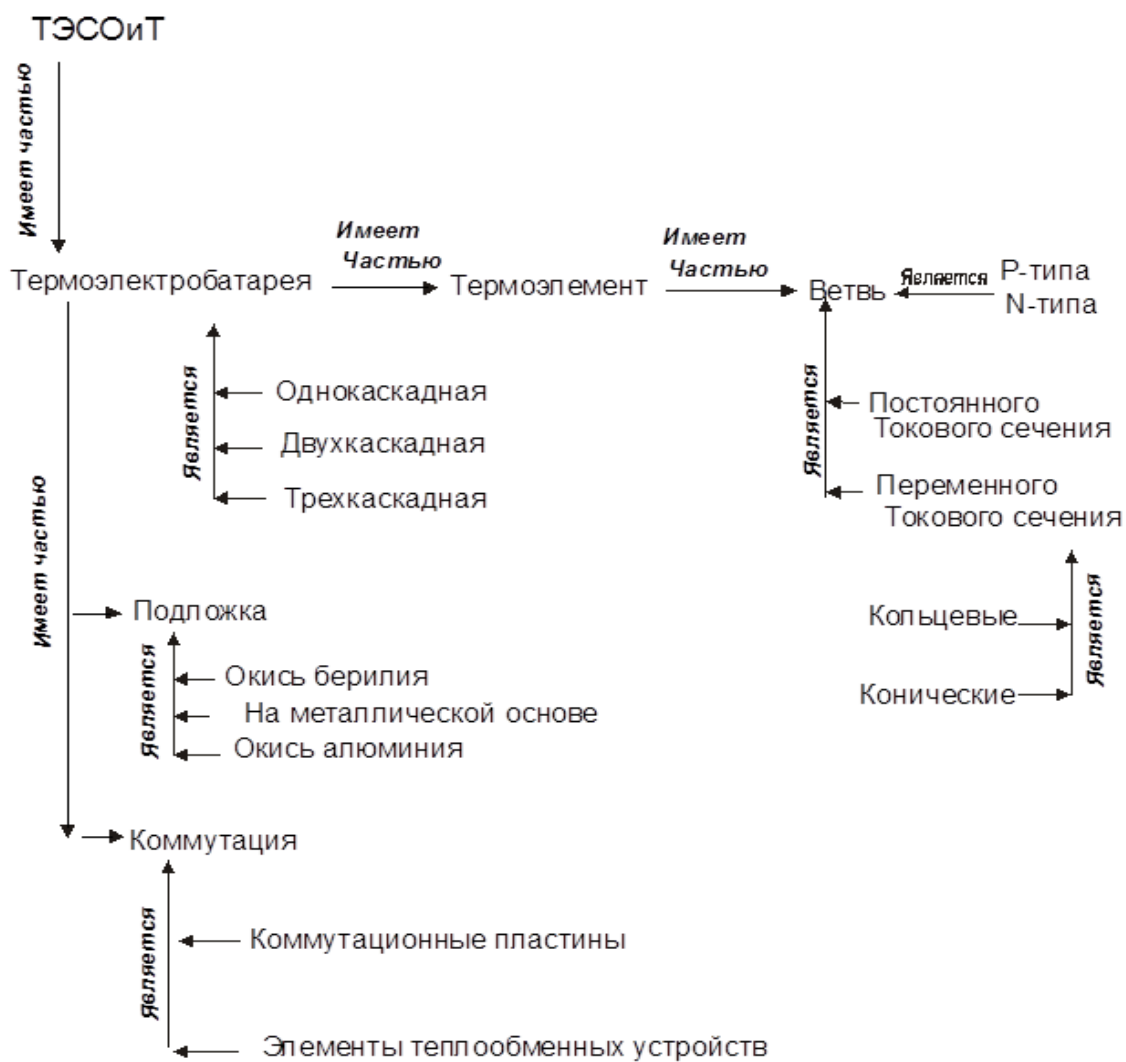


Рисунок 8 – Семантическая сеть понятия «Термоэлектробатарея»

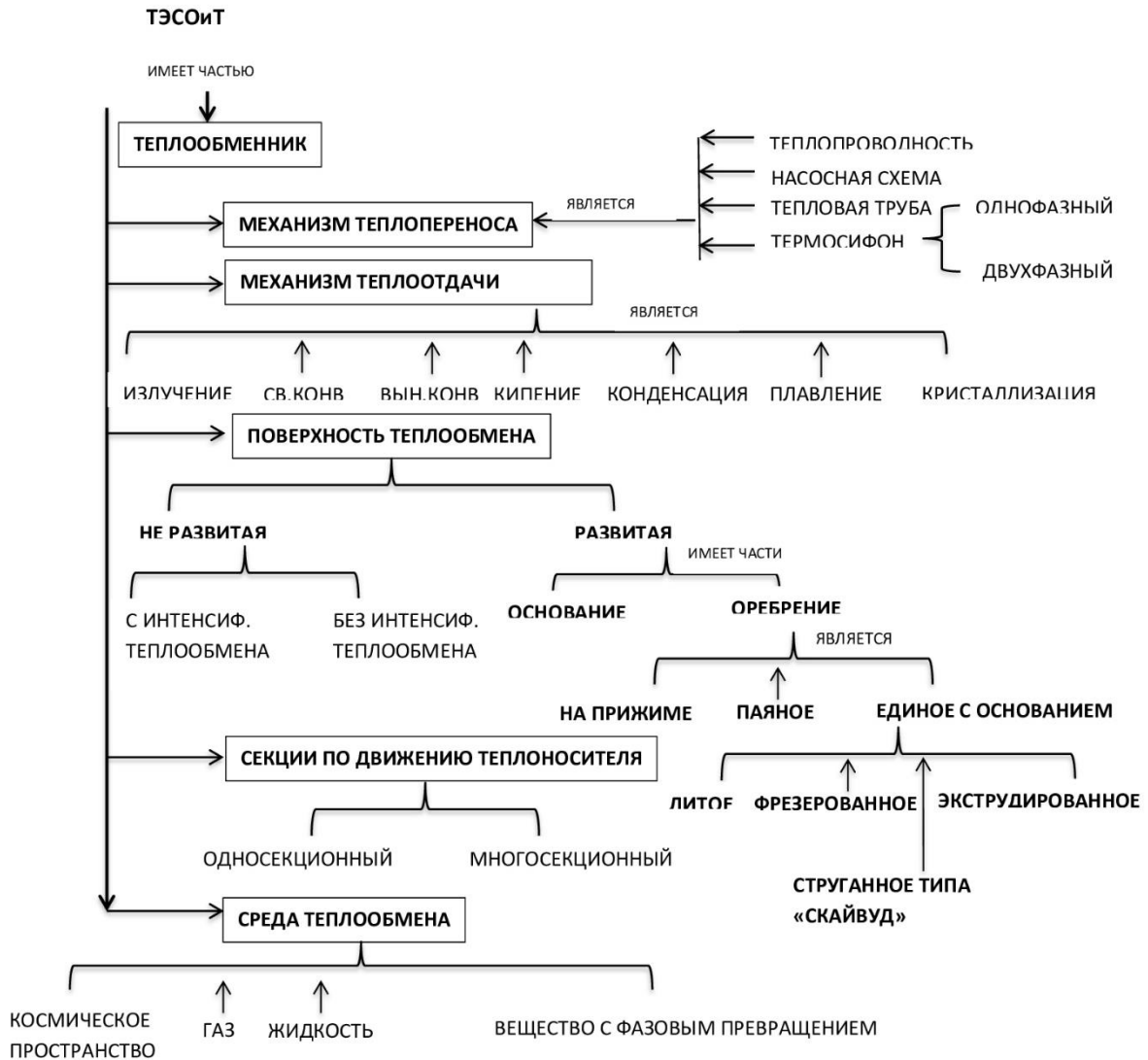


Рисунок 9 – Семантическая сеть понятия «Теплообменник»

Следующим рассматриваемым механизмом теплообмена являются процессы теплоотдачи между поверхностями теплообменника и окружающей средой, промежуточным теплоносителем или объектом статирования. В термоэлектрических устройствах могут использоваться процессы теплообмена излучением, естественная и вынужденная конвекция, фазовые переходы. Отметим, что процессы плавления и кристаллизации зачастую являются единственно возможным способом отвести и подвести тепловую энергию при технологических ограничениях в отводе теплоты в окружающую среду, а также имеют преимущества при циклической работе ТЭСОиТ.



Конструктивное решение поверхности теплообмена зависит от необходимости в интенсификации процесса теплопередачи за счет увеличения поверхности теплообмена. В этой связи различают развитые и неразвитые теплообменные поверхности. При интенсивной теплоотдаче, например, при вынужденной конвекции с жидкостью, развитие поверхности теплообмена за счет оребрения обычно нецелесообразно в связи с низкой эффективностью ребра. В термоэлектрических системах чаще всего развитые поверхности теплообмена представляют собой плоское оребренное основание. При этом возможны различные технологии установки оребрения на основание. В основном применяется прижим, пайка и изготовление ребер фрезерованием на поверхности основания. Чрезвычайно важным является обеспечение теплового контакта ребер с поверхностью. В этой связи теплообменники, изготовленные из стянутого на прижиме набора пластин, несмотря на простоту и технологичность не отличаются высокими теплофизическими характеристиками. Паянная технология менее технологична и экологически опасна, но при этом гарантирует низкое термическое сопротивление тепловому контакту.

Изготовление ребер едиными с основанием наиболее предпочтительно в связи с отсутствием термического сопротивления между основанием и ребром. В то же время реализация такой конструкции связана с рядом технологических сложностей. Например, фрезерование является высокоотходным производством. Экструдирование (выдавливание через фильеру) и литье относятся к сложным и дорогим технологиям.

Относительно новой является технология механического нанесения с помощью специальных приспособлений для фрезерного станка «лепестков», известная как оребрение типа «скайвуд».

Часто при конструировании ТЭСОиТ прибегают к секционированию устройств. Данное техническое решение приводит к повышению надежности и к снижению термодинамических потерь от продольной теплопроводности в теплообменниках.

Важное влияние на эффективность и режим работы оказывает среда, в тепловом контакте с которой находятся элементы ТЭСОиТ. Например, низкая теплоемкость среды и низкая интенсивность теплообмена с воздухом в термоэлектрических кондиционерах требуют от разработчика применения эффективных технических решений.

#### *Выводы по разделу*

*Иерархическая структура строения любой системы может быть построена с использованием классических семантических связей типа «has a part» (имеет частью) и «is a» (является). С помощью данных связующих элементов описываются конструктивные, технологические и*

*теплофизические особенности ТЭСОиТ, термоэлектрической батареи и теплообменных устройств.*

### *Контрольные вопросы по разделу*

- 1. Из каких основных блоков состоит ТЭСОиТ?*
- 2. Из каких основных элементов состоит термоэлектрическая батарея?*
- 3. Опишите в общем виде устройство термоэлемента.*
- 4. Назовите механизмы теплопереноса, реализуемые в теплообменных устройствах ТЭСОиТ.*
- 5. Какими способами может осуществляться теплоотдача в теплообменниках ТЭСОиТ?*

### **III. Схемные решения и анализ необратимых потерь в ТЭСОиТ**

*В данном разделе пособия на примере анализа патентной информации показаны основные конструктивные решения ТЭСОиТ. Упор сделан на анализ технических решений теплообменных устройств и организации их теплового контакта с термоэлектрической батареей.*

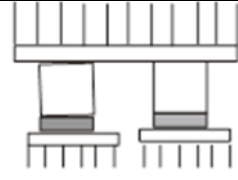

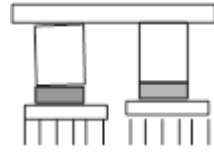
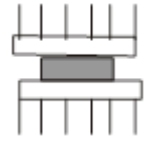
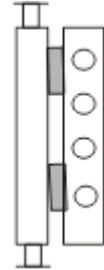
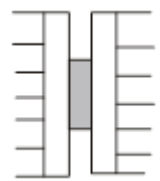

*Проанализированы необратимые термодинамические потери в элементах конструкции ТЭСОиТ и причины возникновения потерь.*

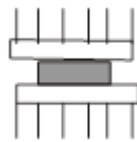
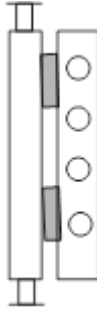
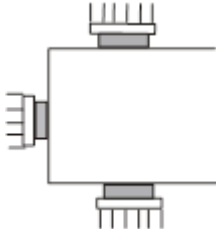
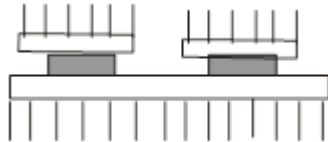
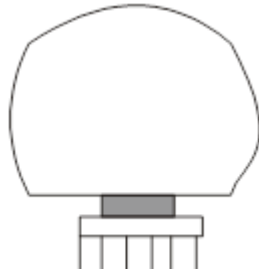
В соответствии с изложенной выше структурой понятий, относящихся к данной области знаний, существует множество возможных технических решений ТЭСОиТ, определяемое сочетанием таких параметров, как типы термоэлектробатарей, конструктивные решения теплообменников, применяемые механизмы теплопередачи, виды теплоносителей и т.д. Техническое решение в большой степени зависит от назначения, условий эксплуатации, уровня температур статирования и других эксплуатационных факторов.


На основе патентной информации в предметной области ТЭСОиТ нами проанализированы материалы, которые наиболее полно отражают конструктивное исполнение данных систем. Схемные решения графически обобщены в виде сборочной единицы «теплопоглощающий теплообменник – термоэлектробатарея – тепловыделяющий теплообменник» (таблица 1). Прежде всего следует выделить ТЭСОиТ с общими теплообменниками, индивидуальными теплообменниками, а также – с теплообменниками, реализующими чисто кондуктивный или двухфазный процесс теплопередачи.

Таблица 1 – Основные схемные решения ТЭСОиТ

№ п/п	Источник	Характеристика	Схемное решение
1	А.с. СССР 464769	Двухфазный термосифон	
2	Заявка Франции 2647598	Индивидуальные теплообменники	
3	Патент США 4213309	Пространственный теплообменник	
4	Патент ФРГ DE 3503281	Общие теплообменники	
5	Европейский патент 0 271704	Индивидуальные теплообменники	
6	Патент ФРГ DE 3639089	Индивидуальные теплообменники	
7	Заявка Франции 2618886	Индивидуальные и общий теплообменники	

			
8	Патент США 4612772	Индивидуальные теплообменники	
9	Патент США 3986337	Индивидуальные и общий 19.10.76 теплообменники	
10	Патент США 3821881	Индивидуальные теплообменники	
11	А.с. СССР 1723415	Общие теплообменники	
12	Европейский патент 0 346560	Индивидуальные теплообменники	
13	Патент ФРГ DE 3707393	Индивидуальные теплообменники	

14	Патент США 4726193	Индивидуальные теплообменники	
15	Патент США 5154661	Общие теплообменники	
16	Патент США 4627242	Индивидуальные и общий теплообменники	
17	Патент США 4764193	Индивидуальные и общий теплообменники	
18	Европейский патент 0 426092	Индивидуальные теплообменники	
19	Патент США 4704870	Индивидуальные и общий теплообменники	

			
20	Патент США 4738113	Индивидуальные теплообменники	

На рисунке 10 приведена в общем виде тепловая схема термоэлектрического блока. Необратимые потери в данной системе представляют собой потери в термоэлектробатарее и потери, которые определяются конструкцией устройства.

Потери в термоэлектробатарее (термоэлектрическом модуле) зависят от параметров полупроводникового вещества, качества сборки, теплоперетоков в ветвях термоэлементов и других факторов, присущих конкретному промышленно выпускаемому изделию. Эти потери относятся к классу внутренних потерь системы и на этапе конструирования не могут быть снижены. В отличие от внутренних потерь, внешние потери системы определяются схемным решением и конструкцией устройства. Понимание причин их возникновения необходимо разработчику для принятия наиболее эффективного решения проектируемого изделия или системы [9].

Основными типами внешних потерь в ТЭСОиТ являются следующие.

1 Потери, определяемые качеством теплового контакта между поверхностями термоэлектрического модуля и теплообменниками (поз. 2 на рисунке 10).

2 Потери при теплоперетоках от теплой стороны устройства на холодную по элементам конструкции (3).

3 Потери от термических сопротивлений в теплообменниках.

4 Потери от термических сопротивлений при теплоотдаче.

Таким образом, задачей разработчика при проектировании ТЭСОиТ является применение таких конструктивных решений, которые приводят к снижению перечисленных выше необратимых потерь. Рассмотрим на конкретном примере разработки термоэлектрического блока охлаждения процесс синтеза устройства с минимизированными внешними потерями.

Рассмотрим в качестве исходного варианта схему термоэлектрического блока охлаждения с общими теплообменниками на

охлаждающей и нагревающей сторонах (рисунок 11). Такого типа устройства отличаются простотой сборки, технологичностью изготовления теплообменников. В то же время, данное схемное решение обладает рядом недостатков, приводящих к необратимым потерям и снижающим термодинамическую эффективность. Основными недостатками являются:

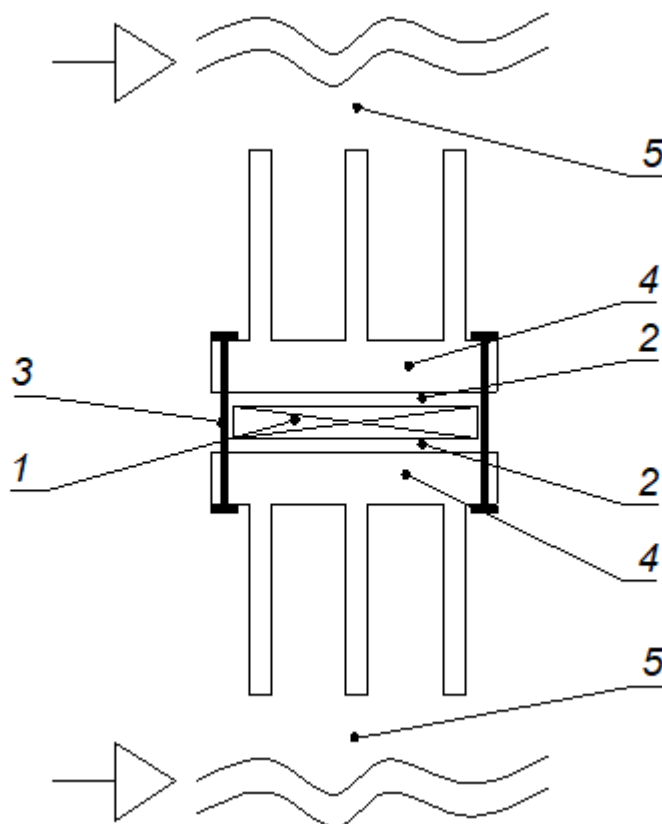


Рисунок 10 – Тепловая схема термоэлектрического блока охлаждения

1 Повышенные требования к плоскопараллельности охлаждающей и нагревающей поверхностей термоэлектробатарей.

2 Повышенные требования к унификации термоэлектробатарей по толщине.

3 Низкая надежность в части устойчивости к термическим напряжениям в термоэлектробатареях и элементах конструкции.

4 Теплоперетоки по элементам крепления.

5 Низкая ремонтпригодность.

6 Потери из-за кондуктивного теплопереноса вдоль основания теплообменников, т.е. в связи с выравниванием температур в основании теплообменников.

Применение индивидуальных теплообменников в термоэлектрических блоках (рисунок 12) позволяет достичь ряда

преимуществ по сравнению с общими теплообменниками. Во-первых, снимаются жесткие требования к плоскопараллельности и к унификации термоэлектробатарей (модулей) по толщине. Кроме того, данные схемы характеризуются существенно меньшей чувствительностью к термическим напряжениям.

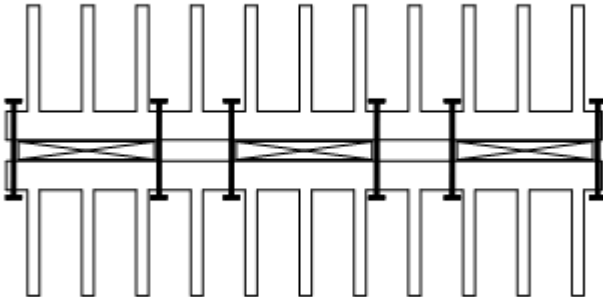


Рисунок 11 – Схема блока охлаждения с общими теплообменниками

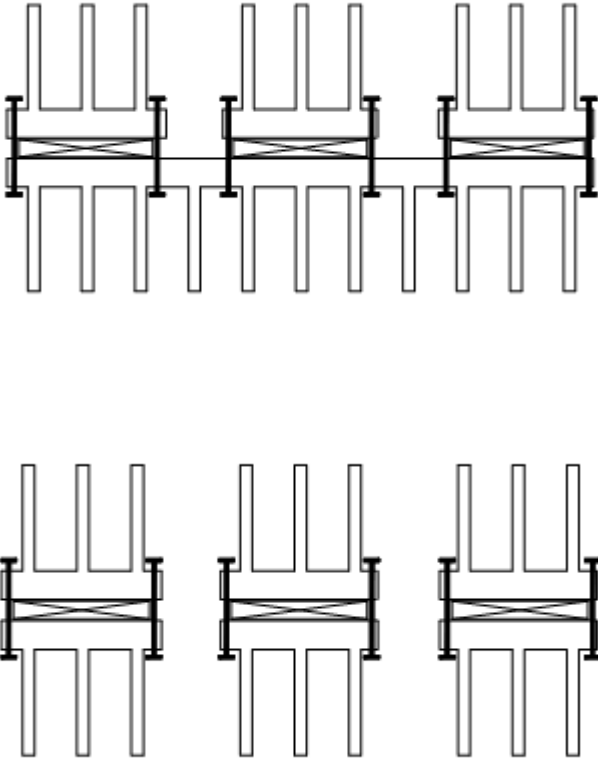


Рисунок 12 – Схемы блоков охлаждения с индивидуальными теплообменниками



Однако при применении индивидуальных теплообменников возникают новые конструктивные сложности в части обеспечения целостности устройства. Также не решенной остается задача по снижению теплотерь через элементы крепления.

Схема термоэлектрического блока, приведенная на рисунке 13, принципиально отличается от предыдущих тем, что использование общих теплообменников при переменных направлениях тепловых потоков позволяет решить как задачу обеспечения целостности конструкции, так и задачу снижения теплотерь по элементам крепления. При этом данная схема не выдвигает повышенных требований к плоскопараллельности и унификации термоэлектробатарей по толщине.

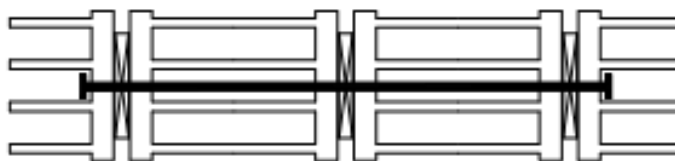


Рисунок 13 – Схема блока охлаждения с измененными направлениями тепловых потоков

Существенным недостатком рассматриваемой схемы является усложнение в организации движения охлаждаемого и нагреваемого теплоносителей. Возникающие в этой связи конструктивные сложности в ряде случаев исключают практическую реализацию данного технического решения.

#### *Выводы по разделу*

*Несмотря на изобилие конструктивных исполнений ТСОиТ различного назначения, они могут быть сгруппированы в зависимости от организации теплообмена на поверхностях термоэлектробатарей. С позиции анализа необратимых потерь принципиальное значение имеет количество термоэлектробатарей, приходящихся на один теплообменник. Схемы с индивидуальными теплообменниками имеют ряд технических и технологических преимуществ.*

## *Контрольные вопросы по разделу*

- 1. Какие потери в ТЭСОиТ относятся к внутренним потерям системы?*
- 2. Какие потери в ТЭСОиТ относятся к внешним потерям системы?*
- 3. В чем преимущество и недостатки конструктивного исполнения ТЭСОиТ с общими теплообменниками?*
- 4. В чем преимущество и недостатки конструктивного исполнения ТЭСОиТ с индивидуальными теплообменниками?*
- 5. Какими преимуществами обладает схема с измененными направлениями тепловых потоков?*

### **IV. Построение альтернативной тепловой схемы**

*В данном разделе пособия приведена логика построения тепловой схемы ТЭСОиТ с минимальными необратимыми потерями.*

*Техническое решение альтернативной схемы основано на изменении направления тепловых потоков, подводимых и отводимых от термоэлектрического модуля, и на применении в качестве теплообменников двухфазных гравитационных термосифонов.*

Принципиально новое схемное решение ТЭСОиТ представлено на рисунке 14. Данная конструкция сохраняет преимущества схемы, изображенной на рисунке 13, но при этом упрощает организацию движения теплоносителей за счет изменения направления тепловых потоков в устройстве. Тепловые потоки предлагается подводить и отводить от модулей Пельтье не перпендикулярно, а параллельно теплопоглощающей и тепловыделяющей поверхности. Данное решение позволяет конструктивно разделить в этом теплообменные устройства на теплопоглощающей и тепловыделяющей сторонах, что принципиально упрощает организацию движения теплоносителей. При этом следует иметь в виду, что необратимые потери в цельнометаллических теплообменниках увеличенной длины будут весьма высокими. Кроме того, недопустим тепловой контакт охлаждаемого и нагреваемого теплообменников, что требует дополнительного совершенствования предложенной схемы с измененным направлением тепловых потоков.

Схема термоэлектрического блока охлаждения, приведенная на рисунке 15, исключает рассмотренные выше недостатки [10, 11]. Во-первых, теплообменники выполнены изогнутыми, во-вторых, исключен тепловой контакт между охлаждаемым и нагреваемым теплообменником и, в-третьих, вместо цельнометаллических предложено применить теплообменники, частично заполненные легкокипящим теплоносителем

(так называемые двухфазные термосифоны или тепловые трубы) [12].  
Схема теплообменника приведена на рисунок 16.

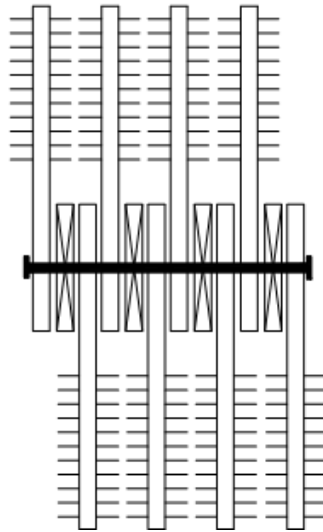


Рисунок 14 – Схема блока охлаждения с измененными направлениями  
ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ

Высокую эффективность теплопередачи в данном теплообменнике подтверждают результаты измерения температурного напора между поверхностью теплообмена и потоком воздуха, приведенные на рисунке 17.

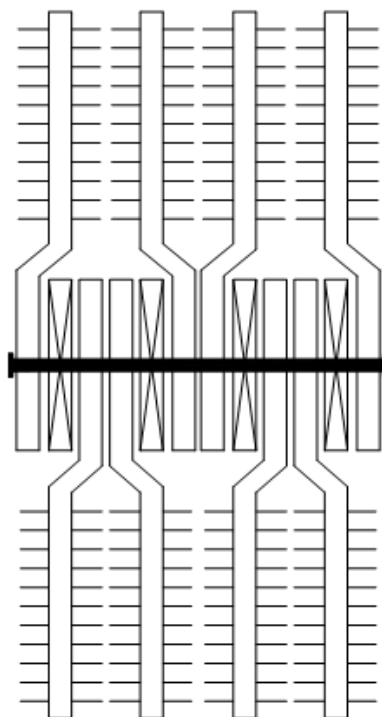


Рисунок 15 – Альтернативная тепловая схема

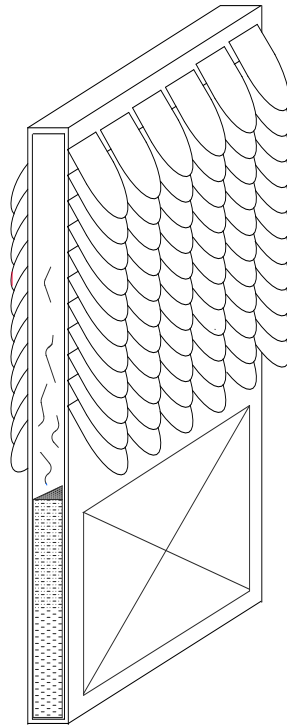


Рисунок 16 – Теплообменник-термосифон на основе плоскоовальных алюминиевых трубок.

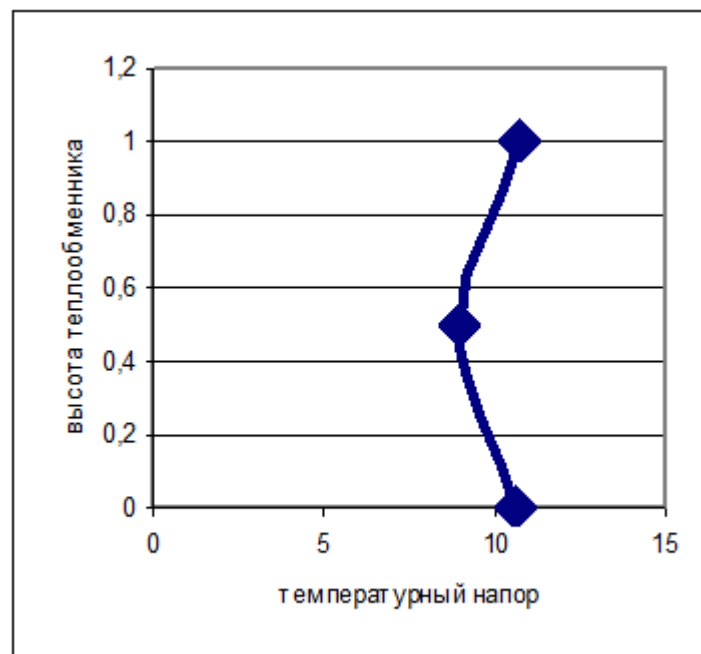


Рисунок 17 - Температурное поле двухфазного теплообменника.  
Расход воздуха 12 м<sup>3</sup>/ч, тепловая нагрузка 31,8 Вт

Рассмотренный выше анализ необратимых термодинамических потерь и конструктивных особенностей при различных схемных решениях термоэлектрических блоков охлаждения приводит к новому высокоэффективному решению, которое может использоваться как базовое для термоэлектрических систем различного назначения [12].

Варианты реализации термоэлектрических блоков для случаев жидких и газообразных теплоносителей приведены на рисунках 18 – 20.

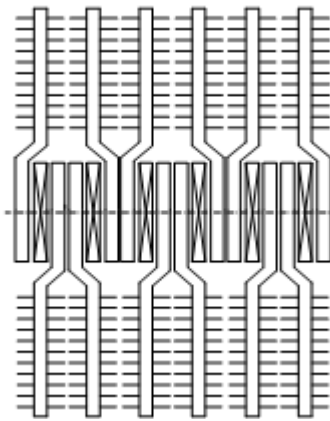


Рисунок 18 – Варианты реализации альтернативной схемы для сред воздух-воздух

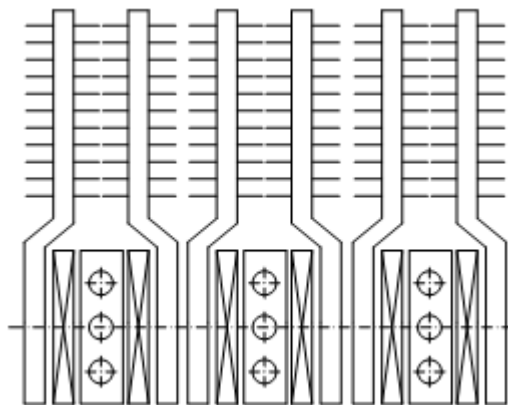


Рисунок 19 – Варианты реализации альтернативной схемы для сред воздух-жидкость

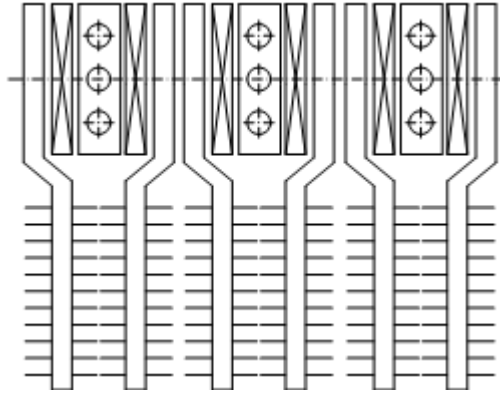


Рисунок 20 – Варианты реализации альтернативной схемы для сред жидкость-воздух

Рассмотрим еще раз преимущества и недостатки предложенного схемного решения.

Преимущества определяются следующими характеристиками:

- нет завышенных требований к плоскопараллельности поверхностей термоэлектрических модулей;
- термоэлектрические модули не обязательно должны быть строго унифицированы по толщине;
- предусмотрено применение высокоэффективных теплообменных устройств в виде двухфазных термосифонов или тепловых труб;
- исключаются тепловые потери по крепежным элементам конструкции;
- упрощена схема движения теплоносителей;
- устройство представляет собой единую сборочную единицу;
- устройство характеризуется высокой ремонтопригодностью.

В то же время для рассматриваемого схемного решения характерны недостатки:

- технологические сложности, связанные с изготовлением и заправкой теплообменников теплоносителем, а также опасность газообразования в процессе эксплуатации;
- гравитационная зависимость процесса теплопередачи для случая использования двухфазных термосифонов, поскольку в условиях гравитации тепловой поток в устройстве может передаваться только в направлении, противоположном вектору силы тяжести.

#### *Выводы по разделу*

*Задача создания термоэлектрического блока с индивидуальными теплообменниками и технологичной схемой движения теплоносителей*

*может быть решена путем организации потоков теплоты в направлении параллельном поверхности термоэлектробатарей. Для повышения термодинамической эффективности данной схемы теплообменники предложено выполнить по принципу плоскооальной тепловой трубы или двухфазного термосифона специальной формы.*

#### *Контрольные вопросы к разделу*

- 1. Каким образом организовано движение теплоносителей в альтернативной тепловой схеме ТЭСОиТ?*
- 2. С чем связано применение двухфазных термосифонов в альтернативной тепловой схеме?*
- 3. Опишите принцип действия двухфазного термосифона.*
- 4. Чем отличается двухфазный термосифон от тепловой трубы?*
- 5. Перечислите преимущества и недостатки рассмотренного в разделе схемного решения ТЭСОиТ.*

#### **V. Методология проектирования ТЭСОиТ**

*В данном разделе учебного пособия рассмотрена последовательность действий разработчика, характерная для этапов проектирования ТЭСОиТ.*

*Схемное решение ТЭСОиТ, представленное в общем виде, описано в виде структуры (графа) отношений, включающих уравнения тепловых балансов, уравнения теплопередачи и производительности термоэлектрической батареи.*

Проектирование ТЭСОиТ мы рассматриваем как комплекс работ, состоящий из двух этапов – внешнее и внутреннее проектирование. Задачей внешнего проектирования является выявление облика ТЭСОиТ, при котором свойства и характеристики системы наиболее полно отвечают целям технического задания. Облик системы можно назвать также ее технической моделью или моделью на предметном уровне.

Методы внешнего проектирования включают теоретические и экспериментальные методы, использование квалификации и опыта разработчика (естественный интеллект) для выполнения анализа проектируемой системы, выбора классов и типов узлов и способов объединения их в систему.

Для ТЭСОиТ могут быть сформулированы следующие цели и задачи внешнего проектирования.

1. Обоснование целесообразности применения термоэлектрического принципа охлаждения и нагрева для решения задачи термостатирования.
2. Построение тепловой схемы (конкурирующих вариантов тепловых схем) системы.
3. Обоснование выбора тех или иных узлов системы: теплообменники с естественной или вынужденной конвекцией, внешняя среда в виде жидкости или газа, термоэлектробатареи однокаскадной или многокаскадной сборки и т.д.

Внутреннее проектирование выполняется с целью оптимизации режимов функционирования агрегатов и окончательного синтеза системы. Эта задача может быть сформулирована как оптимизационная, т.е. удовлетворяющая экстремальному значению некоторой целевой функции с учетом наложенных ограничений.

Для ТЭСОиТ целями и задачами внутреннего проектирования являются.

1. Подбор типоразмеров теплообменных устройств, термоэлектробатарей, побудителей расхода и других узлов в зависимости от результатов внешнего проектирования.
2. Определение требуемых номиналов энергопитания, массогабаритных, экономических и других показателей, характеризующих эффективность системы.
3. Анализ конкурирующих вариантов и выявление наиболее отвечающих сформулированным ограничениям.

Задачи внешнего и внутреннего проектирования носят итерационный характер, и принятие окончательного решения осуществляется как решение взаимосвязанной задачи анализа и синтеза проектируемой ТЭСОиТ. На рисунке 21 приведена традиционная четырехуровневая технология решения задачи проектирования. Уровни проектирования распределяются следующим образом.



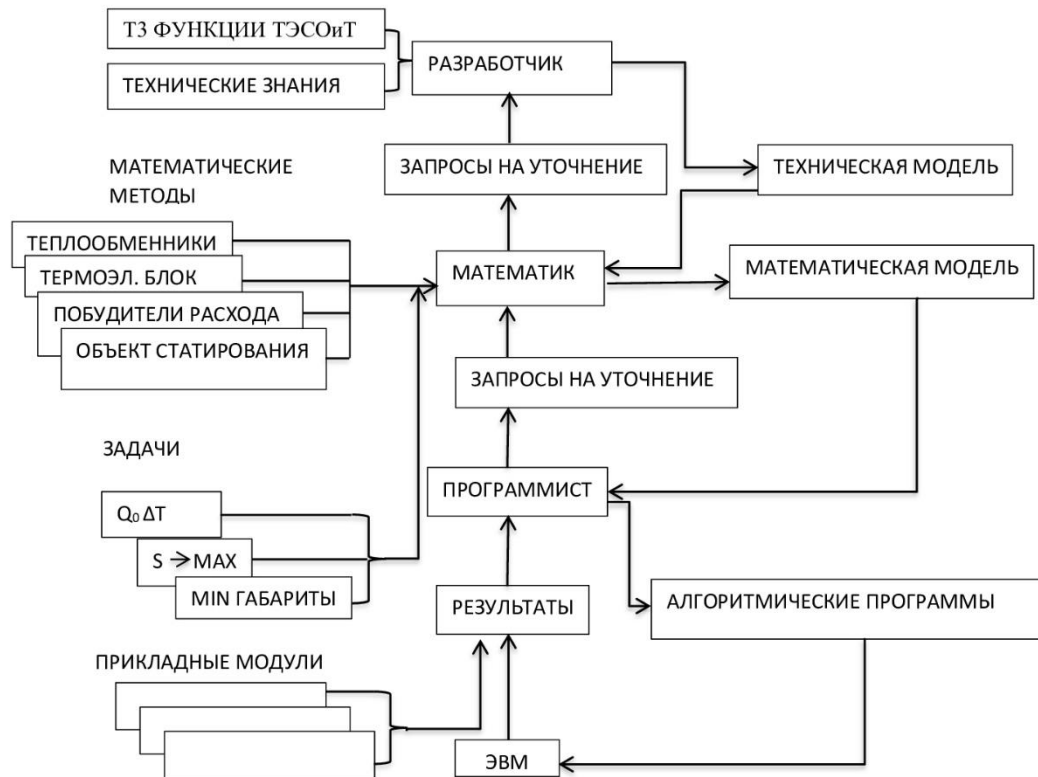


Рисунок 21 – Традиционная технологическая схема проектирования ТЭСОиТ

1. На уровне технических описаний. Разработчик формирует облик ТЭСОиТ. При этом постановка расчетных задач и определение свойств системы осуществляется им в терминах технических терминов и понятий.
2. На уровне построения математической модели специалистами по прикладной математике осуществляется переформулирование технической модели в математическую модель. Формирование математической модели происходит в тесном взаимодействии, при этом основной сложностью является выявление в технической модели самоочевидных для разработчика деталей.
3. На третьем уровне проектирования осуществляется очередное переформулирование от моделей к алгоритмическим программам расчета, для чего привлекается специалист по прикладному программированию. На этом этапе, кроме математической специфики задачи, учитываются также возможности компьютера и систем программирования.
4. Четвертый уровень – уровень переформулирования алгоритмов в машинные команды – выполняется автоматически программами-трансляторами.

Таким образом, традиционная технология проектирования ТЭСОиТ предусматривает четыре уровня переформулирования задачи, из которых только на уровне трансляции алгоритмических программ процесс выполняется автоматически. Применение интеллектуальных систем при проектировании ТЭСОиТ позволяет решать задачи внутреннего проектирования при максимальном приближении компьютера к разработчику, т.е. переформулирование задачи на всех уровнях происходит автоматически с вытеснением посредников из контура использования ЭВМ.

На рисунке 22 приведена схема проектирования, основанная на методологии интеллектуальных систем. С этих позиций рассматриваемая предметная область ТЭСОиТ представляет собой фрагмент окружающего мира, информация о котором может быть представлена в виде совокупности фактов и правил. Под «фактами» здесь понимается некоторая статическая информация, характеризующая предметную область, а «правила» – это в терминологии искусственного интеллекта некоторые закономерности, описывающие взаимосвязь между фактами. Поле знаний с помощью инструментальных средств интеллектуальных систем (например, в синтаксисе языка Пролог) описывается в декларативном виде как перечисление фактов и правил. Декларативное описание имеет существенное отличие от так называемого процедурного программирования. При декларативном описании не разрабатывается алгоритм (процедура) получения решения, которое выводится благодаря встроенным в систему механизмам вывода (в Прологе – логика предикатов).

В то же время задачи внешнего проектирования на уровне разработки технической модели мы рассматриваем как задачи, требующие приложения естественного интеллекта разработчиков с привлечением всех известных средств, из которых зачастую наиболее достоверные результаты могут быть получены методами вычислительного и натурного эксперимента.

В качестве примера рассмотрим ТЭСОиТ, представляющую собой термоэлектрический блок, обеспечивающий передачу теплоты от среды с температурой  $T_{f1}$  и расходом  $W_1$  в среду с температурой  $T_{f2}$  и расходом  $W_2$  (рисунок 23).

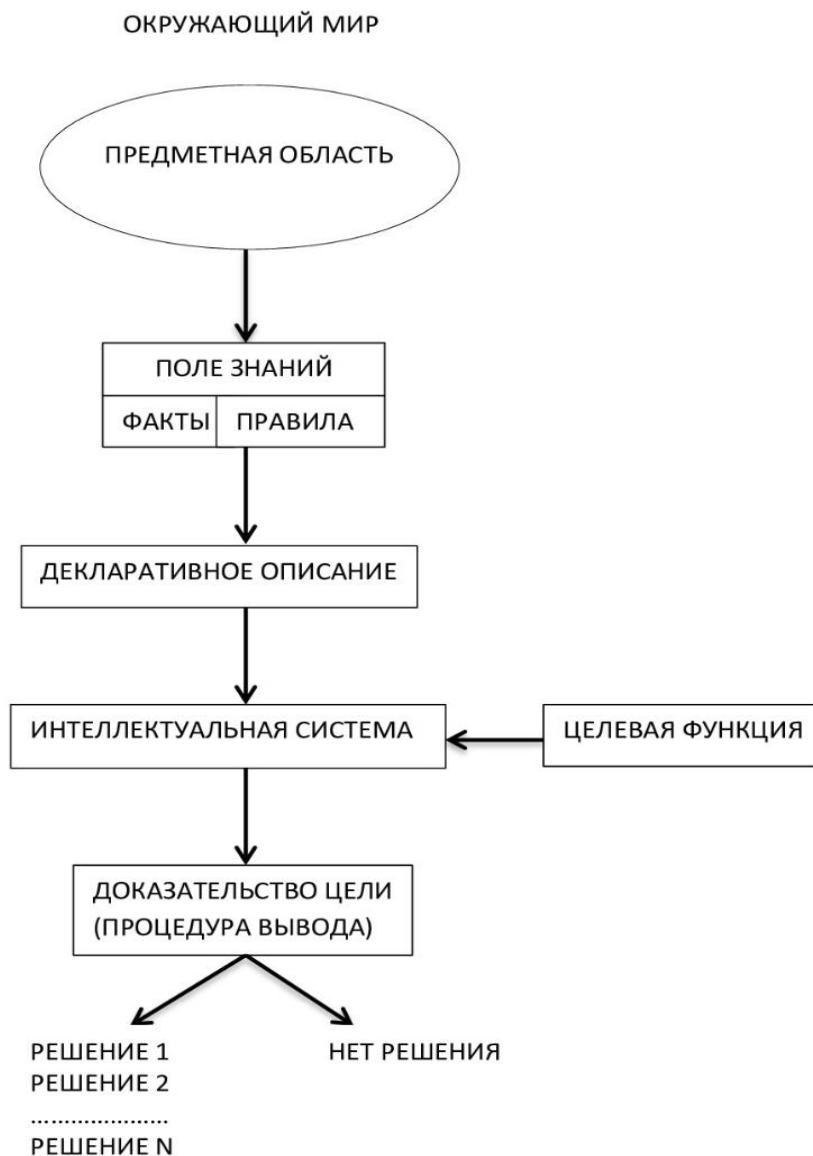


Рисунок 22 – Схема проектирования, ориентированная на интеллектуальные информационные технологии

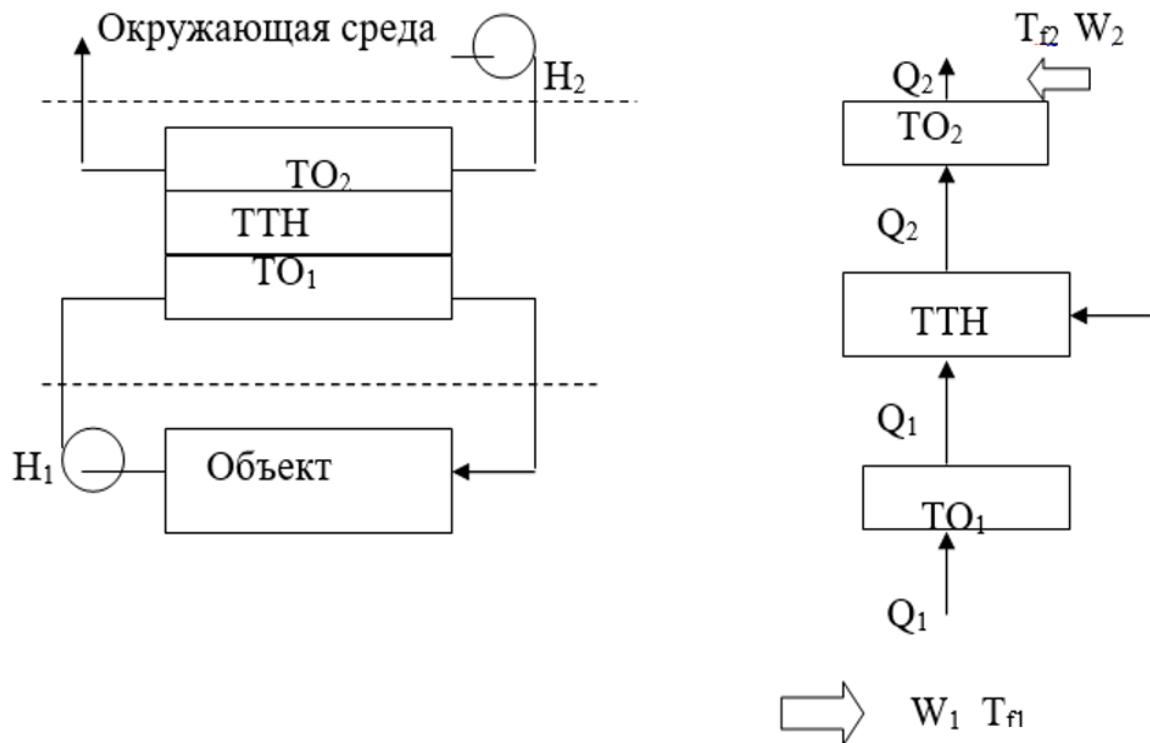


Рисунок 23 – Схема ТЭСОиТ в общем виде

На рисунке 24 приведена структура отношений, описывающих факты и правила, соответствующие приведенной выше схеме ТЭСОиТ. Понятия, относящиеся к фактам, помещены в круглые ячейки, а понятия, относящиеся к правилам – в квадратные. Здесь представлены такие факты, как температуры и водяные эквиваленты сред  $T_f$  и  $W$ , обменивающихся теплотой с термоэлектробатареей ТВ, условия теплопередачи на холодных и горячих спаях в виде коэффициентов теплопередачи  $K$ . В качестве правил выступают классические уравнения тепловых балансов и теплообмена на спаях, а также уравнения холодо- и теплопроизводительности термоэлектробатарей  $Q_1$  и  $Q_2$ .

Тепловой баланс охлаждаемого и нагреваемого теплоносителей описывается отношениями  $R_1$  и  $R_8$  соответственно. Расчетные средние температуры теплоносителей описываются отношениями  $R_2$  и  $R_7$ . Отношения  $R_3$  и  $R_6$  описывают теплопередачу в охлаждаемом и нагреваемом теплообменниках соответственно. И, наконец, холодо- и теплопроизводительность термоэлектрической батареи описывается отношениями  $R_4$  и  $R_5$ .

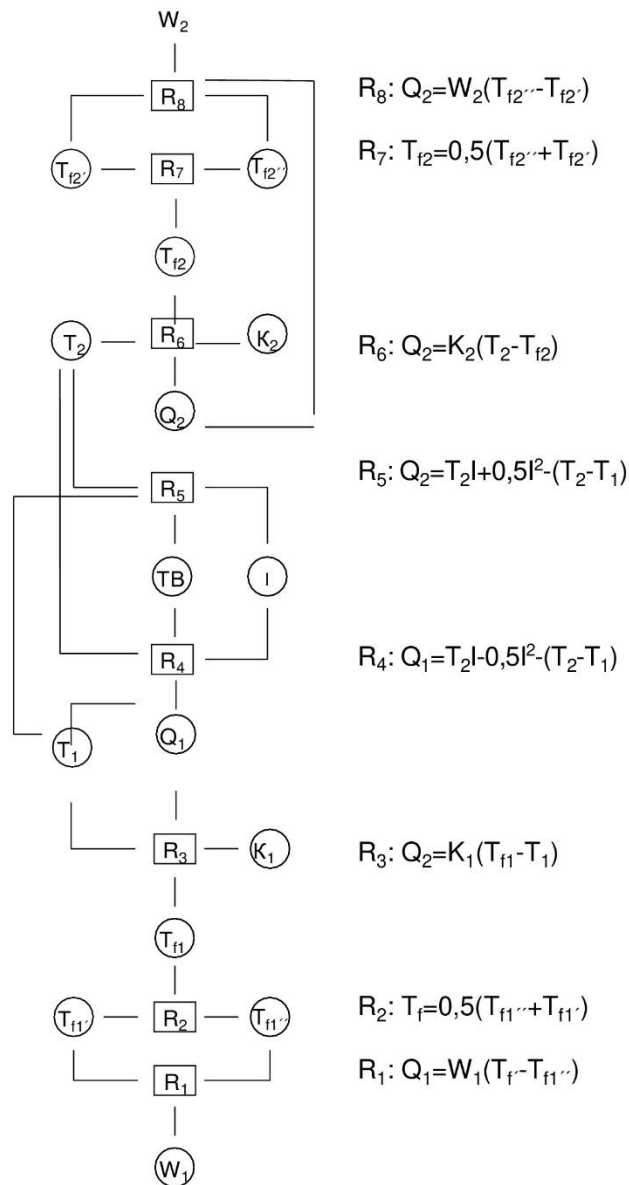


Рисунок 24 – Структура отношений в предметной области ТЭСОиТ

Расчет ТЭСОиТ представляет собой решение системы уравнений, представленных на рисунке 24 отношениями  $R_1 - R_8$ .

### Выводы по разделу

Проектирование технической системы представляет собой решение задач внутреннего и внешнего проектирования. Задачи внешнего и

*внутреннего проектирования носят итерационный характер, и принятие окончательного решения осуществляется как решение взаимосвязанной задачи анализа и синтеза проектируемой системы. На основании структуры отношений, описывающих факты и правила в соответствии с выбранной тепловой схемой, формируется система уравнений, решение которой позволяет установить энергетические характеристики ТЭСОиТ.*

### *Контрольные вопросы к разделу*

- 1. Что такое внешнее и внутреннее проектирование системы?*
- 2. Чем отличается методология проектирования с применением интеллектуальных систем от классического проектирования?*
- 3. Что относится к фактам в предметной области ТЭСОиТ?*
- 4. Что относится к правилам в предметной области ТЭСОиТ?*
- 5. Перечислите основные отношения, описывающие процессы в ТЭСОиТ.*

### **Заключение**

Термоэлектрические системы охлаждения и термостатирования являются системами прямого преобразования энергии и обладают рядом преимуществ перед другими системами охлаждения, основным из которых является отсутствие промежуточных рабочих тел и, соответственно, - аппаратов, работающих под давлением и разрядением. Кроме того, данные системы являются гравитационно независимыми, что для многих приложений делает их безальтернативными.

В то же время полупроводниковые материалы, применяемые в настоящее время в термоэлектрических системах, не обеспечивают достаточно высокий коэффициент преобразования. В этой связи особое внимание должно уделяться проектированию термоэлектрических устройств с минимизированными термодинамическими потерями в элементах системы. В данном учебном пособии рассмотрены подходы, позволяющие на этапе проектирования минимизировать необратимые потери.

### **Литература**

1. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства, Справочник. – Киев: Наукова думка, 1979. – 768с.
2. Каганов М.А., Привин М.Р. Термоэлектрические тепловые насосы: (Теорет. основы расчета). - Ленинград : Энергия. Ленингр. отд-ние, 1970. - 176 с.

3. Булат Л. П., Ведерников М. В., Вялов А. П. Термоэлектрическое охлаждение : Текст лекций / [Л. П. Булат, М. В. Ведерников, А. П. Вялов и др.] ; Под общ. ред. Л. П. Булата; М-во образования Рос. Федерации, С.-Петербург. гос. ун-т низкотемператур. и пищевых технологий. - СПб.: СПбГУНИПТ, 2002. - 146 с.
4. Сулин А. Б. Развитие теории проектирования систем охлаждения и термостатирования на базе термоэлектрических преобразователей : автореф. дис. на соиск. учен. степ. д.т.н. : спец. 05.04.03 / Сулин Александр Борисович ; [С.-Петербург. гос. ун-т низкотемпературных и пищевых технологий]. - СПб., 2000. - 32 с.
5. Лобунец Ю.Н. О классификации тепловых схем термоэлементов // Промышленная теплотехника, 1985, т.7, №5, с. 81-84.
6. Осуга С. Обработка знаний. – М.: Мир, 1989. – 293 с.
7. Вагин В.М., Клишин В.В., Филиппова О.В. Иерархическая фреймово-продукционная модель представления знаний о машиностроительном объекте проектирования // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика, 1991, №3, С. 184-192.
8. Сулин А.Б. Системы охлаждения и термостатирования как логическая спецификация интеллектуальной системы // Вестник Международной академии холода, № 3, 1999, с.37-39.
9. Сулин А.Б. Термоэлектрические системы охлаждения. Анализ потерь и пути повышения эффективности // Холодильная техника, 2009, № 8, с. 2-5.
10. Патент РФ 2112908 // Термоэлектрический блок (варианты) // Сулин А.Б., Емельянов А.Л., Мощенко В.И., Назарцев А.А. Опубл. в БИ № 16. 10.06.98, с. 363.
11. Sulin A.B. New approach to thermoelectrik air-cooled subunit configuration.// 14-th Int.Conf. on Thermoelectrics, St.Petersburg 1995, p.453-454.
12. Вердиев М.Г. Исследование термоэлектрических охлаждающих устройств, работающих с испарительными тепловыми сифонами // Автореферат Дис. . . . канд. наук. – Л. 1974 – 28 с.

Сулин Александр Борисович

СХЕМНЫЕ РЕШЕНИЯ И ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ И  
ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ

учебно-методическое пособие

В авторской редакции  
Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО  
Зав. РИО Н. Ф. Гусарова  
Подписано к печати  
Заказ №  
Отпечатано на ризографе



**Редакционно-издательский отдел**  
**Университета ИТМО**  
197101, Санкт-Петербург, Кронверский пр., 49