

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БАЛТИЙСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. И. КАНТА»
ИНСТИТУТ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК
И ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Рекомендована к защите:
методический руководитель
направления подготовки

доцент ИФМНиИТ

_____ Д.А. Савкин

" ____ " _____ 2018 г.

Допущена к защите:
первый заместитель директора
института физико-математических
наук и информационных технологий
к. ф.-м. н., доцент

_____ А.А. Шпилевой

" ____ " _____ 2018 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

**Тема: «МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ
КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ»**

**Направление подготовки: 02.03.03 «Математическое обеспечение
и администрирование информационных систем»**

Квалификация (степень): бакалавр

ВКР защищена на оценку:

Выполнила: студентка 4 курса
_____ Е.Е. Белова

Руководитель: к.т.н., доцент
_____ О.В. Толстель

Калининград
2018

Содержание

Введение.....	4
Глава 1. Сложный теплообмен в изделиях космической техники.....	10
1.1. Основные положения учения о теплопроводности.....	10
1.2. Конвекция.....	15
1.3. Лучистый теплообмен.....	17
1.4. Теплообмен излучением между чёрными поверхностями.....	25
Глава 2. Изучение программы СПРУТ, прямые и обратные задачи теплообмена.....	29
2.1. Классификация задач тепломассообмена.....	29
2.2. Методы и задачи исследования лучистого теплообмена.....	30
2.3. Пакеты, основанные на методе конечных элементов.....	31
2.4. Тепловая модель.....	33
Глава 3. Расчёт сложного теплообмена объекта космической техники.....	37
Глава 4. Обзор результатов испытаний космического робота.....	43
4.1. Глобальная тепловая модель.....	43
4.2. Результаты расчёта глобальной тепловой модели.....	52
Глава 5. Решение обратной задачи теплообмена.....	58
5.1. Обоснование важности решения обратной задачи теплообмена.....	59
5.1.1. Эволюция тепловой модели космической техники.....	59
5.1.2. Неопределённости тепловой модели, связанные с тепловыми сопротивлениями.....	59
5.1.3. Неопределённости модели, вызванные неточностью данных по степеням черноты и коэффициентам солнечного поглощения.....	59
5.1.4. Неопределённости модели, вызванные изменением свойств узлов.....	60
5.2. Эволюционное моделирование.....	60
5.2.1. Понятие эволюционного моделирования.....	60
5.2.2. Генетический алгоритм.....	63
5.2.3. Параметры и этапы генетического алгоритма.....	65
5.2.4. Использование modeFRONTIER при решении задачи геометрической оптимизации.....	76

5.3. Применение modeFRONTIER для решения обратной задачи теплообмена	81
Заключение	89
Список использованной литературы.....	90
Приложение 1. Основные обозначения	94
Приложение 2. Постоянные величины	95
Приложение 3. Таблица связей в узлах.....	96
Приложение 4. Связь программы СПРУТ в среде modeFRONTIER.....	97

Введение

Одним из главных условий, гарантирующих надёжность и долговечность сложного космического аппарата, является поддержание стабильного температурного режима работы всей бортовой аппаратуры. Эта задача довольно сложная, так как космический аппарат находится в сложных, постоянно меняющихся тепловых условиях [13].

Режим работы самого аппарата периодически меняется: включаются и выключаются мощные электрические приборы, космический аппарат заходит в тень Земли, вращаются нагретые солнечные панели, являющиеся источником переменного теплового облучения приборного отсека [13].

В таких сложных условиях задача обеспечения теплового режима работы каждого элемента космического аппарата возлагается на специальную систему терморегулирования. При этом сброс «излишков» тепла с аппарата осуществляется единственным способом — излучением в окружающее космическое пространство [13].

Система терморегулирования (СТР) предназначена для обеспечения требуемого температурного режима космического аппарата, находящегося на орбите. Для бортовой аппаратуры оптимальной температурой является температура от 0 до 40°С, а для жизнедеятельности экипажа — от 15 до 25°С. Заданный температурный режим обеспечивается регулированием подвода и отвода тепла [27].

Обычная система терморегулирования космического аппарата включает в себя тепловые газожидкостные контуры, излучательные радиаторы, нагреватели, терморегулирующие покрытия и тепловые изоляторы. При этом важна правильная компоновка тепловыделяющих элементов, основанная на точном расчёте тепловых режимов работы. После создания космического аппарата система тщательно тестируется на Земле, так как в космосе уже ничего нельзя будет исправить [13].

Тепловой режим в кабинах и отсеках космического аппарата создаётся под воздействием внешних и внутренних источников тепла, и для успешного решения задачи теплового режима необходимо знать характер внешних и внутренних тепловых нагрузок. В зависимости от назначения и типа космического аппарата, режимов его полёта и выполняемых рабочих программ спектр внешних и внутренних тепловых нагрузок может существенно изменяться [23].

Одной из первых «космических» разработок учёных стала вычислительная модель теплового режима космического аппарата негерметичного исполнения, которая базировалась на опыте решения трёхмерных нестационарных задач тепломассообмена [13].

Даже на современной вычислительной технике полное решение подобных задач требует слишком много времени, поэтому исследователями была предложена «иерархическая модель». Её основная идея заключалась в том, что нет необходимости детально просчитывать температурный режим каждого мелкого тепловыделяющего элемента, пока не оценён допустимый тепловой баланс целых узлов [13].

В результате был создан пакет прикладных программ для расчёта теплового режима космического аппарата негерметичного исполнения, движущегося по произвольной орбите, с учётом эффективной теплоёмкости конструкции и приборов, теплового сопротивления посадочных мест и переменной теплопроводности радиационных панелей [13].

Долговечность космического аппарата зависит от каждого элемента бортовой аппаратуры, поэтому проверка её надёжности — один из важнейших этапов создания космического аппарата [13].

Сейчас эта задача стала особенно актуальной. Ещё в 2000-х годах срок службы космических аппаратов связи и навигации не превышал пяти лет, сейчас же он увеличился до 15 и более лет. Для создания таких аппаратов требуются точные современные методы контроля качества, которые гарантируют их надёжную работу на протяжении всего срока службы. Конечно, имеющиеся

математические модели теплового режима можно использовать для расчёта тепловых режимов отдельных электронных блоков и оптимизации их расположения, однако в расчётах невозможно учесть все технологические разбросы параметров теплового обмена в условиях реальной работы аппаратуры [13].

Исследования реакции материалов и конструкций на воздействие высокоинтенсивных тепловых потоков является важной частью проектирования современных космических аппаратов [16].

С 2005 г. все радиоэлектронные приборы, предназначенные для использования на борту космических аппаратов, проходят проверку на тепловакуумном стенде. Этот стенд представляет собой камеру, обеспечивающую имитацию космических условий (вакуум до 10^{-6} мм рт. ст., «холод» (до -180°C) и «черноту» (степень черноты азотных панелей вокруг объекта испытаний не менее 0,9) космического пространства, имитацию солнечного излучения и инфракрасного излучения планет и других космических факторов, а также имитацию особых условий функционирования космических объектов) и оснащённой специальным измерительным оборудованием и программным обеспечением. В камеру помещаются модули с бортовой аппаратурой, а затем в условиях, приближенных к реальным, в автоматизированном режиме осуществляется наблюдение за тепловым полем всех элементов. Анализ температурных данных позволяет выявить теплонапряжённые узлы и заменить их или улучшить качество монтажа [13].

Проблема теплообмена является весьма актуальной, поэтому изучается многими научными работниками (см., напр., [8], [9], [24]). Вычислению плотности тепловых потоков, приходящих от Земли и Солнца на поверхность космического аппарата, посвящено большое количество литературы. В статье [29] смоделировано тепловое состояние малого космического аппарата, разработаны основные составляющие тепловой математической модели, приведено описание средств системы обеспечения теплового режима. В работе [7] предлагается расчёт внешнего теплообмена космического аппарата, а в [15] приве-

дена методика расчёта коэффициентов облучённости цилиндрического космического аппарата подсветкой Земли. Методика выбора определяющих параметров для обеспечения заданной температуры космического аппарата предложена в статье [1], а в [12] рассматривается моделирование тепловых и гидравлических процессов в контуре активной системы терморегулирования космического аппарата, описывается процесс построения математической модели контура. В работе [10] отмечены особенности работы системы обеспечения теплового режима автоматического космического аппарата. В [11] даётся обзор совершенствования агрегатов для транспортировки тепла в космических аппаратах, а в [19] — совершенствование системы терморегулирования космических аппаратов. В работе [25] приведен расчёт параметров теплообменного аппарата (радиатора) из состава системы терморегулирования негерметичного телекоммуникационного спутника малого класса. В статье [20] рассмотрен тепловой режим малого космического аппарата «АИСТ». В работе [14] представлены две математические модели, одна из которых предназначена для расчёта теплообмена в системе терморегулирования стандарта частоты космического аппарата, другая — для определения распределённых характеристик в пористой структуре гипертеплопроводящих панелей (плоских тепловых труб).

При решении задач оптимизации теплового режима космического аппарата используется эволюционное моделирование (см., напр., [2], [3], [5], [17], [21], [22], [26]).

В последнее время все чаще ставятся задачи проектирования разнообразных объектов аэрокосмической техники, что позволяет наиболее полно учесть различные факторы. Необходимость решения таких задач приводит к появлению специализированного программного обеспечения. Существует тенденция вытеснения дорогостоящих физических экспериментов и испытаний численным моделированием. Разработано множество программных продуктов, которые реализуют метод конечных элементов и представляют собой

автономные пакеты с модульной структурой, наличием инструментов для решения линейных и нелинейных, статических и динамических задач механики конструкций, анализа течения жидкостей, моделирования явлений теплопереноса и др. [31].

В данной работе будет использоваться программный комплекс modeFRONTIER, разработчиком которой является ESTECO.

ModeFRONTIER — это среда для решения задач критериальной и многокритериальной оптимизации, работающая с разными программными комплексами. В ней имеется возможность работы в режиме автоматического проектирования — виртуальный анализ и оптимизация деталей, узлов, механизмов и изделий в целом. Данная среда поддерживает генетические алгоритмы. ModeFRONTIER интегрирована с современными расчётными комплексами ANSYS, ANSYS CFX, ANSYS WORKBENCH и др. Система может функционировать в ОС MS Windows, Linux и UNIX.

Актуальность выбранной темы. Проблема обеспечения теплового режима космического оборудования очень важна. Данная работа является продолжением исследования по теме «Разработка основных функциональных и мехатронных систем роботов для космического и напланетного использования», 2015 (федеральная целевая программа «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014 – 2020 годы»).

Цель ВКР: Разработать методику идентификации тепловых моделей, созданных методом изотермических элементов для кондуктивно-лучистого теплообмена.

Задачи:

- 1) изучить физические процессы теплообмена космического аппарата и моделирование в СПРУТ;
- 2) изучить возможности использования программного обеспечения modeFRONTIER;

3) верифицировать модель типового космического блока методом генетического алгоритма;

4) обеспечить совместную работу программного обеспечения mode-FRONTIER и СПРУТ и верифицировать модели по результатам испытаний.

Глава 1. Сложный теплообмен в изделиях космической техники

Тела, участвующие в тепловом процессе, обмениваются между собой энергией, при этом энергия одних тел увеличивается, других — уменьшается [30].

Передача энергии от одного тела к другому происходит двумя способами:

1) при непосредственном контакте соприкасающихся тел, которые имеют различную температуру (путём теплопроводности и путём излучения при помощи электромагнитных волн). Мерой передаваемого таким способом движения здесь является теплота [30];

2) при наличии силовых полей или внешнего давления (передача энергии в форме работы) [30].

1.1. Основные положения учения о теплопроводности

Явление *теплопроводности* — это процесс распространения тепловой энергии при непосредственном соприкосновении отдельных частиц тела или отдельных тел, имеющих различные температуры. Теплопроводность обусловлена движением микрочастиц вещества [30].

Аналитическое исследование теплопроводности сводится к изучению пространственно-временного изменения температуры, т. е. к нахождению уравнения:

$$T = f(x, y, z, \tau) \quad (1.1)$$

Уравнение (1.1) представляет математическое выражение температурного поля. Таким образом, *температурное поле* есть совокупность значений температуры во всех точках изучаемого пространства для каждого момента времени [30].

Уравнение (1.1) является записью наиболее общего вида температурного поля, когда температура изменяется с течением времени и от одной точки

к другой. Такое поле отвечает неустановившемуся тепловому режиму теплопроводности и называется *нестационарным температурным полем* [30].

Если тепловой режим является установившимся, то температура в каждой точке поля с течением времени остается неизменной. Такое температурное поле называется *стационарным* [30]. В этом случае температура является функцией только координат

$$T = f_1(x, y, z); \quad \frac{\partial T}{\partial \tau} = 0. \quad (1.2)$$

Замечание. Температурное поле, соответствующее уравнениям (1.1) и (1.2), является пространственным.

Если соединить точки тела, имеющие одинаковую температуру, то получим поверхность равных температур, которая называется *изотермической*.

Замечание. Так как одна и та же точка тела не может одновременно иметь различные температуры, то изотермические поверхности не пересекаются.

Возрастание температуры в направлении нормали к изотермической поверхности характеризуется градиентом температуры.

Градиент температуры — это вектор, направленный по нормали к изотермической поверхности в сторону возрастания температуры и численно равный производной от температуры по этому направлению [30], т. е.

$$\text{grad } T = \vec{n}_0 \frac{\partial T}{\partial n},$$

где \vec{n}_0 — единичный вектор, нормальный к изотермической поверхности и направленный в сторону возрастания температуры; $\frac{\partial T}{\partial n}$ — производная температуры по нормали n .

Замечание. Скалярная величина температурного градиента $\frac{\partial T}{\partial n}$ не одинакова для различных точек изотермической поверхности. Она больше там, где расстояние Δn между изотермическими поверхностями меньше.

При решении задач, связанных с нахождением температурного поля, необходимо иметь дифференциальное уравнение теплопроводности [30].

В основу вывода дифференциального уравнения теплопроводности положен **закон сохранения энергии**: количество теплоты dQ , введённое в элементарный объём dV за время $d\tau$ вследствие теплопроводности, а также от внутренних источников, равно изменению внутренней энергии (в зависимости от рассмотрения изохорического или изобарического процесса), содержащегося в элементарном объёме [30].

Согласно **гипотезе Фурье** количество теплоты dQ_r , [Дж], проходящее через элемент изотермической поверхности dF за промежуток времени $d\tau$, пропорционально температурному градиенту $\frac{\partial T}{\partial n}$, т. е.

$$dQ_r = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} dF d\tau. \quad (1.3)$$

Коэффициент пропорциональности в уравнении (1.3) называется *коэффициентом теплопроводности*. Он характеризует способность данного вещества проводить теплоту [30].

Замечание. Коэффициент теплопроводности является физическим параметром вещества. В общем случае он зависит от температуры, давления и рода вещества [30].

Количество теплоты, проходящее в единицу времени через единицу площади изотермической поверхности $q = \frac{dQ_r}{dF d\tau}$, [Вт/м²], называется *плотностью теплового потока* [30]. Плотность теплового потока есть вектор, определяемый соотношением

$$\vec{q} = -\vec{n}_0 \lambda \frac{\partial T}{\partial n}. \quad (1.4)$$

Замечание. Данный вектор направлен по нормали к изотермической поверхности. Его положительное направление совпадает с направлением убыва-

ния температуры (теплота передаётся от горячих к холодным частям тела). Таким образом, векторы q и $\text{grad } T$ лежат на одной прямой, но направлены в противоположные стороны, поэтому в правых частях уравнений (1.4) и (1.3) ставится знак «минус» [30].

Уравнения (1.3) и (1.4) являются математической записью основного **закона теплопроводности**: *плотность теплового потока пропорциональна градиенту температуры.*

Количество теплоты, проходящее в единицу времени через изотермическую поверхность F , называется *тепловым потоком*. Если градиент температуры для различных точек изотермической поверхности различен, то количество теплоты, которое пройдёт через всю изотермическую поверхность в единицу времени, найдётся как

$$Q = \int_F q dF = - \int_F \lambda \frac{\partial T}{\partial n} dF, \quad [Bm]$$

где dF — элемент изотермической поверхности.

Полное количество теплоты Q , Дж, прошедшее за время τ через изотермическую поверхность F , равно

$$Q_\tau = - \int_0^\tau \int_F \lambda \frac{\partial T}{\partial n} dF d\tau.$$

Дифференциальное уравнение теплопроводности описывает целый класс явлений теплопроводности. Чтобы выделить конкретно рассматриваемый процесс и дать его полное математическое описание, к дифференциальному уравнению необходимо присоединить условия однозначности или краевые условия, которые включают в себя:

- геометрические условия, характеризующие форму и размеры тела, в которых протекает процесс;
- физические условия, характеризующие физические свойства среды и тела (λ , c , ρ и др.);

- временные (начальные) условия, характеризующие распределение температур в изучаемом теле в начальный момент времени;
- граничные условия, характеризующие взаимодействие рассматриваемого тела с окружающей средой.

В общем случае начальное условие аналитически может быть записано следующим образом:

при $\tau = 0$

$$T = f(x, y, z).$$

В случае равномерного распределения температуры в теле начальное условие упрощается:

при $\tau = 0$

$$T = T_0 = \text{const}.$$

Граничные условия первого рода. При этом задаётся распределения температуры на поверхности тела для каждого момента времени:

$$T_c = f(x, y, z, \tau),$$

где T_c — температура поверхности тела; x, y, z — координаты поверхности тела.

Граничные условия второго рода. При этом задаются значения теплового потока для каждой точки поверхности тела и любого момента времени:

$$q_n = f(x, y, z, \tau),$$

где q_n — плотность теплового потока на поверхности тела; x, y, z — координаты на поверхности тела.

Процесс теплопроводности можно записать в следующем виде:

$$Q = \sigma m \cdot (T_1 - T_2).$$

Решение задач распространения тепла в средах связано с решением уравнения параболического типа

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \nabla^2 T + \frac{q_v}{c_p}. \quad (1.5)$$

Если система тел не содержит внутренних источников тепла, т. е. $q = 0$, тогда выражение (1.5) принимает форму уравнения Фурье

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \nabla^2 T.$$

Если имеются внутренние источники теплоты, но температурное поле соответствует стационарному состоянию, т. е. $T = T(x, y, z)$, то дифференциальное уравнение теплопроводности превращается в уравнение Пуассона:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q_v}{\lambda} = 0.$$

Для стационарной теплопроводности и отсутствие внутренних источников теплоты выражение принимает вид уравнения Лапласа:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0.$$

Нахождение частных решений этих уравнений в частных производных и некоторых других является основным содержанием теории теплопроводности [30].

1.2. Конвекция

Конвекция — это перенос энергии, обусловленный пространственным перемещением вещества от нагретого тела в жидкостях, газах [30].

Естественная конвекция возникает под действием массовых сил, связанных с неоднородностью жидкости (архимедова сила). *Вынужденная* конвекция возникает при действии внешних сил на границе системы твёрдое тело — жидкость (перепад давления в трубопроводе), либо сообщении потоку кинетической энергии от источника. Конвективный теплообмен между жидкостью и поверхностью твёрдого тела характеризуется теплоотдачей [30].

Конвекция возможна только в текучей среде, в которой перенос теплоты связан с переносом самой среды. Конвекция теплоты всегда сопровождается

теплопроводностью. Совместный перенос теплоты путём конвекции и теплопроводности называют *конвективным теплообменом* [30].

Теплоотдача — это конвективный теплообмен между движущейся средой и поверхностью (стенкой) [30].

Поскольку при движении жидкости или газа конвекция и теплопроводность связаны, то

$$\vec{q} = \vec{q}_{\text{теп}} + \vec{q}_{\text{конв}} = -\lambda \nabla T + \rho \cdot \vec{w} \cdot h,$$

где \vec{w} — скорость, $[m/c]$, ρ — плотность жидкости, $[кг/м^3]$, h — энтальпия, $[Дж/(м^2c)]$.

Количество теплоты, переданное в процессе теплоотдачи, определяется по **уравнению Ньютона – Рихмана**:

1) для установившегося режима

$$q = \alpha \cdot S(T_{\text{ст}} - T_{\text{ж}}),$$

где α — коэффициент теплообмена, $[Вт/(м^2 \cdot К)]$; $T_{\text{ст}}$, $T_{\text{ж}}$ — температура стенки и жидкости соответственно, $[К]$; S — поверхность стенки, $[м^2]$; q — тепловой поток (количество теплоты), $[Вт]$.

2) для неустановившегося режима

$$q = \alpha \cdot S(T_{\text{ст}} - T_{\text{ж}}) \cdot \tau,$$

где τ — время, $[с]$.

Силы, действующие на элемент жидкости, условно разделяют на массовые и поверхностные (массовые действуют на частицы жидкости, природа которых связана с внешними силовыми полями, а поверхностные возникают при соприкосновении поверхности тела с жидкостью, природа этих сил обусловлена внешним давлением и силой трения) [30].

Свободная конвекция возникает за счёт неоднородности массовых сил. Неоднородность возникает за счёт градиента температуры, и, как следствие, неоднородное распределение плотности, в поле земного тяготения, может возникнуть свободное гравитационное движение [30].

Вынужденное движение объёма жидкости происходит под действием поверхностных сил, действующих на его границах, за счёт передаваемой кинетической энергии от источника (например, насоса, вентилятора, ветра) [30].

Коэффициент теплоотдачи α характеризует интенсивность теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой [30].

Замечание. Коэффициент теплоотдачи показывает, какое количество тепла передаётся от единицы поверхности стенки к жидкости в единицу времени при разности температур между стенкой и жидкостью. Он зависит от вида и режима движения жидкости, её физических свойств, размеров, формы и шероховатости стенки. Определение α является основной задачей расчёта теплообменных аппаратов. Обычно коэффициент теплоотдачи определяют методами теории подобия [30].

1.3. Лучистый теплообмен

Совместные процессы взаимного испускания, поглощения, отражения и пропускания энергии излучении в системах различных тел называется *лучистым теплообменом*, причём тела, входящие в данную излучающую систему, могут иметь одинаковую температуру. Лучистый теплообмен между телами определяется потоком результирующего излучения. *Излучение* — это перенос энергии в виде электромагнитных волн. Лучистый теплообмен отличается от теплопроводности и конвекции тем, что теплота в этом случае может передаваться через вакуум [30].

Примером теплового излучения является свет свечи, костра, лампы накаливания, нагретого тела [30].

Энергия теплового излучения, падающего на тело, может поглощаться телом, отражаться от тела или проходить через данное тело. Тело, которое поглощает всю падающую на него лучистую энергию, называют *абсолютно чёрным телом* [4].

Замечание. Абсолютно чёрное тело является физической идеализацией, применяемой в термодинамике. Оно само может испускать электромагнитное излучение любой частоты и визуально иметь цвет [30]. При данной температуре абсолютно чёрное тело излучает максимально возможное количество энергии [4].

Замечание. Так как абсолютно чёрных тел в природе не существует, то в физике для экспериментов используется модель, представляющая собой замкнутую полость с небольшим отверстием. Свет, попадающий внутрь сквозь это отверстие, после многократных отражений будет полностью поглощён, и отверстие снаружи будет выглядеть совершенно чёрным [30].

Плотность потока собственного излучения тела называют его *лучеиспускательной способностью* или *интегральной интенсивностью излучения*. Зная температуру тела, лучеиспускательную способность абсолютно чёрного тела рассчитывают по **закону Стефана — Больцмана**.

Замечание. Закон Стефана — Больцмана устанавливает зависимость плотности интегрального полусферического излучения от температуры. Эта зависимость впервые экспериментально была установлена Стефаном в 1879 г. Позднее, в 1884 г., она теоретически была получена Больцманом [30].

Согласно данному закону

$$E_0 = \sigma_0 \cdot T^4, \quad (1.6)$$

где E_0 — лучеиспускательная способность абсолютно чёрного тела, $[Вт/м^2]$, $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} Вт/(м^2 \cdot К^4)$ — постоянная Стефана — Больцмана; T — абсолютная температура абсолютно чёрного тела, $[К]$.

Для удобства практических расчётов зависимость (1.6) представляется в виде

$$E_0 = c_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad (1.7)$$

где $c_0 = 5,67 Вт/(м^2 \cdot К^4)$ — коэффициент излучения абсолютно чёрного тела.

Замечание. Собственное излучение реальных тел заменяют излучением *серого тела*.

Расчёт лучеиспускательной способности *серого тела* выполняют по формуле

$$E = \varepsilon \cdot E_0,$$

которая с учётом закона Стефана — Больцмана (1.6) принимает вид

$$E = \varepsilon \cdot E_0 = \varepsilon \sigma_0 \cdot T^4,$$

или

$$E = \varepsilon c_0 \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4 = c \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4,$$

где E — лучеиспускательная способность серого тела, $[Вт/м^2]$; ε — интегральная степень черноты серого тела ($0 \leq \varepsilon \leq 1$); $c = \varepsilon \cdot c_0$ — коэффициент излучения серого тела, $[Вт/(м^2 \cdot K^4)]$.

Степень черноты твёрдых тел определяют экспериментально и в зависимости от физических свойств тела, его температуры и шероховатости поверхности приводят в справочниках. Степень черноты поглощающих и излучающих энергию газов рассчитывают в зависимости от состава газа, размеров газового объёма и его температуры на основе экспериментальных данных, приведённых в справочной литературе, как правило, в графическом виде (см. [4]).

Тепловой поток собственного излучения тела рассчитывают по формуле

$$Q = E \cdot F_w = \varepsilon \sigma_0 T^4 \cdot F_w,$$

где F_w — площадь поверхности твёрдого тела или поверхности газовой оболочки, $[м^2]$.

Излучение, характеризующееся интенсивностью, одинаковой по всем направлениям, называется *изотропным*. Если излучение исходит с поверхности твёрдого тела, оно называется *идеально диффузным излучением*. Излучение, которое определяется природой данного тела и его температурой, называется *собственным излучением* [30].

Закон Стефана — Больцмана для объёмной плотности энергии интегрального излучения u_0 , $[Дж/м^3]$, в вакууме при температуре оболочки T имеет вид

$$u_0 = \frac{4\sigma_0}{c_\phi} T^4, \quad (1.8)$$

где c_ϕ — скорость фотонов, $[м/с]$.

Замечание. Из формул (1.7) и (1.8) следует, что плотность интегрального излучения изменяются пропорционально четвёртой степени абсолютной температуры. При $T = 0$ поток интегрального излучения также равен 0.

Пусть имеется плоскопараллельная система тел с установленным между ними экраном, который ставится ортогонально к направлению потока излучения и изготавливается из материалов с большой отражательной способностью и теплопроводностью (например, полированные тонкие листы алюминия, меди и др.) [18].

Замечание. Величина результирующего потока уменьшается в соответствии с количеством установленных экранов и их оптическими свойствами [18].

Пусть необходимо найти результирующий поток излучения и температуру экрана T_3 , тогда

$$\begin{cases} q_{1,3} = A_{1,3} c_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_3}{100} \right)^4 \right], \\ q_{3,2} = A_{3,2} c_0 \left[\left(\frac{T_3}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]. \end{cases} \quad (1.9)$$

По условию имеем $A_{1,3} = A_{3,2} = A_{1,2}$. Для стационарного режима $q_{1,3} = q_{3,2} = q_{(1,2),3}$. Из системы (1.9) находим T_3

$$\left(\frac{T_3}{100} \right)^4 = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 + \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right].$$

Учитывая температуру экрана в формулах (1.9), находим плотность потока результирующего излучения в $[Вт/м^2]$

$$q_{(1,2)э} = \frac{1}{2} A_{1,2} c_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right],$$

где поглощательная способность $A_{1,2}$ системы тел определяется следующим образом:

$$A_{1,2} = \frac{1}{\frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2} - 1}. \quad (1.10)$$

Замечание. При наличии одного экрана лучистый поток уменьшается в два раза [18].

Пусть последовательно установлены n экранов и пусть их поглощательные способности различны [18].

Найдём плотность потока результирующего излучения и температуры экранов в предположении, что их тепловое сопротивление теплопроводности пренебрежимо мало [18].

Имеем

$$\left\{ \begin{array}{l} q_{1,э1} = A_{1,э1} c_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{э1}}{100} \right)^4 \right], \\ q_{э1,э2} = A_{э1,э2} c_0 \left[\left(\frac{T_{э1}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{э2}}{100} \right)^4 \right], \\ \dots\dots\dots \\ q_{эn,2} = A_{эn,2} c_0 \left[\left(\frac{T_{эn}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]. \end{array} \right. \quad (1.11)$$

В системе (1.11) содержится $(n+1)$ уравнений, в качестве неизвестных величин берутся температуры экранов и результирующий поток излучения [18].

Находим плотность результирующего потока. Выражаем температурные перепады

где $A_{1,2}$ — поглощательная способность системы двух тел при отсутствии экрана. С увеличением числа экранов это сопротивление возрастает [18].

В частном случае, при $A_{1,э1} = A_{э1,э2} = \dots = A_{эn,2}$, система (1.12) приводится к зависимости

$$q_{(1,2)э} = \frac{1}{n+1} A_{1,2} c_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] = \frac{1}{n+1} q_{1,2}.$$

Таким образом, плотность потока результирующего излучения при использовании n экранов уменьшается в $n+1$ раз.

Вместо приведённой поглощательной способности в зависимости (1.13) может быть введён коэффициент излучения

$$c_{(1,2)э} = c_0 A_{(1,2)э} = \frac{1}{\frac{1}{c_{1,2}} + \sum_{i=1}^n \left(\frac{2}{c_{эi}} - \frac{1}{c_0} \right)}.$$

Полный поток результирующего излучения получается путём умножения плотности этого потока на поверхность тела [18].

Замечание. Расстояние экранов от нагретой поверхности первого тела на величину результирующего потока не оказывает влияния [18].

Искомые температуры экранов находятся из уравнений (1.12), в которых $q_{(1,2)э}$ является найденной величиной

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{T_{э1}}{100} \right)^4 = \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \frac{q_{(1,2)э}}{c_0} \frac{1}{A_{1,э1}}, \\ \left(\frac{T_{э2}}{100} \right)^4 = \left(\frac{T_{э1}}{100} \right)^4 - \frac{q_{(1,2)э}}{c_0} \frac{1}{A_{э1,э2}} = \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \frac{q_{(1,2)э}}{c_0} \left(\frac{1}{A_{1,э1}} + \frac{1}{A_{э1,э2}} \right), \\ \dots\dots\dots \\ \left(\frac{T_{эn}}{100} \right)^4 = \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \frac{q_{(1,2)э}}{c_0} \left(\frac{1}{A_{1,э1}} + \frac{1}{A_{э1,э2}} + \dots + \frac{1}{A_{э(n-1),n}} \right). \end{array} \right.$$

Для расчёта полного результирующего потока необходимо ещё учесть перенос тепла путём теплопроводности и конвекции через среду, заполняющую пространство между экранами [18].

С уменьшением расстояния между телами и экранами и уменьшением давления среды этот перенос тепла уменьшается. Если газовая среда находится под низким давлением, то такая многократная система может быть использована в качестве надёжной тепловой защиты (экранная изоляция) [18].

При всех расчётах теплообмена излучением важную роль играет геометрия системы. Она учитывается введением угловых коэффициентов излучения, которые часто называются также коэффициентами облучённости [18].

Угловым коэффициентом излучения (коэффициентом облучённости) называют величину, которая определяет долю лучистой энергии, приходящей на данное тело с другого тела [18].

Замечание. Угловым коэффициентом излучения является чисто геометрической величиной, так как зависит только от взаимного расположения тел в пространстве [18].

Угловые коэффициенты находят аналитически, численно методом статистических испытаний, экспериментально по величине освещённости тел и используя свойства угловых коэффициентов. В общем случае выделяют семь свойств угловых коэффициентов: замкнутости, взаимности, невогнутости, затенённости, совмещаемости, распределительности и аддитивности [18].

Замечание. Угловые коэффициенты излучения (коэффициенты облучённости) в системе, состоящей из двух поверхностей, можно рассчитать, используя только первые три свойства угловых коэффициентов [4].

Свойства угловых коэффициентов

1. *Свойство замкнутости (замыкаемости).* Сумма угловых коэффициентов с любой поверхности, входящей в замкнутую систему, включая угловой коэффициент «сам на себя», равна единице. Например, для системы твёрдых тел, состоящей из n поверхностей произвольной формы, свойство замыкаемости для тела i запишется в виде

$$\sum_{k=1}^n \varphi_{ik} + \varphi_{ii} = 1,$$

где $\sum_{k=1}^n \varphi_{ik}$ — сумма угловых коэффициентов излучения с тела i на все n тел, входящих в замкнутую систему; φ_{ii} — угловой коэффициент излучения «сам на себя» (с тела i на тело i).

2. *Свойство взаимности.* Для двух тел, входящих в любую замкнутую или разомкнутую систему, и находящихся в состоянии лучистого теплообмена, справедливо равенство:

$$\varphi_{ik} \cdot F_i = \varphi_{ki} \cdot F_k,$$

где φ_{ik} — угловой коэффициент излучения с тела i на тело k ; F_i — площадь i -го тела; φ_{ki} — угловой коэффициент излучения с тела k на тело i ; F_k — площадь k -го тела.

3. *Свойство невогнутости.* Для плоских и выпуклых поверхностей угловой коэффициент «сам на себя» равен нулю, так как в этом случае тело само себя не облучает («не видит»), т. е.

$$\varphi_{ii} = 0.$$

1.4. Теплообмен излучением между чёрными поверхностями

Рассмотрим замкнутую систему, состоящую из N чёрных поверхностей с площадями A_1, A_2, \dots, A_N . Каждая из поверхностей является изотермической, т. е. температура во всех её точках одинакова, и имеет температуру T_1, T_2, \dots, T_N , соответственно [28].

Замечание. Если какая-либо из поверхностей в действительности не является изотермической, она может быть разделена на более мелкие участки, каждый из которых может рассматриваться как изотермический [28].

Для любой произвольной поверхности i поверхностная плотность потока результирующего излучения может быть определена как разность между плотностями потоков собственного излучения поверхности и поглощённой ею частью потока падающего излучения

$$\frac{Q}{A} = \varepsilon_i \sigma T_i^4 - \alpha_i H_i, \quad (1.14)$$

где H_i — поверхностная плотность потока падающего излучения. Для чёрной поверхности её степень черноты ε и поглощательная способность α равны единице [28].

Поток излучения, падающий на поверхность i , поступает с других поверхностей системы. Пусть излучение попадает с другой поверхности j . Так как j — чёрная поверхность, то она излучает энергию $\sigma T_j^4 A_j$, которая распределяется равномерно во всех направлениях. Часть $\sigma T_j^4 A_j \varphi_{A_j-A}$ этой энергии падает на поверхность i . На единицу площади поверхности i падает энергия $\sigma T_j^4 \frac{A_j}{A} \varphi_{A_j-A}$. По свойству взаимности можно переписать это выражение в виде $\sigma T_j^4 \varphi_{A-A_j}$. Суммарный поток излучения от всех поверхностей на поверхность i можно выразить как сумму потоков от каждой поверхности

$$H_i = \sum_{j=1}^N \sigma T_j^4 \varphi_{A-A_j}. \quad (1.15)$$

Учитывая (1.15) и то, что для чёрных поверхностей $\varepsilon_i = \alpha_i = 1$, по формуле (1.14) находим

$$\frac{Q}{A} = \sigma T_i^4 - \sum_{j=1}^N \sigma T_j^4 \varphi_{A-A_j}. \quad (1.16)$$

В соответствии с законом сохранения энергии поток излучения поверхности i равен сумме потоков излучения, падающих от i на все поверхности замкнутой системы, т. е.

$$\sigma T_i^4 = \sum_{j=1}^N \sigma T_i^4 \varphi_{A-A_j}.$$

Учитывая это в равенстве (1.16), получим

$$\frac{Q}{A} = \sum_{j=1}^N \sigma (T_i^4 - T_j^4) \varphi_{A-A_j}. \quad (1.17)$$

Таким образом, поток результирующего излучения поверхности i вычисляют, суммируя разности четвёртых степеней температур с учётом соответствующих угловых коэффициентов [28].

Поток результирующего излучения $\frac{Q}{A}$ может быть задан на одной или на нескольких поверхностях системы. Для адиабатической поверхности (отсутствие теплообмена среды с поверхностью) $Q = 0$. При этом температуры поверхностей, для которых задаётся поток $\frac{Q}{A}$, являются искомыми неизвестными [28].

Пусть на поверхности k задан поток результирующего излучения $\frac{Q_k}{A_k}$. На всех остальных поверхностях заданы температуры. Учитывая (1.16), определим неизвестную температуру поверхности T_k из равенства

$$\sigma T_k^4 = \frac{\sum_{j=1}^N \sigma T_j^4 \varphi_{A_k-A_j} + \frac{Q_k}{A_k}}{1 - \varphi_{A_k-A_k}},$$

в котором поверхность $j - k$ специально исключена из суммирования. После определения величины σT_k^4 находим потоки результирующего излучения всех остальных поверхностей системы по формулам (1.16) или (1.17).

Если на поверхностях k и n заданы потоки результирующего излучения $\frac{Q_k}{A_k}$ и $\frac{Q_n}{A_n}$, а на всех остальных поверхностях — температуры. Решая систему линейных алгебраических уравнений

$$\begin{cases} \sigma T_k^4 (1 - \varphi_{A_k-A_k}) - \sigma T_n^4 \varphi_{A_k-A_n} = \sum_{j=1}^N \sigma T_j^4 \varphi_{A_k-A_j} + \frac{Q_k}{A_k}; \\ -\sigma T_k^4 \varphi_{A_n-A_k} + \sigma T_n^4 (1 - \varphi_{A_n-A_n}) = \sum_{j=1}^N \sigma T_j^4 \varphi_{A_n-A_j} + \frac{Q_n}{A_n}, \end{cases}$$

находим неизвестные величины σT_k^4 и σT_n^4 . В данной системе члены с индексами $j = k$ и $j = n$ исключены из суммирования. После определения искомых температур T_k и T_n неизвестные потоки результирующего излучения на всех остальных поверхностях системы рассчитываются по формулам (1.16) и (1.17).

Глава 2. Изучение программы СПРУТ, прямые и обратные задачи теплообмена

2.1. Классификация задач тепломассообмена

Задачи тепломассообмена можно объединить в различные группы:

1) задачи разной размерности (*0-мерные, 1-мерные, 2-мерные и 3-мерные*), которая влияет на трудоёмкость решения; важен учёт системы координат, в которой записывают уравнения тепломассообмена [4];

2) *стационарные и нестационарные* задачи тепломассообмена, в зависимости от того изменяются или нет поля температур и поля концентраций во времени [4];

3) *линейные и нелинейные* задачи тепломассообмена (точность решения нелинейных задач значительно выше, но при этом существенно возрастает и сложность реализации алгоритма решения) [4];

4) *внутренние, внешние и сопряжённые* задачи. *Внутренние* задачи теплообмена — задачи расчёта температурных полей и потоков теплоты в твёрдых телах, формируемых в процессе теплопроводности (на границах тела известны условия теплообмена); *внешние* задачи теплообмена — задачи расчёта температурных полей и потоков теплоты в текучей среде, окружающей твёрдое тело, в процессе конвективного или лучисто-конвективного теплообмена (условия теплообмена на границах области известны); при решении *сопряжённой* задачи тепломассообмена учитывают взаимное влияние внутреннего и внешнего процессов переноса теплоты и массы путём согласования условий тепломассообмена на границе раздела фаз [4];

5) *прямые и обратные* в зависимости от заданных (входных) и искомым (выходных) параметров. В прямых задачах по заданным условиям однозначности (размер тела, время процесса, начальное распределение температуры и т. д.) рассчитывают поле температур или поле концентраций, потоки теплоты или потоки массы. В *обратных* задачах тепломассообмена по известному из

эксперимента температурному полю или полю концентраций определяют одно из условий однозначности [4];

б) *прямые, обратные и смешанные* задачи радиационного теплообмена: в *прямых* задачах входными параметрами считают температуры твёрдых поверхностей и газовых объёмов, а выходными параметрами — тепловыделения в газовых объёмах и результирующие тепловые потоки на твёрдых поверхностях; в *обратных* задачах входными параметрами считают тепловыделения в газовых объёмах и результирующие тепловые потоки на твёрдых поверхностях, а выходными параметрами — температуры твёрдых поверхностей и газовых объёмов; в *смешанных* задачах для одних газовых объёмов и твёрдых поверхностей входными параметрами являются температуры, а выходными — тепловыделения и результирующие тепловые потоки; для других газовых объёмов и твёрдых поверхностей, наоборот, заданы тепловыделения или результирующие тепловые потоки, а требуется найти температуры [4].

2.2. Методы и задачи исследования лучистого теплообмена

Задачи лучистого теплообмена

- прямая задача (определение потоков различных видов излучения по заданным температурам, оптическим свойствам поверхностей тел, их геометрической форме и размерам) [18];
- обратная задача (определение температур поверхностей тел по заданным потокам излучения, оптическим и геометрическим свойствам тел) [18];
- смешанные задачи (для одних тел заданы потоки излучения, а для других — температуры) [18].

Методы для исследования лучистого теплообмена

1) метод многократных отражений (наглядный метод, вскрывает механизм протекания лучистого теплообмена в конкретных системах, связан с громоздкими вычислениями);

2) метод эффективных потоков (исследование теплообмена с помощью величин, характеризующих конечные эффекты теплообмена между телами системы, не может наглядно вскрыть всю физическую картину переноса энергии, позволяет получить данные без громоздких вычислений);

3) метод сальдо (см. метод 2);

4) алгебраический метод (аппроксимация метода 5, позволяет находить потоки излучения в узловых точках системы);

5) интегральный метод (интегральные уравнения составляются применительно к отдельным видам излучения, позволяет составить полное представление о сущности явлений лучистого переноса и проводить исследования в сложных геометрических системах);

6) дифференциальный метод (основывается на решении дифференциальных уравнений).

2.3. Пакеты, основанные на методе конечных элементов

Рассмотрим несколько прикладных программ, которые в настоящее время используются в разных странах и в разных организациях при тепловом проектировании, в том числе в космической технике. Укажем методы, которые используются в данных программах, отметим их плюсы и минусы.

ПП	метод	плюсы	минусы
THERMICA (Италия)	изотермических элементов	расчёт суперповерхностей	дорогой, недоступный
TERM (Россия)	изотермических элементов	дешёвый	недоступный (лицензия)
SolidWorks	конечных элементов	доступный, удобное проектирование деталей в машиностроении	долгое время расчётов

СПРУТ	изотермических элементов	доступный	старый интерфейс, отсутствие пре-процессора
-------	--------------------------	-----------	--

Данные универсальные программные системы довольно популярны у специалистов в сфере автоматизированных инженерных расчётов. В следующей таблице приведены характеристики основных таких программных систем.

Название	Разработчик	Характеристика
ANSYS	ANSYS, Inc., США	<p>Многоцелевой конечно-элементный пакет для проведения анализа в широкой области инженерных дисциплин (прочность, теплофизика, динамика жидкостей и газов и электромагнетизм).</p> <p>Это универсальный, конечно элементный пакет, предназначенный для решения в единой среде на одной и той же конечно-элементной модели задач по прочности, теплу, электромагнетизму, гидрогазодинамике, междисциплинарного связанного анализа и оптимизации на основе всех выше приведённых типов анализа.</p>
NISA/DISPLAY	Cranes Software, Inc. — (formerly NISA Software, Inc.)	<p>Комплекс программ конечно-элементного анализа общего назначения для ПК, рабочих станций или суперкомпьютеров.</p> <p>Семейство программ NISA — это набор модулей общего и специального назначения, разработанного для проведения моделирования и анализа в различных областях инженерных знаний, включающих следующие разделы: линейная и нелинейная статика, динамика, композитные материалы, стационарная и нестационарная теплопроводность (NISA II), усталостная прочность и распространение трещин (ENDURE), сжимаемый и несжимаемый потоки в газообразных и жидких средах (3D-FLUID), анализ электрических и магнитных полей (EMAG), анализ печатных плат (FEAP), динамика жёстких тел (DYMES), Р-адаптации (P-ADAPT) и т. д. Используется метод конечных элементов.</p>

MSC.Nastran	Corporate MSC.Software Corporation	"Базовые" виды расчёта; динамические расчёты; нелинейные расчёты; расчёты теплопередачи; аэроупругость I; оптимизация; специальные методы анализа; суперэлементы.
-------------	--	---

2.4. Тепловая модель

В ОКБ «Факел» была построена тепловая математическая модель в формате собственного программного обеспечения. Данная модель представляет собой набор изотермических узлов, на которые из условия обеспечения изотермичности и/или удобства вычисления тепловых связей может быть условно разделена конструкция робота или любого его компонента. Изотермические узлы могут быть связаны между собой и с узлами на границе кондуктивными, конвективными и радиационными тепловыми связями. Для каждого узла тепловой модели задаются необходимые геометрические и теплофизические свойства (площади излучающих поверхностей, угловые коэффициенты для теплового излучения между узлами и на границе, угловые коэффициенты для прямого и переотражённого Солнечного излучения, прямого и отраженного излучения планет, а также значения теплоёмкости, коэффициентов теплового излучения (E_n) и коэффициентов поглощения (A_s) Солнечного излучения). Если требуется, в узле учитывается также мощность объёмного или поверхностного источника, или стока тепла.

Указанная тепловая математическая модель описывается системой алгебраических уравнений, записанных для каждого узла модели. Алгоритм решения системы дифференциальных уравнений для динамических режимов или системы уравнений теплового баланса для стационарных режимов компонента комплекса бортовых систем космического аппарата и соответствующая компьютерная программа собственной разработки ОКБ «Факел» зарегистрированы в ОФАП Российского Космического Агентства (№ 2764, 1989 г).

С учётом вышеизложенного уравнение теплового баланса для i -го узла тепловой модели в дифференциальном виде может быть записано как

$$\frac{dT_i}{d\tau} = \frac{1}{c_i} \left\{ \sum_{j=1}^N k_{ij} (T_j - T_i) - \sigma_0 \cdot F_i \cdot \sum_{j=1}^N \frac{E_j}{1 - E_j} \left(\delta_{ij} - \frac{E_j}{\delta_{ij} - (1 - E_j)\varphi_{ij}} \right) \left(\frac{T_j}{100} \right)^4 + Q(\tau) + A_{s_i} \cdot F_i \cdot q_s \cdot [\varphi_{s_i}(\tau) + \varphi_{s_i}(\tau)] \right\},$$

где $i = 1, \dots, NT$; T_i, T_j — переменные величины, соответствующие искомой температуре узлов и конечных элементов (объёмов) тепловой модели.

Узлы с номерами $NT < i < N$ представляют собой граничные узлы для тепловой модели, нумерация которых производится в последнюю очередь.

При наличии кондуктивного и/или радиационного интерфейсов (например, при жёстком закреплении объекта испытаний и теплового анализа внутри вакуумной камеры на термостатируемой плите и окруженного тепловыми экранами с регулируемой температурой) граничные тепловые условия могут быть записаны в виде уравнения

$$T_i = T_i(\tau),$$

которое задаёт изменение во времени температуры окружающих тепловую модель пограничных узлов.

При расчёте переходных (нестационарных) тепловых режимов дополнительно к граничным тепловым условиям должны быть заданы начальные условия — температурное поле $T_{i0} = T_i(0)$, зафиксированное в начальный момент времени.

Для независимых коэффициентов и свободных членов в уравнениях будем использовать следующие обозначения:

c_i — суммарная теплоёмкость, [Дж/К], i -го узла тепловой модели (на основе метода изотермических узлов) или удельная теплоёмкость и соответствующая удельная масса i -го материала конструкции, заданная в файле исходных данных для всех материалов объекта теплового анализа при генерировании выбранным программным комплексом расчётной сетки, созданных на основе метода конечных элементов;

$k_{ij} = \lambda \cdot S/L$ — кондуктивная тепловая связь, $[Вт/К]$, между узлами i и j тепловой модели с учётом проводимости теплового контакта отдельных деталей конструкции, если такой контакт после разбивки конструкции на расчётные узлы имеется (на основе метода изотермических узлов);

S — эквивалентная площадь сечения кондуктивного теплового потока;

L — эквивалентное расстояние распространения кондуктивного теплового потока.

На основе метода конечных элементов задаётся только коэффициент теплопроводности λ , $[Вт/(м \cdot К)]$, для каждого материала конструкции, остальные параметры автоматически определяются программным комплексом из ранее созданной и адаптированной (упрощённой) для этого комплекса геометрической математической модели объекта для теплового моделирования;

$\sigma_0 = 10^8 \cdot \sigma$, где σ — постоянная Стефана — Больцмана;

F_i — общая площадь излучающей поверхности, $[м^2]$, i -го узла тепловой модели (метод изотермических узлов). На основе метода конечных элементов площади излучающих поверхностей элементов определяются программным комплексом из геометрической математической модели;

E_i ($0 < E_i < 1$) — коэффициент диффузного излучения (поглощения) или степень черноты излучающей (поглощающей) поверхности по отношению к инфракрасным (тепловым) лучам для i -го узла тепловой модели (метод изотермических узлов). На основе метода конечных элементов задаются коэффициенты диффузного и зеркального излучения для каждого материала конструкции с учетом термооптических особенностей поверхностей;

$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}$ — единичная матрица;

φ_{ij} — угловой (геометрический) коэффициент диффузного теплового излучения между узлами i и j (метод изотермических узлов). На основе метода

конечных элементов угловые коэффициенты диффузного и зеркального излучения определяются программным комплексом из геометрической математической модели;

$Q(\tau, T)$ — мощность, $[Вт]$, объёмного или поверхностного источника или стока тепла в i -ом узле, заданная в виде циклограммы или изменяющая свою величину в зависимости от значений температуры других узлов тепловой модели;

A_s — коэффициент поглощения солнечного излучения поверхностью i -го узла (метод изотермических узлов). На основе метода конечных элементов коэффициент поглощения задаётся для каждого материала конструкции с учетом термооптических особенностей поверхностей;

q_s — плотность потока солнечного излучения, $[Вт/м^2]$;

$\varphi_{si}, \varphi_{sri}$ — геометрические коэффициенты солнечной тепловой нагрузки, учитывающие направление и изменение во времени прямого и связанного с ним диффузно отраженного потоков солнечного излучения, падающих на поверхность i -го узла, и отношение освещённой площади узла к общей площади узла (метод изотермических узлов). На основе метода конечных элементов диффузные и зеркальные геометрические коэффициенты солнечной или другой внешней тепловой нагрузки (например, от планет и их спутников) определяются программным комплексом из геометрической математической модели.

Описанные выше коэффициенты уравнений являются независимыми от температурных условий только в первом приближении, но их численные значения могут быть уточнены в зависимости от текущих расчётных значений температуры по рекуррентной схеме. Современные компьютерные программы для выполнения тепловых расчетов обладают такими схемами «внутри» программного комплекса.

Глава 3. Расчёт сложного теплообмена объекта космической техники

Для проведения компьютерных расчётов тепловых режимов может быть использована программа СПРУТ.

Программа СПРУТ (тепловые модели на основе метода изотермических узлов), ФГУП ОКБ «Факел», Государственный фонд алгоритмов и программ (ГосФАП), регистрационный № 2764, 1989 г.

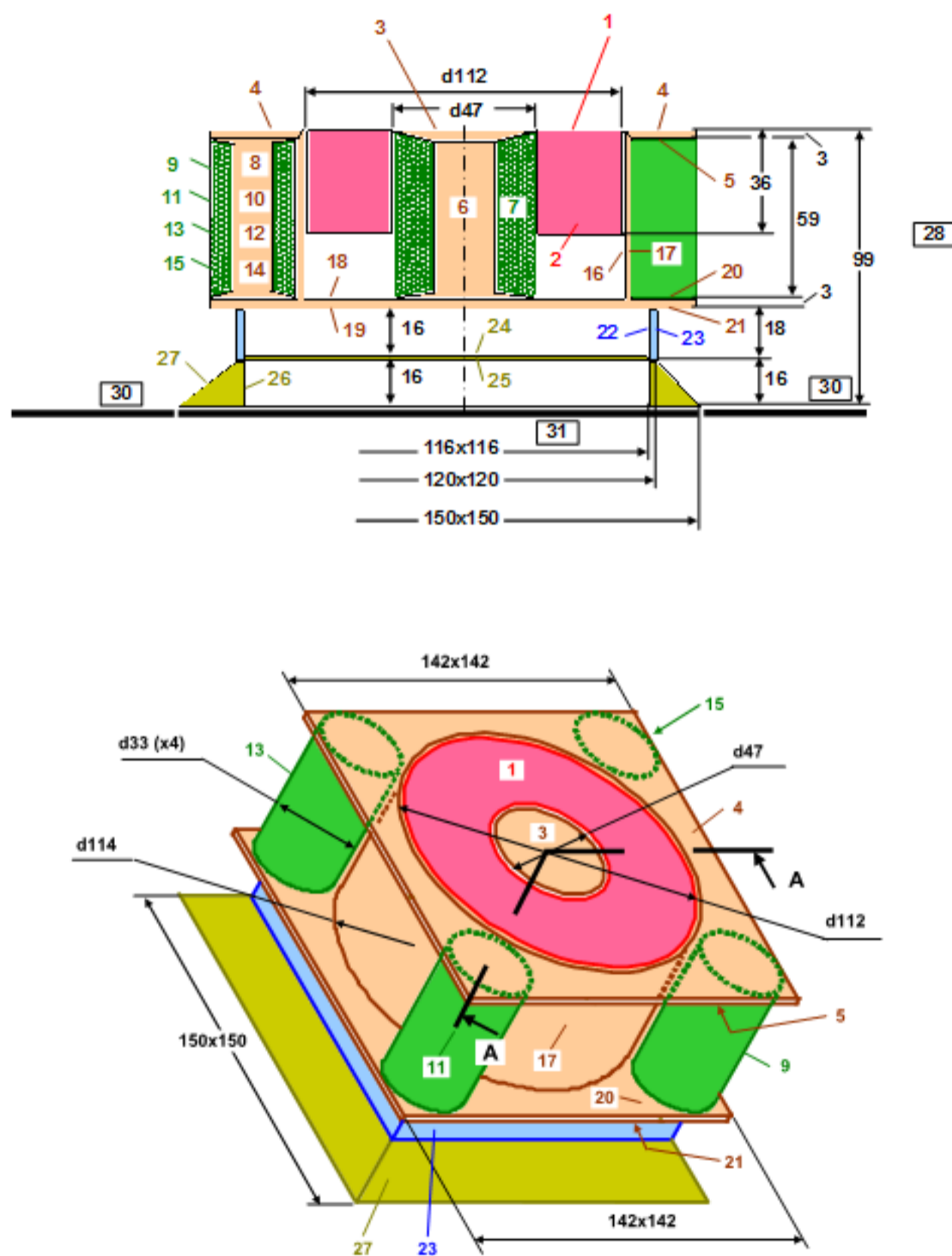


Рис. 1. Карта узлов упрощённой тепловой модели анодного блока

На рис. 1 представлена модель двигателя анодного блока SPT-100В (узлы 1 – 27) и положение узлов для граничных тепловых условий (узлы 28 –

31). Данная модель является упрощённой геометрической моделью внутренних и внешних поверхностей, адаптированной к западному программному обеспечению.

Геометрические и теплофизические характеристики внутренних и внешних поверхностей упрощённой геометрической модели анодного блока SPT-100B приведены в следующей таблице:

№ узла	Наименование компонента SPT-100B	Геометрия узла	Площадь, M^2	Оптические характеристики	
				E_{η} (cold/hot)	A_{η} (BOL/EOL)
Узлы для упрощённой тепловой модели SPT-100B					
1	Выходная (фронтальная) поверхность разрядной камеры	Кольцо (диаметр $d_{нар}=112$ мм, $d_{вн}=47$ мм)	0,00811	0,95/0,86	0,81/0,95
2	Задние (обращённые внутрь анодного блока) поверхности разрядной камеры	Кольцо (диаметр $d_{нар}=112$ мм, $d_{вн}=47$ мм) плюс боковые поверхности двух цилиндров: $d=47$ мм, $h=36$ мм, $d=112$ мм, $h=36$ мм	0.0261	0.08/0.08	— (внутренние поверхности)
3	Фронтальная поверхность внутреннего магнитного полюса	Круг $d=47$ мм	0,00173	0,92/0,75	0,6/0,9
4	Фронтальная поверхность наружного магнитного полюса	Симметричная поверхность, ограниченная квадратом $142*142$ мм и кругом $d=112$ мм	0,012	0,92/0,74	0,6/0,9
5	Задняя поверхность наружного магнитного полюса	Симметричная поверхность, ограниченная квадратом $142*142$ мм, кругом $d=114$ мм и четырьмя кругами $d=33$ мм	0,00654	0,27/0,27	0,3/0,6
6	Сердечник внутренней магнитной катушки	Без радиационных связей	— (внутренняя поверхность)		
7	Обмотка внутренней магнитной катушки	Боковая поверхность цилиндра: $d=47$ мм, $h=62$ мм	0.00915	0.14/0.14	— (внутр. поверхность)
8, 10, 12, 14	Сердечник наружных магнитных катушек	Без радиационных связей	— (внутренние поверхности)		

9, 11, 13, 15	Внешняя поверхность обмоток наружных катушек	Боковая поверхность цилиндра $d=33 \text{ мм}$, $h=59 \text{ мм}$	0,00611	0,15/0,15	0,34/0,6
16	Наружный магнитный экран магнитопровода (внутренняя поверхность)	Боковая поверхность цилиндра $d=112 \text{ мм}$, $h=62 \text{ мм}$	0.0218	0.25/0.25	— (внутр. поверхность)
17	Наружный магнитный экран – боковая поверхность анодного блока	Боковая поверхность цилиндра $d=114 \text{ мм}$, $h=59 \text{ мм}$	0,0211	0,92/0,77	0,6/0,9
18	Поверхность основания магнитопровода (верх)	Кольцо (диаметр $d_{нар}=112 \text{ мм}$, $d_{вн}=47 \text{ мм}$)	0.00811	0.5/0.5	— (внутр. поверхность)
19	Поверхность основания магнитопровода (низ)	Квадрат $116*116 \text{ мм}$	0.0135	0.25/0.25	(внутр. поверхность)
20	Поверхность основания магнитопровода (верх)	Симметричная поверхность, ограниченная квадратом $142*142 \text{ мм}$, кругом $d=114 \text{ мм}$ и четырьмя кругами $d=33 \text{ мм}$	0,00654	0,25/0,25	0,3/0,6
21	Поверхность основания магнитопровода (низ)	Симметричная поверхность, ограниченная двумя квадратами $142*142$ и $120*120 \text{ мм}$ плюс кромка $h=3 \text{ мм}$	0.00747	0,25/0,25	0,3/0,6
22	Промежуточный фланец анодного блока (внутренние поверхности)	Боковая поверхность прямоугольной призмы, основание $116*116 \text{ мм}$, $h=16 \text{ мм}$	0.00742	0.13/0.13	— (внутр. поверхность)
23	Промежуточный фланец анодного блока (внешние поверхности)	Боковая поверхность прямоугольной призмы, основание $120*120 \text{ мм}$, $h=18 \text{ мм}$	0,00864	0,13/0,13	0,45/0,6
24	Задняя крышка анодного блока (внутренняя поверхность)	Квадрат $116*116 \text{ мм}$	0.0135	0.71/71	— (внутр. поверхность)
25	Задняя крышка (внешняя поверхность)	Квадрат $116*116 \text{ мм}$	0,0135	0,65/0,65	0,64/0,9
26	Монтажная плита анодного блока (внутренняя поверхность)	Боковая поверхность прямоугольной призмы $116*116 \text{ мм}$, $h=16 \text{ мм}$ плюс симметричная поверхность, обращённая к монтажной плите ТОМа (узел 31) и ограниченная двумя квадратами $150*150$ и $116*116 \text{ мм}$ минус четыре контактные площадки	0.0139	0,75/0,75	0,64/0,9

		(4x637 мм ² , SPT-100B ICD)			
27	Монтажная плита анодного блока (внешние поверхности)	Боковая поверхность конической призмы, основания 150*150 мм и 120*120 мм, h=16 мм	0,0118	0,75/0,75	0,64/0,9
Узлы для моделирования граничных тепловых условий (для справки)					
28, 29	Окружающая среда / космос	Поверхности окружающей среды в окрестности SPT, достаточные для учёта взаимного переизлучения с внешних поверхностей блока	~ 0,73	1,0	—
30	Терморегулируемая поверхность ТОМа в зоне монтажа SPT (вокруг SPT)	Симметричная поверхность, ограниченная двумя квадратами 250*250 и 150*150 мм	0,04	0,9/0,9	—
31	Терморегулируемая поверхность ТОМа в зоне монтажа SPT (под SPT)	Квадрат 150*150 мм	0,0225	0,9/0,9	—

Мною была изучена работа программы СПРУТ в ходе корректирования моделей одного из двигателей SPT.

Для существующей тепловой модели двигателя были доработаны ряд узлов. Планируется доработка ряда узлов и увеличить мощность. Требовалось пересчитать модель.

В ходе работы была произведена корректировка модели, пересчитаны связи изменения тепловыделений в верхней части двигателя (керамика).

Сравнение расчётных значений температуры по узлам упрощённой тепловой модели анодного блока SPT-100B приведено в следующей таблице:

№ узла	T _i °C	
	Operating mode 1350 W (U _d =300 В, I _d =4,5 А, I _m =4,5 А, КПД двигателя=0,5, тепловой КПД=0,7692 (при «тяговом» КПД=0,65) test environment (30 °C)	Non-operating mode, flight condition (cold case)
1	626,2	-63,9
2	522,0	-62,9
3	328,4	-57,5

4	310,6	-63,6
5	360,5	-57,4
6	391,8	-59,1
7	391,5	-59,1
8	312,2	-62,9
9	211,2	-67,2
10	303,3	-61,5
11	314,7	-58,9
12	314,1	-58,9
13	301,6	-57,2
14	286,9	-56,8
15	250,3	-55,6
16	249,8	-55,6
17	256,7	-50,5
18	165,1	-45
19	309,8	-34,7
20	248,1	-39,9
21	241,5	-31,6
22	241,5	-31,6
23	110,0	0
24	30,0	-269,0
25	30,0	-269,0
26	300	-60
27	30	-60
28	30	-60

Связи (весовые коэффициенты) в узлах, полученные в ходе экспериментов, приведены в таблице (см. приложение 3).

Решение задачи было осуществлено на Фортране. Программа выдала оптимальную температуру в узлах:

номер узла	температура	номер узла	температура
1	606.4	17	192.0
2	562.3	18	208.3
3	241.5	19	207.0
4	249.7	20	190.1
5	250.2	21	189.8
6	243.5	22	185.5
7	252.4	23	185.1
8	228.9	24	182.1

9	233.3	25	182.0
10	224.9	26	121.0
11	227.3	27	119.9
12	216.4	28	-269.0
13	214.4	29	-269.0
14	219.2	30	100.0
15	218.8	31	100.0
16	192.5		

Глава 4. Обзор результатов испытаний космического робота

4.1. Глобальная тепловая модель

Рассмотрим тепловую математическую модель для робота, в которой радиационные поверхности системы терморегулирования используются для отвода избыточного внутреннего тепловыделения в окружающее пространство с помощью лучистого теплообмена (в вакууме) и конвективного теплообмена (в атмосфере планеты при наличии таковой). Основными характеристиками, описывающими физическую суть данного процесса являются коэффициент излучения (степени черноты) E_n и коэффициента поглощения солнечного излучения A_s . Эффективный отвод избыточного тепловыделения обеспечивается при минимальных значениях комплекса A_s/E_n , т. е., в случае минимального поглощения внешней тепловой энергии от Солнца и максимального излучения внутреннего тепловыделения в окружающее пространство.

Используя компьютерные программы для теплового моделирования, основанные на методе изотермических узлов, упрощённая тепловая математическая модель любого компонента робота может быть представлена следующими типовыми узлами (объёмами различной формы, оболочками различной толщины и т. п.): 1 — силовой каркас компонента, 2 — тепловыделяющий элемент (один с суммарной мощностью тепловыделения или несколько; также отдельно может быть выделен узел, для которого строго должно выполняться требование по допустимому диапазону температуры), 3, 4 — внутренняя и внешняя, обращённая в космос, поверхности защитного кожуха компонента, 5 — часть внешней поверхности защитного кожуха, выделенная для моделирования радиационной поверхности (используется для случая, когда узел 4 моделирует многослойную экранно-вакуумную теплоизоляцию робота в открытом космическом пространстве), 6 — нагреватель и соответствующий датчик

температуры локальной СТР (в упрощённом варианте расчёта нагреватель может быть совмещён с датчиком температуры, используемым для управления этим нагревателем).

Основные размеры компонентов робота, используемые для построения геометрической модели, приведены на рис. 2.

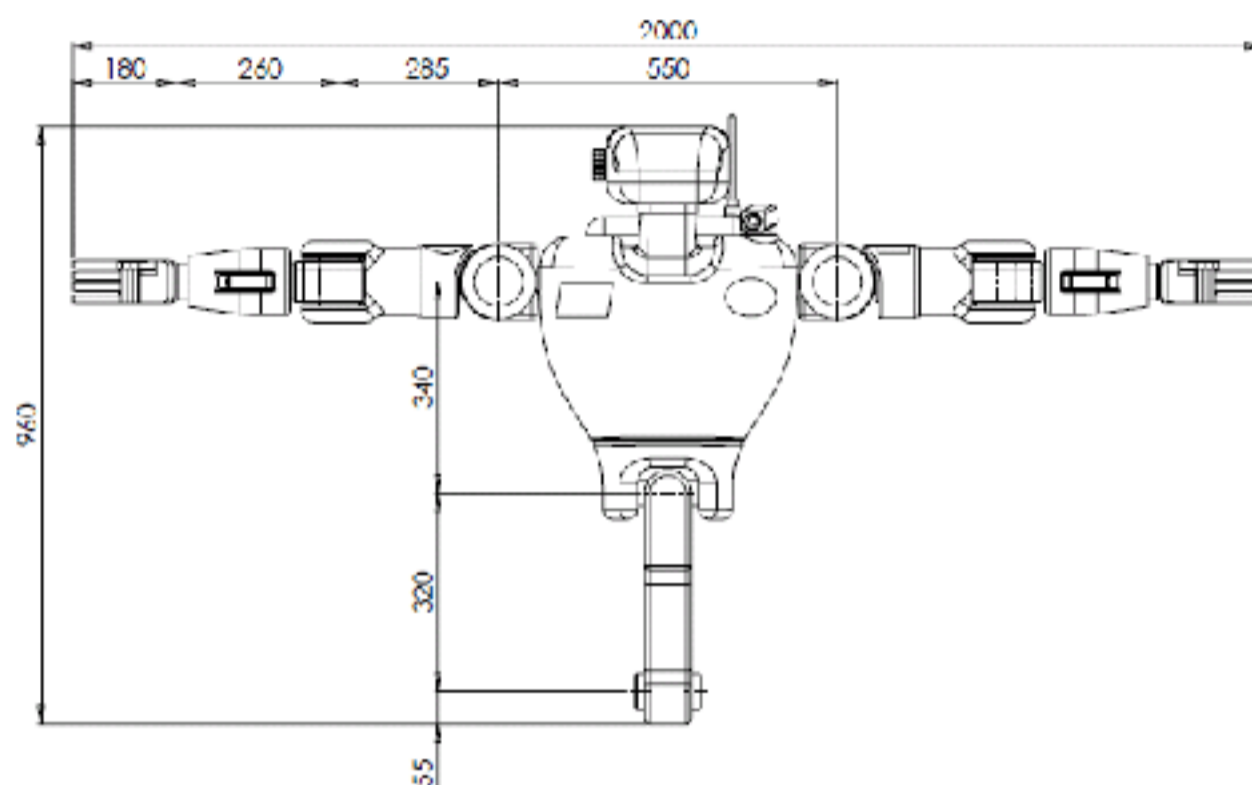


Рис. 2. Основные размеры компонентов робота, используемые для построения геометрической модели

Были вычислены размеры внешних поверхностей модулей и выбран конструкционный материал с соответствующими теплофизическими свойствами для изготовления корпусных деталей. В качестве конструкционного материала при изготовлении всех корпусных деталей компонентов макета должен быть использован алюминиевый сплав, который обладает низкой плотностью, высокой теплопроводностью, необходимой для эффективной работы робота, жаропрочностью, механической прочностью и пластичностью при низких уровнях температуры.

Использовались два типа терморегулирующих покрытий со следующими свойствами и технологическими приемами применения: эмаль АК-512 белого цвета (диапазон температуры от -150 до $+200^{\circ}\text{C}$; $A_s \leq 0,3$, $E_n \geq 0,85$);

терморегулирующее покрытие класса «солнечные отражатели» на основе гибкой фторопластовой пленки Ф4МБ (толщина 0,2 мм), металлизированной с одной стороны (серебро, толщина 0,15 мкм, отражающий слой) и с защитой этого слоя от механических повреждений и коррозии (защитный слой 0,08 мкм, моноокись кремния, нихром + лак) (диапазон температуры от -130 до $+130^{\circ}\text{C}$; $A_s \leq 0,11-0,17$, степень черноты $E_n \geq 0,8-0,85$; масса покрытия (клей + плёнка) — от 500 до 600 г/м²).

Термооптические характеристики внешних поверхностей корпусов модулей манипуляционной системы макета должны соответствовать состоянию поверхности алюминиевого сплава после механической обработки, которая в этом случае обеспечивает коэффициенты E_n в диапазоне 0,2 – 0,3, коэффициенты A_s — в диапазоне 0,3 – 0,5.

При имитации теплового воздействия факторов космического пространства и тепловых условий функционирования в качестве метода испытаний должен быть выбран метод воспроизведения поглощаемых внешними поверхностями макета тепловых потоков. Метод основан на воспроизведении с помощью источников инфракрасного излучения, размещаемых в непосредственной близости от объекта испытаний, расчётного распределения поглощаемых его поверхностью внешних тепловых потоков. Выбранный метод испытаний обеспечивает с минимальными затратами решение целей и задач испытаний без использования имитаторов солнечного и планетного излучения.

Экранно-вакуумная теплоизоляция робота предназначена для защиты робота от воздействия окружающей среды путём уменьшения теплообмена с этой средой с целью поддержания заданного теплового режима. Данная теплоизоляция представляет собой набор экранов-слоёв (от 5 до 30) из материалов с высокой отражательной способностью, разделённых прокладками из материалов с низкой теплопроводностью, заключённых в «конверт» из облицовочных материалов.

Были рассчитаны площади поверхностей робота, выбран материал для изготовления составных частей и определены необходимые теплоизоляционные характеристики. Все облицовочные слои изготавливаются из полиамидных (“беспылевых”) материалов. Термооптические свойства внешнего слоя: $A_s \leq 0,6$ и $E_n \geq 0,6$. Максимальная величина удельного коэффициента поперечной тепловой проводимости матов экранно-вакуумной теплоизоляции должна быть не более $0,025 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, соответствующее количество слоёв промежуточного набора мата – 18. Температура всех требуемых материалов находится в диапазоне от -200°C до $+150^\circ\text{C}$. Масса макета робота (8 матов) не должна превышать 2250 г.

Разработка нагревателей системы терморегулирования макета робота включала выбор и обоснование типа нагревателя для использования в космических условиях, определение и обоснование технических характеристик нагревателя (электрические параметры, рабочий диапазон температуры, габаритно-массовые параметры и др.), определение и обоснование необходимого количества нагревателей, разработка схемы расположения их на модулях манипулятора и на модуле торса макета робота, выбор и обоснование способа крепления на макете робота.

Наружные поверхности модулей манипулятора являются важной составляющей системы терморегулирования макета робота. Изготовление радиационных поверхностей выполняется при помощи особой механической обработки корпусов модулей. Тепловой режим обеспечивается полным укрыванием экранно-вакуумной теплоизоляцией. Мат такой теплоизоляции состоит из 20 слоёв тонкой металлической фольги, отделённых друг от друга слоями специальной кремнезёмной ткани, имеющей низкий коэффициент теплопроводности. При этом теплопередача от слоя к слою происходит за счёт переизлучения тепла.

На макет робота устанавливались специальные датчики температуры. Диапазон измеряемых значений температуры — от -196 до $+200$ °С, гарантийная наработка в пределах гарантийного срока — 135000 часов в диапазоне температуры -196 до $+100$ °С.

После завершения электромонтажных работ было произведено программирование блока для задания необходимой логики работы нагревателей по входным данным термодатчиков.

При использовании этого подхода к выбору типа и нумерации узлов была получена глобальная тепловая математическая модель робота. Проектный облик робота SAR402 и положение узлов глобальной модели робота (107 узлов) представлены на рис. 3.

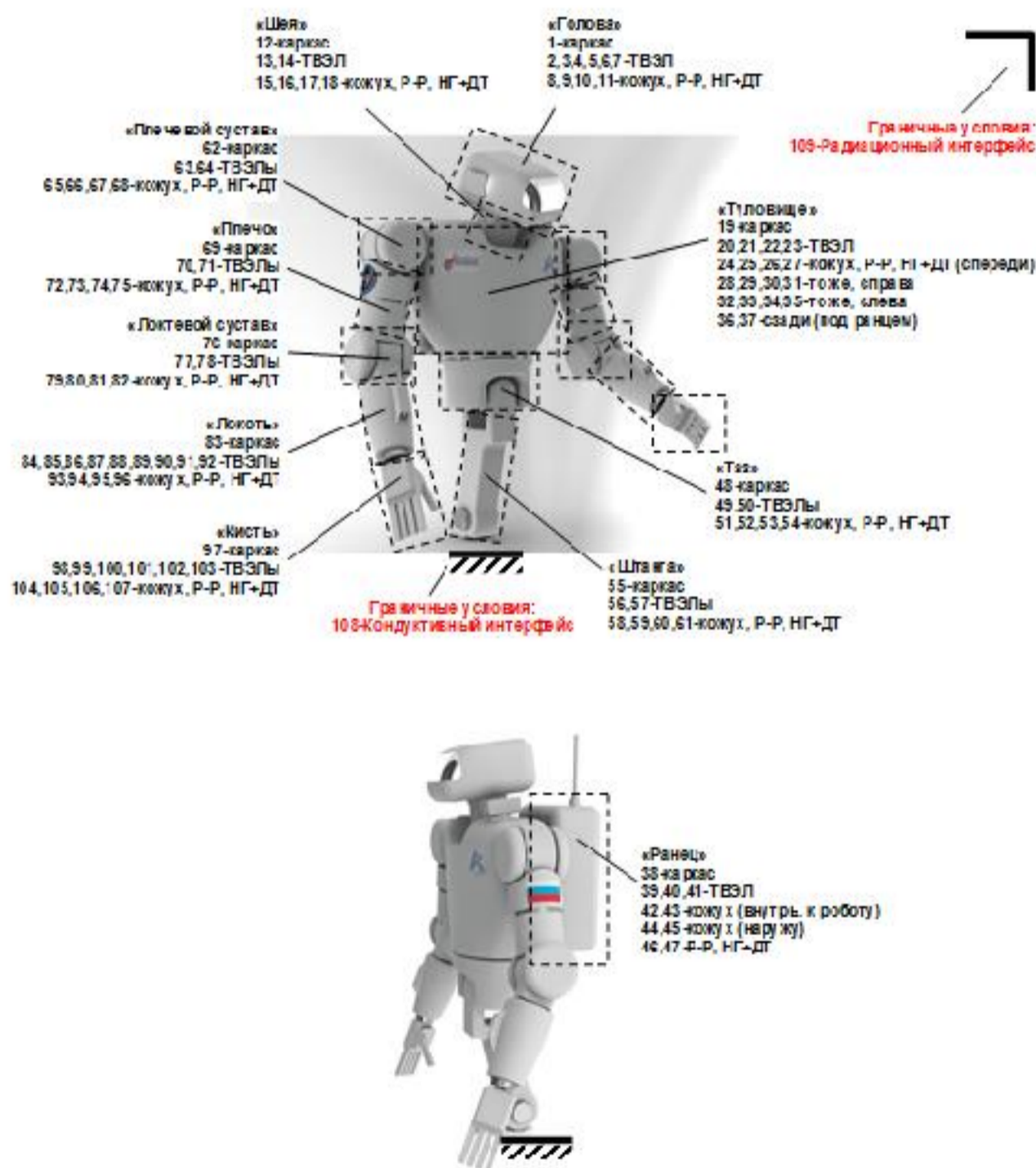


Рис. 3. Тепловая математическая модель робота. Расположение узлов

Здесь используются следующие обозначения и понятия:

каркас — силовой элемент в пределах выделенной зоны конструкции робота;

ТВЭЛ — тепловыделяющие элементы в зоне;

кожух — внешняя защитная оболочка зоны;

р-р — радиатор;

НГ — нагреватель;

ДТ — датчик температуры.

Система обеспечения теплового режима робота проектируется как сочетание пассивного и активного способов регулирования температуры: пассивный способ используется для устранения перегрева элементов робота, активный способ в виде подвода тепловой энергии от электрических нагревателей или от собственных источников тепла к элементам робота — для устранения переохлаждения.

В качестве основных пассивных средств используются: создание кондуктивных "тепловых мостов" и "тепловых развязок" между различными компонентами робота, применение экранно-вакуумной теплоизоляции, обеспечение определенных оптических характеристик внешних поверхностей путём применения покрытий или соответствующей обработки этих поверхностей, выбор мест расположения, формы и площади радиационных поверхностей, обеспечивающих отвод избыточного тепла излучением на окружающие поверхности или в открытый космос и т. п.

Тепловой режим робота на всех этапах орбитального функционирования обеспечивается при следующих граничных тепловых условиях:

- робот установлен на терморегулируемую монтажную плиту, температура которой поддерживается в заданном диапазоне внешними средствами;
- робот может длительно находиться как в условиях постоянного воздействия Солнечного излучения с максимальным миделем (режим "перегрев"), так и в условиях длительной тени, т. е. полного отсутствия потока Солнечного излучения (режим "переохлаждение").

В режиме “перегрев” непрерывное воздействие максимальных внешних тепловых потоков на внешние поверхности робота, для которых значения оптических характеристик терморегулирующих покрытий приняты с учётом возможной деградации на конец срока активного существования, сочетается с максимальной внутренней тепловой нагрузкой, соответствующей длительной непрерывной работе.

В режиме “переохлаждение” рассматривается тепловой режим при неработающем роботе, его полном затенении (внешние тепловые потоки отсутствуют) и при работе нагревателей системы терморегулирования для поддержания нижних границ допустимого диапазона температуры по заданному алгоритму управления.

Требования к допустимым диапазонам температуры критических элементов конструкции робота приведены в следующей таблице:

Компонент	Номер узла тепловой модели	Температурные границы эффективной работы, °С		Границы стойкости к нагреву/охлаждению, °С	
		max	min	max	min
Мотор (обмотка)	max/min {5-7}, {13,14}, {20-23}, {49,50}, {56,57}, {63,64}, {70,71}, {77,78}, {84-92}, {98-103}	+125	-30	-	-
...
Скан-камера (корпус)	max/min {2,3}	+50		-	-
Лазерный дальномер	max/min {4}	+50	-10	+75	-25
		окр. ср.		окр. ср., хранение	
...	
Электронный блок управления	max/min {39}	+60	-30	+70	
		монтажная пов-ть		нерабочий режим	
...	

Нагреватель	max/min {...}	+200	-75	-	-
...

Обычно температурные границы для критичных элементов могут быть назначены, исходя из критерия нагревостойкости, определяемого как способность изделия или материала выдерживать воздействие повышенной или пониженной температуры без повреждения и ухудшения конструкционных и функциональных свойств, обеспечивая заданные сроки активного существования.

Использовались следующие предварительные оценки для параметров глобальной тепловой математической модели робота:

1. Локальная радиационная поверхность компонента робота должна характеризоваться минимальным отношением A_s / E (коэффициент поглощения солнечного излучения/степень черноты). Радиационные поверхности должны, по возможности, располагаться на противоположных сторонах кожуха компонента робота, чтобы освещённость радиатора Солнцем всегда была ниже 50%.

В качестве признака отсутствия радиатора на каком-либо компоненте робота в нашем подходе к моделированию служит минимальная ненулевая площадь радиатора (например, 1 мм^2), заданная в соответствующей матрице параметров модели.

2. Узел, укрытый экранно-вакуумной теплоизоляцией, в упрощённом варианте может быть описан по известной формуле для вычисления приведенной степени черноты

$$E_{np} = \frac{1}{1/E_1 + 1/E_2 - 1 + n(1/E_{11} + 1/E_{12} - 1)},$$

которая зависит от количества слоёв (экранов) экранно-вакуумной теплоизоляции (n), степени черноты этих экранов (E_i) и уровня температуры экранно-вакуумной теплоизоляции (тенивая или солнечная сторона). Для метода изо-

термических узлов использовался другой подход к моделированию теплоизоляции: кондуктивная связь между внутренней и внешней поверхностями кожуха компонента робота задавалась из условия $0,075 \times F_i$ [$Вт/К$] для 10 слоёв экранно-вакуумной теплоизоляции и $0,05 \times F_i$ [$Вт/К$] для 20 слоёв, где F_i [$м^2$] — площадь поверхности кожуха, укрытой теплоизоляцией.

Для предварительной оценки кондуктивных связей внутри каждого компонента робота использовались следующие величины:

- 1) «каркас + тепловыделяющие элементы»: $1,0$ $Вт/К$ (кондуктивный теплообмен);
- 2) «каркас + кожух»: $0,1$ $Вт/К$ (радиационный теплообмен);
- 3) «каркас + нагреватель и датчик температуры»: $1,0$ $Вт/К$ (нагреватель и датчик температуры каждого компонента «установлены» в модели непосредственно на каркасе);
- 4) «каркас + радиатор»: 0 или $1,0$ $Вт/К$, если для связи с радиатором используется тепловая шина любой конструкции;
- 5) «кожух + радиатор»: $0,1$ $Вт/К$ (продольная связь по тонкостенному элементу конструкции).

Кондуктивная связь между каркасами соседних компонентов робота принята минимальной, т. е., около $0,1$ $Вт/К$.

Из-за некоторой неопределенности геометрической модели в пределах одного компонента на данном этапе анализа принята следующая предварительная оценка для величин радиационных связей (угловых коэффициентов излучения):

- 1) тепловыделяющие элементы (25 % — излучение на каркас, 25 % — излучение на соседние тепловыделяющие элементы, 25 % — излучение на внутренние поверхности кожуха, 25 % — самооблучение);
- 2) каркас (кроме ответного излучения на тепловыделяющие элементы каркас излучает на внутренние поверхности кожуха, на «самооблучение» задано 30 %);

3) кожух (для наружной поверхности задано 100 % излучения в окружающую среду).

Для учёта Солнечного излучения, падающего на внешние поверхности робота, используются угловые коэффициенты: максимальная величина углового коэффициента для цилиндрической поверхности, например, равна 0,32, для сферической — 0,25.

4.2. Результаты расчёта глобальной тепловой модели

Для разработки программы проведения исследовательских испытаний системы терморегулирования робота необходимо использовать различные средства проведения испытаний, который бы обеспечивал имитацию условий эксплуатации робота в открытом космическом пространстве. Для этого в первую очередь необходимо соорудить сооружение (барокамера), внутри которого можно обеспечить условия безвоздушного пространства. В барокамере создаётся пониженное давление. Необходимо также использовать сооружения, поддерживающие определенные тепловые режимы. Такими сооружениями являются термокамеры различных видов, например, климатические камеры. В данной модели необходимо сочетание условий обеспечения определённых тепловых режимов в условиях поддержания вакуума. Сочетание таких условий обеспечивает термокамера (термобарокамера) определённого вида.

Рассмотрим блок-схему вариантов расчёта глобальной тепловой модели для вариантов «a02» и «a11» (см. рис. 4).

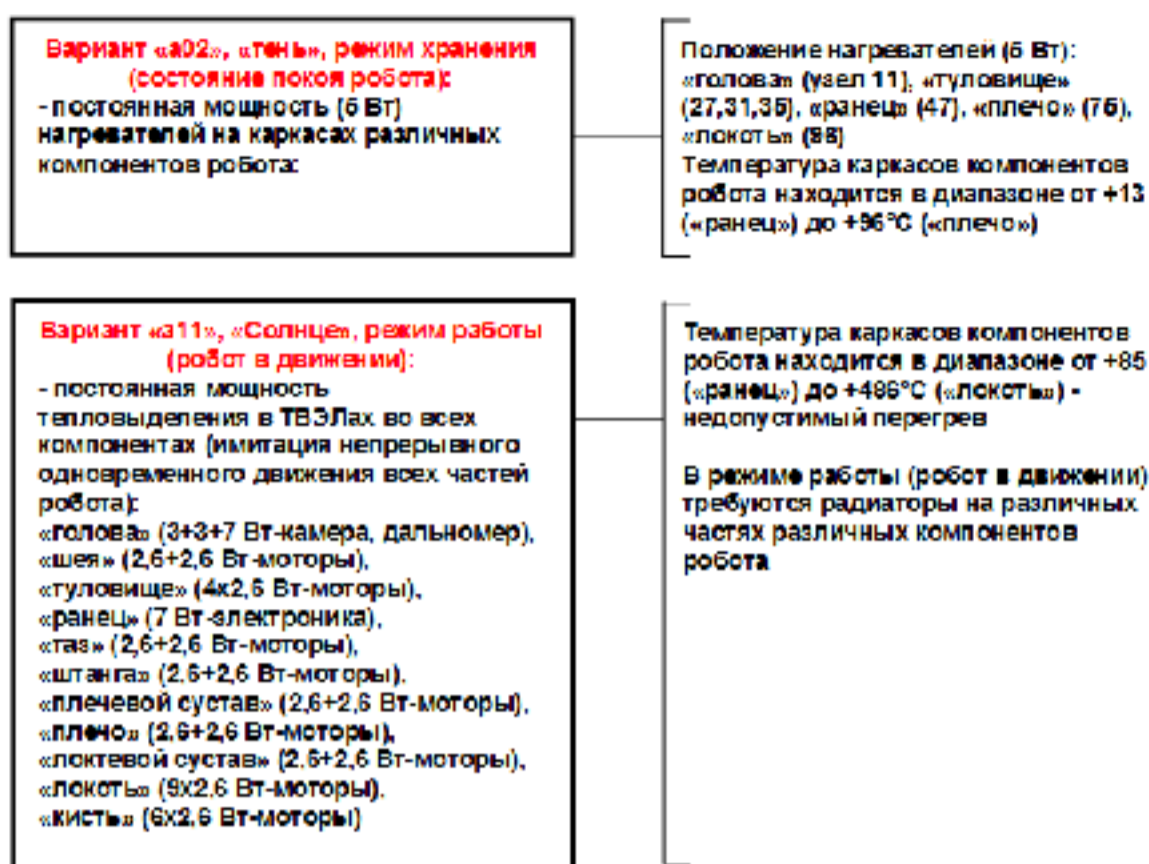


Рис. 4. Блок-схема

Для расчёта температуры по узлам глобальной тепловой модели робота в режиме работы (робот в движении при постоянном тепловыделении во всех тепловыделяющих элементах) используются следующие параметры:

Матрица тепловых связей для узлов тепловой модели (кондуктивные связи, необходимые для вычисления кондуктивного теплового потока

$$Q_k(i, j) = K(i, j) \cdot (T_i - T_j), \quad K(i, j) = K(j, i)$$

i	j	K(i,j)	i	K(i,j)	j	K(i,j)	j	K(i,j)
1	2	1,00E+00	3	1,00E+00	4	1,00E+00	5	1,00E+00
	6	1,00E+00	7	1,00E+00	8	1,00E-01	11	1,00E+00
	12	1,00E-01						
2	1	1,00E+00						
3	1	1,00E+00						
4	1	1,00E+00						
5	1	1,00E+00						
6	1	1,00E+00						
7	1	1,00E+00						
8	1	1,00E-01	9	2,17E-02	10	1,00E-01		
9	8	2,17E-02						
10	8	1,00E-01						
.....								
50	48	1,00E+00						
51	48	1,00E-01	52	1,15E-02	53	1,00E-01		
52	51	1,15E-02						
53	51	1,00E-01						
54	48	1,00E+00						
55	48	1,00E-01	56	1,00E+00	57	1,00E+00	58	1,00E-01
	61	1,00E+00	108	1,00E-01				
56	55	1,00E+00						
57	55	1,00E+00						
58	55	1,00E-01	59	6,80E-03	60	1,00E-01		
59	58	6,80E-03						
60	58	1,00E-01						
.....								
100	97	1,00E+00						
101	97	1,00E+00						
102	97	1,00E+00						
103	97	1,00E+00						
104	97	1,00E-01	105	1,00E+02	106	1,00E-01		

105	104	1,00E+02					
106	104	1,00E-01					
107	97	1,00E+00					
108	55	1,00E-01					

Параметры узлов тепловой модели (теплоёмкость c_i , общая площадь излучающих поверхностей узла F_i , коэффициент излучения (поглощения) тепловых лучей E_{hi} , коэффициент поглощения солнечного излучения A_{si})

i	F_i	E_i	O_i	A_{si}	FI_{si}
1	5,00E-02	0,6			
2	6,60E-03	0,6	7,50E-01		
3	6,60E-03	0,6	7,50E-01		
4	6,60E-03	0,6	1,75E+00		
5	6,60E-03	0,6			
6	6,60E-03	0,6			
7	6,60E-03	0,6			
8	2,89E-01	0,6			
9	2,89E-01	0,8		0,7	0,32
10	4,50E-02	0,9		0,2	0,5
.....					
50	6,60E-03	0,6	6,50E-01		
51	1,53E-01	0,6			
52	1,53E-01	0,8		0,7	0,32
53	1,00E-07	0,9		0,2	0,5
54	1,00E-03	0,8			
55	8,00E-03	0,6			
56	6,60E-03	0,6	6,50E-01		
57	6,60E-03	0,6	6,50E-01		
58	9,10E-02	0,6			
59	9,10E-02	0,8		0,7	0,32
60	1,00E-07	0,9		0,2	0,5
.....					
100	6,00E-03	0,6	6,50E-01		
101	6,00E-03	0,6	6,50E-01		
102	6,00E-03	0,6	6,50E-01		
103	6,00E-03	0,6	6,50E-01		
104	1,44E-02	0,6			
105	1,44E-02	0,9		0,2	0,32
106	1,00E-07	0,9		0,2	0,5
107	1,00E-03	0,8			
108	8,00E-03	0,8			
109	2,00E+00	0,999			

Матрица тепловых связей для тепловой модели

i	j	$Fi(j,i)$	i	$Fi(j,i)$	i	$Fi(j,i)$	i	$Fi(j,i)$	i	$Fi(j,i)$
1	1	0,302	2	0,033	3	0,033	4	0,033	5	0,033
	6	0,033	7	0,033	8	0,5				
2	1	0,25	2	0,25	3	0,25	8	0,25		
3	1	0,25	2	0,25	3	0,25	8	0,25		
4	1	0,25	4	0,25	5	0,25	8	0,25		
5	1	0,25	4	0,25	5	0,25	8	0,25		
6	1	0,25	6	0,25	7	0,25	8	0,25		
7	1	0,25	6	0,25	7	0,25	8	0,25		
8	1	0,087	2	0,006	3	0,006	4	0,006	5	0,006
	6	0,006	7	0,006	8	0,879				
9	9	0,02	16	0,03	109	0,95				
10	109	1								
.....										
50	48	0,247	49	0,25	50	0,253	51	0,25		
51	48	0,206	49	0,011	50	0,011	51	0,773		
52	109	1								
53	109	1								
55	55	0,238	56	0,206	57	0,206	58	0,35		
56	55	0,25	56	0,25	57	0,25	58	0,25		
57	55	0,25	56	0,25	57	0,25	58	0,25		
58	55	0,031	56	0,018	57	0,018	58	0,933		
59	109	1								
60	109	1								
.....										
100	97	0,15	100	0,523	104	0,326				
101	97	0,15	101	0,523	104	0,326				
102	97	0,15	102	0,523	104	0,326				
103	97	0,15	103	0,383	104	0,466				
104	97	0,068	98	0,194	99	0,136	100	0,136	101	0,136

	102	0.136	103	0.194						
105	109	1								
106	109	1								
109	9	0.137	10	0.023	16	0.005	25	0.068	29	0.027
	33	0.027	37	0.029	45	0.171	52	0.076	59	0.045
	66	0.021	73	0.027	80	0.026	94	0.03	105	0.007
	109	0.28								

Здесь угловые коэффициенты радиационных связей показывают, какая часть теплового потока излучения с поверхностей узла i падает на поверхности узла j и в формуле для вычисления радиационного теплового потока $Q_r(i, j) = \sigma \cdot E_{ij} \cdot F_i \cdot \varphi(i, j) \cdot (T_i^4 - T_j^4)$ присутствуют как $\varphi(i, j)$, причём

$$\varphi(i, j) \times F_i = \varphi(j, i) \times F_j, \quad \sum_{i=1}^N \varphi(i, j) = 1, \quad i = 1, 2, \dots, N.$$

Стационарное распределение температуры по узлам глобальной тепловой модели робота для вариантов «a02» и «a11» (см. блок-схему на рис. 4) приведено в следующих таблицах:

Вариант «a02», «тень», режим хранения (состояние покоя робота)											
i	НГ/ДТ	30 Вт(исп)		30 Вт	25 Вт	20 Вт (исп)		20 Вт	15 Вт	10 Вт	5 Вт
.....											
13	НГ5			-58.5	-62.6			-66.8	-71.3	-76.1	-81.3
14	НГ5			-58.5	-62.6			-66.8	-71.3	-76.1	-81.3
15	T7, T8	-10.3	-7.7	-60.2	-64.2	-17.9	-15.3	-68.4	-72.9	-77.6	-82.7
16	T7, T8	-10.3	-7.7	-149.8	-150.9	-17.9	-15.3	-152.0	-153.1	-154.4	-155.8
17	T7, T8	-10.3	-7.7	-60.2	-64.2	-17.9	-15.3	-68.4	-72.9	-77.6	-82.7
18	T7, T8	-10.3	-7.7	-58.5	-62.6	-17.9	-15.3	-66.8	-71.3	-76.1	-81.3
.....											
24	T10	-10.2		-49.5	-54.0	-18.0		-58.6	-63.5	-68.6	-74.2
25	T10	-10.2		-156.3	-157.2	-18.0		-158.3	-159.3	-160.5	-161.9
26	T10	-10.2		-49.5	-54.0	-18.0		-58.6	-63.5	-68.6	-74.2
27	T10	-10.2		-39.8	-44.5	-18.0		-49.4	-54.5	-59.9	-65.8
.....											
48	T11	-11.8		19.5	19.5	-19.9		19.4	19.4	19.3	19.3
49	T11	-11.8		20.0	20.0	-19.9		19.9	19.9	19.9	19.9
50	T11	-11.8		20.0	20.0	-19.9		19.9	19.9	19.9	19.9
51	T11	-11.8		20.0	20.0	-19.9		20.0	20.0	20.0	20.0
52	T11	-11.8		15.2	15.2	-19.9		15.2	15.2	15.2	15.2
53	T11	-11.8		20.0	20.0	-19.9		20.0	20.0	20.0	20.0
54	T11	-11.8		20.0	20.0	-19.9		19.9	19.9	19.9	19.9
.....											
63	НГ4			8.7	-5.3			-19.8	-35.0	-50.9	-68.0
64	НГ4			8.7	-5.3			-19.8	-35.0	-50.9	-68.0
65	T6	-11.7		5.1	-8.8	-19.7		-23.1	-38.1	-53.8	-70.5
66	T6	-11.7		-147.1	-149.5	-19.7		-152.2	-155.1	-158.3	-162.1

67	T6	-11.7	5.1	-8.8	-19.7	-23.1	-38.1	-53.8	-70.5		
68	T6	-11.7	8.7	-5.3	-19.7	-19.8	-35.0	-50.9	-67.9		
69	T6	-11.7	62.0	38.2	-19.7	13.7	-11.8	-38.7	-67.2		
70	HГ3		61.9	38.2		13.7	-11.8	-38.7	-67.2		
71	HГ3		61.9	38.2		13.7	-11.8	-38.7	-67.2		
72	T3, T4	5.2	-5.8	57.2	33.6	-12.2	-12.4	9.3	-16.0	-42.4	-70.5
73	T3, T4	5.2	-5.8	-138.9	-142.5	-12.2	-12.4	-146.4	-150.9	-156.0	-162.1
74	T3, T4	5.2	-5.8	57.2	33.6	-12.2	-12.4	9.3	-16.0	-42.4	-70.5
75	T3, T4	5.2	-5.8	68.0	43.2	-12.2	-12.4	17.7	-8.8	-36.7	-66.2
76	T3, T4	-5.2	-5.8	63.2	39.0	-12.2	-12.4	13.6	-13.1	-41.7	-72.7
77	HГ2		63.2	38.9		13.6	-13.2	-41.7	-72.8		
78	HГ2		63.2	38.9		13.6	-13.2	-41.7	-72.8		
79	T5	-5.9	58.0	33.9	-12.5	8.9	-17.5	-45.5	-75.9		
80	T5	-5.9	-138.5	-142.1	-12.5	-146.2	-150.9	-156.4	-163.1		
81	T5	-5.9	58.0	33.9	-12.5	8.9	-17.5	-45.5	-75.9		
82	T5	-5.9	63.2	39.0	-12.5	13.6	-13.1	-41.7	-72.7		
83	T5	-5.9	72.4	46.8	-12.5	19.7	-9.1	-40.4	-74.8		
84	HГ1		72.4	46.8		19.7	-9.1	-40.4	-74.8		
85	HГ1		72.3	46.7		19.7	-9.2	-40.4	-74.8		
86	HГ1		72.3	46.7		19.7	-9.2	-40.4	-74.8		
87	HГ1		72.3	46.7		19.7	-9.2	-40.4	-74.8		
88	HГ1		72.3	46.7		19.7	-9.2	-40.4	-74.8		
89	HГ1		72.3	46.7		19.7	-9.2	-40.4	-74.8		
90	HГ1		72.3	46.7		19.7	-9.2	-40.4	-74.8		
91	HГ1		72.3	46.7		19.7	-9.2	-40.4	-74.8		
92	HГ1		72.3	46.7		19.7	-9.2	-40.4	-74.8		
93	T1, T2	-7.2	-6.6	68.8	43.1	-15.2	-14.5	16.1	-12.7	-43.8	-77.7
94	T1, T2	-7.2	-6.6	-137.1	-140.9	-15.2	-14.5	-145.1	-150.1	-156.1	-163.7
95	T1, T2	-7.2	-6.6	68.8	43.1	-15.2	-14.5	16.1	-12.7	-43.8	-77.7
96	T1, T2	-7.2	-6.6	78.4	51.8	-15.2	-14.5	23.7	-6.1	-38.4	-73.8
.....											
108	Посадочное		20.0	20.0		20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
109	Космос		-269.0	-269.0		-269.0	-269.0	-269.0	-269.0	-269.0	-269.0

Вариант «a11», «Солнце», режим работы (робот в движении)				
i	HГ/ДТ	θ Вт(учп)		θ Вт
.....				
13	HГ5			254.0
14	HГ5			254.0
15	T7, T8	55.2	57.7	250.9
16	T7, T8	55.2	57.7	59.1
17	T7, T8	55.2	57.7	250.9
18	T7, T8	55.2	57.7	251.6
.....				
24	T10		54.2	132.2
25	T10		54.2	103.8
26	T10		54.2	132.2
27	T10		54.2	136.6

.....				
48	T11	51.6		50.1
49	T11	51.6		50.0
50	T11	51.6		50.0
51	T11	51.6		50.0
52	T11	51.6		49.7
53	T11	51.6		50.0
54	T11	51.6		50.0
.....				
63	НГ4			284.8
64	НГ4			284.8
65	T6	48.6		280.7
66	T6	48.6		19.8
67	T6	48.6		280.7
68	T6	48.6		282.5
69	T6	48.6		384.5
70	НГ3			386.7
71	НГ3			386.7
72	T3, T4	61.9	61.4	382.7
73	T3, T4	61.9	61.4	21.4
74	T3, T4	61.9	61.4	382.7
75	T3, T4	61.9	61.4	384.5
76	T3, T4	61.9	61.4	449.4
77	НГ2			451.3
78	НГ2			451.3
79	T5	60.4		447.3
80	T5	60.4		22.5
81	T5	60.4		447.3
82	T5	60.4		449.4
83	T5	60.4		479.2
84	НГ1			481.5
85	НГ1			481.4
86	НГ1			481.4
87	НГ1			481.4
88	НГ1			481.4
89	НГ1			481.4
90	НГ1			481.4
91	НГ1			481.4
92	НГ1			481.4
93	T1, T2	63.9	63.9	479.7
94	T1, T2	63.9	63.9	23.0
95	T1, T2	63.9	63.9	479.7
96	T1, T2	63.9	63.9	479.2
.....				
108	Посадочное место			50.0
109	Космос			-269.0

Вывод. Таким образом проанализированы испытания и осуществлён расчёт температуры в 109 узлах глобальной тепловой модели робота. В ходе всех исследовательских испытаний система терморегулирования макета робота поддерживала температуру всех компонентов в диапазоне от -20°C до $+80^{\circ}\text{C}$.

Глава 5. Решение обратной задачи теплообмена

Постановка задачи оптимального проектирования включает в себя задание следующих величин:

- конструктивных переменных;
- целевых функций или критериев, подлежащих минимизации или максимизации;
- ограничений параметров состояния рассматриваемого объекта.

Целевая функция — это функция, связывающая цель с управляемыми переменными в задаче оптимизации.

Программные комплексы многокритериальной оптимизации включают в себя средства управления математическими моделями как «чёрными ящиками»: считывать значения целевых функций и ограничений, генерировать новые значения конструктивных переменных и передавать их в модель [31].

Способ обмена данными между комплексом и математическими моделями может быть различным. Для самых простых случаев с использованием аналитической модели некоторые комплексы позволяют описать ее непосредственно внутри себя благодаря встроенным редакторам и интерпретаторам популярных скриптовых языков программирования: VBScript, JavaScript, Python и др. [31].

На каждой итерации комплекс генерирует новые значения конструктивных переменных и записывает их во входной файл модели, которая после завершения своей работы записывает значения функций состояния в выходной файл. Комплекс на основании информации выходного файла модели генерирует следующий набор величин конструктивных переменных в соответствии с реализованными в нем алгоритмами, и весь процесс повторяется снова [31].

При работе с modeFRONTIER могут использоваться различные инженерные продукты (SolidWorks, MatLab, MathCAD, MS Excel и многие другие).

Одним из основных понятий многокритериальной оптимизации является *множество Парето* — совокупность компромиссных решений, каждое из которых не может быть улучшено по всем критериям одновременно [31].

5.1. Обоснование важности решения обратной задачи теплообмена

5.1.1. Эволюция тепловой модели космической техники

Очевидно, исходя из экспериментальных данных, что неопределённости в тепловых моделях, используемых при расчётах, делают их результаты непредсказуемыми и ведут к ложным выводам о прогнозируемом сроке службы. Поэтому модель должна быть верифицирована по результатам испытаний.

В соответствии с ГОСТ различают предварительные, окончательные модели. В ходе тепловой отработки изделий на этапах доводочных испытаний происходит корректировка предварительных тепловых моделей.

5.1.2. Неопределённости тепловой модели, связанные с тепловыми сопротивлениями

Существует большая зависимость контактного теплового сопротивления от шероховатости поверхности, степени затяжки болтовых соединений взаимно-конструктивного расположения поверхностей, не позволяет точно их рассчитывать.

5.1.3. Неопределённости модели, вызванные неточностью данных по степеням черноты и коэффициентам солнечного поглощения

Для определения результирующих потоков излучения необходимо располагать данными по коэффициентам излучения. Коэффициент излучения яв-

ляется сложной функцией, зависящей от природы излучающего тела, его температуры, состояния поверхности, а для металлов — от степени окисления этой поверхности [32].

Коэффициент поглощения (а следовательно, и степень черноты) слоя запылённой среды, в отличие от твёрдого тела, зависит от его толщины и концентрации пыли.

5.1.4. Неопределённости модели, вызванные изменением свойств узлов

Неточности тепловой модели могут быть связаны с изменением свойств узлов в зависимости от температуры а также от увеличения погрешности при увеличении размера узлов.

Вывод. Проведённый анализ говорит о необходимости точной верификации модели по результатам испытаний. Поскольку данная задача является многомерной, то вычисления занимают очень много времени. Следовательно, необходимо автоматизировать этот процесс. Одной из таких технологий является эволюционное моделирование.

5.2. Эволюционное моделирование

5.2.1. Понятие эволюционного моделирования

Эволюционное моделирование — направление в искусственном интеллекте, в основе которого лежат принципы и понятийный аппарат, которые заимствованы из эволюционной биологии и популяционной генетики и объединяют компьютерные методы (генетические алгоритмы, генетическое программирование, эволюционное программирование и эволюционные стратегии) моделирования эволюционных процессов в искусственных системах.



Применение эволюционного моделирования:

- изучение и моделирование отдельных процессов естественной эволюции;
- для совершенствования существующих искусственных систем за счёт наделения их свойствами адаптивного поведения и самоорганизации на основе метода эволюционного моделирования;
- для автоматизации решения различных оптимизационных задач науки и техники.

Области применения методов эволюционного моделирования:

- системы автоматического управления и регулирования;
- системы технического проектирования;
- коммуникационные и транспортные системы;
- управление в социально-экономических системах.

Особенности эволюционного моделирования как технологии оптимизации:

- поиск осуществляется не из единственной точки, а из «популяции» точек;
- в процессе поиска используется значение целевой функции, а не её приращения;
- вместе с обычным чаще всего используется закодированное представление значений параметров задачи (как правило, в виде хромосомы);

- специфика работы позволяет накапливать и использовать знания об исследованном пространстве поиска и, как следствие, проявлять способность к самообучению;
- применяются вероятностные, а не детерминированные правила поиска и генерации решений;
- выполняется одновременный анализ различных областей пространства решений, в связи с чем возможно нахождение новых областей с лучшими значениями целевой функции за счёт объединения субоптимальных решений из разных популяций.

В следующей таблице приведены соответствия терминов эволюционной и математической модели:

Эволюционная модель	Математическая модель
Хромосома	Решение, объект, строка, последовательность
Ген	Переменная, параметр, характеристика, признак
Аллель	Значение фрагмента закодированного параметра
Локус	Номер фрагмента закодированного параметра
Генотип	Множество закодированных решений задачи, пространство поиска
Фенотип	Множество решений задачи, пространство решений
Особь, индивидуум	Объект, система
Пригодность, приспособленность	Качество, оптимальность
Fitness-функция	Целевая функция
Популяция	Множество решений

Поколение	Итерация работы эволюционного алгоритма
-----------	---

Далее мы рассмотрим генетический алгоритм, как один из самых распространённых эволюционных методов.

5.2.2. Генетический алгоритм

Генетический алгоритм — метод эволюционного моделирования, основанный на использовании аналогий с природными процессами естественного отбора и генетических преобразований, предназначенный для решения задач оптимизации [6].

Идея генетических алгоритмов была предложена Джоном Холландом в 60-х годах, а результаты первых исследований обобщены в его монографии «Адаптация в природных и искусственных системах». Генетические алгоритмы используют для работы эволюционные принципы наследственности, изменчивости и естественного отбора. Общую схему генетического алгоритма можно представить следующим образом (см. рис. 5).



Рис. 5. Общая схема генетического алгоритма

Генетический алгоритм применяется для решения таких задач, как:

- оптимизация функций;
- оптимизация запросов в базах данных;
- задачи на графах;
- задачи компоновки;
- настройка и обучение нейронных сетей;
- составление расписаний;
- теория приближений;
- биоинформатика;
- игровые стратегии.

В стандартном генетическом алгоритме используются следующие генетические операторы:

- 1) оператор отбора (селекция);

- 2) оператор кроссинговера (рекомбинация);
- 3) оператор мутации;
- 4) оператор инверсии (факультативно).

Генетический алгоритм работает с популяцией особей, в хромосоме (генотип) каждой из которых закодировано возможное решение задачи (фенотип). В начале работы алгоритма популяция формируется случайным образом (см. блок «Формирование начальной популяции» на рис. 2). Для того чтобы оценить качество закодированных решений используют функцию приспособленности, которая необходима для вычисления приспособленности каждой особи (см. блок «Оценивание популяции»). По результатам оценивания особей наиболее приспособленные из них выбираются (см. блок «Селекция») для скрещивания. В результате скрещивания выбранных особей посредством применения генетического оператора кроссовера создаётся потомство, генетическая информация которого формируется в результате обмена хромосомной информацией между родительскими особями (см. блок «Скрещивание»). Созданные потомки формируют новую популяцию, причем часть потомков мутирует (используется генетический оператор мутации), что выражается в случайном изменении их генотипов (см. блок «Мутация»). Эволюция популяции состоит из последовательности поколений, т. е. этапов, включающих последовательность «Оценивание популяции» — «Селекция» — «Скрещивание» — «Мутация» [6].

Длительность эволюции может определяться нахождением решения в результате эволюционного поиска, ограниченностью количества поколений и вырождением популяции, когда степень разнородности хромосом в популяции становится меньше допустимого значения [6].

5.2.3. Параметры и этапы генетического алгоритма

Кодирование информации и формирование начальной популяции

Главным этапом в использовании эволюционных алгоритмов является выбор способа кодирования. На данном этапе необходимо выполнить следующее условие: должна быть возможность закодировать, с допустимой погрешностью, в хромосоме любую точку из пространства поиска [6].

Если это условие не будет выполнено, то время эволюционного поиска может быть увеличено, а решения поставленной задачи может быть вовсе не найдено [6].

В хромосоме кодируются численные параметры решения. Существует два способа кодирования (целочисленное и вещественное) [6].

Целочисленное кодирование

В генетическом алгоритме хромосома представляет собой битовую строку, в которой закодированы параметры решения поставленной задачи [6].

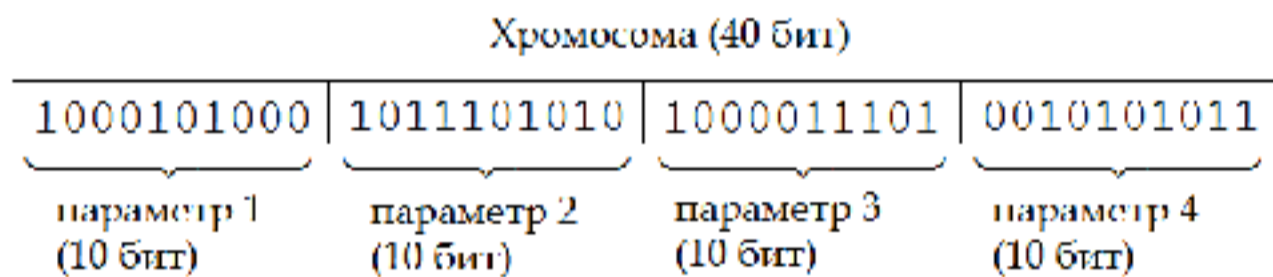


Рис. 6

Рассмотрим пример кодирования четырёх 10-разрядных параметров в 40-разрядной хромосоме (рис. 6). Каждому параметру соответствует свой ген. В данном примере хромосома состоит из четырёх 10-разрядных генов [6].

Вещественное кодирование

Если кодировать в гене целое число не совсем удобно, тогда применяется вещественное кодирование, которое позволяет избавиться от операций кодирования или декодирования, применяемых в целочисленном кодировании, и увеличивает точность полученного решения [6].

Хромосома			
0,34892	-2,94374	-0,15887	3,14259
⏟	⏟	⏟	⏟
параметр 1	параметр 2	параметр 3	параметр 4

Рис. 7. Пример вещественного кодирования

Формирование начальной популяции

Обычно начальная популяция генерируется случайным образом. Существует единственное требование: должно быть достаточное разнообразие особей. Это нужно для того, чтобы популяция не «свалилась» в ближайший экстремум. Гены инициализируются случайными значениями [6].

Оценка популяции

Необходимо производить оценку популяции для того, чтобы выявить более или менее приспособленных особей. Для расчёта приспособленности каждой особи используется функция приспособленности (целевая функция)

$$f_i = f(G_i),$$

где $G_i = \{g_{ik}, k = 1, 2, \dots, N\}$ — хромосома i -ой особи; N — количество генов в хромосоме; g_{ik} — значение k -го гена i -ой особи [6].

В первом способе (целочисленное кодирование) для вычисления значения функции приспособленности необходимо преобразовать закодированные в хромосоме целочисленные значения к вещественным значениям. То есть,

$$f(G_i) = f(X_i),$$

где $X_i = \{x_k, k = 1, 2, \dots, N\}$ — вектор вещественных чисел, соответствующих генам i -ой хромосомы [6].

При использовании эволюционного алгоритма необходимо решить задачу максимизации (минимизации) целевой функции, когда необходимо найти такие значения параметров функции f , при которых значения функции максимально (минимально). Таким образом, если $f(G_i) < f(G_j)$, то есть решается

задача минимизации, то считают, что i -ая особь лучше (приспособленнее) j -ой особи. И наоборот, для задачи максимизации, если $f(G_i) > f(G_j)$, то i -ая особь приспособленнее, чем j -ая особь [6].

Селекция

Селекция или отбор применяется для определения на основе значений fitness-функции хромосом-кандидатов в следующее поколение. Другими словами, выбираются более приспособленные особи для скрещивания. Как правило, берётся определённое число лучших по приспособленности. Также необходимо отбрасывать особей с одинаковым набором генов. Таких особей принято называть «клонами» [6].

Наиболее известными вариантами селекции являются:

- ***рулеточная селекция*** (отбор на основе «колеса рулетки»). Вероятность i -ой особи принять участие в скрещивании p_i пропорциональна значению её приспособленности f_i и будет равна

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_j f_j}.$$

Процесс напоминает игру в «рулетку». Рулеточный круг делится на сектора. Площадь i -го сектора пропорциональна значению p_i . После этого n раз «вращается» рулетка, где n — размер популяции. Особь выбирается из того сектора, на котором остановится рулетка. Чем выше оптимальность хромосомы, тем больше её сектор на колесе рулетки. Случайность выбора этого метода даёт шанс всем хромосомам попасть в следующее поколение [6];

- ***пропорциональный отбор*** (число копий хромосомы пропорционально её оптимальности, в следующее поколение проходят только те хромосомы, у которых оптимальность выше средней) [6];

- **турнирный отбор** (отбираются n особей, для этого из популяции случайным образом выбирают t особей. Та особь, которая окажется самой приспособленной, допускается к скрещиванию. Таким образом, формируется турнир из t особей, где t — размер турнира. Эта операция повторяется n раз. Чем больше значение t , тем больше давление селекции. Самая «худшая» хромосома популяции не имеет шансов попасть в следующее поколение. Типичные значения размера турнира $t = 2, 3, 4, 5$) [6];
- **отбор на основе ранжирования** (линейного, равномерного) членов популяции по их приспособленности. Вероятность попадания хромосомы в следующую популяцию вычисляется на основе её ранга [6].

Скрещивание и формирование нового поколения

После селекции отобранные особи называются *родительскими*. Далее эти особи скрещиваются и дают потомство. Обычно, скрещивание производят между двумя лучшими особями из популяции. В результате получают две особи с компонентами, взятыми от своих родителей. Главной задачей оператора скрещивания (*оператора кроссинговера*) является распространение хороших генов по всей популяции [6].

Оператор кроссинговера предназначен для обмена с заданной вероятностью генетической информацией между особями-родителями, полученными в результате отбора, с целью получения особей-потомков для составления популяции следующего поколения [6].

В целочисленном кодировании часто используются 1-точечный, 2-х точечный, однородный оператор скрещивания. Также возможно и вещественное кодирование [6].

Рассмотрим, как работает оператор кроссинговера на примере 1-точечного оператора [6].

В этом методе необходимо выбрать произвольную точку разрыва и производим обмен частями родительских хромосом для создания следующего поколения [6].

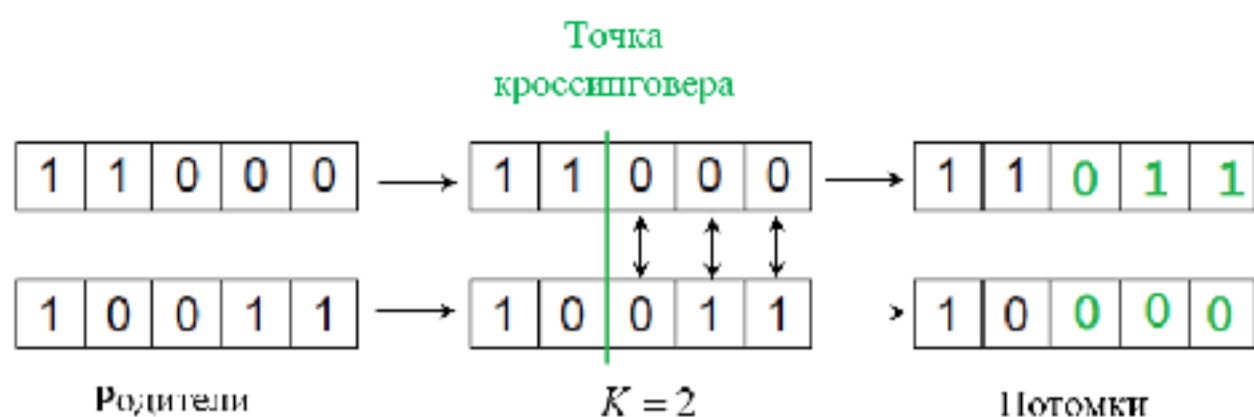


Рис. 8. Пример работы 1-точечного оператора кроссинговера

Операторы кроссинговера способны разрушать родительские хромосомы. Способность целочисленного кодирования к разрушению зависит от того, насколько сильно оператор кроссинговера рекомбинирует (перемешивает) содержимое родительских хромосом. Слаборазрушающим является 1-точечный оператор кроссинговера. Однородный кроссинговер считается сильноразрушающим, а 2-точечный оператор кроссинговера по своим разрушающим способностям находится между ними двумя [6].

Наряду со способностью разрушения, кроссинговер способен создавать новые особи. Таким образом, разрушая хромосомы особей-родителей, кроссинговер способен создавать абсолютно новые хромосомы, ранее не встречавшихся в процессе эволюционного поиска [6].

С учётом вышеизложенного, формируется популяция следующего поколения. Построенная таким образом популяция, не обязательно должна включать только одних особей-потомков. Если часть обновляемых особей будет равна T , то в новое поколение попадёт Tn потомков, где n — размер популяции. В новой популяции $(1-T)n$ особей являются наиболее приспособленными родительскими особями (*элитные особи*), T — разрыв поколений [6].

Мутация

Для внесения случайных изменений в хромосомы особей используется оператор мутации. Это нужно, чтобы «выбираться» из локальных экстремумов, и как следствие, эффективнее исследовать пространство поиска. Оператор мутации представляет собой случайное изменение (на противоположное) значение каждого бита с некоторой малой вероятностью P_m [6].

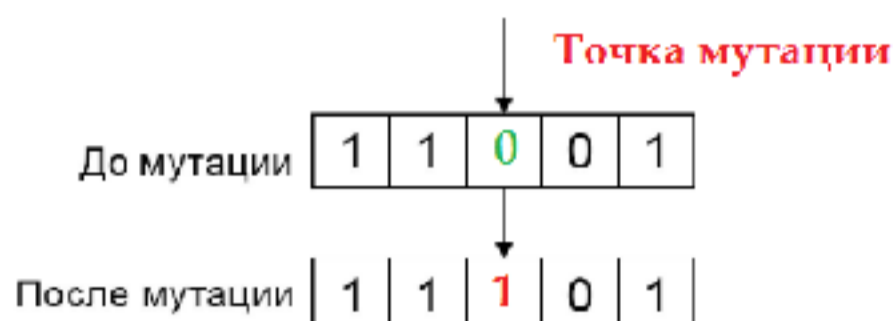


Рис. 9. Пример оператора мутации

Настройка параметров генетического алгоритма

От настройки параметров генетического алгоритма зависит результат его работы [6].

Основные параметры генетического алгоритма:

- количество поколений (длительность эволюции);
- размер популяции;
- интенсивность селекции;
- вид оператора кроссинговера;
- вероятность кроссинговера P_c ;
- разновидность оператора мутации;
- вероятность мутации P_m ;
- величина T (разрыва поколений).

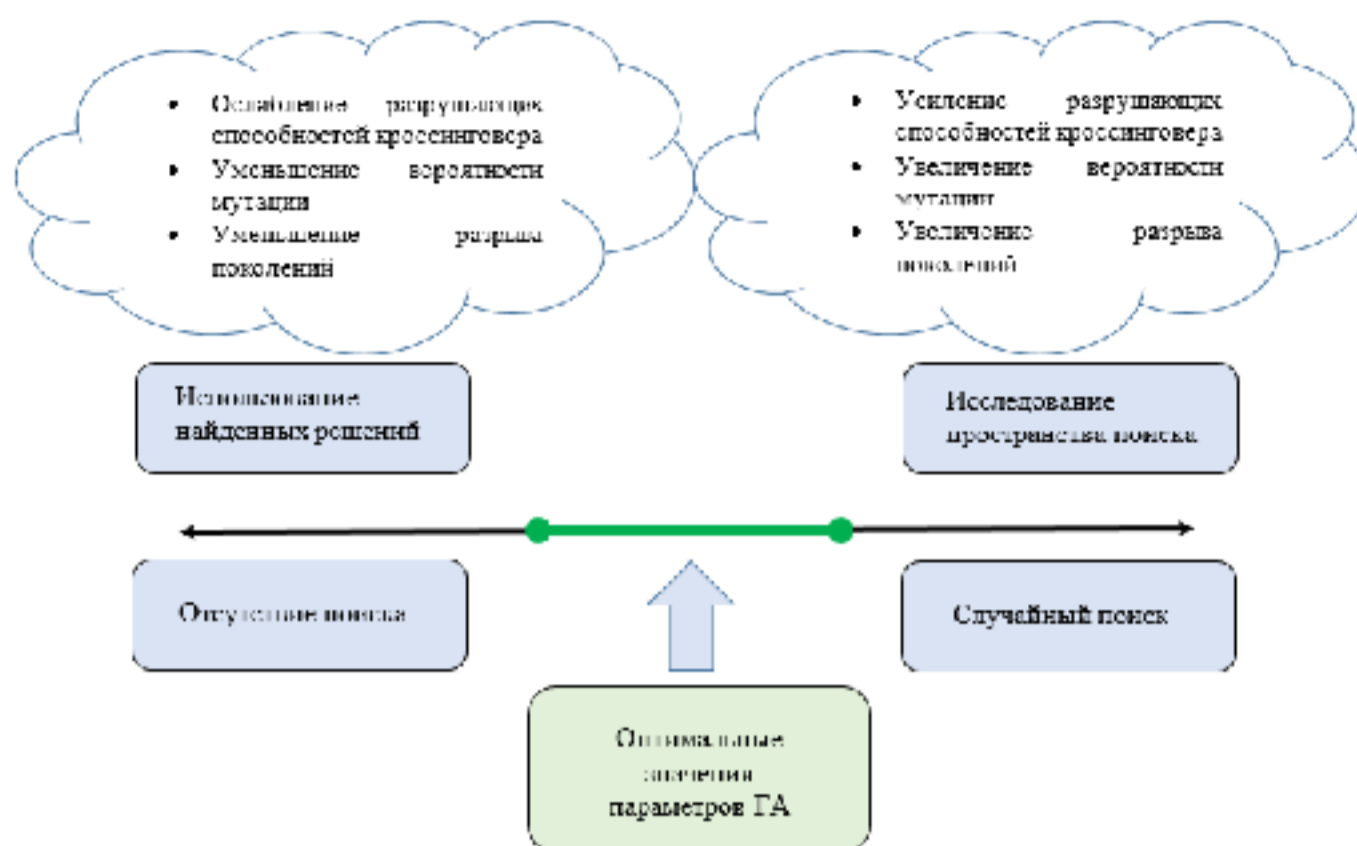


Рис. 10. Влияние параметров генетического алгоритма на характеристики эволюционного поиска

Рассмотрим встречаемые проблемы, с которыми можно столкнуться при неправильно настроенных параметрах генетического алгоритма.

Проблемы	Способы их решения
Плохая приспособленность решения.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Увеличение числа поколений. 2. Увеличение численности популяции. 3. Изменение критерия оценки особей. 4. Исправление способа формирования родительских пар для скрещивания. 5. Исправление стратегии скрещивания и формирования нового поколения.

Преждевременная сходимость (вырождение популяции).	<ol style="list-style-type: none"> 1. Изменение стратегии выбора родительских пар для скрещивания. 2. Отслеживание появления в популяции идентичных особей и их удаление. 3. Использование сильно разрушающего оператора кроссинговера. 4. Увеличение вероятности мутации.
Низкая «стабильность» эволюции популяции (значительные скачки значений приспособленности от поколения к поколению).	<ol style="list-style-type: none"> 1. Уменьшение разрыва поколений. 2. Уменьшение вероятности мутации. 3. Использование кроссинговера со слабой разрушающей способностью.
Преобладание удовлетворительных результатов над хорошими.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Изменение стратегии выбора родительских пар для скрещивания. 2. Изменение операторов скрещивания и/или мутации. 3. Распараллеливание поиска.

Анализ генетического алгоритма

Генетический алгоритм используется для решения задачи оптимизации. Рассмотрим пример. Необходимо решить задачу минимизации заданной функции Z . Функция Z — сферическая функция.

$$z = \sum_{i=1}^n x_i^2, \quad n = 10, \quad x_i \in [-5, 12; 5, 12],$$

n — количество переменных функции Z . Требуется найти значения переменных X_i при которых функция Z принимает наименьшее значение.

На рис. 11 показана общая схема решения задачи с помощью генетического алгоритма.



Рис. 11. Схема решения задачи генетических алгоритмом

Этап 1. По условию поставленной задачи необходимо найти значения переменных X_i , минимизирующие значение функции Z , поэтому в хромосоме будем кодировать значения X_i . Таким образом, каждый i -ый ген хромосомы будет соответствовать i -ой переменной функции Z .

Этап 2. Будем определять приспособленность особи в зависимости от значения, которое принимает функция Z при подстановке в нее вектора параметров, соответствующих генотипу этой особи. Поскольку рассматривается задача минимизации функции Z , то будем также считать, что чем меньше значение Z , тем приспособленнее особь. Приспособленность i -ой особи f_i будем определять по формуле $f_i = \exp(-Z_i)$, где Z_i — значение функции Z в точке, которая соответствует i -ой особи.

Этап 3. В качестве способа представления генетической информации рассмотрим целочисленное кодирование с 10-разрядными генами. Учитывая, что

содержимое каждого гена может принимать одно из $2^{10} = 1024$ значений в диапазоне $[-5,12;5,12]$, получим, что переменные X_i кодируются в хромосоме с точностью до 0,01.

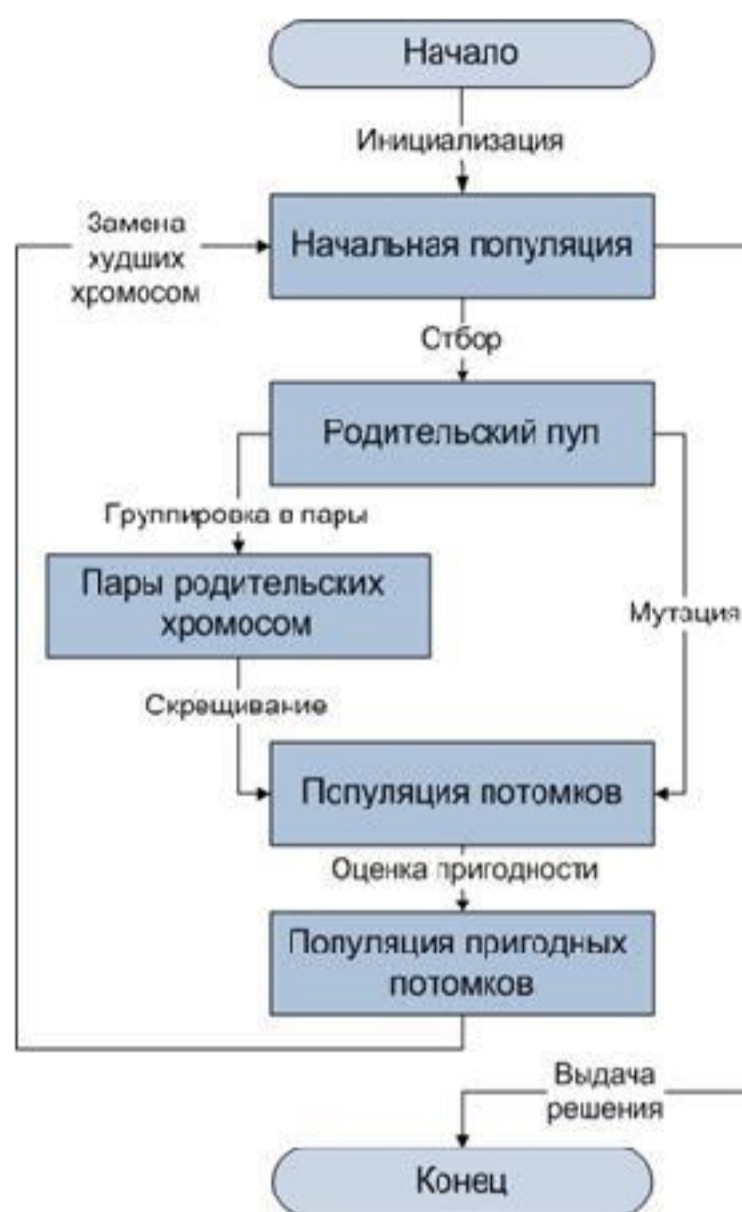


Рис. 12. Блок-схема эволюции решений в генетическом алгоритме

Плюсы	Минусы
большое число свободных параметров, позволяющих эффективно выстраивать эвристики	большое количество свободных параметров
эффективное распределение	недосказанность сходимости
работает заведомо не хуже абсолютно случайного поиска	в простых целевых функциях (гладкие, один экстремум и т. п.) генетика всегда проигрывает по скорости простым алгоритмам поиска

связь с биологией, дающая некоторую надежду на исключительную эффективность генетического алгоритма в природе	
---	--

5.2.4. Использование modeFRONTIER при решении задачи геометрической оптимизации

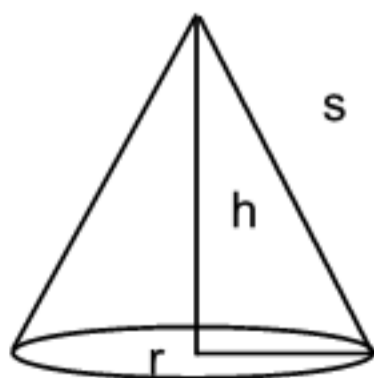
Для оптимизации тепловой модели будем использовать программную среду modeFRONTIER, поддерживает генетические алгоритмы.

Программная среда modeFRONTIER обладает многочисленными возможностями:

- 1) планировать эксперименты (DOE) и оценивать точность прогноза;
- 2) принимать решения при многокритериальной оптимизации (генетический алгоритм, линейный алгоритм и др.);
- 3) использовать алгоритмы и методы оптимизации (MOGA-II, AR-MOGA и др.);
- 4) использовать метамоделли и применять различные методы построения;
- 5) визуализировать полученные данные;
- 6) применять управление качеством;
- 7) использовать методы кластерного анализа.

Изучение программирования в modeFRONTIER осуществлялось на примере задачи геометрической оптимизации.

Пусть дан конус радиуса r , высоты h и наклонной s . Тогда



$$s = \sqrt{r^2 + h^2}, \quad V = \frac{\pi}{3} r^2 h, \quad B = \pi r^2,$$

$$S = \pi r s, \quad T = B + S = \pi r (r + s),$$

где введены обозначения: V — объём, $[M^3]$; B — площадь основания, $[M^2]$; S — площадь поверхности, $[M^2]$; T — общую площадь, $[M^2]$.

Форма конуса определяется однозначно, когда даны обе входные величины. Пусть r и h будут находиться в пределах: $r \in [0, 10]$ см, $h \in [0, 20]$ см

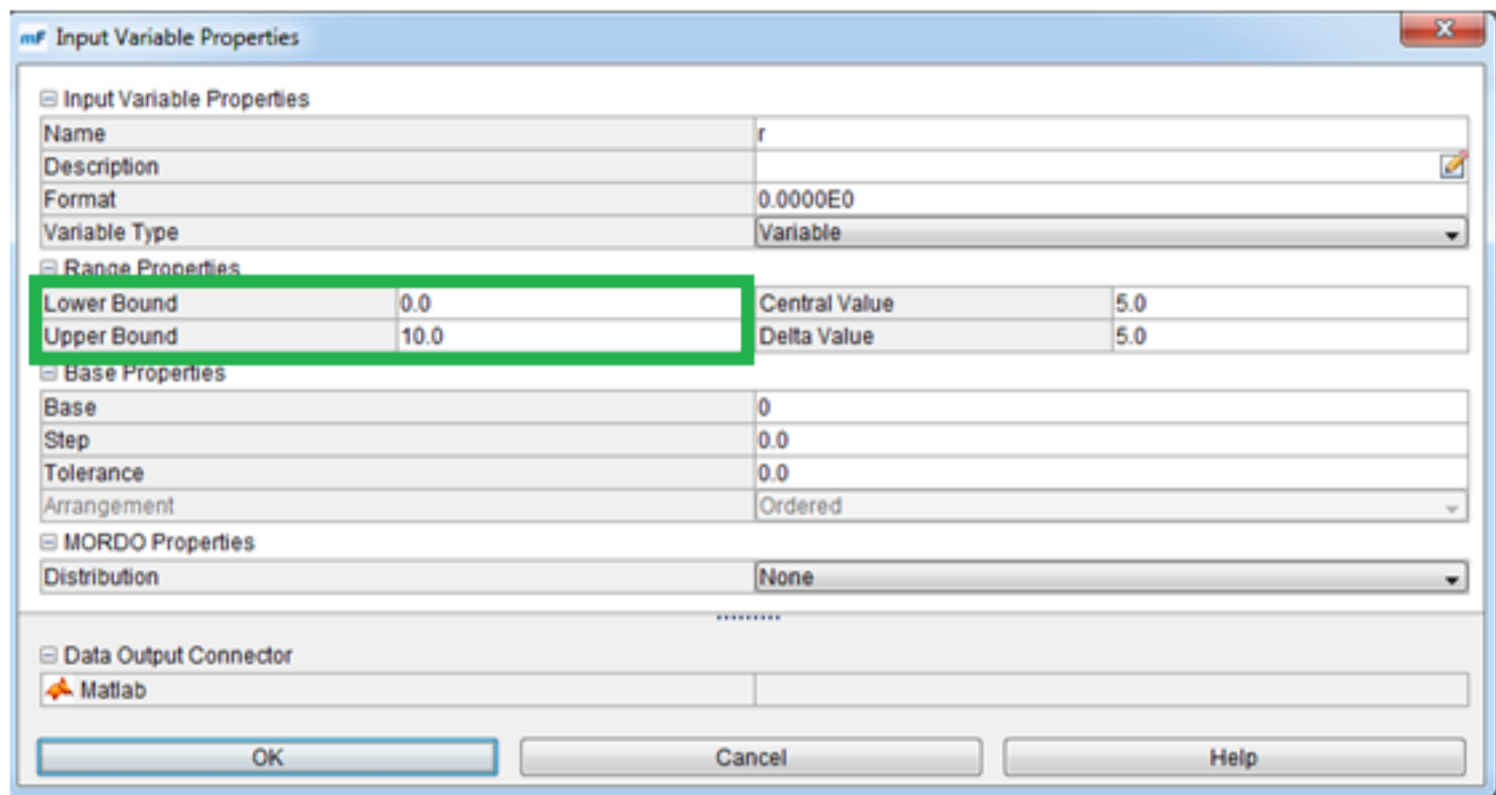


Рис. 13. Свойства радиуса конуса

В строке Lower Bound указываем нижнюю границу, а в Upper Bound — верхнюю границу.

Мы хотим минимизировать как площадь боковой поверхности, так и общую площадь поверхности. Для этого создаём блоки Design Objective в разделе Goal Nodes. В строке Type ставим Minimize.

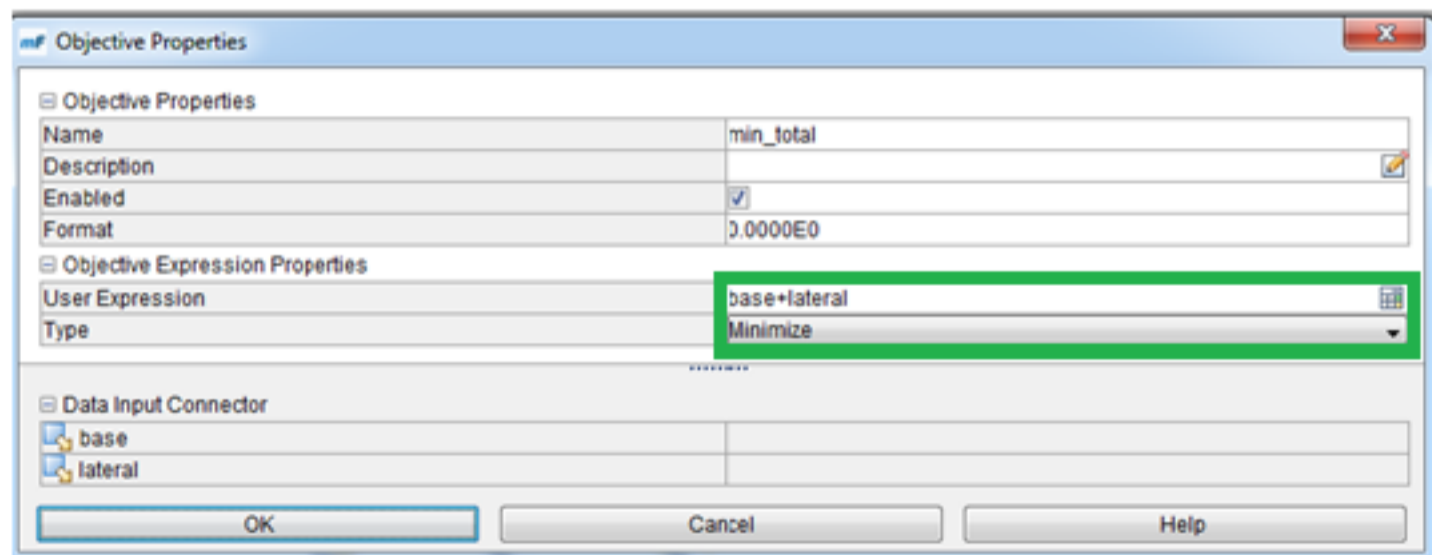


Рис. 14. Свойства минимизированной общей площади

В данном случае также необходимо написать в User Expression выражение, вычисляющее общую площадь конуса. Аналогично для площади поверхности.

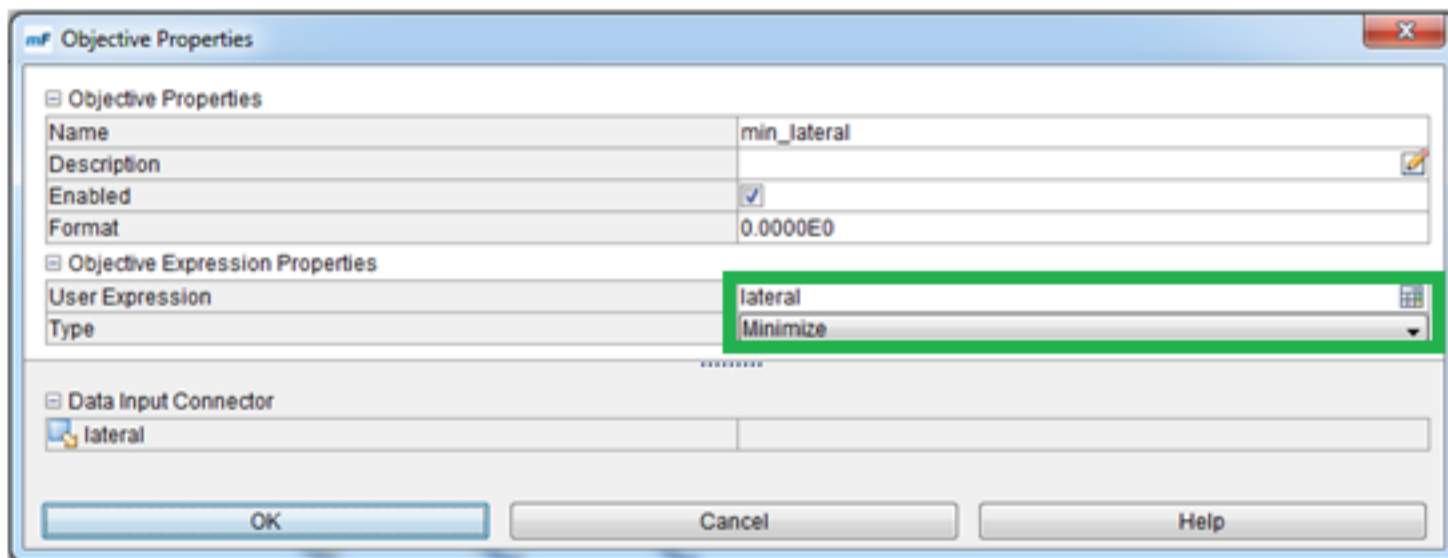


Рис. 15. Свойства минимизированной площади поверхности

Дается ограничение для объема конуса, чтобы гарантировать минимальный объем.

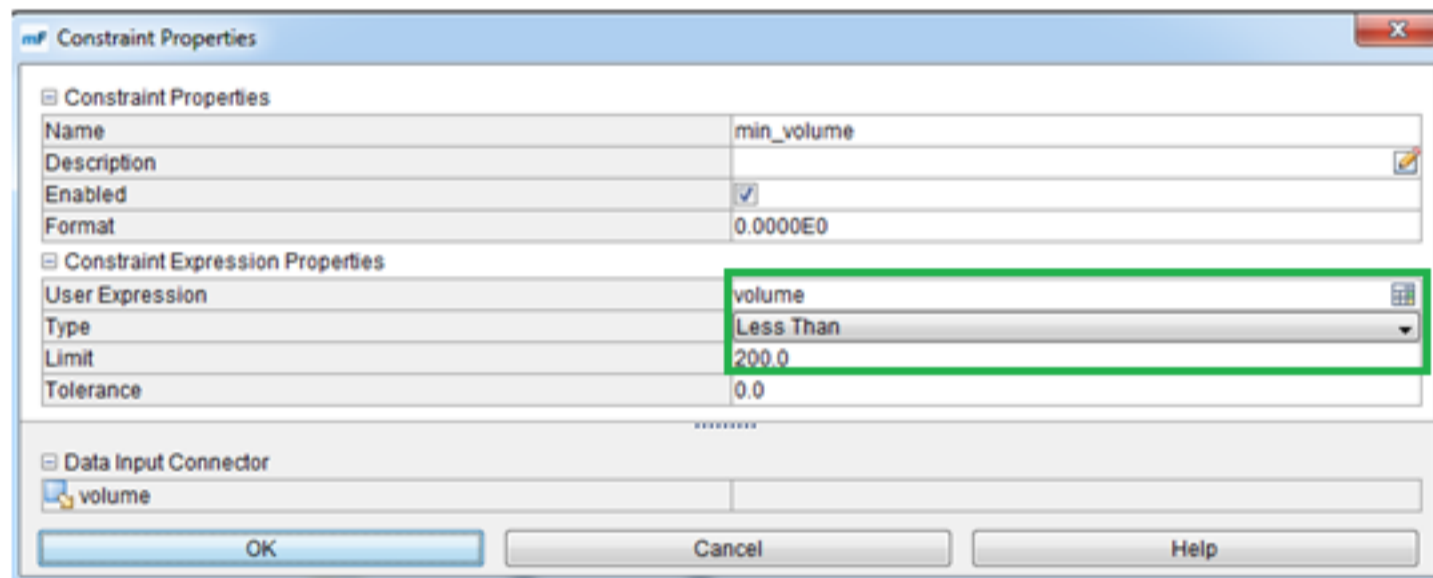


Рис. 16. Свойства объема конуса

Напишем скрипт для вычисления необходимых значений.

```

Editor - C:\Users\Лиза\Desktop\ДИПЛОМ\cones.m
cones.m x +
1 - volume = pi/3*r*r*h;
2 - s = sqrt(r*r+h*h);
3 - lateral = pi*r*s;
4 - base = pi*r*r;

```

Рис. 17. Скрипт m-файла

Итоговая схема для данной задачи будет выглядеть следующим образом (см. рис. 18).

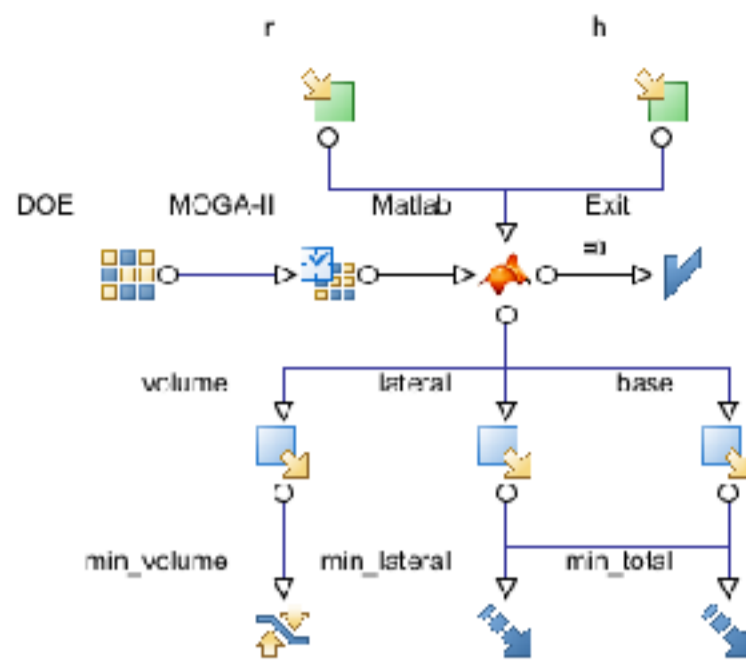


Рис. 18

На следующих рисунках показаны несколько примеров прогонов с различными DOE:

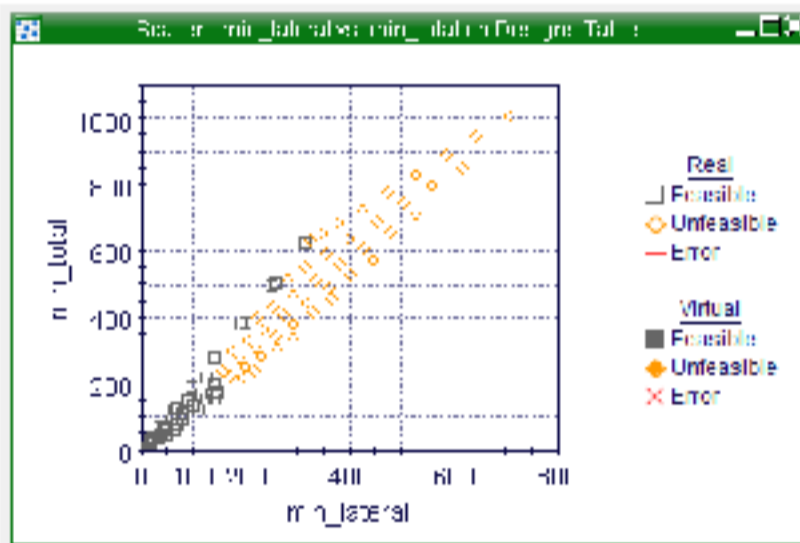


Рис. 19. Алгоритм Full Factoria

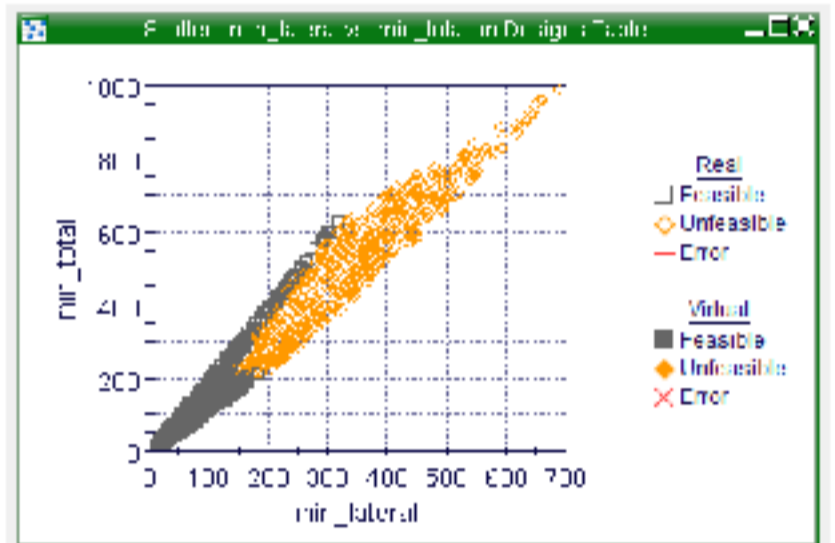


Рис. 20. Случайная выборка Random

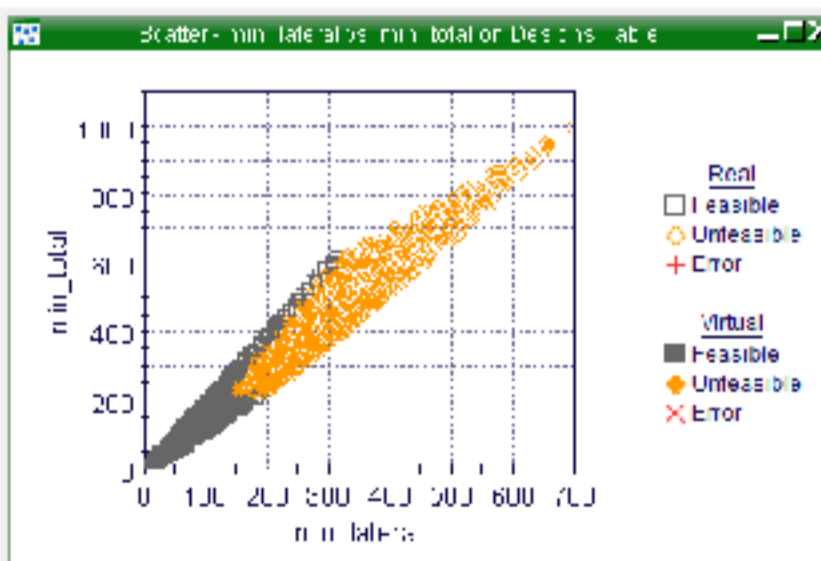


Рис. 21. Случайная выборка Sobol

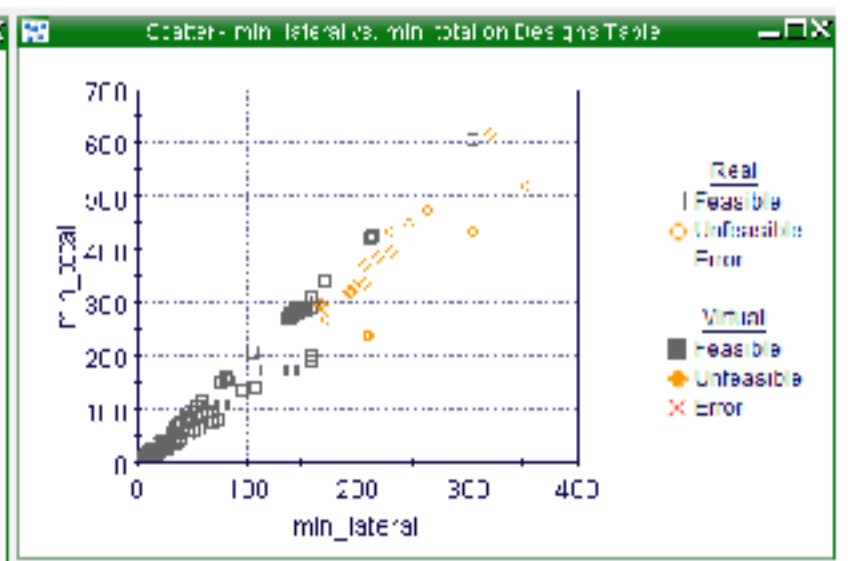


Рис. 22. Генетический алгоритм MOGA-II

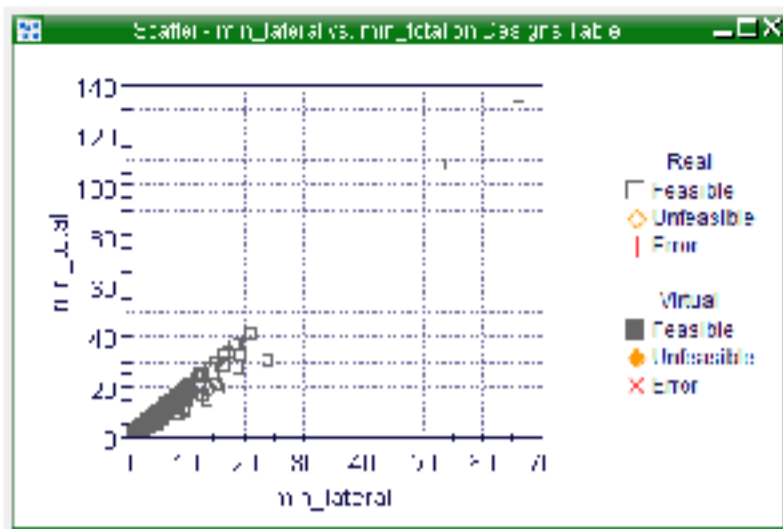


Рис. 23. Генетический алгоритм
NSGA-II

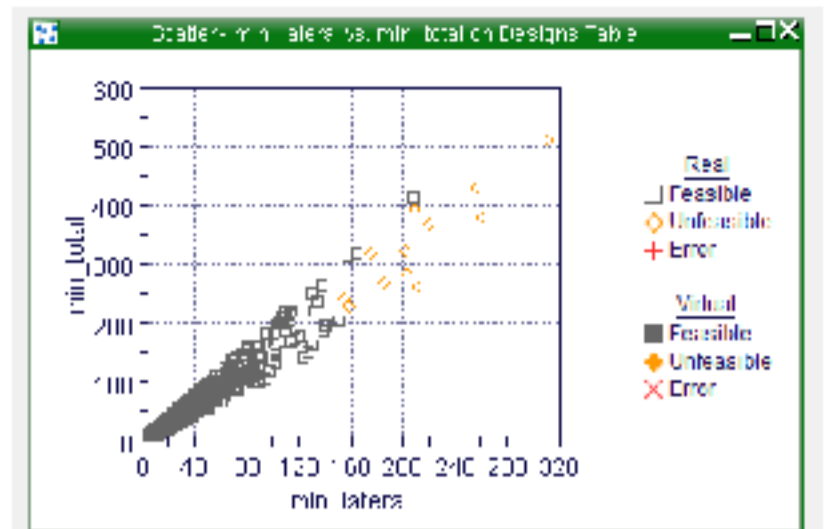


Рис. 24. MOEA

Алгоритмы, применяемые в modeFRONTIER

	ПЛЮСЫ	МИНУСЫ
MOGA-II (Multiobjective Genetic Algorithm)	устойчивый находит глобальный min (max) подходит для нелинейных задач	медленный (много итераций)
Simplex	быстрый	более чувствительный, чем MOGA-II; обычно находит локальный min (max); только одна задача
Fast	оправдывает своё название	не подходит для нелинейных задач
Hybrid	подходит для охвата глобального min (max)	расширенный поиск, в котором используются два алгоритма
MOGT	более быстрый, чем MOGA-II	не поисковый, локальный min (max)
MOGA	находит глобальный min (max);	очень медленный (много итераций)

	хорошо подходит для больших проектных пространств	
--	---	--

5.3. Применение modeFRONTIER для решения обратной задачи теплообмена

Применим возможности modeFRONTIER для связи программы СПРУТ и генетических алгоритмов, используемых для оптимизации задачи теплообмена. Данная модель имеет вид, представленный на рис. 25.

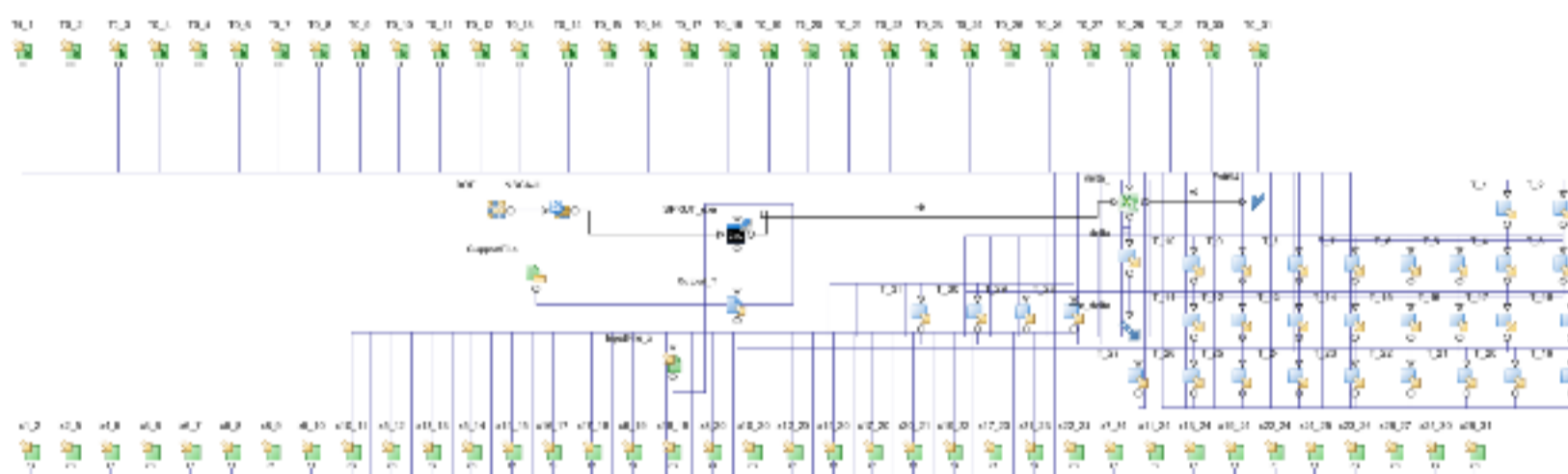


Рис. 25. Модель связи программы СПРУТ в среде modeFRONTIER

Для передачи значений в узлах необходимо связать входные блоки с input файлом и присвоить соответствующие значения.

В блоке Input Variable вводим данные для оптимальных температур. Выбираем тип переменной Constant в графе Variable Type. Далее вводим параметр в Default Value. На рис. 26 представлено заполнение константных параметров на примере температуры в 10-ом узле.

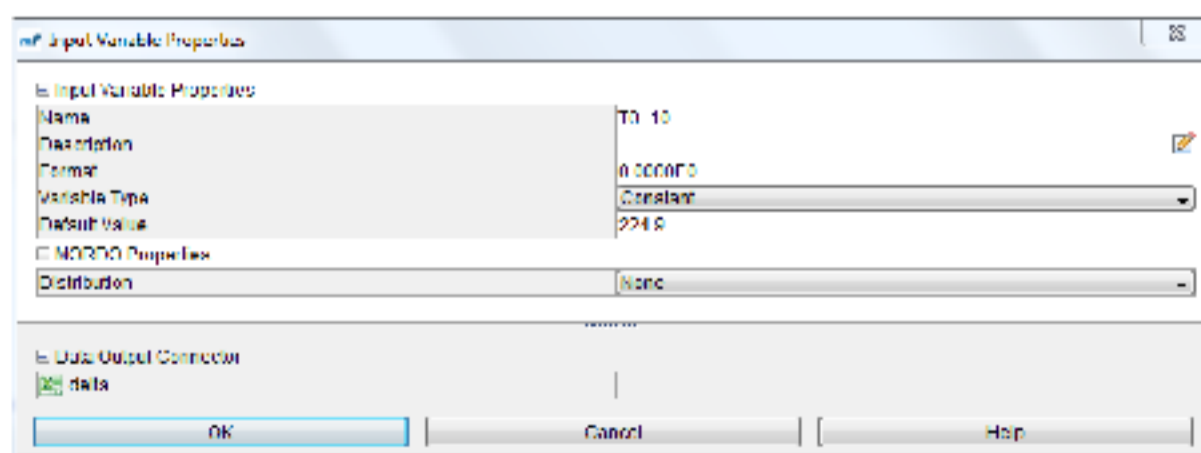


Рис. 26

Рассмотрим случай для данных, отвечающих за связь между узлами, на примере 5-го и 8-го узлов. В разделе Variable Type выбираем тип Variable. В качестве центрального значения Central Value записываем соответствующий параметр 0,14. Для всех блоков устанавливаем шаг Delta Value равный 0,1 (см. рис. 27).

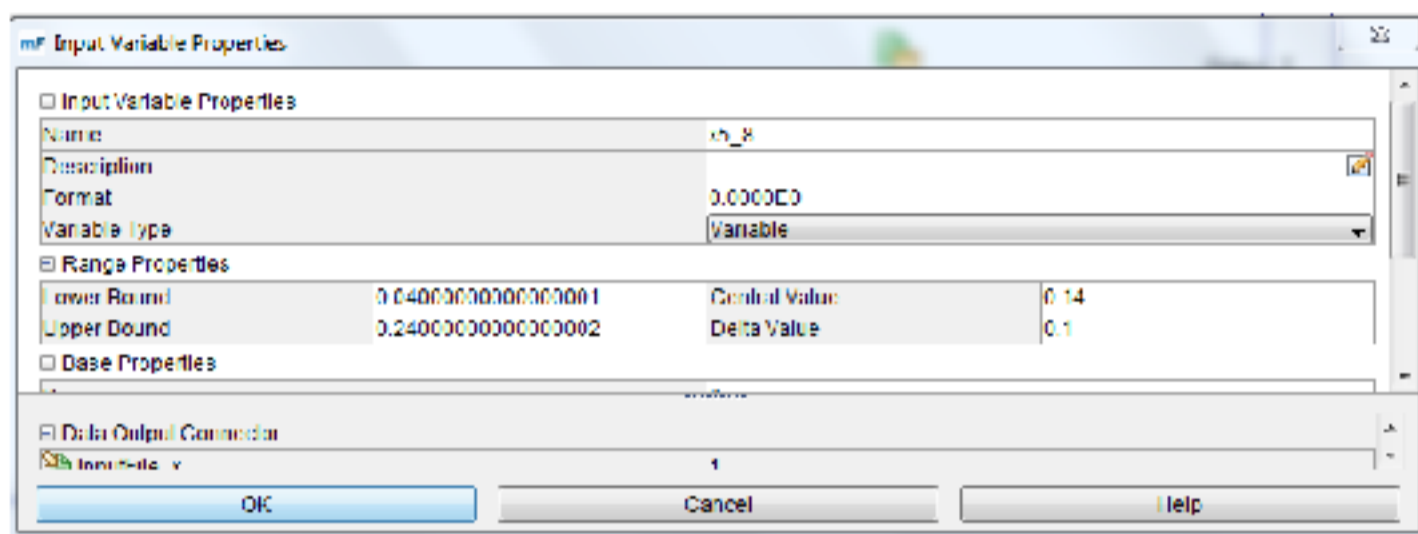


Рис. 27

На рис. 28 представлен выходной параметр полученной температуры, который будет использоваться для вычисления разницы между оптимальными и неоптимальными температурами.

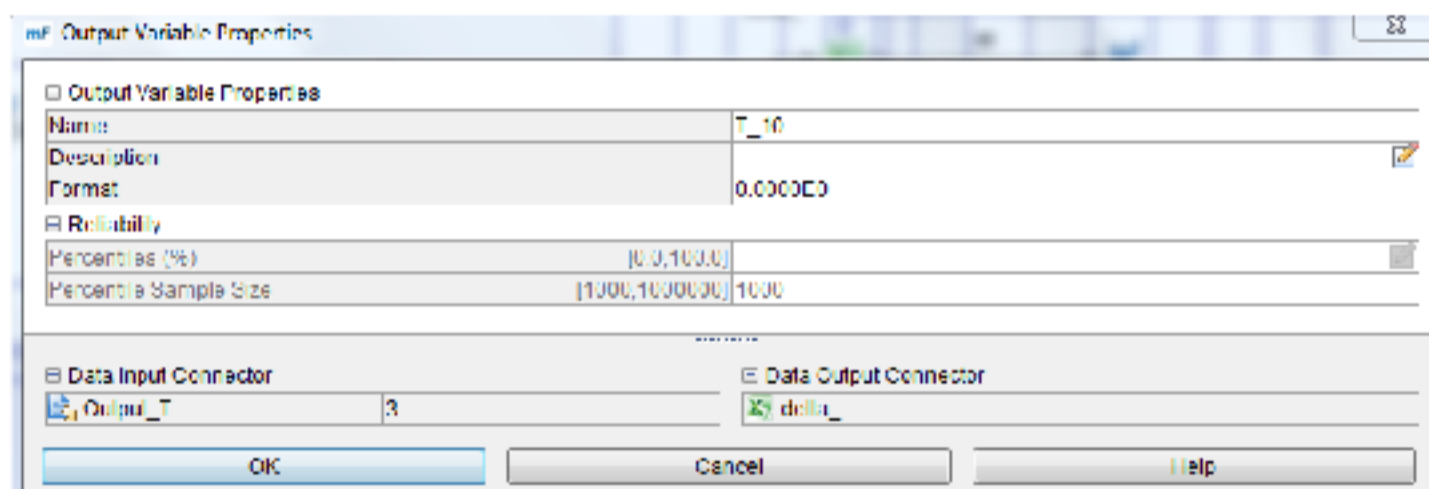


Рис. 28

В файле исходных данных необходимо связать значения переменных с входными параметрами (рис. 29)

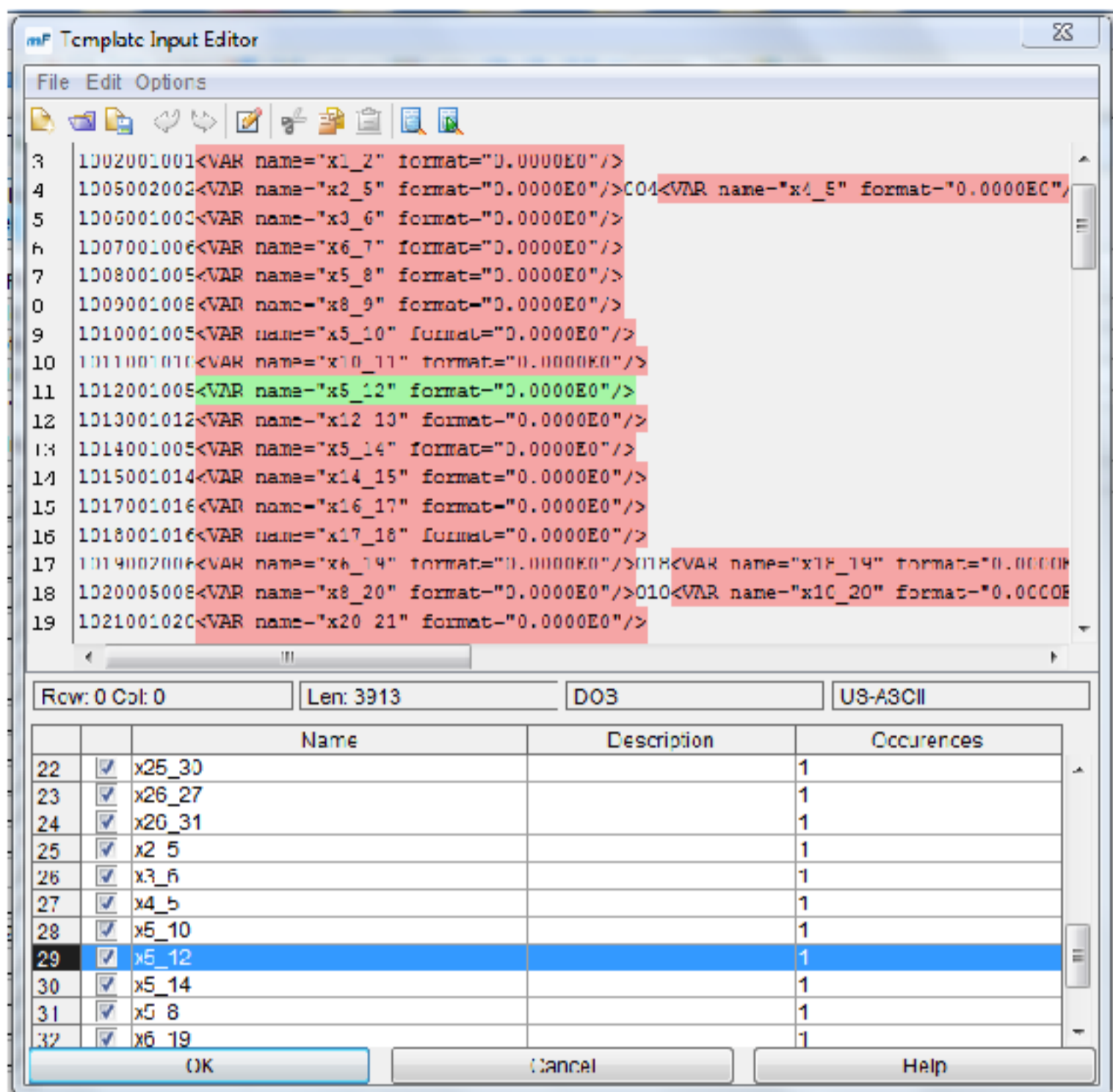


Рис. 29. Файл исходных данных

Аналогично связываем выходные параметры блоков с output файлом (см. рис. 30).

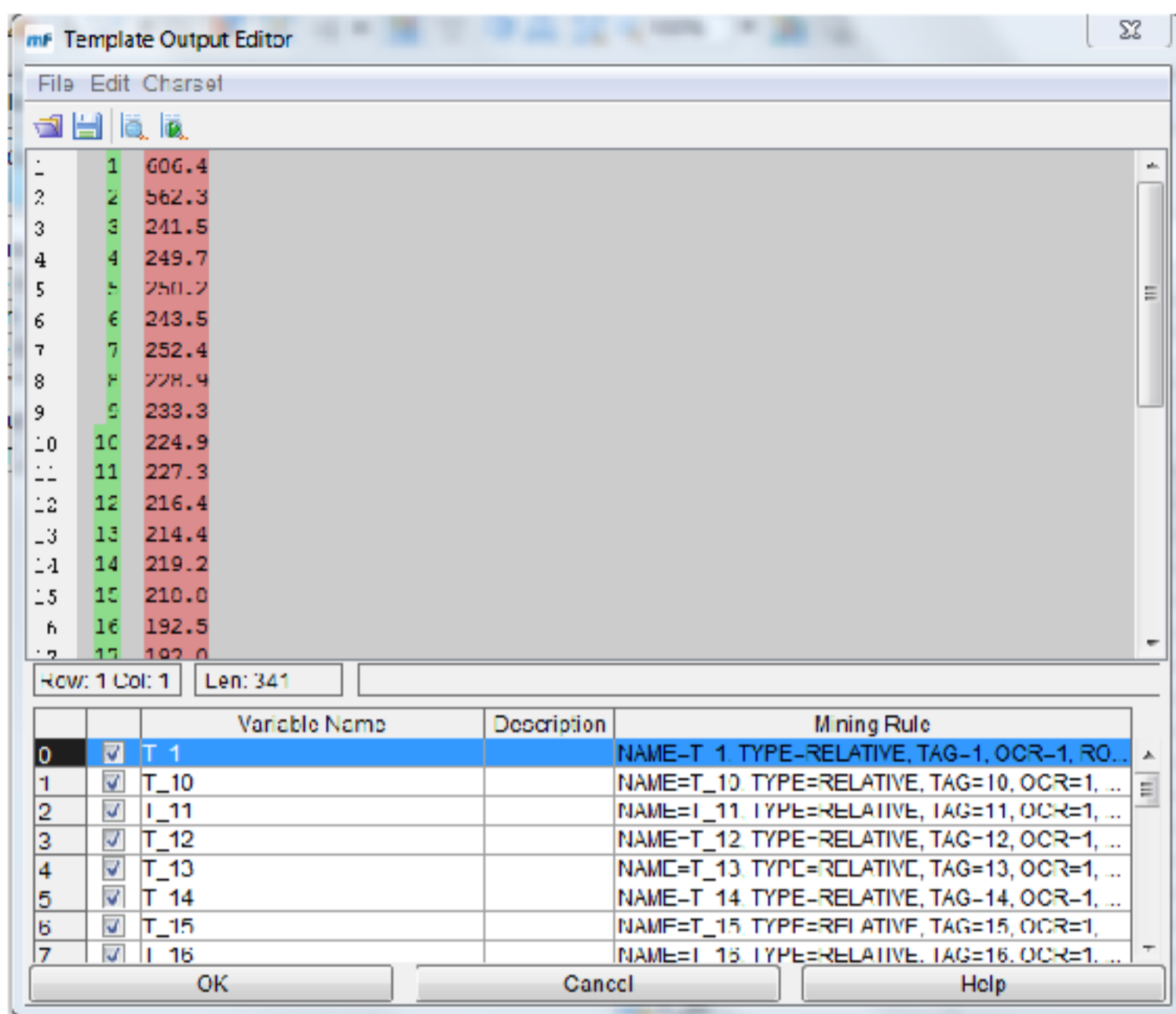


Рис. 30. Файл полученных температур

Для подсчёта разницы между идеальными и полученными температурами воспользуемся Excel. Чтобы выходные значения могли быть использованы для расчётов, необходимо для каждого параметра указать ячейку для записи соответствующего значения (см. рис. 31).

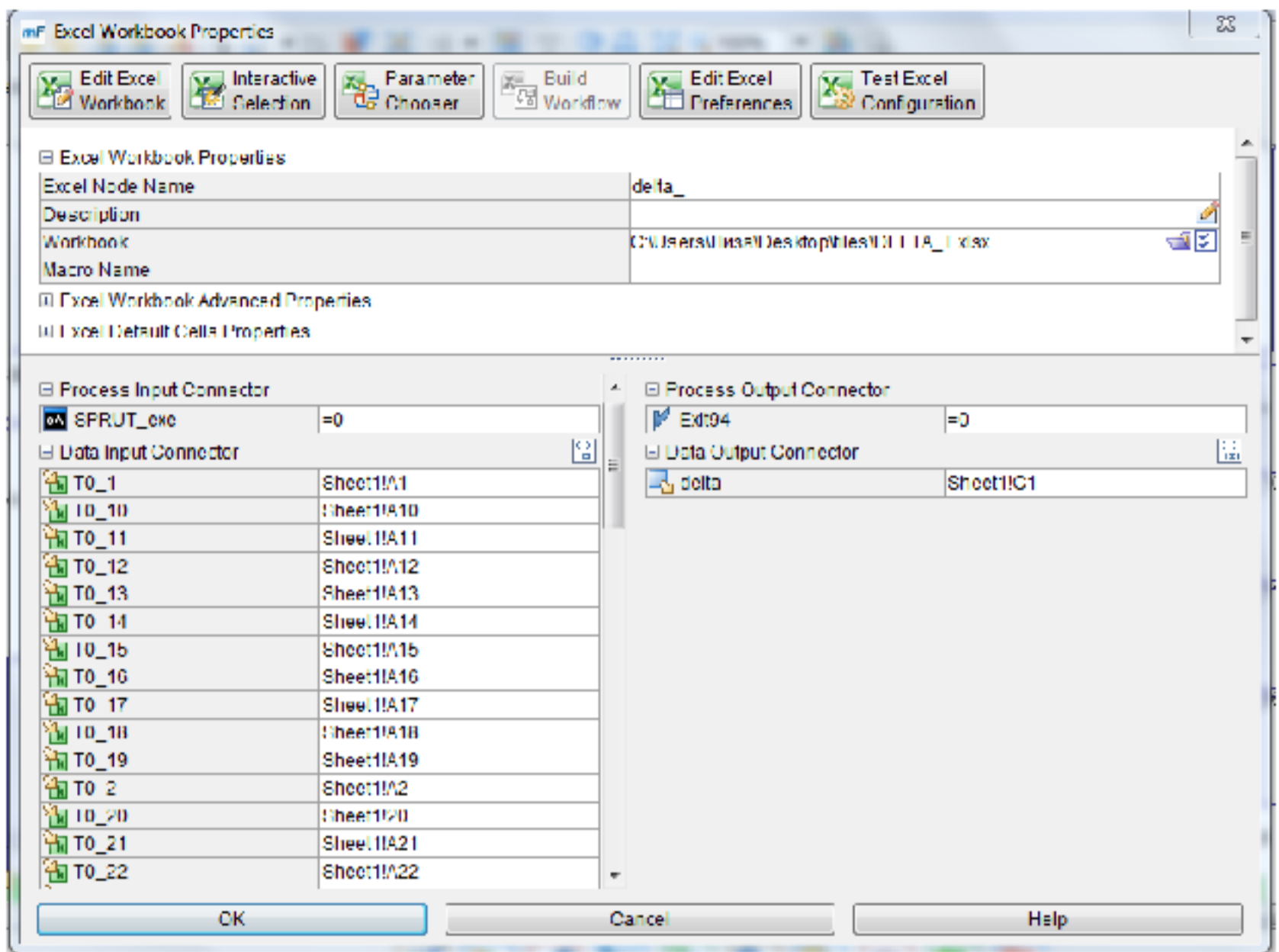


Рис. 31

В ходе прогонки генетического алгоритма, данные будут перезаписываться в ячейки и высчитываться разница температур по формуле

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^{31} (T_i - T_i^*)^2}. \quad (5.1)$$

Фрагмент работы программы изображён на рис. 32.

	A	B	C	D
1	606,4	100,1	1331,977195	
2	562,3	90,1		
3	241,5	54,099876		
4	249,7	229,9		
5	250,2	308,911712		
6	243,5	169,9		
7	252,4	205,7		
8	228,9	190,499754		
9	233,3	209,577776		
10	221,9	100,9		
11	227,3	348,626704		
12	216,4	128,33997		
13	214,4	111,7		
14	219,2	23,713418		
15	218,8	557,135136		
16	192,5	226,4		
17	192	205		
18	208,3	180,006045		

Рис. 32

Здесь в первой колонке записана оптимальная температура T_i^* в узлах, во второй колонке — меняющаяся в ходе работы программы температура T_i . В третьей колонке по формуле (5.1) вычисляется целевая функция δ .

После выполнения программы можно визуализировать в modeFRONTIER полученные результаты (история нахождения решения изображена на рис. 33).

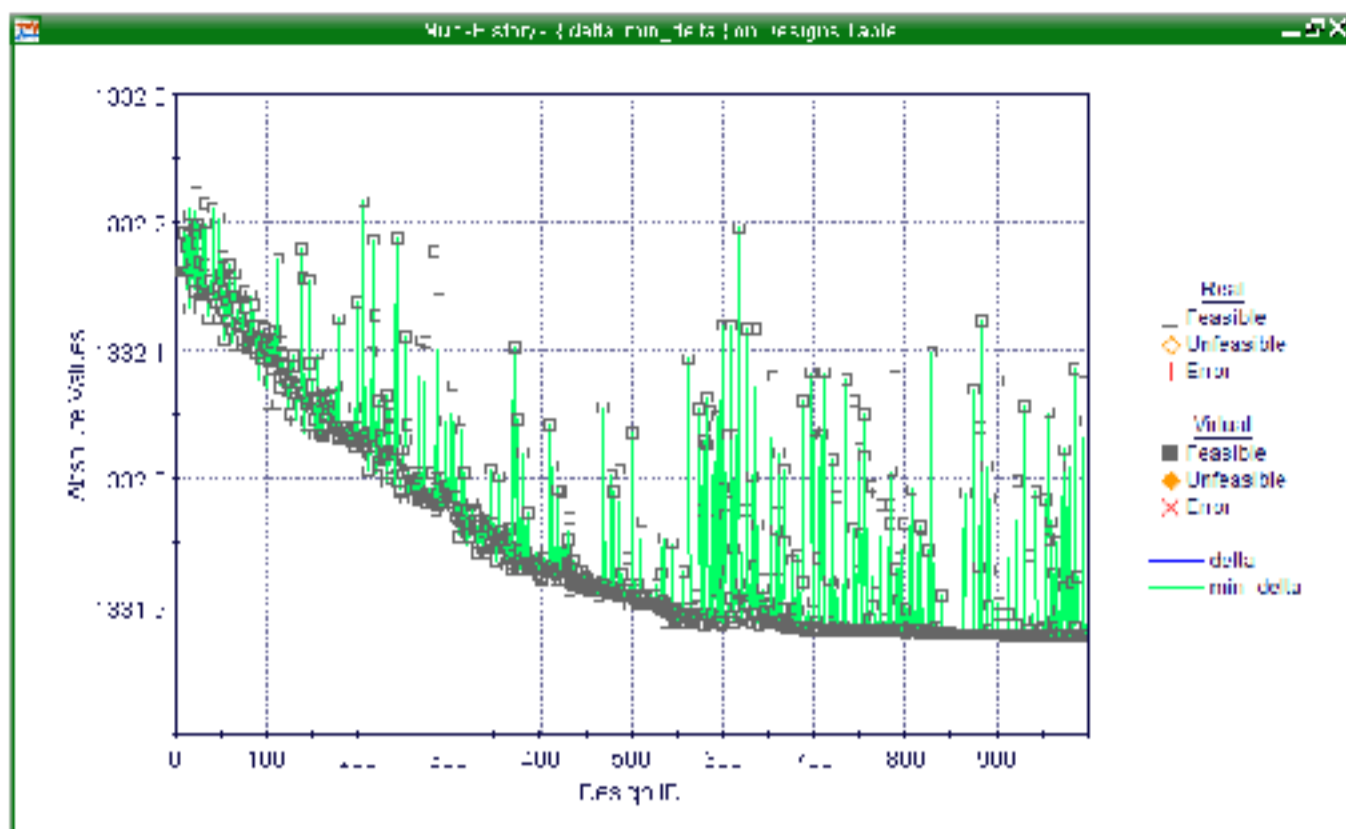


Рис. 33

При работе в modeFRONTIER можно выбрать различные генетические алгоритмы из представленных в списке (см. рис. 34).

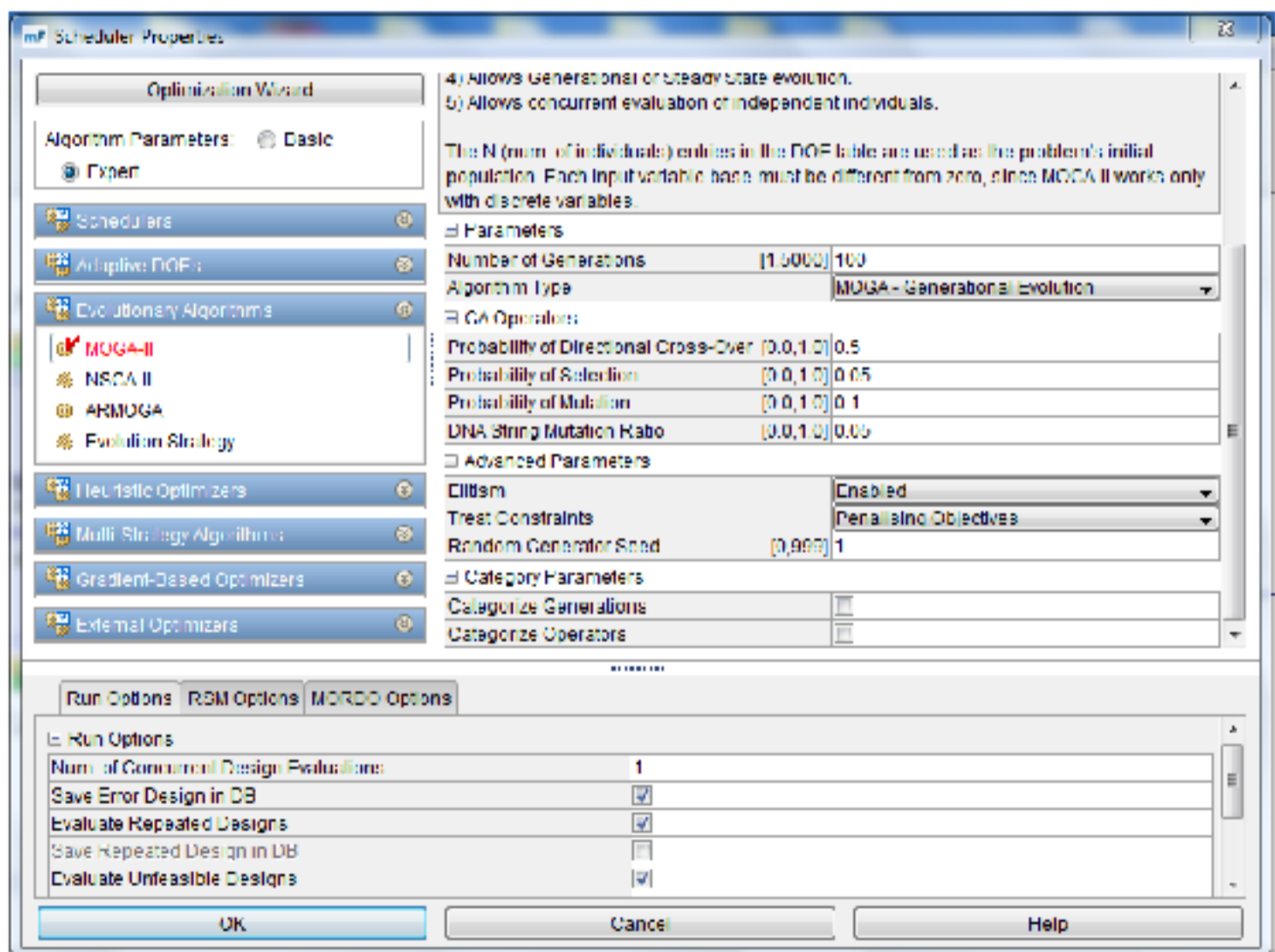


Рис. 34. Выбор генетического алгоритма

При использовании различных генетических алгоритмов для рассмотренной модели (31 узел), задавая 200 поколений, получены следующие результаты:

алгоритм	время работы
MOGA-II (Multiobjective Genetic Algorithm)	8 мин 40 сек
NSGA-II (Non Dominated Sorting Genetic Algorithm)	8 мин 22 сек
ARMOGA (Adaptive range Multiobjective Genetic Algorithm)	7 мин 48 сек
ES (Evolution Strategy)	8 мин 27 сек

Аналогичные расчёты были проведены для модели робота (см. Приложение 4).

Заключение

В ходе работы были изучены физические процессы теплообмена космического аппарата, рассмотрена задача теплового баланса космической техники при помощи моделирования в СПРУТ. Была изучена возможность использования генетических алгоритмов и программного обеспечения modeFRONTIER. Данное программное обеспечение было изучено на примере задачи геометрической оптимизации. При использовании генетического алгоритма верифицированы модели типового космического блока и робота.

Была обеспечена совместная работа программного обеспечения modeFRONTIER и СПРУТ и верифицированы модели по результатам испытаний. Предложенные в работе модели были реализованы с помощью modeFRONTIER и Excel.

Данная работа позволит автоматизировать инженерные расчёты, необходимые для поддержания теплового баланса космической техники.

Список использованной литературы

1. Баёва Ю.В., Лаповок Е.В., Ханков С.И. *Метод поддержания заданного температурного диапазона космического аппарата, движущегося по круговой орбите с заходом в тень Земли*. Изв. вузов. Приборостроение, Т. 56, № 7, 2013. С. 56–61.

2. Болоцкова И.А. *Решение оптимизационных задач на основе методов эволюционного моделирования*. Материалы межд. конф. Известия ТРТУ. С. 340–341.

3. Бурцев М.С. *Эволюция кооперации в Многоагентной системе* // Научная сессия МИФИ-2005. VII всероссийская научно-практическая конференция "Нейроинформатика-2005": Сборник научных трудов. Ч.1. М.: МИФИ, 2005. С. 217–224.

4. Бухмиров В.В. *Тепломассообмен: Учеб. пособие* / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», Иваново, 2014.

5. Виттих В.А. *Эволюционное управление сложными системами*. Известия Самарского научного центра Российской академии наук, Т. 2, № 1, 2000. С. 53–65.

6. Генетический алгоритм.

(http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title=%D0%93%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D0%B0%D0%BB%D0%B3%D0%BE%D1%80%D0%B8%D1%82%D0%BC#.D0.9E.D0.BF.D0.B8.D1.81.D0.B0.D0.BD.D0.B8.D0.B5_.D0.B0.D0.BB.D0.B3.D0.BE.D1.80.D0.B8.D1.82.D0.BC.D0.B0)

7. Голиковская К.Ф. *Математическое моделирование тепловых потоков космического аппарата*. Вестник Сибирского госуд. аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетникова. С. 116–119.

8. Голубева И.Л., Сагадеев В.В. *Тепловое излучение твёрдых и жидких металлов*. Вестник технологического университета, Т.20, №2, 2017. С. 31–32.

9. Горбунов А.Д., Уклеина С.В. *Расчёт нестационарных температур и термических напряжений при вычислении коэффициента теплообмена, учитывающего излучение*. Problemele energeticii regionale, Termoenergetica, 1(30), 2016. С. 78–83.

10. Гридин С.Н. *Особенности работы системы обеспечения теплового режима автоматического космического аппарата*. Актуальные проблемы авиации и космонавтики – 2015, Том 1, 2015. С. 91–92.

11. Двирный В.В., Крушенко Г.Г., Голованова В.В., Двирный Г.В., Петяева Н.Н., Кирьянова К.А. *Совершенствование агрегатов для транспортировки тепла в космических аппаратах*. Исследования наукограда, № 3-4 (18), 2016. С. 12–16.

12. Делков А.В., Ходенков А.А., Танасиенко Ф.В., Кишкин А.А. *Моделирование рабочего процесса системы терморегулирования космического аппарата*. Решетневские чтения, 2013. С. 125–126.

13. Деревянко В.А. *Когда в космосе жарко*. Наука из первых рук, том 37, №1, 2011. С. 28–33.

14. Деревянко В.А., Васильев Е.Н., Нестеров Д.А. и др. *Вычислительное моделирование процессов теплообмена в системах терморегулирования космических аппаратов*. Вычислительные технологии, Т.14, № 6, 2009. С. 19–28.

15. Дзитоев А.М., Ханков С.И. *Методика расчёта коэффициентов облученности цилиндрического космического объекта подсветкой земли*. Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, №1 (89), 2014. С. 145–150.

16. Елисеев В.Н., Товстоног В.А. *Теплообмен и тепловые испытания материалов и конструкций аэрокосмической техники при радиационном нагреве*. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014.

17. Емельянов В.В., Курейчик В.В., Курейчик В.М. *Теория и практика эволюционного моделирования*. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.

18. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. *Теплопередача. Учебник для вузов.* М., «Энергия», 1975.
19. Крушенко Г.Г., Голованова В.В. *Совершенствование системы терморегулирования космических аппаратов.* Вестник СибГАУ, № 3(55), 2014. С. 185–189.
20. Куликов Д.С., Ерилкин Я.Н. *Тепловой режим малого космического аппарата «Аист».* Вестник Самарского госуд. аэрокосмического университета, Т. 15, № 1, 2016. С. 81–88.
21. Курейчик В.В. *Эволюционное моделирование в системах управления.* Известия ТРТУ, 2004. С. 80–83.
22. Курейчик В.В., Смирнова О.В. *Эволюционное моделирование при принятии решений.* Известия ТРТУ, Материалы межд. конференции «Интеллектуальные САПР». С. 55–62.
23. Малоземов В.В. *Тепловой режим космических аппаратов.* М., Машиностроение, 1980.
24. Мельников С.Г. *Лучистый теплообмен в высокотемпературных вакуумных печах с экранной тепловой изоляцией.* «Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение», №4 (44), 2015. С. 196–203.
25. Мурадимов М.Ж., Двирный В.В., Двирный Г.В., Кукушкин С.Г., Голованова В.В., Сидорова Е.С. *Тепловая схема малого космического аппарата типа «Юбилейный» и определение параметров теплообменного устройства.* Исследования наукограда, № 1 (11), 2015. С. 18–23.
26. Рухлинский В.М. *Аналитическое представление целевой функции методом группового учета аргументов.* Научный вестник МГТУ ГА, № 127, 2008. С. 32–38.
27. Солодов А.В. *Инженерный справочник по космической технике.* М., Военное издательство МО СССР, 1977.
28. Спэрроу Э.М., Сесс Р.Д. *Теплообмен излучением.* «Энергия» Ленинградское отделение, 1971.

29. Судомоин П.Д., Шабанов В.А., Платонов К.А., Каськов С.И. *Исследование теплового состояния малого космического аппарата*. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение», №2, 2016. С. 28–44.

30. Цаплин С. В., Большев С.А., Романов А.Е. *Основы теплообмена космических аппаратов*. Самара: Изд-во «Самарский университет», 2013.

31. Царицынский А.А. *Обзор существующих программных продуктов многокритериальной оптимизации объектов аэрокосмической техники*. Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов, Вып. 4, 2015. С. 112–123.

32. Энциклопедия по машиностроению (<http://mash-xxl.info/info/76392/>).

Приложение 1. Основные обозначения

Величина	Название	Единицы измерения
α	коэффициент теплообмена	$Вт/(м^2 \cdot К)$
w	скорость движения теплоносителя	$м/с$
F	площадь поверхности	$м^2$
S		
q	плотность теплового потока	$Вт/м^2$
Q	тепловой поток	$Вт$
l	длина	$м$
h	энтальпия	$Дж/(м^2 \cdot с)$
c	теплоёмкость	$Дж/(кг \cdot К)$
ϵ	коэффициент излучения серого тела	$Вт/(м^2 \cdot К^4)$
ρ	плотность	$кг/м^3$
λ	коэффициент теплопроводности	$Вт/(м \cdot К)$
μ	молекулярная масса	$г/моль$
μ	относительная молекулярная масса	а.е.м.
T	температура	$К$ $T, К = T, ^\circ C + 273,15$
Q	поток излучения	$Вт$
E	плотность потока излучения	$Вт/м^2$

τ	время	c
dQ	количество теплоты	Дж
ε	интегральная степень черноты тела	$0 \leq \varepsilon \leq 1$
u_0	объёмная плотность излучения	Дж/м ³
c_ϕ	скорость фотонов	м/с
m	масса	кг

Приложение 2. Постоянные величины

Величина	Название
$g = 9,8 \text{ м}^2 / \text{с}$	ускорение свободного падения
$R_\mu = 8314,2$ Дж/(кмоль · К)	универсальная газовая постоянная
$\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$	постоянная Стефана — Больцмана
$\epsilon_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$	коэффициент излучения абсолютно чёрного тела

Замечание. 1 Дж = 1 Вт · с

Приложение 3. Таблица связей в узлах

	2	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	30	31	
1	0,55																									
2		0,12																								
3			0,8																							
4		40																								
5					0,1		0,1		0,1		0,1															
6				1											0,2											
7																				0,057						
8					0,4											0,1										
10								0,4								0,1										
11																					0,021					
12										0,4						0,1										
13																					0,021					
14												0,4				0,1										
16													60													
17														0,2		1,5			0							
18															10											
19																		0,8		0,057						
20																	40									
21																			2,5							
22																			40	0,7						
23																						0,4				
24																					70					
25																								0,005		
26																							4		1	

Приложение 4. Связь программы СПРУТ в среде modeFRONTIER

