

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

*На правах рукописи*

ДУДКИН  
Константин Кириллович



**КОНТАКТНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ВНУТРЕННЕГО  
ТЕПЛОВОГО ПОТОКА ЛУНЫ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ЛУННОГО ГРУНТА**

Специальность 01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника»

ДИССЕРТАЦИЯ  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор,  
академик РАН  
АЛИФАНОВ Олег Михайлович

Москва - 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Глава 1. КОНТАКТНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ВНУТРЕННЕГО ТЕПЛООВОГО ПОТОКА ЛУНЫ .....	14
1.1. Общая характеристика плотности внутреннего теплового потока Луны. История измерений .....	14
1.2. Простейшие схемы поверхностных термозондов.....	15
1.3. Датчик с термоизолированными поверхностями.....	17
1.4. Датчик с термоизолированной боковой поверхностью .....	19
1.5. Н-образный поверхностный термозонд для измерения плотности теплового потока. Конструкция и принцип действия.....	24
1.6. Термозонды на основе поверхностных батарейных датчиков .....	28
1.6.1. Поверхностные батарейные датчики с термопарами.....	28
1.6.2. Поверхностные батарейные датчики на основе анизотропных монокристаллов висмута, или градиентные датчики теплового потока (ГДТП).....	31
1.7. Проникающий термозонд для измерения плотности внутреннего ТП Луны .....	34
1.7.1. Схема зонда.....	34
1.7.2. Оценка влияния теплопроводности стержня на определение теплового потока для модели однородного грунта.....	36
1.7.3. Оценка влияния теплопроводности стержня на определение теплового потока для модели многослойного грунта.....	40
1.8. Выводы по главе 1 .....	44
Глава 2. КОНТАКТНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛУННОГО ГРУНТА .....	47
2.1. Общее описание теплофизических характеристик лунного грунта. История измерений .....	47
2.2. Поверхностный термозонд .....	52
2.3. Остывающий термозонд .....	59
2.4. Схема с использованием пенетратора.....	60

2.5. Проникающий термозонд для измерения ТФХ лунного грунта .....	67
2.6. Термозонд с отделяющимся нагревателем .....	76
2.7. Определение ТФХ лунного грунта при помощи солнечного тепла....	83
2.7.1. Способ измерения .....	83
2.7.2. Методы решения задачи по определению ТФХ .....	83
2.7.3. Исходные данные. Выбор размера конечного элемента. Результаты решения задачи .....	85
2.8. Выводы по главе 2 .....	91
<b>Глава 3. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СХЕМЫ ТЕРМОЗОНДОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА ЛУНЫ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЕ ГРУНТА .....</b>	<b>95</b>
3.1. Постановка задачи .....	95
3.2. Разделяемый термозонд .....	97
3.2.1. Схема зонда.....	97
3.2.2. Последовательность установки и использования разделенного термозонда. Вариант конструкции.....	99
3.2.3. Измерение ТФХ лунного грунта с помощью разделяемого термозонда .....	105
3.2.4. Измерение плотности внутреннего ТП Луны с помощью разделяемого термозонда .....	108
3.3. Термозонд с высоким тепловым сопротивлением (ВТС) .....	110
3.3.1. Схема зонда. Принцип действия.....	110
3.3.2. Измерение ТФХ лунного грунта с помощью термозонда ВТС. Влияние конструкции зонда на распределение температуры.....	112
3.3.3. Моделирование определения ТФХ. Сравнение с аналогом .....	125
3.3.4. Измерение плотности внутреннего ТП Луны с помощью термозонда ВТС .....	130
3.4. Выводы по главе 3 .....	131
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>134</b>
<b>СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....</b>	<b>136</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>138</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А .....</b>	<b>145</b>

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **Актуальность темы диссертации и степень ее разработанности**

Одна из важнейших проблем в изучении Луны – это эволюция термических процессов, т.е. понимание как менялись процессы теплопереноса и распределение температурных зон внутри Луны за определённое геологическое время. Изучение термических процессов внутри планеты во многом являются ключом к пониманию ее эволюции в целом. Тепловой режим внутри Луны определяет глубину и время протекания основных процессов дифференциации лунного вещества, а также ход глобальных тектонических процессов, таких, как сжатие, расширение и вулканическая активность.

Для построения достоверной модели химического строения Луны необходимо, наряду со знанием радиального профиля скоростей сейсмических волн, знать характер изменения температуры с глубиной (лунотерму). Как показывает пример Земли, для "твёрдых" планет наблюдается корреляция величины теплового потока с содержанием радиоактивных элементов, прежде всего U и Th. В настоящее время можно считать доказанным, что энергия распада радиоактивных элементов является основным источником внутреннего тепла Земли и планет земной группы [67].

Для правильного понимания термических процессов, протекающих на Луне, необходимо выяснить существующие в настоящее время тепловые потоки. Правильная оценка параметров поверхностного теплового потока в глобальных масштабах даёт возможность ограничить количество существующих моделей эволюции термических процессов.

Для определения плотности теплового потока из недр Луны (будем называть его «внутренним тепловым потоком») в большинстве случаев необходимо знание теплофизических характеристик (ТФХ) лунного грунта. В частности, важное значение имеет распределение этих характеристик по глубине.

Определение ТФХ лунного грунта само по себе является отдельной научной задачей. Понимание распределения этих характеристик, помимо научного интереса, может быть полезно для решения таких практических задач, как например строительство лунной базы или ведение горнодобывающей деятельности на поверхности Луны.

Что касается непосредственно истории измерений плотности внутреннего теплового потока (ТП) Луны, то изначально, до экспедиции «Аполлон», оно базировалось на наблюдениях с Земли теплового излучения поверхности Луны в микроволновом диапазоне. Благодаря частичной прозрачности лунного материала, спектр излучения электромагнитных волн длиннее 1 мм зависит от температуры приповерхностного слоя. Зная электрические свойства лунных грунтов, можно по спектру теплового излучения построить распределение температуры в приповерхностном слое.

Наиболее успешные результаты по такой методике были получены Ф. С. Троицким и его коллегами в Институте радиофизики. В результате анализа спектра теплового излучения в микроволновом диапазоне от 1 мм до 3 см Т. Ф. Тихонова и Ф. С. Троицкий получили величины плотности теплового потока, равные  $3 \cdot 10^{-2} - 4 \cdot 10^{-2}$  Вт/м<sup>2</sup>, что составляет приблизительно половину среднего теплового потока для Земли [26].

Г. С. Юри в своей книге [74], базируясь на различных данных, также одним из первых составил описание строения и модель тепловой истории Луны в современном понимании.

Однако, как пишет в своей монографии Н.В. Шумаков [43], радиоизмерения дают некоторые средние значения искомым величин (плотность потока внутреннего тепла Луны, теплофизические характеристики грунта Луны и т. д.) в лучшем случае для области радиусом 50-60 км и с погрешностью не менее 20-25%. Поэтому возникает потребность в их локальном определении [43].

Прямые, и пока единственные, измерения плотности внутреннего ТП Луны, проведенные непосредственно на поверхности, были успешно проведены в миссиях «Аполлон-15» и «Аполлон-17».

М. С. Лангсет в своей статье [26], посвященной этому исследованию, подробно описывает методику измерений, аппаратуру, принципы ее работы и последовательность действий астронавтов; приводит результаты измерений, а также анализирует полученные данные [45].

В сборнике статей [36] опубликованы различные статьи авторов, которые, опираясь на полученные ранее данные, занимались проблемой теплового состояния Луны. В частности, С. Ранкорн в статье [35] предложил свою тепловую модель Луны, и использовал для объяснения различных явлений идею о конвективном теплообмене в недрах Луны [35, 68, 69]. В свою очередь в статье Е. Фрикера и др. [42] приведены расчеты различных вариантов возможной тепловой истории Луны. Однако отмечено, что данные, которые были известны на момент расчетов, не позволяют однозначно выбрать определенную модель с достаточной точностью. Единственным ключом для однозначного выбора типа модели тепловой истории Луны могут послужить планомерные измерения плотности теплового потока. Дж. Бастин и др. в своей статье [4] разрабатывает метод для расчета плотности теплового потока Луны, основанный на отождествлении теплопроводности поверхностного слоя Луны с теплопроводностью мелкозернистого материала, полученной из лабораторных измерений.

О. И. Орнатская и др. в статье [32] проводит расчеты тепловой истории Луны, основанные на решении уравнения теплопроводности с источниками тепла – долгоживущими радиоактивными элементами. Эти расчеты опираются на различные данные о плотности внутреннего теплового потока Луны.

Н. В. Шумаков в своей монографии [43] предложил новый подход к определению плотности внутреннего теплового потока Луны на основе

метода последовательных интервалов. Он считал, что измерения по этому вопросу, проведенные в миссиях «Аполлон», не совсем корректны из-за искажения температурного поля термозондами.

Что касается определения ТФХ лунного грунта, то измерения проводились как в лабораторных условиях, так и непосредственно на Луне. Результаты лабораторных измерений описываются, например, в [1].

Единственные измерения ТФХ грунта, проведенные в естественных условиях, были реализованы в миссиях «Аполлон-15» и «Аполлон-17». Подробно методику измерений, аппаратуру и результаты описывает М. С. Лангсет в своей статье [26].

В последние годы проводятся все новые исследования, включающие, например, создание улучшенных по точности математических моделей распределения тепла, новые оценки плотности внутреннего ТП, в также данных по ТФХ лунного грунта.

Y. Saito и др. в своей статье [70] проводят новый анализ данных, полученных в миссиях «Аполлон», тем самым получив более точную оценку плотности внутреннего ТП и ТФХ лунного грунта. Подобный вопрос также рассматривается и в [63]

В статье [54] изучается некоторая неопределенность в расчетах плотности внутреннего ТП по результатам миссий «Аполлон», связанная с неправильным определением теплопроводности окружающего грунта. Предложены возможные модели расчета с учетом этого фактора.

В. А. Кронрод, Е. В. Кронрод, О. Л. Кусков в своих статьях [23, 62] методами математического моделирования производят определение вероятного распределения температуры внутри Луны. Основываясь на этих данных, авторы делают предположения о возможном внутреннем строении Луны. Также проводится оценка достоверности исследуемой сейсмической модели и ее соответствия петрологическим и термальным моделям [60, 62, 61, 59, 53, 71, 58].

Несмотря на продолжающееся развитие математических моделей теплового состояния недр, методов анализа различных данных, и т.п., практически все авторы указывают на то, что продолжает иметь место потребность в новых измерениях на поверхности Луны. Дело в том, что исследования в основной своей массе строятся на научных данных, полученных в миссиях «Аполлон-15» и «Аполлон-17». Однако, эти измерения имели ряд недостатков. Например, в статье [54] показано, что существует погрешность в измерении ТФХ лунного грунта, а это повлекло за собой также ошибку в измерении плотности внутреннего ТП Луны. Н.В. Шумаков [43] пишет следующее: «Размещение датчиков, предназначенных для измерения температуры грунта, внутри фиброгласовой трубки по соседству с многочисленными неоднородностями, обусловленными конструкцией и монтажом зондов, еще может быть оправдано в условиях стационарного поля возможностью введения обоснованных поправок. Использование такого способа измерения температур в нестационарном поле, на наш взгляд, несостоятельно из-за невозможности учета всего множества причин, приводящих к искажению истинной информации».

Таким образом, в проведенных измерениях на поверхности Луны можно наблюдать некоторые ошибки, полученные в результате влияния конструкции термозонда на естественное распределение температуры. Причем эти ошибки могли возникать как при измерении плотности внутреннего ТП Луны, так и при измерении ТФХ лунного грунта. Следовательно, существует потребность не только в новых измерениях на поверхности, но также и в создании термозонда, который бы минимально искажал естественное распределение температуры.

Измерение плотности внутреннего ТП Луны, с одной стороны, и ТФХ грунта, с другой стороны, имеют свою специфику и требуют различного подхода. Исходя из этого, в диссертации рассматриваются две задачи:

- поиск наилучшей (с точки зрения достоверности и точности получаемых данных) конструкции термозонда для измерения плотности внутреннего ТП Луны

- поиск наилучшей (с точки зрения достоверности и точности получаемых данных) конструкции термозонда для измерения ТФХ лунного грунта.

В обоих случаях рассматривались конструкции, удобные для использования в лунных условиях эксплуатации.

### **Цель диссертационной работы:**

Разработка методов, принципов и схем измерения плотности внутреннего ТП Луны и ТФХ лунного грунта, минимизирующих погрешности, связанные с влиянием зонда. Тем самым снижается неопределенность и случайная погрешность при решении тепловой задачи, и, как следствие, повышается достоверность и точность результатов.

Для достижения цели работы решались следующие **задачи**:

1. Проведено численное моделирование с анализом достоверности и точности результатов, полученных при использовании различных ранее известных схем термозондов для измерения плотности внутреннего теплового потока Луны, получены сравнительные оценки с учетом влияния собственно зонда на измеряемую величину.

2. Проведено численное моделирование, оценивающее достоверность и точность различных ранее известных схем термозондов для измерения ТФХ лунного грунта в естественных условиях, получены сравнительные оценки с учетом влияния собственно зонда на измеряемую величину.

3. Проведено численное моделирование измерения ТФХ грунта с использованием в качестве нагревателя солнечного тепла, оценена достоверность получаемых результатов.

4. Проведен анализ недостатков существующих методов и тепловых схем термозондов как для измерения плотности теплового потока (ТП) Луны,

так и для теплофизических характеристик (ТФХ) лунного грунта. Предложено несколько новых методов и схем термозондов.

5. Проведено численное моделирование предложенных схем термозондов для измерения плотности ТП Луны и ТФХ лунного грунта, оценена погрешность влияния конструкции на измеряемую величину, и, как следствие, достоверность и точность получаемых результатов.

6. Выбрана принципиально новая схема, позволяющая минимизировать погрешности измерений. Предложен новый метод и схема реализации, которая позволяет минимизировать погрешности измерения ТФХ. Предложен алгоритм определения ТФХ лунного грунта в соответствии с данной схемой. Оценена точность определения плотности ТП Луны при помощи такой схемы.

**Объектом исследования** являются различные методы и схемы для определения как плотности внутреннего теплового потока Луны, так и ТФХ ее грунта.

**Предметом исследования** является процесс теплообмена в системе термозонд-грунт при проведении измерений.

### **Научная новизна работы**

1. Впервые комплексно рассмотрена проблема влияния погрешности, возникающей в результате воздействия конструкции термозонда на распределение температуры при измерении ТФХ грунта и внутреннего ТП Луны.

2. Предложен новый метод и схема его реализации, которая позволяет определять как ТФХ лунного грунта, так и плотность внутреннего теплового потока Луны. При этом погрешности от влияния термозонда сведены к минимуму. Это подтверждено результатами имитационного численного моделирования.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

В настоящее время планируется серия исследовательских экспедиций на Луну. Разработка термозондов на основе представленных в данной работе

схем позволит увеличить точность контактных измерений ТФХ лунного грунта и плотности внутреннего теплового потока. Это может способствовать как дальнейшим исследованиям строения Луны, истории ее возникновения, развитию теории образования планет в целом, так и решению практических задач, например, при проектировании лунной базы, или при ведении горнодобывающих работ на поверхности.

В диссертации приведены результаты исследований, выполненных при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-08-01012.

**Методы диссертационного исследования.** При решении поставленных в диссертации задач основным методом исследования является имитационное моделирование с использованием численного метода конечных элементов, при помощи которого решался широкий спектр задач теплообмена, моделирующих работу различных методов измерения и схем термозондов в режимах определения ТФХ лунного грунта и плотности внутреннего ТП Луны.

**На защиту выносятся** следующие результаты проведенных автором исследований по вопросам достоверности и точности данных при контактном измерении ТФХ лунного грунта и плотности внутреннего теплового потока термозондами различных схем:

1. Анализ влияния схем и конструктивных решений на измерение плотности внутреннего теплового потока Луны, и, как следствие, оценка достоверности полученных с их помощью результатов;
2. Анализ влияния схем и конструктивных решений на измерение теплофизических характеристик лунного грунта, и, как следствие, оценка достоверности полученных с их помощью результатов;
3. Анализ точности измерения ТФХ лунного грунта с использованием солнечного тепла;
4. Перспективные схемы и конструктивные решения для измерения ТФХ лунного грунта и плотности ТП Луны с уменьшенным влиянием

конструкций на результаты измерений и, как следствие, улучшенными точностными характеристиками.

**Достоверность и обоснованность полученных результатов** обеспечена применением строгих методов теории теплопроводности. Для имитационного моделирования тепловых процессов использовались стандартные апробированные методики на основе конечно-элементного метода. Численное моделирование проводилось как в стационарной, так и в нестационарной постановке задач в системе Ansys Workbench с использованием детализированных моделей изделий, высокоплотной сетки и с учетом тепловых сопротивлений на контактах различных тел. Необходимая точность численных расчетов оценивалось путем варьирования размера конечно-элементной сетки.

**Апробация результатов работы.** Положения и результаты работы докладывались: на 50 Научных чтениях памяти К.Э. Циолковского (Калуга, 2015); 14-й международной конференции «Авиация и космонавтика-2015» (Москва, 2015); на XL Академических чтениях по космонавтике посвященных памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства (Москва, 2016); на XLIV международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения» (Москва, 2018); на Седьмой российской национальной конференции по теплообмену (Москва, 2018) [11, 14, 15, 16].

#### **Публикации по теме диссертации.**

По теме диссертации опубликовано 10 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 5 работ [10, 12, 13, 17, 18] (одна из них также издана в англоязычном варианте [52]), 1 патент на изобретение [33].

**Личный вклад.** Постановка задач исследования, имитационный анализ методов и схем как для измерения плотности внутреннего теплового потока Луны, так и для определения ТФХ грунта, разработка схемы перспективного термозонда, обеспечивающего повышенную точность измерений, а также все проведенные расчеты в диссертационной работе.

**Структура работы.** Диссертация оформлена в виде рукописи объемом 159 страниц и имеет следующую структуру: титульный лист, оглавление, текст диссертации, включающий в себя введение, основную часть из трех глав, заключение, список литературы и приложение.

## Глава 1. КОНТАКТНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ВНУТРЕННЕГО ТЕПЛООВОГО ПОТОКА ЛУНЫ

### 1.1. Общая характеристика плотности внутреннего теплового потока Луны. История измерений

Величину плотности внутреннего теплового потока Луны измеряли различными методами неоднократно, однако в литературе нет единого мнения относительно ее величины.

Этим вопросом занимались В.С. Троицкий, В.Д. Кротиков, Т.В. Тихонова, Е.А. Любимова. В работах [24, 39, 40, 28] полученные ими оценки плотности теплового потока находятся в пределах от  $q_e=1,4*10^{-2}$  Вт/м<sup>2</sup> до  $q_e=5,443*10^{-2}$  Вт/м<sup>2</sup>. В работе [20] приводятся данные по величине плотности внутреннего теплового потока от  $q_e=1,047*10^{-2}$  Вт/м<sup>2</sup> до  $q_e=1,4*10^{-2}$  Вт/м<sup>2</sup>.

Прямые измерения плотности теплового потока в тонком подповерхностном слое Луны были успешно проведены в двух районах: Хэдли Рилли на краю Моря Дождей («Аполлон-15»), и Тавр-Литтров в узком заливе на юго-восточной окраине Моря Ясности («Аполлон-17»).

Расчеты плотности теплового потока были проведены на основании измерения теплопроводности и температурного градиента. Тепловой поток в Районе Хэдли Рилли составил  $3,1*10^{-2}$  Вт/м<sup>2</sup>, и в районе Тавр-Литтров  $2,8*10^{-2}$  Вт/м<sup>2</sup> [26]. Это достаточно близко к последним данным В. С. Троицкого [39, 40].

В данном исследовании, вслед за Н.В. Шумаковым [43], примем опорное значение плотности потока внутреннего тепла Луны равным:  $q_e=3,14*10^{-2}$  Вт/м<sup>2</sup>.

Что касается теплофизических свойств лунного грунта, стоит сказать, что М. С. Лангсет и С. Дж. Кейм в своей статье «Непосредственные измерения теплового потока на Луне» [26] показывают значения теплопроводности от  $1*10^{-3}$  Вт/м °С для приповерхностного слоя, и до  $3*10^{-2}$  Вт/м °С для глубины порядка 2,2 м. Это хорошо согласуется с моделью лунного грунта, описанной в статье К. П. Флоренского [41].

Для оценочных расчетов примем величину теплопроводности лунного грунта равной:  $\lambda=2 \cdot 10^{-3}$  Вт/м °С.

Основные потенциально возможные виды термозондов для измерения плотности внутреннего теплового потока:

- Проникающий термозонд
- Поверхностные термозонды: с термоизолированными поверхностями; с термоизолированной боковой поверхностью; Н-образный термозонд; батарейный датчик теплового потока (БДТП); градиентный датчик теплового потока (ГДТП).

Далее в тексте рассмотрим отдельно каждый из указанных типов термозондов.

## **1.2. Простейшие схемы поверхностных термозондов**

Поверхностный термозонд располагается на поверхности изучаемой среды и не предполагает заглубления в нее.

Наиболее распространенным типом поверхностного термозонда для измерения плотности теплового потока являются термозонды на основе датчиков тепловых потоков с «одномерными» чувствительными элементами (ЧЭ), выполненными из материалов с хорошо известными теплофизическими характеристиками (ТФХ). Датчики конструируются таким образом, чтобы температурное поле в ЧЭ можно было бы с приемлемой точностью отождествить с одномерным температурным полем в плоскопараллельной неограниченной пластине. В частности, ЧЭ выполняется в виде сплошного цилиндра достаточно малого диаметра с теплоизолированной боковой поверхностью. На один из его торцов действует измеряемый тепловой поток с определенной плотностью, в то время как на другом обеспечиваются условия теплоизоляции (рисунок 1.2), постоянства температуры (рисунок 1.3), или, если трудно обеспечить или проконтролировать указанные граничные условия на верхнем торце, то измерение температуры нужно выполнить как минимум в двух точках (рисунок 1.4) [2].

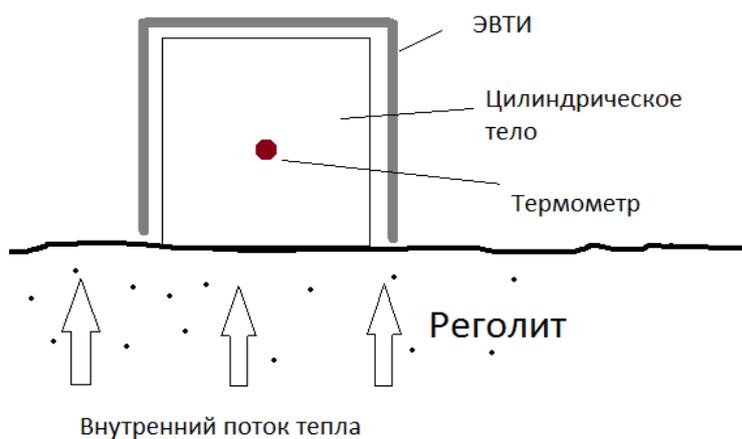


Рис. 1.2. Схема датчика теплового потока с теплоизолированными боковой и верхней поверхностями (здесь и далее ЭВТИ – экранно-вакуумная теплоизоляция)

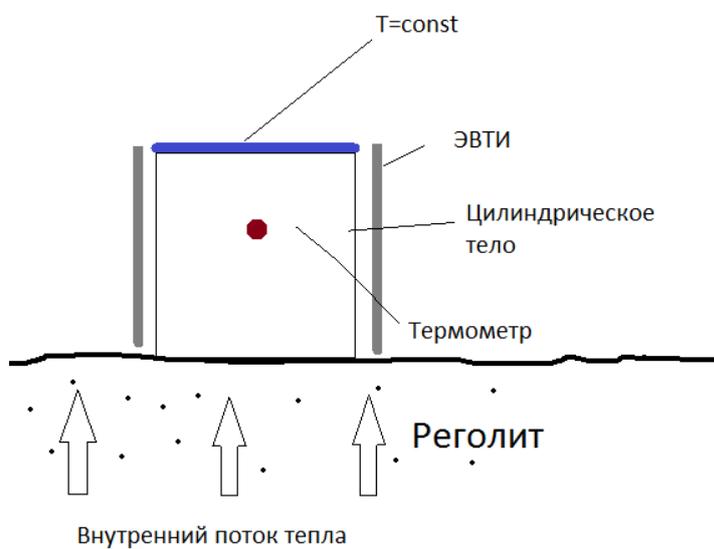


Рис. 1.3. Схема датчика теплового потока с теплоизолированной боковой и термостатированной верхней поверхностями

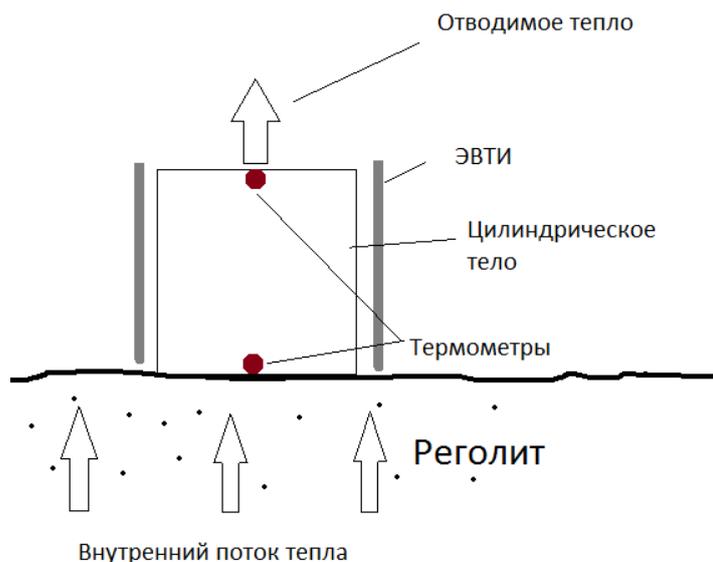


Рис. 1.4. Схема датчика теплового потока с термоизолированной боковой поверхностью.

Поскольку, как уже было оговорено, в нашем исследовании мы берем опорное значение внутреннего теплового потока Луны равным  $q_в=0,0314$  Вт/м<sup>2</sup>, можно предположить, что для такой малой величины возникают серьезные трудности при ее точном контактном измерении.

Вариант теплового датчика с постоянной температурой на торце (рисунок 1.3) можно отбросить сразу по техническим соображениям. Обеспечить точное постоянство температуры на верхнем торце достаточно сложно, следовательно, данная схема не подходит.

Остальные схемы будут рассмотрены далее.

### 1.3. Датчик с термоизолированными поверхностями

Рассмотрим схему на рисунке 1.2, где боковые и верхние стороны датчика термоизолированы. Принцип действия датчика заключается в следующем: измеряя зависимость температуры тела датчика по времени, и используя эти данные можно из решения нестационарной обратной задачи определить величину искомого теплового потока.

Поскольку тело датчика должно обладать высокой теплопроводностью, примем следующую схему. На поверхность грунта помещается тонкий

медный диск (рисунок 1.5). Верхняя и боковая поверхности его тщательно изолированы. Температуру по всему диску в каждый момент времени можно считать одинаковой – т.е., при расчетах нестационарной задачи можно пользоваться квазистационарным приближением.

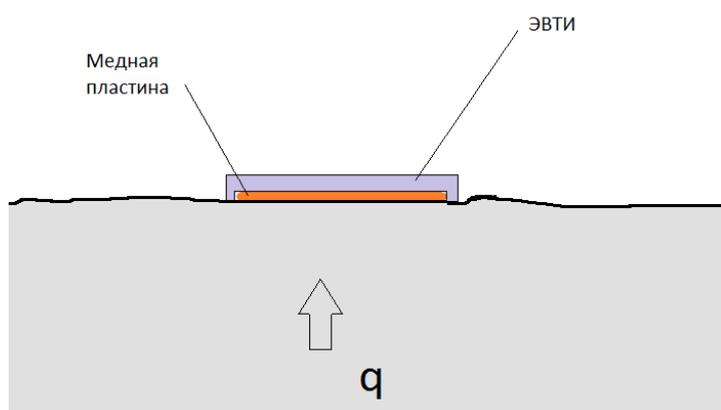


Рис. 1.5. Схема датчика с термоизолированными поверхностями

При использовании данной схемы возникает ряд сложностей.

Во-первых, в самом начале эксперимента пластина будет иметь свою собственную температуру. При контакте с грунтом это исказит и без того достаточно тонкие распределения температуры

Во-вторых, даже если взять идеальный случай, и представить, что изначально температура пластины и грунта была одинаковой, то сразу же после помещения пластины на грунт соответствующий участок грунта окажется изолирован от внешнего пространства и отдача тепла через этот участок во внешнее пространство прекратится. В результате локальная область под пластиной начнет нагреваться, создавая сопротивление тепловому потоку. Это значит, что тепловой поток, приходящий на пластину, начнет постепенно ослабевать. Таким образом, тепловой поток, поступающий на пластину, уже не будет соответствовать номинальному значению внутреннего теплового потока Луны, и, к тому же, будет изменяться во времени. В конечном итоге, температура пластины

поднимется до определенного значения, так же, как и температура локального участка грунта под пластиной,—и тепло прекратит поступать в данную зону (рисунок 1.6). Температура пластины будет несколько больше температуры окружающего грунта, и система придет к равновесию.

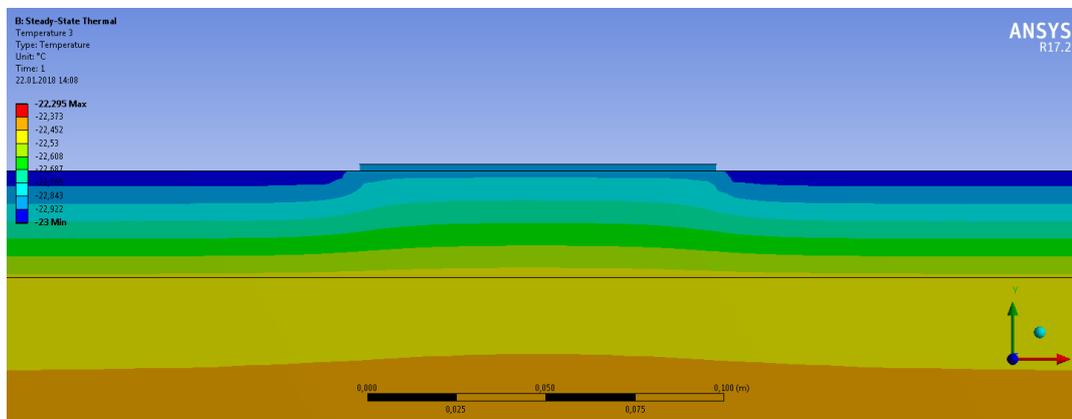


Рис. 1.6. Распределение температур при моделировании действия датчика с термоизолированными поверхностями

Данные изменения температур в условиях сверхмалого теплового потока и неизвестных теплофизических характеристик грунта крайне сложно поддаются анализу. Скорее всего, в естественных условиях эти данные будут сравнимы с погрешностями, и не позволят определить внутренний тепловой поток с приемлемой точностью.

Чтобы получить в реальных условиях какой-либо приемлемый для измерения теплового потока градиент температур, очевидно, придется использовать стационарный режим.

#### 1.4. Датчик с термоизолированной боковой поверхностью

Рассмотрим еще один вариант датчика – с теплоизолированной боковой поверхностью и отводом тепла на торце (рисунок 1.4).

Принцип действия датчика следующий. На поверхность грунта помещается некоторое тело (наиболее удобно цилиндрическое тело), боковая поверхность которого термоизолирована. С верхней поверхности отводится тепло. В данном случае тепло отводится излучением с поверхности с фиксированной степенью черноты. Через некоторое время после помещения

датчика на поверхность грунта вся система приходит в равновесие. Предполагается, что значительная часть тепловой энергии будет проходить через цилиндрическое тело датчика, создавая некую разность температур между нижней и верхней его частью. Анализируя этот градиент температур, можно получить искомый тепловой поток. При этом, цилиндрическое тело датчика не должно иметь слишком высокую теплопроводность, чтобы создавалась необходимая для анализа разность температур.

Проведем имитационное моделирование работы такого термозонда.

Постановка задачи и исходные данные следующие. Геометрические параметры датчика: цилиндр диаметром 100 мм и высотой 100 мм. Материал – нержавеющая сталь, теплопроводность  $\lambda_0=15,1$  Вт/м\* °С. Плотность внутреннего теплового потока, как уже отмечалось,  $q_l=0,0314$  Вт/м<sup>2</sup>, теплопроводность верхнего слоя грунта –  $\lambda_{zp}=2*10^{-3}$  Вт/м\*°С, степень черноты верхней поверхности датчика условно примем  $\varepsilon_d=1$ , степень черноты окружающего грунта  $\varepsilon_{zp}=0,72$ .

Пусть задана некоторая область  $G(x', y', z')$  трехмерного евклидова пространства  $E_3(x, y, z)$ . При этом:  $0 < x' < x_1$ ;  $0 < y' < y_1$ ;  $0 < z' < z_1$  (рисунок 1.7 слева).

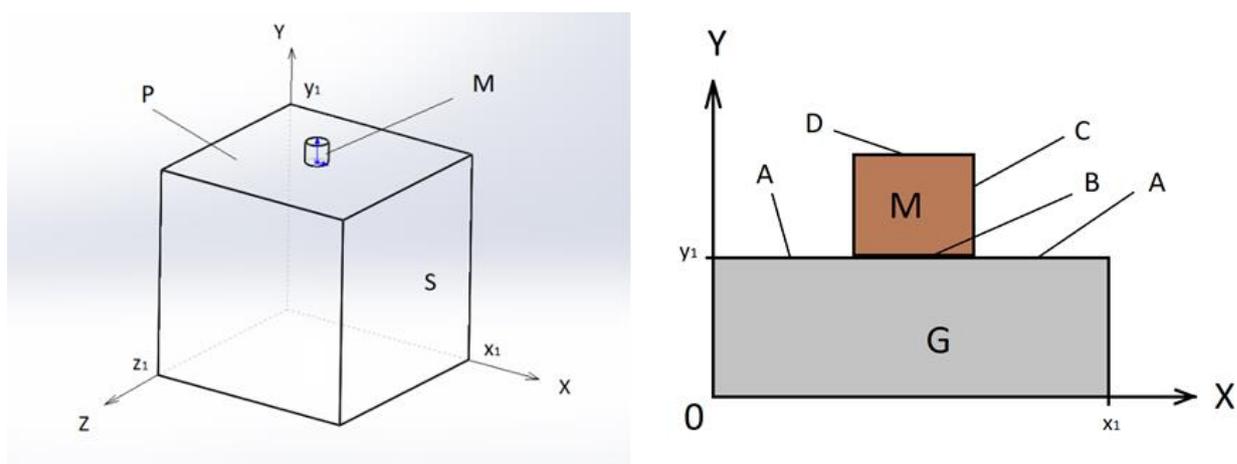


Рис. 1.7 Трехмерные тела, используемые в математической постановке задачи. Буквами показаны различные поверхности и области пространства

Область пространства  $G$  ограничивает тело, имитирующее грунт. При этом, несмотря на то что этот участок грунта конечен, его размеры настолько велики, что позволяют имитировать полубесконечное тело, верхняя поверхность которого описывается поверхностью  $P(x, y, z)$ .

На поверхности  $P$  находится еще одно цилиндрическое тело, ограниченное областью пространства  $M$ , где  $M \subset E_3$ . Это тело имитирует датчик.

На рисунке 1.7 справа схематически изображены тела в разрезе, описываемые областями  $M$  и  $G$ , и обозначены зоны, используемые в математической записи постановки задачи.

Вся система состоит из двух тел: грунт и датчик.

Уравнения теплопроводности.

Уравнение теплопроводности для грунта:

$$\frac{\partial^2 T(G_1)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(G_1)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(G_1)}{\partial z^2} = 0;$$

$$(G_1 \in G).$$

Здесь  $G$  – область пространства, занятая грунтом.

Уравнение теплопроводности для датчика:

$$\frac{\partial^2 T(M_1)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(M_1)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(M_1)}{\partial z^2} = 0;$$

$$(G_1 \in G).$$

Здесь  $M$  – область пространства, занятая датчиком,

Граничные и начальные условия.

Условие равенства тепловых потоков и температур на контакте датчика и грунта:

$$\lambda_d \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{B_d} = \lambda_{гр} \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{B_{гр}} ;$$

$$T|_{B_d} = T|_{B_{гр}};$$

где  $B_d$  – поверхность датчика, контактирующая с грунтом;  $B_{cp}$  – поверхность грунта, контактирующая с датчиком, причем  $B_{cp} \subset P$ ;  $\lambda_d$  – теплопроводность датчика,  $\lambda_{cp}$  – теплопроводность грунта (рисунок 1.7 слева).

Условие теплоизолированности боковой поверхности датчика:

$$\lambda_d \frac{\partial T}{\partial i_C} \Big|_C = 0;$$

где  $C$  – боковая поверхность датчика;  $i_C$  – нормаль к поверхности  $C$ .

Условие теплового потока на нижней поверхности области  $G$ :

$$\lambda_{гр} \frac{\partial T(x, 0, z)}{\partial y} + q_l = 0;$$

где  $q_l$  – плотность теплового потока Луны.

Условие излучения с верхней поверхности грунта:

$$\lambda_{гр} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_A + \varepsilon_{гр} \sigma T^4 \Big|_A = 0;$$

где  $A$  – верхняя поверхность грунта, причем  $A \subset P$ , однако  $B_{cp} \not\subset A$ ;  $\varepsilon_{гр}$  – степень черноты поверхности  $A$ ;  $\sigma = 5,670367(13) \cdot 10^{-8} \left( \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4} \right)$  – постоянная Стефана-Больцмана.

Условие излучения с верхней поверхности датчика:

$$\lambda_d \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_D + \varepsilon_d \sigma T^4 \Big|_D = 0;$$

где  $D$  – верхняя поверхность датчика;  $\varepsilon_d$  – степень черноты поверхности  $D$ .

Условие нулевого потока на боковой поверхности тела  $G$ :

$$\lambda_{гр} \frac{\partial T(0, y, z)}{\partial x} = 0;$$

$$\lambda_{гр} \frac{\partial T(x, y, 0)}{\partial z} = 0;$$

$$\lambda_{гр} \frac{\partial T(x_1, y, z)}{\partial x} = 0;$$

$$\lambda_{гр} \frac{\partial T(x, y, z_1)}{\partial z} = 0;$$

На рисунке 1.8 представлена картина распределения температуры внутри датчика. На рисунке 1.9 показано распределение температуры во всей модели.

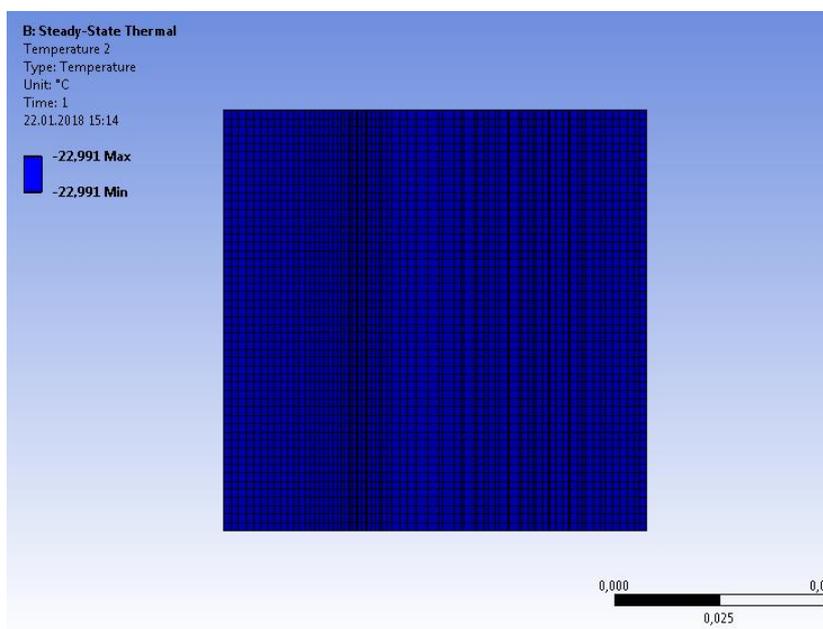


Рис. 1.8. Распределение температуры внутри ЧЭ при моделировании работы датчика с термоизолированной боковой поверхностью

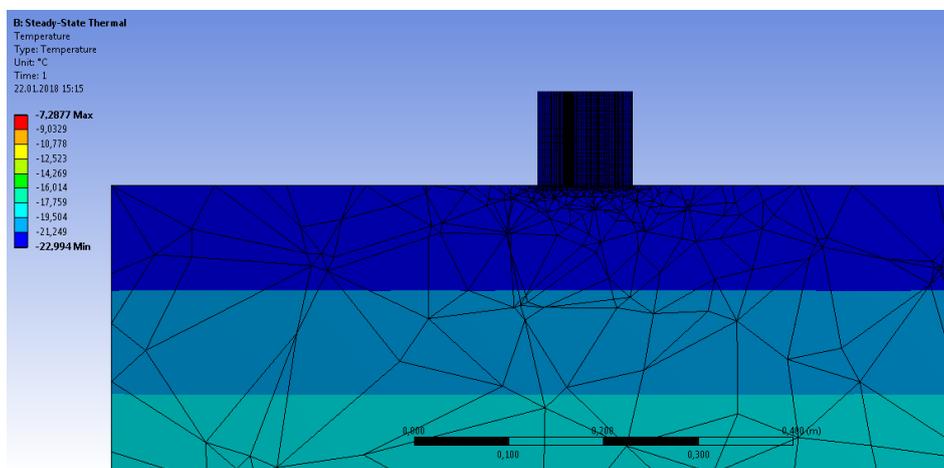


Рис. 1.9. Распределение температуры при моделировании работы датчика с термоизолированной боковой поверхностью

Как видно из рисунков 1.8 и 1.9, при моделировании заметной разницы температур на верхней и нижней поверхности датчика не возникло. Это означает, что была взята слишком высокая теплопроводность.

Следовательно, теплопроводность тела датчика надо понизить. Попытка решения этой проблемы реализована в Н-образном термозонде.

### **1.5. Н-образный поверхностный термозонд для измерения плотности теплового потока. Конструкция и принцип действия**

Предположим, что у нас имеется тепловой датчик, построенный по схеме, показанной на рисунке 1.4, с чувствительным элементом из того или иного материала с известными теплофизическими свойствами. Пусть этот элемент имеет цилиндрическую форму, и его нижний торец контактирует с грунтом. Верхний торец не имеет теплоизоляции и излучает тепловой поток в космос (тепловое влияние Солнца не учитываем, в частности, можно представить, что измерение производится ночью). Тогда после установления стационарного режима, скорее всего, будет происходить процесс «затекания» теплового потока с ближайших зон грунта из-за более высоких значений теплопроводности и излучательной способности поверхности ЧЭ (чувствительного элемента) датчика по отношению к лунному грунту. Вариант с «обтеканием» датчика также возможен, когда из-за слишком сильного теплового сопротивления и слабой излучательной способности верхней поверхности датчика тепловой поток будет обходить эту зону. В любом случае, плотность теплового потока, который будет проходить через чувствительный элемент датчика и который будет измеряться, окажется не соответствующей искомой величине.

Единственный способ приблизить плотность теплового потока, проходящего через ЧЭ этого датчика, к естественной – попытаться приблизить его характеристики к характеристикам самого грунта. В первую очередь это касается теплового сопротивления тела датчика и степени черноты верхнего торца.

К тому же, большее тепловое сопротивление даст и большую разность температур, что положительно скажется на возможности измерения плотности теплового потока.

Похожий подход с приравниванием тепловых сопротивлений термозонда и грунта описан в статье М. Я. Марова, А.В. Колесниченко и др. [29], однако там он используется для определения ТФХ грунта, в первую очередь – теплопроводности.

Тепловое сопротивление однородного чувствительного элемента с постоянной площадью сечения равно:

$$R = \frac{l}{\lambda S} \quad (1.1)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения цилиндра,  $l$  – высота,  $\lambda$  – теплопроводность.

Итак, сопротивление ЧЭ термозонда должно быть равно сопротивлению воображаемого цилиндра грунта:

$$R_1 = R_2 \quad (1.2)$$

Или

$$\frac{l_1}{\lambda_1 S_1} = \frac{l_2}{\lambda_2 S_2} \quad (1.3)$$

где индекс «1» относится к грунту, а «2» - к термозонду.

Если посмотреть на формулу (1.3) и сопоставить ее с принятой ранее теплопроводностью грунта ( $\lambda=2 \cdot 10^{-3}$  Вт/м\*°С), то можно увидеть, что эквивалентом теплового сопротивления диска лунного грунта будет тонкая длинная проволока из материала со значительно большей теплопроводностью. При этом диаметр диска термозонда будет значительно больше диаметра проволоки (рисунок 1.10).

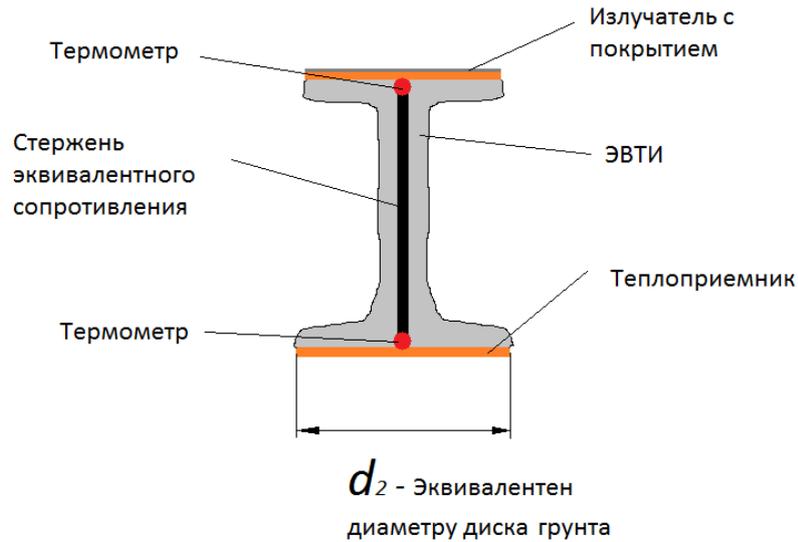


Рис. 1.10. Принципиальная схема Н-образного термозонда

Проведем моделирование задачи теплообмена. Примем в качестве исходных данных:  $\lambda_{gp}=2 \cdot 10^{-3}$  Вт/м\*°С (теплопроводность грунта),  $d_{gp}=0,1$  м (диаметр эквивалентного цилиндра грунта)

В качестве материала стержня эквивалентного сопротивления возьмем сплав 40Х10С2М, его теплопроводность равна:  $\lambda_{cm}=17$  Вт/м\*°С.

Геометрические характеристики стержня примем следующими (рисунок 1.11):

$$d_2=0,001\text{м}=1\text{мм}$$

$$l_2=0,1\text{ м.}$$

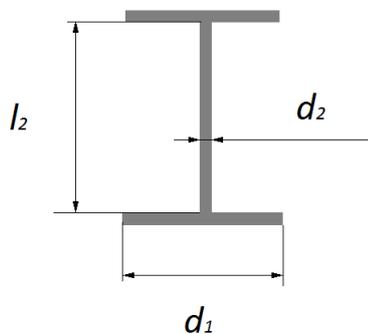


Рис. 1.11. Размеры основных элементов термозонда

Тогда, по формуле (1.3), получаем:  $l_{cp}=0,01176$  м. Это высота эквивалентного цилиндра лунного грунта.

Начальные условия следующие.

Начальная температура системы:  $T_0=-23\text{C}^\circ$ ; диаметр верхнего и нижнего медных дисков:  $d_1=100$  мм; теплопроводность медных дисков:  $\lambda_\delta=400$  Вт/м\* $^\circ\text{C}$ ; степень черноты верхнего диска термозонда  $\varepsilon_m=0,72$ ; стержень из 40X10C2M  $d_2=1$  мм,  $l=100$  мм, теплопроводность стержня  $\lambda_{cm}=17$  Вт/м\* $^\circ\text{C}$ ; теплопроводность лунного грунта –  $\lambda_{cp}=0,002$  Вт/м\* $^\circ\text{C}$ , степень черноты поверхности –  $\varepsilon_{cp}=0,72$ ; плотность внутреннего теплового потока Луны  $q_l=0,0314$  Вт/м $^2$ . Тепловой контакт между медными дисками и стержнем – идеальный.

Постановка задачи аналогична приведенной в пункте 1.4.

Однако расчеты показали, что такой подход к измерению теплового потока Луны дает неудовлетворяющие с точки зрения точности результаты и не может быть использован для непосредственных измерений. Результаты моделирования теплового потока для рассматриваемой схемы представлены на рисунках 1.12 и 1.13, где показано распределение температуры для установившегося теплового потока (стационарный случай).

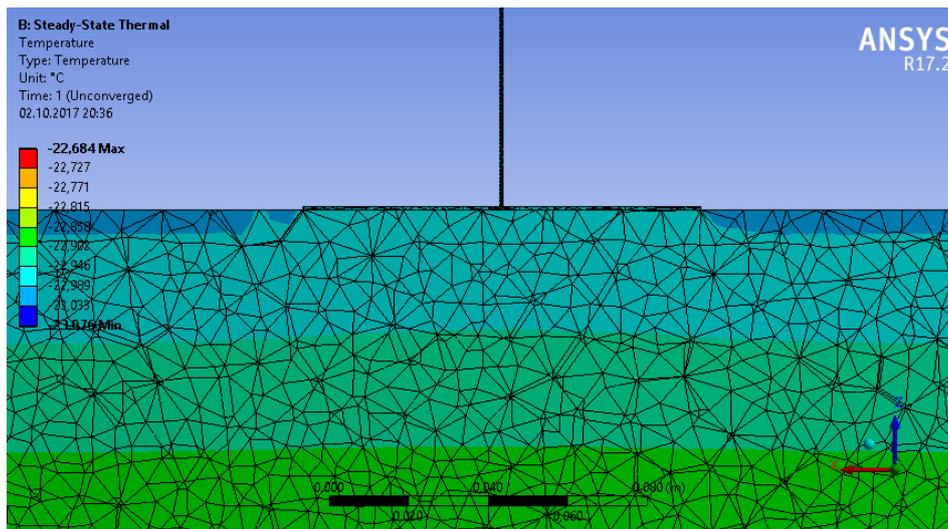


Рис. 1.12. Температурное распределение в нижней части Н-образного термозонда

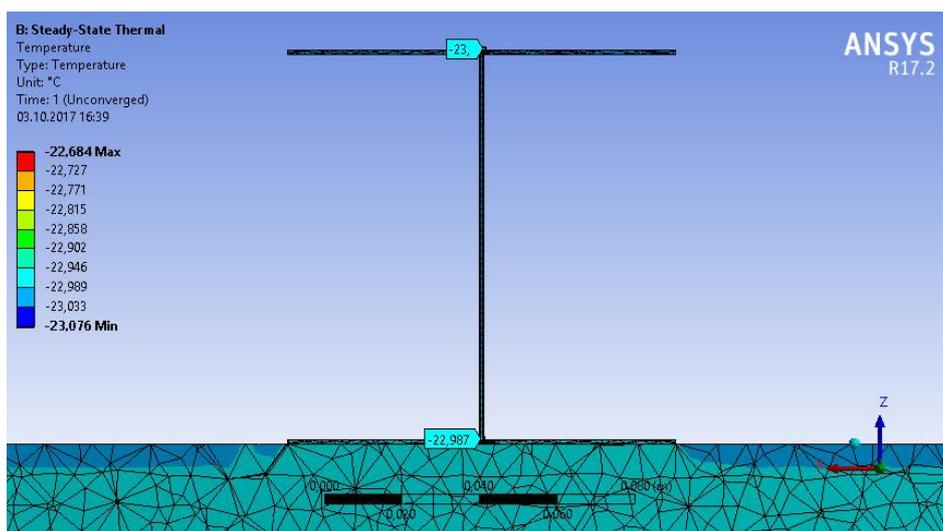


Рис. 1.13. Температурное распределение H-образного термозонда

Несмотря на то, что, как видно, на рисунке 1.12 создается некий температурный напор, и часть тепла все же проникает в термозонд, на рисунке 1.13 можно наблюдать, что перепад температур в крайних точках термозонда чрезвычайно мал.

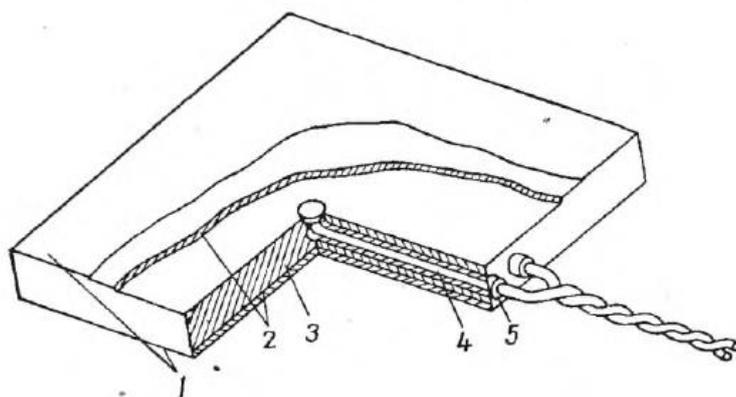
Рассчитанная по данному перепаду плотность теплового потока имеет величину  $q_{расч}=0,00026$  Вт/м<sup>2</sup>, которая весьма далека от искомого значения.

## 1.6. Термозонды на основе поверхностных батарейных датчиков

### 1.6.1. Поверхностные батарейные датчики с термопарами

Для того, чтобы понять принцип работы данного вида датчика, представим в общих чертах схему одиночного датчика, а затем перейдем к описанию батарейного датчика.

Одиночный датчик представляет собой своеобразную «сплюсненную» дифференциальную термопару (рисунок 1.14). При расположении датчика на изотермической поверхности исследуемого тела на гранях промежуточного слоя толщиной  $\delta$  возникает разность температур, пропорциональная измеряемой плотности потока. Эта разность температур вызывает соответствующую термоэдс, которая токосъемными проводами подается на измерительный прибор.



1 – никелевое покрытие; 2 – медные термоэлектроды; 3 – промежуточный термоэлектрод; 4 – токосъемные провода; 5 – изоляционные втулки.

Рис. 1.14. Одиночный датчик теплового потока

Существенный недостаток одиночных датчиков заключается в их низкой чувствительности. В уникальных приборах, требующих либо тщательной изоляции от внешних влияний, либо глубокого охлаждения, достигнута чувствительность около  $200 \text{ Вт/м}^2$ , что абсолютно неприемлемо для уровня измеряемых тепловых потоков в лунных условиях.

Все это приводит к необходимости увеличения чувствительности на 4-5 порядков. Наиболее простое решение задачи состоит в соединении одиночных элементов в последовательные батареи, образуя тем самым батарейные датчики теплового потока (БДТП).

Основная идея устройства теплотрической батареи состоит в том, что элементы включены параллельно по измеряемому потоку и последовательно по генерируемому сигналу (рисунок 1.15).

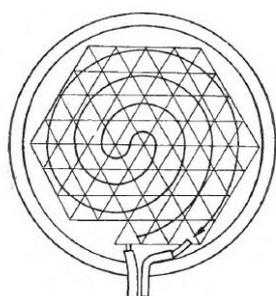


Рис. 1.15. Схема соединения треугольных элементов в круглом БДТП

При дальнейшем увеличении чувствительности за счет числа элементов необходимо уменьшать их поперечные сечения. Теоретически на каждом квадратном сантиметре может уложиться более  $10^4$  проводников диаметром 0,1 мм, что соответствует 5000 парных элементов. Практически число элементов в особенно тщательном исполнении удавалось довести до 2000 шт/см<sup>2</sup>. Однако изготовление таких датчиков – процесс крайне трудоемкий.

Применение гальванических термопар значительно упрощает технологию изготовления батарейных датчиков при несущественном снижении чувствительности.

Чувствительные элементы датчиков имеют вид винтовых пружин с наружным диаметром около 1 мм, навитых из константановой проволоки диаметром 0,1 мм. Половина каждого витка покрывалась слоем меди и изоляционным лаком. В датчике пружинка укладывалась по спирали таким образом, чтобы места переходов полувитков покрытых медью и без медного покрытия находились в верхней и нижней плоскостях датчика. В связи с характером укладки элементов датчики получили название спиральных (рисунок 1.16).

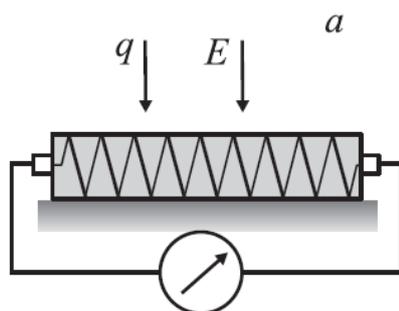


Рис. 1.16. Схема датчика спирального типа

Недостатки спиральных датчиков заключаются в низкой плотности заполнения пространства, занятого чувствительными элементами, в связи с чем термическое сопротивление датчиков сравнительно велико, а также в

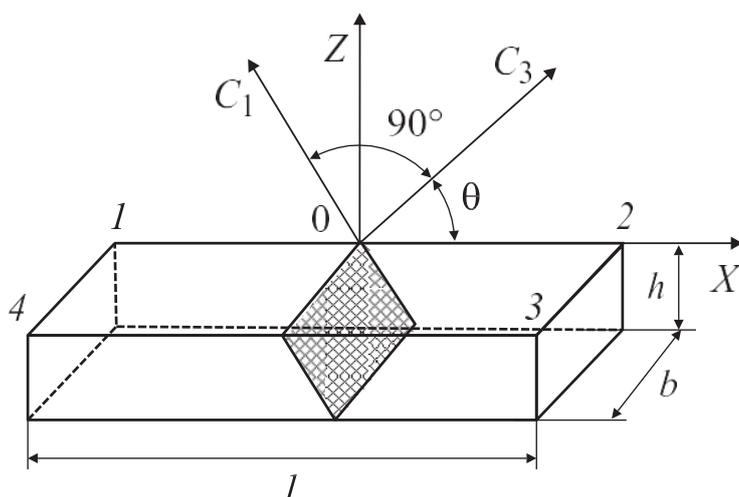
том, что при меднении эластичных пружинок и последующей их укладке в батарею возникают большие технологические трудности.

Устранение названных недостатков при сохранении преимуществ получено в градиентных датчиках теплового потока [7].

### 1.6.2. Поверхностные батарейные датчики на основе анизотропных монокристаллов висмута, или градиентные датчики теплового потока (ГДТП)

Действие ГДТП основано на так называемом поперечном эффекте Зеебека – эффекте появления термоэдс с вектором напряженности, нормальным к вектору теплового потока, в средах с анизотропией теплопроводности, электропроводности и коэффициента термоэдс. Основы теории ГДТП обобщены в работах [34, 51, 50].

На рисунке 1.17 приведен прямоугольный параллелепипед, вырезанный из монокристалла висмута. Это анизотропный термоэлемент, а показанная на рисунке плоскость называется тригональной плоскостью.



$C_1, C_3$  – главные кристаллографические оси;  $\theta$  – угол, под которым термоэлемент вырезан из монокристалла.

Рис. 1.17. Анизотропный термоэлемент размером  $l*b*h$

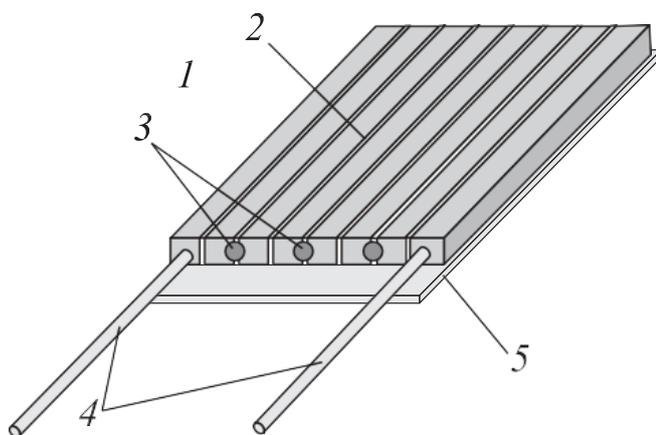
Таким образом, термоэдс  $e_x$  линейно связана с плотностью теплового потока  $q_z$  и площадью элемента  $F$ , а ее величину определяет выбор угла  $\theta$  (для висмута оптимальное значение  $\theta_{opt}=53.4^\circ$ ).

Основной характеристикой такого термоэлемента является вольт-ваттная чувствительность ( $V/W$ ):

$$S_0 = \frac{e_x}{q_z F} \quad (1.4).$$

Одиночная пластинка висмута имеет толщину 0.1-0.2 мм, ее площадь в плане  $F$  и сигнал  $e_x$  оказываются весьма малыми. Именно поэтому термоэлементы (как и термопары в датчиках продольного типа) соединяют последовательно. Полученные в результате батареи и составляют конструкцию ГДТП.

На рисунке 1.18 схематически показан ГДТП, изготовленный из пластинок висмута 1. Пространственное расположение тригональных плоскостей в двух соседних элементах обеспечивает суммирование действующих в них конечных термоэдс.



1 – пластинка из анизотропного висмута, 2 – прокладки, 3 – спаи, 4 – токовыводы, 5 – подложка.

Рис. 1.18. Конструкция ГДТП

Датчик монтируют на подложках 5 из слюды. Пластинки 1 изолируют одну от другой тонкими прокладками из лавсана 2 и склеивают с подложкой из слюды 5 клеем БФ-2. Спаи 3 выполнены чистым висмутом и соединяют пластинки 1 в последовательный контур. Крайние пластинки снабжают токовыводами 4.

Термоэдс ГДТП такой конструкции:

$$E = q_z n S_0 \quad (1.5)$$

где  $n$  – число элементов (пластинок 1), составляющих датчик.

Толщина ГДТП, доведенная до 0.1 ... 0.2 мм, при эффективной теплопроводности, близкой к 7.45 Вт/(м\*°С), обеспечивает термическое сопротивление  $10^{-5}$  м<sup>2</sup> °С/Вт – на 1-2 порядка ниже, чем у датчиков батарейного типа.

В опытах с ГДТП, о которых говорится в [37], брались датчики на основе монокристаллов висмута чистоты 0,9999; для них  $S_0=5...20$  мВ/Вт, а рабочий диапазон температур составляет 20-540 К (верхняя граница близка к точке плавления висмута). Разработанная методика [34] позволяет градуировать ГДТП по тепловому потоку с погрешностью не более 1%. Тепловые шумы ГДТП из висмута сопоставимы с шумами в других чистых металлах. Сопротивление типичных батарейных ГДТП позволяет регистрировать сигнал любой аппаратурой, используемой в комплекте с традиционными термопреобразователями [37].

Проведем примерный расчет величины сигнала, который получим на ГДТП. Примем следующие данные:

Площадь датчика  $0,1 \times 0,1 \text{ м} = 0,01 \text{ м}^2$

Величина теплового потока Луны  $q_{\text{л}} = 0,0314 \text{ Вт/м}^2$

Вольт-ваттная чувствительность датчика  $S_0 = 20 \text{ мВ/Вт} = 0.002 \text{ В/Вт}$

Из формулы (1.4) выражаем ЭДС:

$$e_x = S_0 q_z F$$

$$e_x = 6,28 \cdot 10^{-7} \text{ В} = 0,628 \text{ мкВ}$$

В настоящее время существуют серийные нановольтметры, способные измерять величины напряжения до  $10^{-9}$  В. Поэтому сигнал ГДТП вполне может быть зарегистрирован с достаточной точностью.

## **1.7. Проникающий термозонд для измерения плотности внутреннего ТП Луны**

### **1.7.1. Схема зонда**

Рассмотрим схему измерения теплового потока с помощью проникающего зонда (рисунок 1.19). Принцип его работы заключается в следующем: термозонд помещается в заранее пробуренную скважину, измеряется температура на различных глубинах и, если известна теплопроводность грунта, можно получить плотность теплового потока. Например, для простейшего стационарного случая и одномерной постановке задачи, не учитывающей изменение теплопроводности грунта по глубине, можно воспользоваться следующей формулой:

$$q = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1.6)$$

где  $q$  – плотность теплового потока,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $T$  – температура,  $x$  – координата [27].

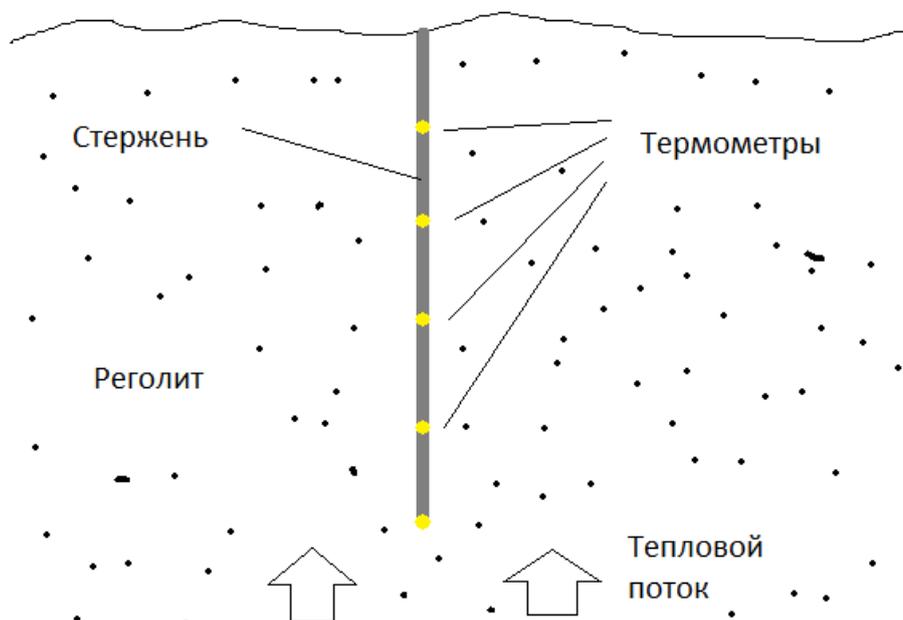


Рис. 1.19. Схема проникающего термозонда

Однако возникает вопрос выбора материала стержня. Если он будет изготовлен из материала с высокой теплопроводностью, то, учитывая сверхнизкую теплопроводность грунта ( $\lambda=0,001-0,03$  Вт/м °С), через сам стержень начнет проходить большее количество тепла, чем через окружающий грунт. А это, в свою очередь, исказит результаты измерений.

Поэтому материал стержня должен иметь как можно более низкую теплопроводность, чтобы минимизировать искажения.

По данной схеме непосредственные измерения на лунной поверхности уже проводились NASA. Для измерения температуры и теплопроводности в грунт были заглублены два зонда: в миссии «Аполлон-15» – до глубин 1,0 и 1,4 м, и в миссии «Аполлон-17» – до глубины 2,3 м. Каждый зонд состоял из стеклопластиковых стержней с 8 платиновыми термометрами сопротивления и 4 термопарами, и был приспособлен для измерений на 11 уровнях глубины под поверхностью [26].

### 1.7.2. Оценка влияния теплопроводности стержня на определение теплового потока для модели однородного грунта

Проведем моделирование работы такого термозонда.

Исходные данные и постановка задачи следующие. В приведенных здесь расчетах, следуя работе [1], примем в качестве материала стержня стеклопластик, обладающий достаточной прочностью для поставленных задач, и при этом имеющий низкую теплопроводность. Теплопроводность стержня термозонда примем равной  $\lambda_m=0,2$  Вт/м\* °С, теплопроводность лунного грунта  $\lambda_{zp}=0,002$  Вт/м\* °С, теплоемкость лунного грунта  $C_{zp}=600$  Дж/(кг\*°С), плотность внутреннего теплового потока Луны  $q_l=0,0314$  Вт/м<sup>2</sup>. Степень черноты верхней поверхности грунта  $\varepsilon_{zp}=0,72$ . Пусть диаметр стержня 10 мм, длина 1 м.

Пусть задана некоторая область  $S(x', y', z')$  трехмерного евклидова пространства  $E_3(x, y, z)$ . При этом:  $0 < x' < x_1$ ;  $0 < y' < y_1$ ;  $0 < z' < z_1$  (рисунок 1.20 слева).

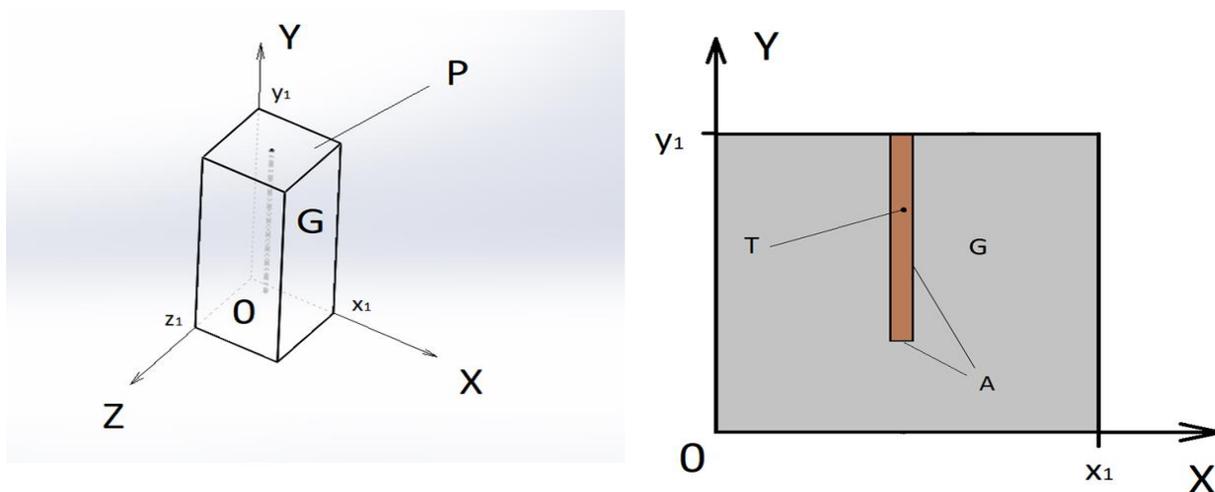


Рис. 1.20 Трехмерные тела, используемые в математической постановке задачи. Буквами показаны различные поверхности и области пространства

Внутри области  $S$  находится участок грунта и стержневой термозонд. При этом, несмотря на то что этот участок грунта конечен, его размеры настолько велики, что позволяют имитировать бесконечное тело.

В центре участка грунта находится термозонд. Он представляет собой стержень из стеклопластика. На рисунке 1.20 справа справа схематически изображена область  $S$  в разрезе, на которой показан термозонд и обозначены зоны, используемые в математической записи постановки задачи.

Вся система состоит из двух тел: стержневого термозонда и грунта.

Уравнения теплопроводности.

Уравнение теплопроводности для грунта:

$$\frac{\partial^2 T(G_1)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(G_1)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(G_1)}{\partial z^2} = 0;$$

$$(G_1 \in G).$$

Здесь  $G$  – область пространства, занятая грунтом.

Уравнение теплопроводности для термозонда:

$$\frac{\partial^2 T(T_1)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(T_1)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(T_1)}{\partial z^2} = 0;$$

$$(T_1 \in T).$$

Здесь  $T$  – область пространства, занятая термозондом.

Условие равенства тепловых потоков и температур на контакте термозонда и грунта:

$$\lambda_T \frac{\partial T}{\partial i_A} \Big|_{A_T} = \lambda_{гр} \frac{\partial T}{\partial i_A} \Big|_{A_{гр}} ;$$

$$T|_{A_T} = T|_{A_{гр}};$$

где  $A_m$  – поверхность термозонда, контактирующая с грунтом;  $A_{gp}$  – поверхность грунта, контактирующая с термозондом;  $i_A$  – нормаль к поверхности  $A$  (рисунок 1.20 справа).

Условие теплового потока на нижней поверхности области  $S$ :

$$\lambda_{гр} \frac{\partial T(x, 0, z)}{\partial y} + q_l = 0;$$

где  $q_l$  – плотность теплового потока Луны.

Условие излучения с верхней поверхности области  $S$ :

$$\lambda_{\text{гр}} \frac{\partial T(x, y_1, z)}{\partial y} + \varepsilon_{\text{гр}} \sigma T^4(x, y_1, z) = 0;$$

где  $\varepsilon_{\text{гр}}$  – степень черноты поверхности верхней поверхности с координатами  $(x, y_1, z)$ ;  $\sigma = 5,670367(13) \cdot 10^{-8} \left( \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4} \right)$  – постоянная Стефана-Больцмана.

Условие нулевого потока на боковой поверхности области  $S$ :

$$\lambda_{\text{гр}} \frac{\partial T(0, y, z)}{\partial x} = 0;$$

$$\lambda_{\text{гр}} \frac{\partial T(x, y, 0)}{\partial z} = 0;$$

$$\lambda_{\text{гр}} \frac{\partial T(x_1, y, z)}{\partial x} = 0;$$

$$\lambda_{\text{гр}} \frac{\partial T(x, y, z_1)}{\partial z} = 0;$$

Результаты моделирования представлены на рисунках 1.21 и 1.22, где показано распределение температуры для установившегося теплового потока.

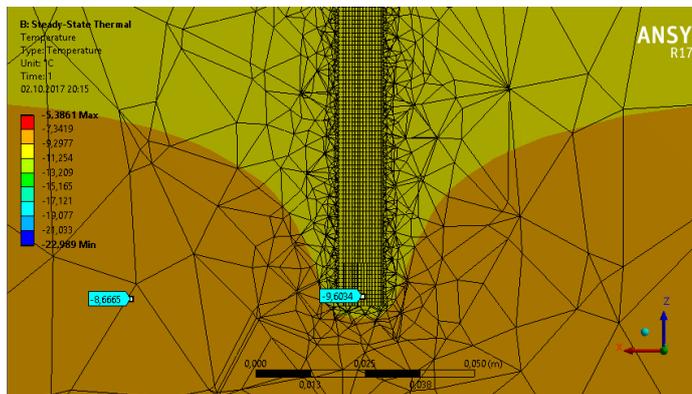


Рис. 1.21. Распределение температуры в нижней части проникающего термозонда на глубине 1 м

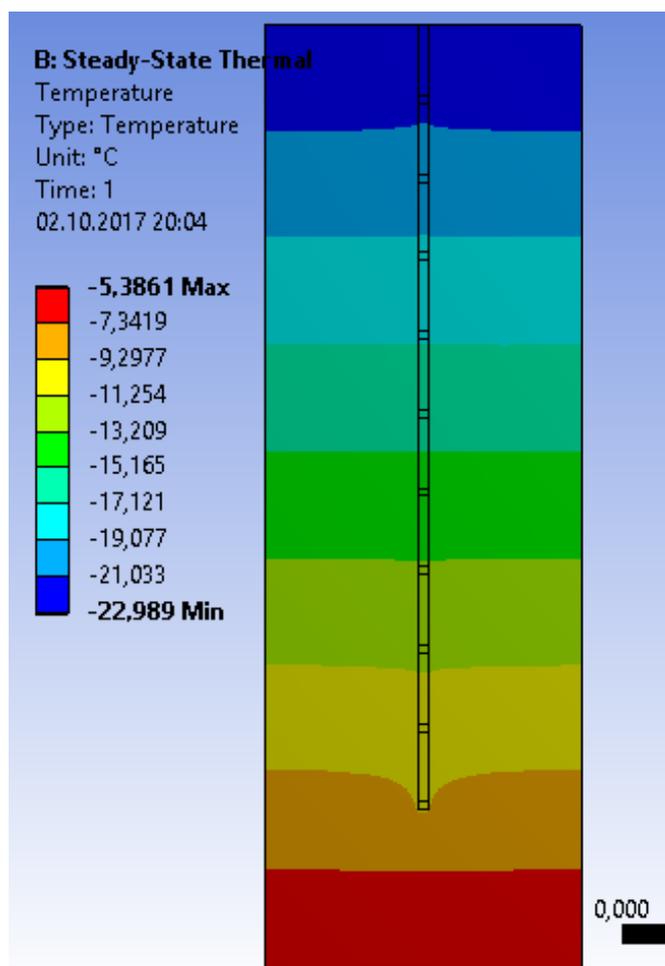


Рис. 1.22. Распределение температуры для проникающего термозонда при использовании модели грунта с постоянными теплофизическими характеристиками

На рисунке 1.21 видно некоторое перетекание тепла из грунта в стержень зонда. В частности, на нижнем конце стержня температура ниже на один градус, чем температура грунта на той же глубине. Величина «измеренной» плотности теплового потока равна  $q_{изм}=0,0256$  Вт/м<sup>2</sup>. Эта величина получена следующим образом: были взяты «измеренные» (т.е. полученные в результате расчета) температуры на нижнем и верхнем концах стержня, и по формуле (1.6) найдена плотность теплового потока. При этом, отклонение от изначально заданного значения плотности теплового потока составило 18,5%.

Напомним, что в расчетах использовалась модель с однородной теплопроводностью грунта по всему объему, причем, принятая нами

величина теплопроводности грунта, равная  $\lambda=0,002 \text{ Вт/м}^{\circ}\text{C}$ , — это самое низкое значение, взятое на основе измерения верхнего слоя реголита.

### 1.7.3. Оценка влияния теплопроводности стержня на определение теплового потока для модели многослойного грунта

Поскольку теплофизические характеристики лунного грунта изменяются с глубиной, проведем моделирование работы термозонда такой схемы с использованием многослойной модели грунта.

Теплопроводность лунного грунта в зависимости от глубины была определена в миссиях «Аполлон». Данные об этих измерениях приведены на рисунке 1.23:

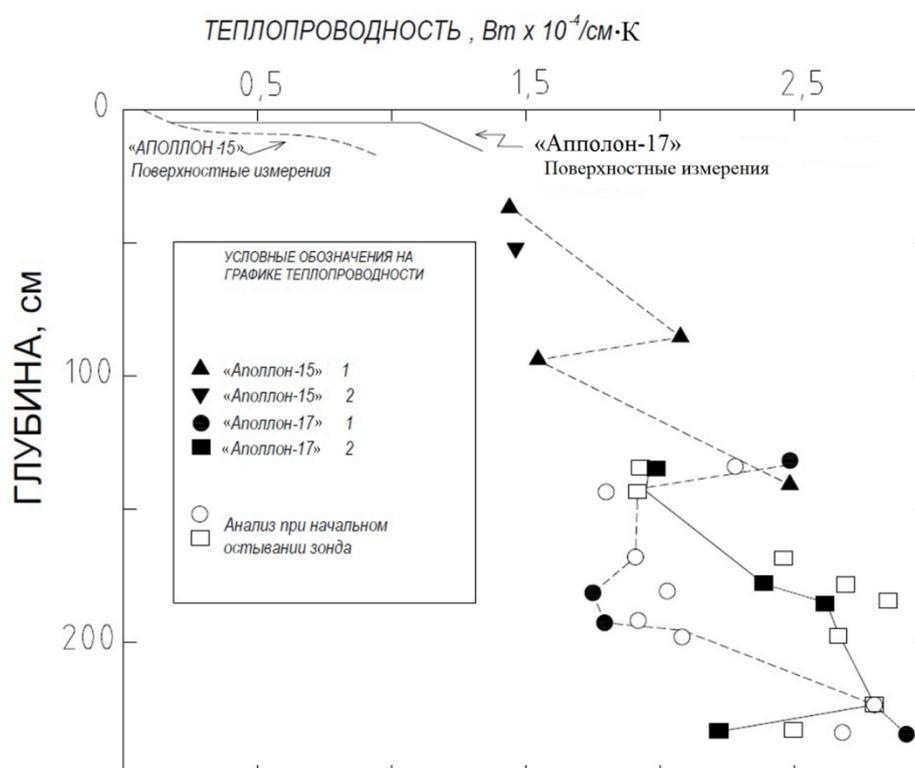


Рис. 1.23. График зависимости теплопроводности лунного грунта от глубины, по результатам миссий «Аполлон 15» и «Аполлон 17»

Как видно из рисунка 1.23, теплопроводность лунного грунта на глубинах от 30 см до 2,4 м равна  $(1,4-3,0) \cdot 10^{-4} \text{ Вт/см}^{\circ}\text{C}$  (или  $\lambda=0,014-0,03 \text{ Вт/м}^{\circ}\text{C}$ ), что примерно в десять раз выше, чем на поверхности. Увеличение

теплопроводности на глубине 2 см обусловлено главным образом уплотнением грунта с глубиной [26].

На основе этих данных была принята следующая многослойная модель (таблица 1.1).

Таблица 1.1.

Значения параметров многослойной модели грунта

№ слоя	Толщина слоя, мм	Теплопроводность, Вт/м* °С	Значение глубины начала и конца слоя, см
1	30	0,002	0-3
2	90	0,013	3-12
3	380	0,015	12-50
4	500	0,017	50-100
5	500	0,02	100-150
6	500	0,023	150-200
7	500	0,025	200-250

Используя эту модель грунта, была решена тепловая задача, в которой имитировалась работа термозонда.

Исходные данные приняты следующими:

Теплопроводность стержня термозонда  $\lambda_m=0,2$  Вт/м\*°С, плотность теплового потока Луны  $q_l=0,0314$  Вт/м<sup>2</sup>, диаметр стержня 10 мм, длина 1 м.

Остальные условия и постановка задачи аналогичны представленным в пункте 1.7.2. Условие равенства тепловых потоков между слоями грунта аналогичны приведенным в пункте 2.7.3.

Расчеты представляли собой серию вычислений с помощью алгоритма, построенного по методу конечных элементов. В каждом последующем вычислении размер конечного элемента уменьшался с целью найти такой, при котором точность расчетов становится приемлемой. В данном случае

удалось достигнуть точности расчетов порядка одной сотой градуса Цельсия. В качестве величин, по которым отслеживалась точность решения задачи, были взяты максимальные и минимальные значения температур верхних четырех слоев грунта. В таблице 1.2 и на рисунке 1.24 представлены результаты.

Таблица 1.2.

### Результаты расчета тепловой задачи

Величина конечного элемента, мм	Температура первого слоя, °С		Температура второго слоя, °С		Температура третьего слоя, °С		Температура четвертого слоя, °С	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
100	-22,696	-22,568	-22,569	-22,311	-22,311	-21,51	-21,51	-20,594
50	-22,697	-22,569	-22,57	-22,31	-22,31	-21,51	-21,51	-20,594
20	-22,715	-22,571	-22,567	-22,309	-22,309	-21,509	-21,509	-20,584
10	-22,712	-22,57	-22,566	-22,309	-22,309	-21,509	-21,509	-20,607
5	-22,711	-22,571	-22,57	-22,311	-22,311	-21,509	-21,509	-20,609
3	-22,702	-22,567	-22,568	-22,311	-22,311	-21,509	-21,509	-20,61

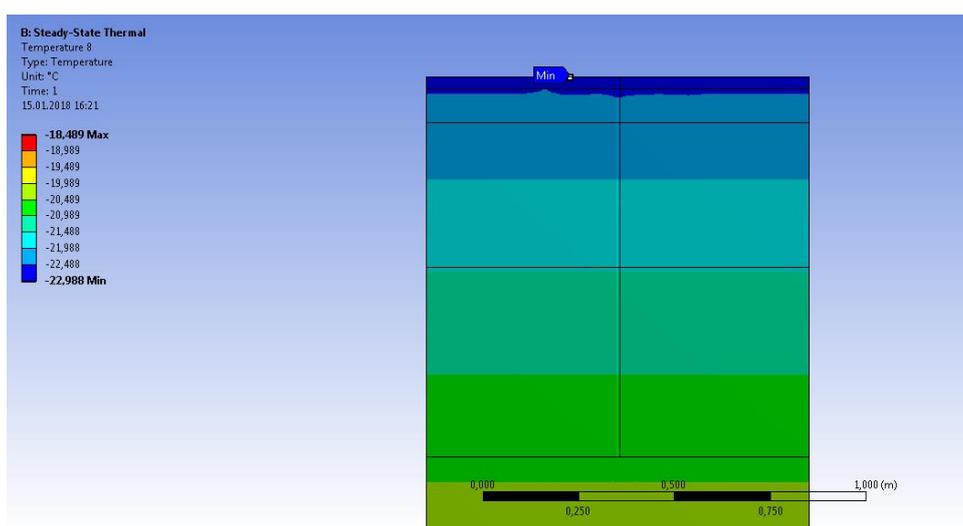


Рис. 1.24. Проникающий термозонд. Распределение температуры при многослойной модели грунта

Как видно из рисунка 1.24, стержень практически не вносит каких-либо заметных искажений в распределение температуры. На рисунке 1.25 показаны значения температур в зоне контакта термозонда и грунта в верхнем слое.

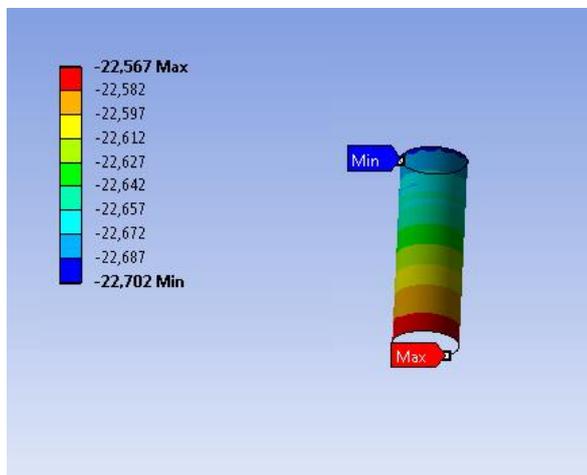


Рис.1.25. Проникающий термозонд. Распределение температуры на контакте стержня и грунта. Верхний слой грунта

Анализ результатов расчетов проводился следующим образом. Сначала на каждом отдельном слое в месте контакта грунта и стержня брались «измеренные» (т.е. полученные в результате расчета) температуры. Для каждого слоя использовались температуры в двух точках: в верхней и нижней. После этого для каждого слоя по формуле (1.6) вычислялась плотность теплового потока. Затем данные усреднялись по всей длине стержня. Таким образом, имитировалась работа рассматриваемого термозонда, и вычислялась измеряемая им плотность теплового потока.

По результатам этих расчетов плотность теплового потока равна:  $q_{изм}=0,0271$  Вт/м<sup>2</sup>, а величина отклонения от заданного значения составила 13,8%.

Как можно заметить, величина отклонения меньше, чем при использовании однородной модели грунта, и это логично: с увеличением глубины увеличивается и теплопроводность грунта. А это означает, что теплопроводность стержня приближается к теплопроводности грунта, и

эффект перетекания тепла становится ниже, что в свою очередь снижает и величину отклонения.

### **1.8. Выводы по главе 1**

В данной главе были рассмотрены четыре различные схемы термозондов для измерения плотности внутреннего теплового потока Луны. Это проникающий зонд и три поверхностных термозонда: Н-образный термозонд, термозонд на основе батарейного датчика с термопарами и термозонд на основе градиентного датчика теплового потока.

Для практического использования сразу можно исключить Н-образный термозонд и термозонд на основе батарейного датчика с термопарами. Н-образный термозонд не дает правильные результаты при характерных для Луны величинах теплового потока, и не может быть использован при столь тонких измерениях. Однако при измерениях, требующих меньшей точности, он, возможно, будет давать приемлемые результаты. Батарейный датчик с термопарами не имеет широкого применения в наше время, обладает большими технологическими сложностями при изготовлении, вносит значительное термическое сопротивление и проигрывает по точности аналогичному, но более современному ГДТП.

Проникающий зонд и термозонд на основе ГДТП вполне применимы для практических измерений на поверхности Луны.

Каждая схема имеет как преимущества, так и недостатки.

По результатам численного моделирования для двух разных моделей грунта проникающий термозонд дает отклонение при определении плотности теплового потока в 18,5% и 13,8% соответственно.

Безусловно, при использовании проникающего термозонда требуется бурение скважины, что вызывает дополнительные трудности при реализации подобной экспедиции, однако принципиально эти технологии были отработаны на таких автоматических аппаратах как Луна-16, Луна-20 и Луна-24, а также в серии пилотируемых миссий «Аполлон». Основными плюсами

использования данного термозонда являются: простота конструкции, надежность, широкий спектр получаемых данных и способов их анализа. Подобный термозонд можно оснастить нагревателями для измерения теплофизических характеристик грунта на разных глубинах [13], что необходимо для оценки теплового потока, а ТФХ грунта, в свою очередь, являются дополнительными ценными научными данными. С помощью такого термозонда можно проводить длительные (до нескольких лет) измерения температуры на разных глубинах.

Что касается точности ГДТП, в литературе есть данные только по градуировке подобных датчиков. Разработанная методика [34] позволяет градуировать ГДТП по тепловому потоку с погрешностью не более 1%. Однако эти данные нельзя считать погрешностью датчика при измерениях, т.к. во-первых – это погрешность градуировки, а во-вторых – они были получены при температурных режимах в лабораторных условиях, отличных от естественных условий на поверхности Луны. Необходимы дальнейшие исследования по данному вопросу, и, при необходимости, проведение экспериментов с максимальным приближением к лунным условиям.

Преимуществами термозондов на основе ГДТП можно назвать простоту их использования (для этого термозонда не требуется какая-то дополнительная подготовка на месте измерений); отсутствие необходимости измерения теплопроводности, поскольку ГДТП по величине термоэдс определяет непосредственно тепловой поток.

Недостатки: отсутствие возможности измерения ТФХ лунного грунта; меньшая надежность полученных данных по сравнению с проникающим термозондом из-за возможных локальных возмущений на поверхности.

Подводя общий итог, можно сказать, что оба термозонда представляют интерес для практического использования. Весь вопрос в том, насколько обширными будут исследования в миссии, где эти термозонды будут применяться. Если миссия в целом обладает большими ресурсами и возможностью использования бура – то лучшим решением будет применение

проникающего термозонда (а возможно, и обоих термозондов в комплексе). Если же таких ресурсов нет, то компромиссным вариантом будет решение использовать термозонд на основе ГДТП.

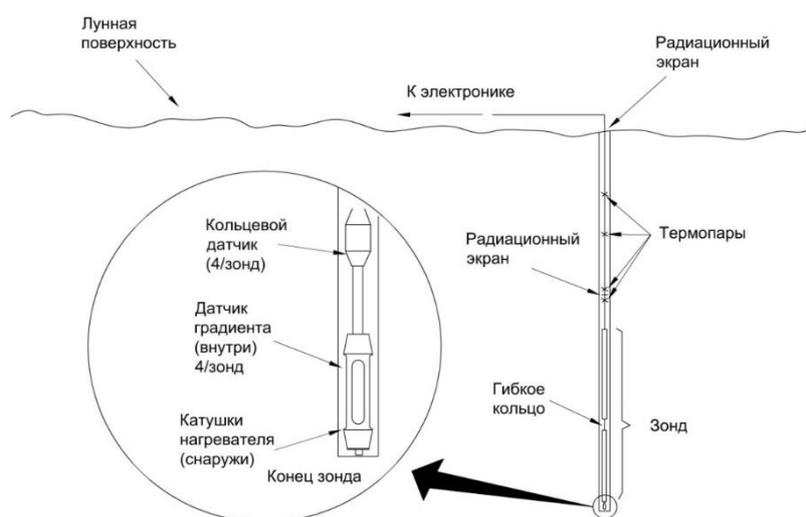
## Глава 2. КОНТАКТНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛУННОГО ГРУНТА

### 2.1. Общее описание теплофизических характеристик лунного грунта. История измерений

Теплофизические характеристики лунного грунта (ТФХ) были определены в результате экспериментов как в лабораториях, так и непосредственно на поверхности Луны. В естественных условиях измерения были проведены только в миссиях «Аполлон 15» и «Аполлон 17».

Для измерения температуры и теплопроводности грунта в предварительно пробуренные скважины опускались два термозонда: на станции «Аполлона-15» - до глубин 1,0 и 1,4 м, на «Аполлоне-17» - до глубины 2,3 м (рисунок 2.1). В этих зондах были установлены 8 платиновых термометров сопротивления и 4 термопары для измерений на 11-ти уровнях глубины под поверхностью. Четыре нагревателя, управляемые с земли, были расположены в одних конструктивных узлах с четырьмя термометрами.

Температурные данные со всех термометров передавались на Землю каждые 7,2 мин.



Тепловой эксперимент

Рис. 2.1. Схема применения термозондов в миссиях «Аполлон 15» и «Аполлон 17» [44]

Теплопроводность была определена в трех различных экспериментах. Во-первых, охлаждение зондов от исходной температуры, которая была выше, чем окружающий грунт, позволило определить теплопроводность по начальной тепловой энергии, содержащейся в зонде и поступившей в скважину. Во-вторых, были сделаны измерения непосредственно в скважинах с применением нагревателей. Теплопроводность рассчитывалась по изменению температуры грунта после 20 часов наблюдений. Данный термозонд позволял провести измерения ТФХ на всех датчиках, т. е. на 8-ми различных глубинах. В-третьих, температурные колебания дневного периода проникают приблизительно до глубины 80 см, а годовые вариации поверхностной температуры ощущаются на всех изученных глубинах. Существенное снижение амплитуды этих колебаний по мере увеличения глубины зависит от теплопроводности окружающего грунта. Однако данные по этому фактору трудно интерпретируются [26, 64, 65].

На рисунке 1.23 был показан график изменения теплопроводности грунта в зависимости от глубины по результатам миссий «Аполлон-15» и «Аполлон-17» [26].

Из этих данных видно, что наиболее сильно теплопроводность грунта изменяется в приповерхностном слое грунта на глубине всего в несколько сантиметров, в то время как при дальнейшем увеличении глубины её изменение не столь значительно.

Из этого можно сделать вывод, что задачу по определению ТФХ грунта на поверхности Луны можно разделить на две подзадачи: измерение ТФХ в поверхностном слое (до нескольких сантиметров, т.е. незаглубляемый термозонд) и определение распределения ТФХ по глубине до нескольких метров (т.е. заглубляемый термозонд).

На такие же две подзадачи эту проблему можно разделить и по возможным техническим решениям заглубляемых и незаглубляемых термозондов, поскольку в зависимости от решаемой подзадачи каждая конструкция будет иметь свои особенности.

Что касается характеристик самого поверхностного слоя, которые нужно учитывать при разработке методов и технологий определения его ТФХ в натуральных условиях («in situ»), приведём следующие данные.

Теплопроводность лунного грунта зависит, прежде всего, от плотности «упаковки» частиц грунта, а его теплоёмкость — от теплоёмкостей входящих в него минералов. Для образца грунта известного химического состава удельная теплоёмкость  $c$  может быть оценена по формуле:

$$c = \sum_i c_i x_i, \quad (2.1)$$

где  $c_i$  — массовая концентрация  $i$ -го компонента в образце;  $x_i$  — удельная теплоёмкость этого компонента (по справочникам для земных минералов).

Несмотря на различие химического состава «морского» и материкового реголита, величины его теплоёмкости мало зависят от региональной геологической ситуации, потому что и морской, и материковый грунт сложены преимущественно силикатами, а величины теплоёмкости этих соединений близки [22, 5, 6].

Характер реголита, рыхлого, с пустыми порами и точечными межзерновыми контактами и на «море», и на материке определяет свойства лунного грунта (таблица 2.1) как весьма эффективного теплоизолятора [1].

Таблица 2.1.

#### Характеристики образцов лунного грунта [41]

метод определения	коэффициент теплопроводности, Вт/м·°С
лабораторный анализ грунтов	
«Луна-16»	$(2 \pm 0,5) \cdot 10^{-4}$
«Аполлон-11»	$(2,3) \cdot 10^{-4}$

дистанционные оптические и радиоизмерения	$5,2 \cdot 10^{-4}$
	$1,46 \cdot 10^{-4}$
	$0,5 \cdot 10^{-4} - 7,1 \cdot 10^{-4}$

Расхождения в оценках величин теплопроводности по оптическим и радиоастрономическим измерениям, вероятно, связаны с изменчивостью плотностных характеристик самого верхнего слоя реголита на различных участках поверхности Луны, например с недоучётом локальных скоплений крупных камней. В то же время лунный материал в земных лабораторных опытах специально отсортировывается [19, 57, 66, 55].

Вследствие хороших теплоизоляционных свойств реголита тепловой режим поверхностного слоя Луны характеризуется быстрым уменьшением амплитуды температурных колебаний с глубиной (таблица 2.2) [1].

Таблица 2.2.

Характеристики теплового режима приповерхностного слоя [1]

Глубина	амплитуда температур, °С	
Поверхность	280	в предположении постоянства тепловых свойств
7 см	~30	
14 см	~3	

Теплофизические свойства реголита в значительной степени зависят от температуры. Характер этой зависимости для конкретных образцов тонкозернистого лунного грунта [46, 47, 48, 49] показан на рисунке 2.2, а в обобщенном виде для среднего реголита с объёмным весом  $1,3 \text{ г/см}^3$  [56] – в таблице 2.3:

Таблица 2.3.

Зависимость теплофизических характеристик от температуры грунта [56].

температура, °С	теплопроводность, $\times 10^{-3}$ , Вт/м·°С	теплоёмкость, Дж/кг·К	вакуум, $10^{-6}$ тор
-173	0,7	275,7	
-123	0,8	433,9	
-23	1,1	672,4	
27	1,4	758,1	
77	1,7	848,9	

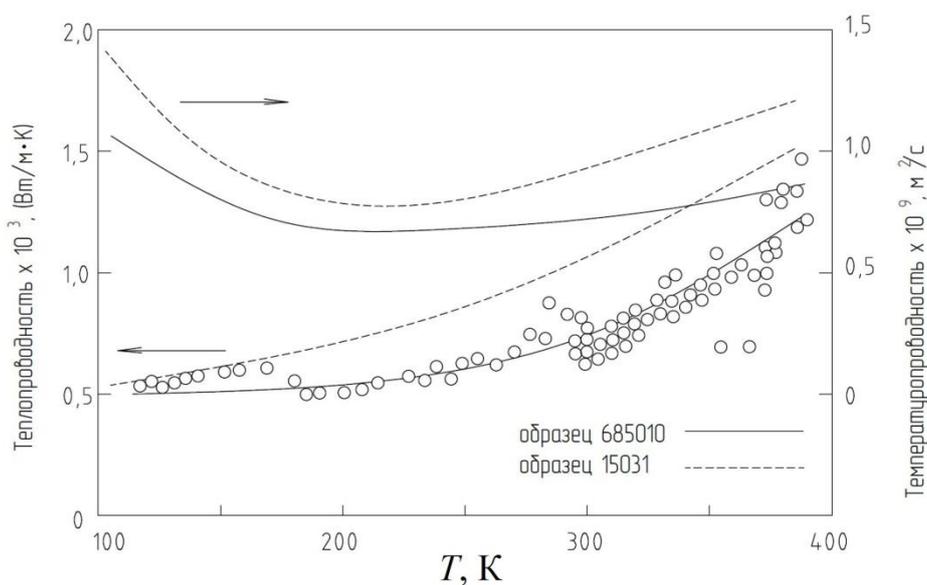


Рис. 2.2. Изменение величин теплопроводности и температуропроводности реголита в миссиях «Аполлон-15» (пунктирная линия) и «Аполлон-16» (сплошная линия) в зависимости от температуры [46]

Измерение теплофизических параметров реголита и его земных аналогов [8] показывает, что для реголита и моделирующих его материалов, как и следовало ожидать, близки величины теплоёмкости и различные величины теплопроводности (таблица 2.4).

Сравнение теплофизических параметров лунного реголита и его аналогов [8]

материал	теплопроводность, $\times 10^{-3}$ , Вт/м·°С	теплоёмкость, Дж/кг·°С	
			вакуум, $10^{-6}$ тор
морской реголит Л-16	2,76	0,74	
андезито-базальтовый песок	4,27	0,735	
мелкораздробленный базальт	6,98	0,79	

Разница эта, вероятно, обусловлена как недостаточно строгим воспроизведением гранулометрических, а, следовательно, и плотностных характеристик, так и неопределённостью условий дегазации исследуемых образцов.

В то же время величины коэффициента теплопроводности плотного силикатного скелета реголита близки к величинам коэффициента теплопроводности аналогичных земных горных пород, в интервале 2,1–4,19 Вт/м·°С [41].

В данной главе будут рассматриваться следующие схемы термозондов, для определения ТФХ грунта:

- Незаглубляемые термозонды: поверхностный термозонд; остывающий термозонд;
- Заглубляемые термозонды: схема с использованием пенетратора; проникающий термозонд; термозонд с отделяющимся нагревателем.

## 2.2. Поверхностный термозонд

Термозонд предназначен для определения ТФХ грунта поверхностного слоя. В простейшем случае он состоит из нагревателя, термометра, конструктивно не связанного с ним, и слоя экранно-вакуумной теплоизоляции, покрывающего всю конструкцию, для максимального

исключения влияния других нагревающих или охлаждающих факторов (рисунок 2.3).

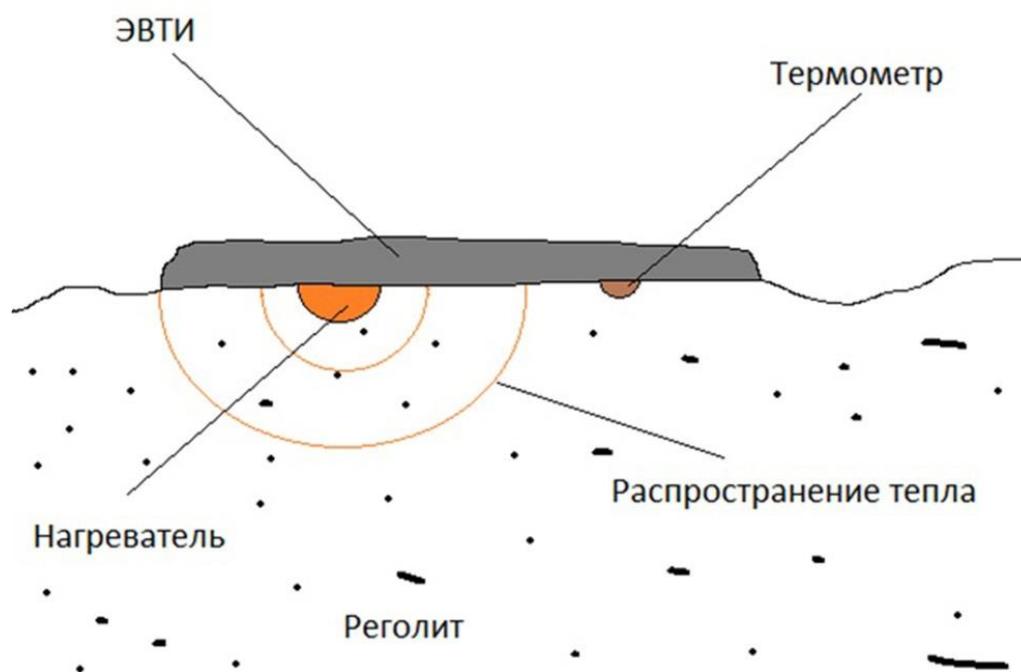


Рис. 2.3. Схема поверхностного термозонда

Термометр находится на определённом заданном расстоянии от нагревателя. При включении нагревателя тепловая волна постепенно доходит до термометра, и по его показаниям после решения обратной двумерной нестационарной задачи теплопроводности для модели полубесконечного тела можно вычислить ТФХ грунта.

Недостатком такого термозонда является возможность измерения характеристик только на поверхности. Однако привлекает простота конструкции и отсутствие необходимости бурения скважины.

Было проведено имитационное моделирование работы данной схемы для анализа распределения температуры в грунте. Похожий подход описан в [9] для гомогенных моделей. Решена серия прямых задач в программной среде Ansys методом конечных элементов. В каждом последующем решении уменьшались размеры конечных элементов. В данном случае при расчётах

удалось достигнуть точности порядка нескольких сотых градуса при величине конечного элемента 0,5 мм (таблица 2.6).

Исходные данные для решения тепловой задачи приведены в таблице 2.5 и ниже.

Таблица 2.5.

## Исходные данные для решения тепловой задачи

наименование	материал	диаметр	высота	теплопроводность, Вт/(м·°С)	теплоёмкость, Дж/(кг·°С)
нагреватель (цилиндрическая форма)	медный сплав	10 мм	10 мм	401	385
грунт	грунт	–	–	0,002	500

Мощность нагревателя 0,01 Вт;

время нагрева 180 минут;

начальная температура системы –23°С.

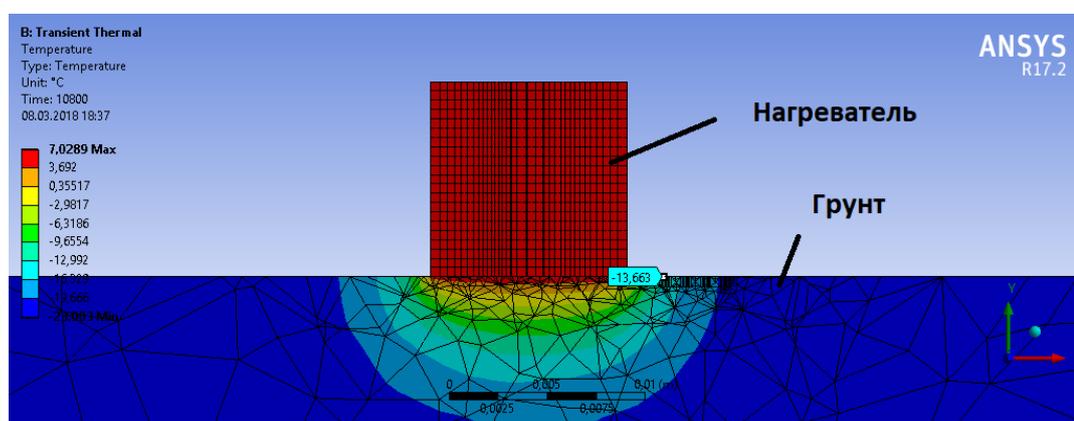
В таблице 2.5 приняты характеристики грунта, характерные для поверхностного слоя (по результатам измерений миссий Apollo). Мощность нагревателя и время нагрева взяты с учётом ограниченной конечной температуры нагрева. Это сделано для того, чтобы ТФХ грунта не изменились при повышении температуры, т. е. задача сохранила свою линейность.

Постановка задачи аналогична представленной в пункте 1.4, с той лишь разницей, что здесь рассматривается нестационарная задача, а тело  $M$  – является нагревателем и выделяет тепло  $Q(M_1; \tau) = Const = 0,01 \text{ Вт}$ .

В таблице 2.6 показаны результаты решения задачи. На рисунке 2.4 показано распределение температуры по результатам расчетов.

**Анализ точности решения тепловой задачи при выборе размера  
конечного элемента**

размер конечного элемента, мм	температура нагревателя, °C		температура грунта на расстоянии 2 мм от нагревателя, °C	температура грунта на расстоянии 5 мм от нагревателя, °C
	max	min		
10	5,2317	5,2137	-13,043	-19,629
5	5,1319	5,1314	-14,613	-19,987
2	5,4838	5,48	-13,175	-19,695
1	5,6177	5,617	-13,254	-19,714
0,5	5,7203	5,7193	-13,363	-19,759



**Рис. 2.4. Поверхностный термозонд. Распределение  
температуры при численном моделировании тепловой задачи**

Особенностью конструкции данной схемы является отделение нагревателя от термометров. Это сделано для того, чтобы отсутствовала какая-либо часть конструкции, находящаяся в тепловой связи с термометром. Но в принятой схеме термозонда необходимо учитывать погрешность в определении расстояния от нагревателя до термометра.

Для оценки этой погрешности применим следующий подход. Определим температуру грунта в двух точках: на расстоянии 2 мм и 5 мм от нагревателя. Предположим, что при установке термометров произошла ошибка в расстоянии от нагревателя до термометра, и термометр, который

предполагался на расстоянии 2 мм, установили на расстоянии 3 мм от нагревателя, а термометр, который должен быть установлен в 5 мм, установили на расстоянии 4 мм.

Точно так же по решённой выше задаче определим температуру в точках 3 мм и 4 мм от нагревателя. Это будут «измеренные значения» термометров.

После этого решим обратную задачу по определению одного параметра – коэффициента теплопроводности. Для этого воспользуемся методом подбора. Проведём ряд вычислений прямой нестационарной задачи теплопроводности, меняя значение коэффициента  $\lambda$ . Остальные характеристики зафиксированы и будут браться из исходных данных, приведённых выше. Рассчитав распределения температур грунта для точек на расстоянии 2 мм и 5 мм от нагревателя в зависимости от теплопроводности и сопоставив эти данные с «измеренными значениями» термометров, определим «измеренную теплопроводность» грунта. Сопоставив эту теплопроводность с изначальной, можно будет определить погрешность измерения в зависимости от расстояния.

Для решения этого ряда прямых задач примем размер конечного элемента равным 1 мм, т.к. при этом значении мы получаем точность расчётов по температуре до сотых градуса, а машинное время решения примерно в восемь раз меньше, чем при размере конечного элемента в 0,5 мм.

Пусть точка, находящаяся в 2 мм от нагревателя, будет называться «термометр 2». По аналогии остальные будут называться «термометр 3, 4, и 5».

Решим задачу по описанной выше схеме.

В таблице 2.7 приведены температуры, которые получились при решении предыдущей задачи (значение теплопроводности грунта 0,002 Вт/(м °С)):

Таблица 2.7.

Значения температур по «показаниям» различных термометров в моделируемой задаче элемента

расстояние от нагревателя, мм	наименование	значение температуры, °С
2	истинное значение термометра 2	-13,254
3	«измеренное значение» термометра 2	-16,403
4	«измеренное значение» термометра 5	-18,386
5	истинное значение термометра 5	-19,714

Теперь проведём ряд вычислений прямой задачи, меняя величину теплопроводности, и построим графики температур в точках 2 мм и 5 мм от нагревателя (таблица 2.8).

Таблица 2.8.

Результаты решения обратной задачи теплопроводности (ОЗТ)

теплопроводность, Вт/(м·°С)	истинное значение температуры, °С, термометра 2	истинное значение температуры, °С, термометра 5
0,0004	-17	-22,2
0,0005	-16,3	-22
0,001	-14,5	-20,9
0,0015	-13,7	-20,2
0,002	-13,3	-19,7
0,0025	-13	-19,4
0,003	-12,9	-19,1
0,0035	-12,9	-18,9
0,004	-12,9	-18,8
0,0045	-13	-18,7
0,005	-13	-18,6
0,006	-13,2	-18,5
0,007	-13,5	-18,5
0,008	-13,7	-18,5

Как видно из графиков (рисунки 2.5, 2.6), исходя из «измеренного значения» термометра 2 ( $-16,4^{\circ}\text{C}$ ), можно по графику определить «измеренную теплопроводность», которая будет равна примерно  $0,00049 \text{ Вт/м}\cdot^{\circ}\text{C}$  (истинная теплопроводность  $0,002 \text{ Вт/м}\cdot^{\circ}\text{C}$ ). Ошибка в данных условиях при сдвиге на 1 мм равна 75,5 %.

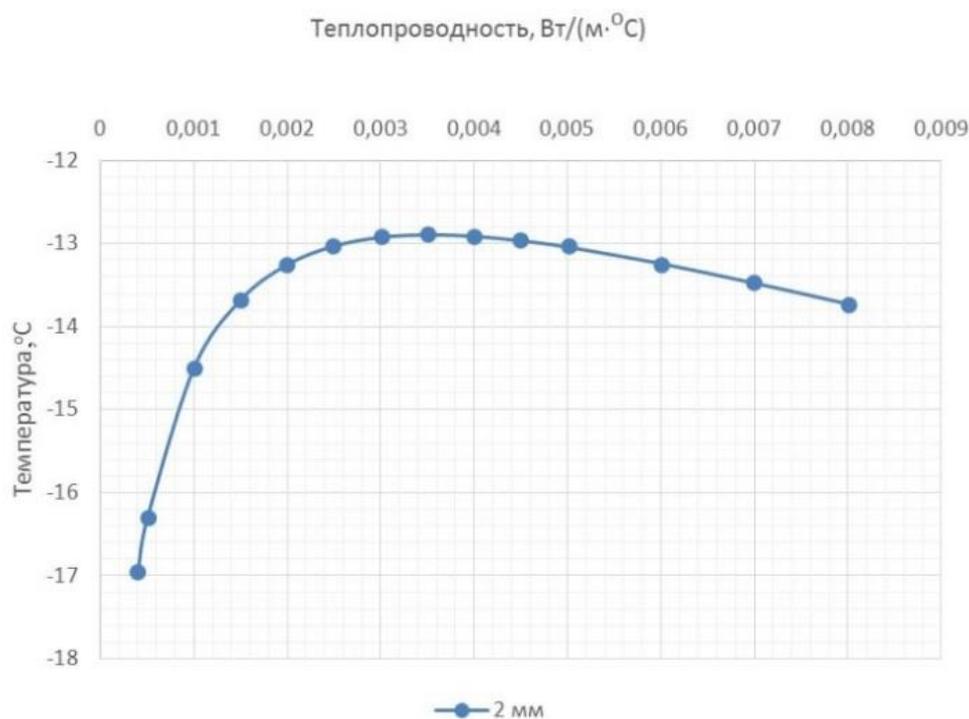


Рис. 2.5. График зависимости температуры от теплопроводности в точке 2 мм от нагревателя

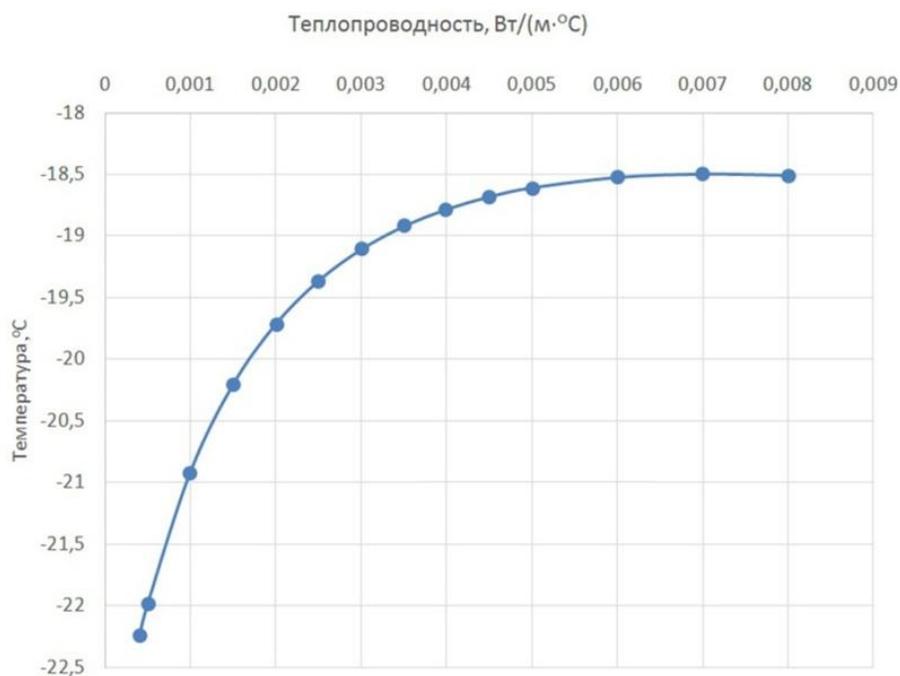


Рис. 2.6. График зависимости температуры от теплопроводности в точке 5 мм от нагревателя

Во втором случае «измеренное значение» термометра 5 было равно – 18,4°С. Это значение не попадает в поле рассчитанных температур в реальной точке в 5 мм от нагревателя.

Следовательно, можно сделать вывод, что, как и ожидалось, поверхностный термозонд весьма чувствителен к погрешности установки термометров, и это надо иметь в виду при его проектировании и практической реализации этой схемы измерения. Второй вывод заключается в том, что универсального способа расчёта для оценки погрешности нет, и погрешность следует рассчитывать индивидуально в каждом случае. Минимизировать её можно на этапе проектирования, при выборе, например, мощности нагревателя и времени его действия.

### 2.3. Остывающий термозонд

Принцип работы этого термозонда основан на следующем. На поверхность грунта помещается некое тело с известными ТФХ, нагретое до определённой температуры (рисунок 2.7). Верхняя и боковые поверхности

этого тела теплоизолированы. После соприкосновения нижней его части с грунтом часть тепла начинает перетекать в реголит. По изменению температуры тела в зависимости от времени и по результатам решения обратной задачи можно получить данные о ТФХ грунта.

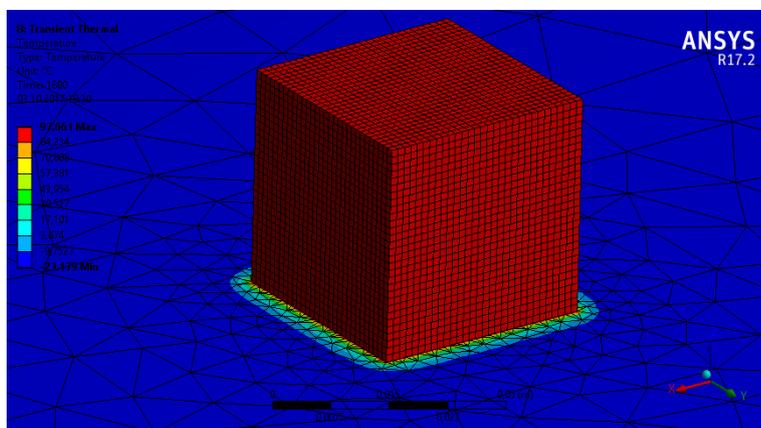


Рис. 2.7. Схема остывающего термозонда

Плюсы такого термозонда: простота конструкции и эксплуатации. Существенным минусом является нестабильность результатов. Для такого термозонда необходимо обеспечить идеальный тепловой контакт с грунтом. Если сопротивление на контакте будет достаточно высоким, то термозонд будет определять ТФХ грунта с недопустимо большой погрешностью.

#### 2.4. Схема с использованием пенетратора

Для измерения ТФХ лунного грунта (в миссии «Луна-Ресурс») планировалось использовать наработки, полученные при создании пенетратора - ударного проникающего в грунт зонда. Два таких зонда входили в состав миссии «Марс-96»<sup>1</sup>. Эксперимент назывался «Термометрия».

Прибор состоял из собственно измерителя – проникающего зонда, и электронного блока, реализующего как циклограмму эксперимента, так и сбор и запоминание экспериментальной информации. Приборы

<sup>1</sup> Миссия «Марс-96» не была реализована из-за отказа разгонного блока, который должен был вывести межпланетную станцию на траекторию полета к Марсу.

располагались на носовой части пенетратора, проникающей на глубину около 5 – 6 м от поверхности Марса, и на его хвостовой части, остающейся на поверхности. Схема размещения аппаратуры на пенетраторе показана на рисунке 2.8.

Измерение температуры предполагалось проводить датчиками, разносимыми от корпуса пенетратора специальными устройствами (системой развёртывания) для того, чтобы чувствительные элементы датчиков измеряли температуру в практически невозмущённой в тепловом отношении области грунта. Эти датчики задействовались и в экспериментах по определению ТФХ.

Для определения ТФХ предполагалось использовать подход, основанный на использовании алгоритмов решения обратных задач теплопроводности (ОЗТ) [2].

В эксперименте по определению ТФХ грунта необходимо было провести активный нагрев грунта в местах установки термозондов и оценить значения коэффициента теплопроводности и объемной теплоемкости грунта по измерениям плотности теплового потока и температуры в месте контакта измерительного устройства с грунтом. Результаты этих измерений использовались в качестве исходных данных в алгоритме обработки. На начальном этапе анализа и разработки данной схемы измерений для определения экспериментальных значений температуры грунта предполагалось использовать термопары (13), (6), (16), (17) по аналогии с [73].

Принципиальная схема размещения датчиков  
эксперимента "ТЕРМОМЕТРИЯ"

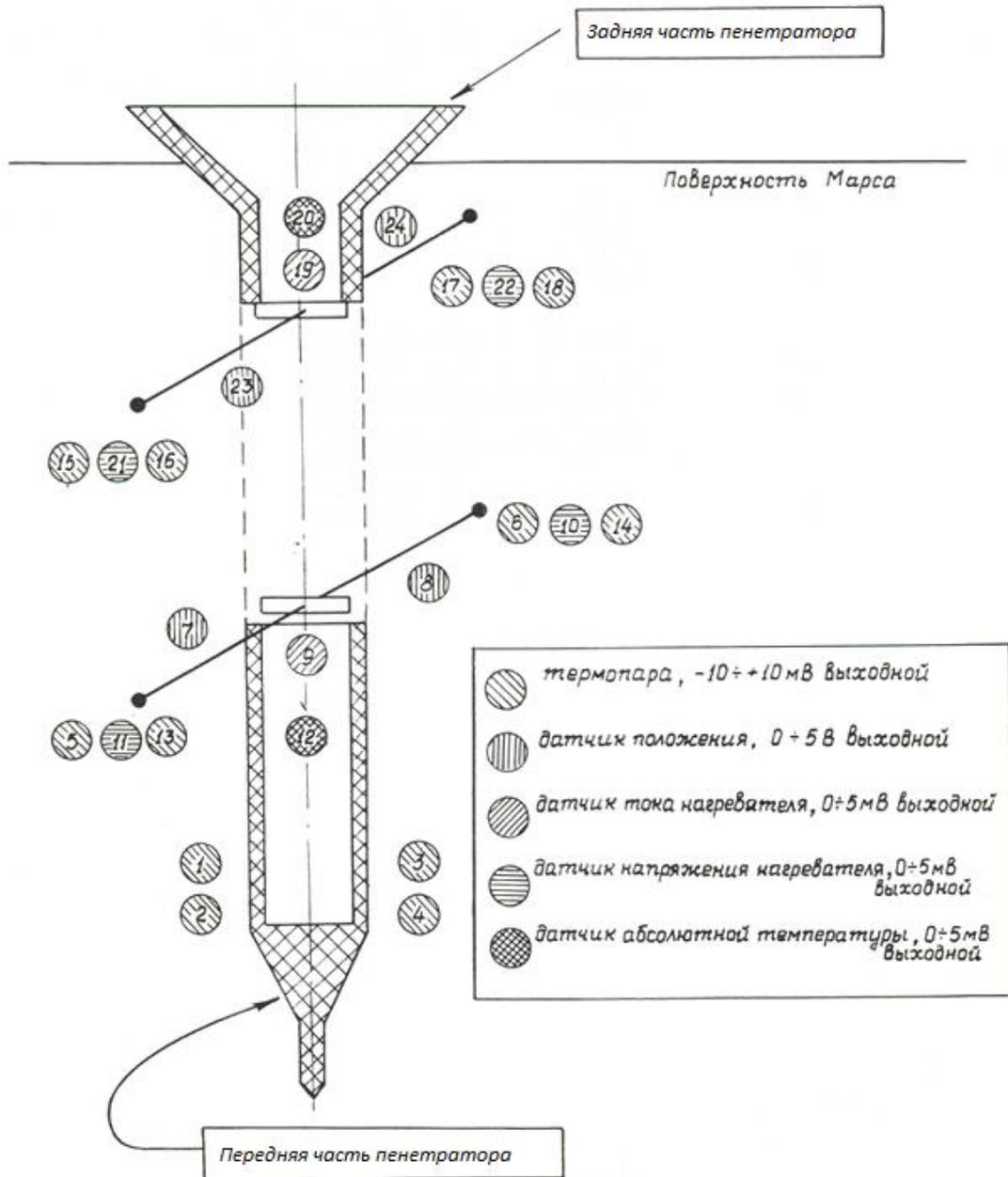


Рис. 2.8. Принципиальная схема размещения датчиков  
эксперимента «Термометрия»

В окончательном варианте для измерения температуры использовались терморезисторы, что позволило отказаться от устройств (12), (20),

предназначенных для измерения абсолютной температуры свободных спаев термопар (рисунок 2.8).

Следуя [29], для моделирования теплового режима грунта в первом приближении планировалось использовать одномерное уравнение теплопроводности для конечной области  $0 \leq x \leq b$  с граничными условиями II рода. На данном этапе рассматривается задача восстановления комплекса постоянных теплофизических коэффициентов  $C$  и  $\lambda$  – коэффициентов объёмной теплоёмкости и теплопроводности из условий:

$$C \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, x \in (0, b), \tau \in (0, \tau_m] \quad (2.2)$$

$$-\lambda \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = q_1(\tau) \quad (2.3)$$

$$-\lambda \frac{\partial T(b, \tau)}{\partial x} = q_2(\tau) \quad (2.4)$$

$$T(x, 0) = T_0(x) \quad (2.5)$$

$$T(x_m, \tau) = f_m(\tau), m = \overline{1, M} \quad (2.6)$$

где  $\tau_m$  – продолжительность процесса нагрева,

$q_1(\tau), q_2(\tau)$  – плотности тепловых потоков на внешней и внутренней границах неограниченной пластины, используемой как расчетная модель,

$T_0(x)$  – распределение температуры в начальный момент времени,

$f_m(\tau)$  – температура, измеренная  $m$ -й термопарой,

$M$  – количество термопар,

В качестве критерия выбора искомых величин  $C$  и  $\lambda$  используется среднеквадратичная невязка рассчитанных и измеренных температур в фиксированных точках установки термодатчиков:

$$J(C, \lambda) = \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \int_0^{\tau_m} \chi_m(\tau) [T(x_m, \tau) - f_m(\tau)]^2 d\tau \quad (2.7)$$

где  $\chi_m(\tau)$ ,  $m = \overline{1, M}$  веса, отражающие достоверность экспериментальных данных.

Для численного решения обратной задачи (2.2) – (2.7) был разработан алгоритм, аналогичный описанному в [3]. Задача (2.2) – (2.7) трактовалась как задача оптимального управления, где управляющим воздействием является вектор параметров

$$A = \{C, \lambda\}.$$

Решение данной задачи строилось с использованием градиентных методов минимизации. [30]

Анализ данной схемы, разработанной для измерения в марсианском грунте, показал, что она имеет недостатки для лунных условий измерений.

Был проведен ряд расчетов прямой задачи с целью понимания распределения температуры при проведении эксперимента. Эти расчеты проводились для упрощенной модели, где в качестве пенетратора рассматривался только его полый корпус, находящийся в тепловом контакте с цилиндрическим выдвижным нагревателем. При этом температурное поле в грунте рассчитывалось для локальной области в форме куба таких размеров, которые позволяли моделировать тепловые условия, соответствующие бесконечному телу. Теплофизические характеристики моделируемого грунта соответствовали характеристикам грунта на глубине от 1 м и глубже.

Исходные данные приведены в таблице 2.9 и ниже:

Таблица 2.9.

## Исходные данные для решения тепловой задачи

Наименование	Материал	Диаметр	Высота/Длина	Теплопроводность, Вт/(м* С°)	Теплоемкость, Дж/(кг* С°)
Корпус пенетратора	ВТ16	Диаметр: 100 мм/ толщина стенки: 5 мм.	1 м	9	540
Нагреватель	Медный сплав	10 мм	50 мм	401	385
Грунт	Грунт	-	-	0,02	600

Мощность нагревателя: 2 Вт;

Время нагрева: 30 минут;

Начальная температура системы: -23°С.

Постановка задачи, в основном, аналогична представленной в пункте 1.7.2. Разница заключается в том, что здесь существуют отличия в геометрических параметрах. А самое главное, что анализируется нестационарная постановка задачи и присутствует тело  $M$ , которое является нагревателем и выделяет тепло  $Q(M_1; \tau) = Const = 2\text{Вт}$ .

Серия расчетов была проведена методом конечных элементов в программной среде ANSYS. В каждом последующем расчете уменьшался размер каждого конечного элемента. Из-за относительной сложности модели, и в виду ограниченной вычислительной мощности компьютера, расчеты проводились до уровня точности в 0,7 °С. В таблице 2.10 представлены данные по итерационным расчетам с изменением величины конечных элементов.

Анализ точности решения тепловой задачи при выборе размера  
конечного элемента

Размер конечного элемента, мм.	Температура нагревателя, °С		Температура корпуса пенетратора, °С		Температура грунта на расстоянии 20 мм от нагревателя, °С	Температура корпуса пенетратора на расстоянии 20 мм от нагревателя, °С
	Max	Min	Max	Min		
10	-3,65	-4,83	-4,5	-23	-22,696	-15,307
5	-2,991	-4,178	-3,469	-23	-22,67	-15,258
3	-3,2666	-4,4777	-4,1521	-23	-22,725	-15,239

Как видно из рисунка 2.9, из-за низкой теплопроводности грунта, значительная часть тепла распределяется по корпусу пенетратора.

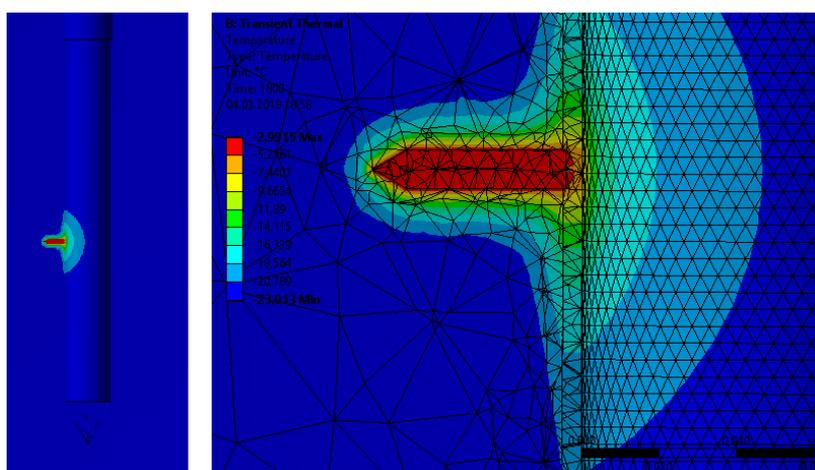


Рис. 2.9. Распределение температуры при решении тепловой задачи для схемы с использованием пенетратора

Эту картину подтверждают значения температур, приведенные в таблице 2.10. Соответственно, термометр, установленный на корпусе

пенетратора, будет показывать искаженные данные, если в качестве модели для ОЗТ берется модель бесконечной пластины (как это было показано ранее в описании миссии).

## 2.5. Проникающий термозонд для измерения ТФХ лунного грунта

Схема этого термозонда подобна той, которую использовали в миссиях «Аполлон-15» и «Аполлон-17». Основа конструкции – стержень, в котором установлены через определенные расстояния нагреватели и термометры (рисунок 2.10).

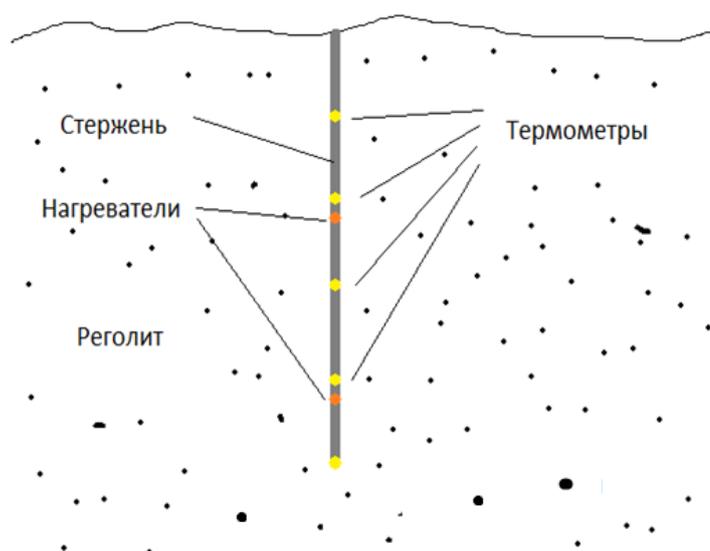


Рис. 2.10. Схема проникающего термозонда.

Стержень помещается в заранее пробуренную скважину и после определенного времени, достаточного для того, чтобы система стержень-грунт пришла в температурное равновесие, включаются нагреватели заданной мощности на заданный промежуток времени. По изменению температуры термометра, находящегося на определенном расстоянии от источника, и по решению обратной задачи теплопроводности находятся ТФХ грунта. Если ставится задача одновременного определения двух

характеристик –  $\lambda$  и  $C$ , то единственность ее решения можно обеспечить при условии измерения не только температур грунта, но и ненулевого теплового потока, хотя бы в одной точке на стенке скважины.

Как можно видеть, несколько нагревателей, расположенных на протяжении всего стержня термозонда, позволяют определять ТФХ на разных уровнях и строить послойные модели грунта.

Основным недостатком такой схемы зонда при определении тепловых свойств в натуральных условиях является совмещение в одном узле нагревательного и измерительного элементов, т.е. при эксперименте регистрируется изменение теплового состояния самого зонда, а не грунта. Ошибка, вносимая переменным коэффициентом теплоотдачи зонд-грунт, может быть при этом довольно значительна.

Так же, как и в предыдущих случаях, был проведен ряд расчетов прямой задачи с целью получения распределения температуры при проведении эксперимента. Расчеты проводились в программной среде ANSYS методом конечных элементов (МКЭ). В каждом последующем расчете величина конечного элемента уменьшалась до тех пор, пока последние расчеты не совпадали по температурам с точностью до сотых градуса (таблица 2.12). В данном случае результаты достаточно стабильны, и слабо меняются от величины конечного элемента (при этом модель для расчетов оказалась достаточно простой, поэтому точность было возможно увеличить до тысячных градуса).

Тепловой расчет был проведен на участке стержня, с одним нагревателем, находящемся между двух частей основного стержня. Модель состояла из стеклопластиковых стержней и медного нагревателя. Грунт однослойный, с усредненными значениями для глубины от 0,5 м до 1 м, по данным миссий «Аполлон». Материал стержня выбран по следующим соображениям: стеклопластик обладает достаточно низкой теплопроводностью при приемлемых прочностных характеристиках. Выбрать какие-то другие материалы с подобной низкой теплопроводностью,

которые можно было бы использовать в подобных конструкциях, затруднительно. В своих миссиях «Аполлон», NASA также в качестве материала стержня использовали стеклопластик.

Исходные данные и постановка задачи приведены в таблице 2.11 и ниже:

Таблица 2.11.

## Исходные данные для решения тепловой задачи

Наименование	Материал	Диаметр	Высота/Длина	Теплопроводность, Вт/(м* С°)	Теплоемкость, Дж/(кг* С°)
Стержень (с двух сторон от нагревателя)	Стеклопластик	10 мм	90 мм	0,4	1000
Нагреватель	Медный сплав	10 мм	10 мм	401	385
Грунт	Грунт	-	-	0,017	600

Мощность нагревателя: 0,1 Вт;

Время нагрева: 30 минут;

Начальная температура системы: минус 23 °С.

Пусть задана некоторая область  $S(x', y', z')$  трехмерного пространства  $E_3(x, y, z)$ . При этом:  $0 < x' < x_1$ ;  $0 < y' < y_1$ ;  $0 < z' < z_1$  (рисунок 2.11 слева).

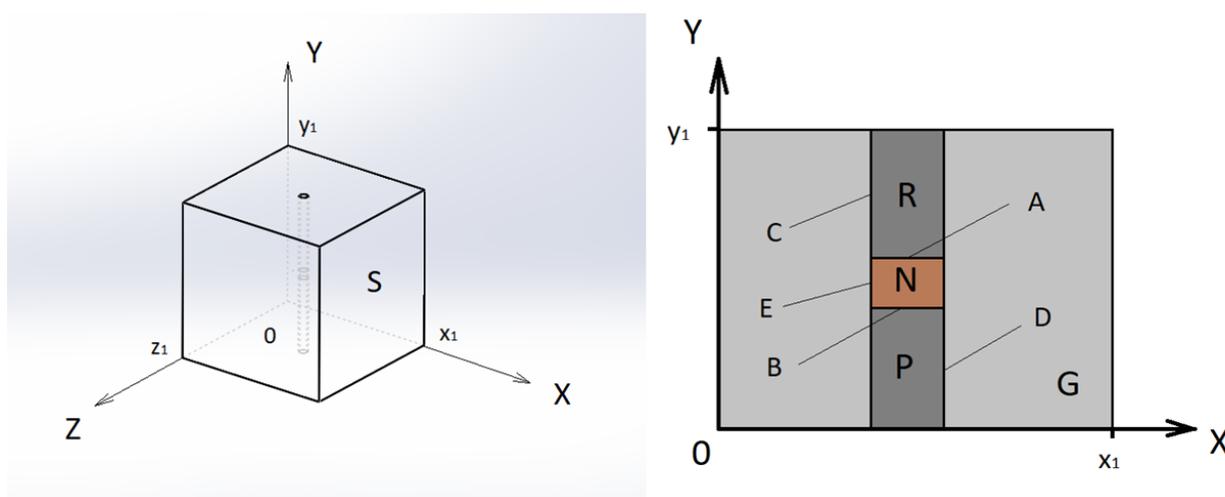


Рис. 2.11 Трехмерные тела, используемые в математической постановке задачи. Буквами показаны различные поверхности и области пространства

Внутри области  $S$  находится участок грунта и термозонд. При этом, несмотря на то что этот участок грунта конечен, его размеры настолько велики, что позволяют имитировать бесконечное тело.

В центре участка грунта находится термозонд. Он состоит из нагревателя, верхней части стержня и нижней части стержня (далее – верхний и нижний стержни). На рисунке 2.11 справа изображена область  $S$  в разрезе, на которой показан термозонд.

Вся система состоит из четырех тел: верхний стержень, нижний стержень, нагреватель и грунт.

Уравнения теплопроводности.

Уравнение теплопроводности для нижнего стержня:

$$\frac{\partial T(P_1; \tau)}{\partial \tau} = a_{ст} \left( \frac{\partial^2 T(P_1; \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(P_1; \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(P_1; \tau)}{\partial z^2} \right);$$

$$(\tau \geq 0; P_1 \in P).$$

Здесь  $P$  – область пространства, занятая нижним стержнем,  $a_{ст}$  – температуропроводность стержня.

Уравнение теплопроводности для верхнего стержня:

$$\frac{\partial T(R_1; \tau)}{\partial \tau} = a_{ст} \left( \frac{\partial^2 T(R_1; \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(R_1; \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(R_1; \tau)}{\partial z^2} \right);$$

$$(\tau \geq 0; R_1 \in R).$$

Здесь  $R$  – область пространства, занятая верхним стержнем.

Уравнение теплопроводности для нагревателя:

$$\frac{\partial T(N_1; \tau)}{\partial \tau} = a_n \left( \frac{\partial^2 T(N_1; \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(N_1; \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(N_1; \tau)}{\partial z^2} \right) + \frac{Q(N_1; \tau)}{C_{vн}};$$

$$Q(N_1; \tau) = Const = 0,1 \text{ Вт};$$

$$(\tau \geq 0; N_1 \in N).$$

Здесь  $N$  – область пространства, занятая нагревателем,  $a_n$  – температуропроводность нагревателя,  $C_{vн}$  – объемная теплоемкость нагревателя,  $Q$  – мощность нагревателя.

Уравнение теплопроводности для грунта:

$$\frac{\partial T(G_1; \tau)}{\partial \tau} = a_r \left( \frac{\partial^2 T(G_1; \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(G_1; \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(G_1; \tau)}{\partial z^2} \right);$$

$$(\tau \geq 0; G_1 \in G).$$

Здесь  $G$  – область пространства, занятая грунтом,  $a_z$  – температуропроводность грунта.

Граничные и начальные условия.

Условие равенства тепловых потоков и температур на границе нижнего стержня и грунта:

$$\lambda_{ст} \frac{\partial T}{\partial i_D} |_{D_{ст}} = \lambda_{гр} \frac{\partial T}{\partial i_D} |_{D_{гр}};$$

$$T|_{D_{ст}} = T|_{D_{гр}};$$

где  $D_{ст}$  – внешняя поверхность нижнего стержня, контактирующая с грунтом;  $D_{гр}$  – поверхность грунта, контактирующая нижним стержнем;  $i_D$  – нормаль к поверхности  $D$ ;  $\lambda_{ст}$  – теплопроводность стержня,  $\lambda_{гр}$  – теплопроводность грунта (рисунок 2.11 справа).

Условие равенства тепловых потоков и температур на границе верхнего стержня и грунта:

$$\lambda_{ст} \frac{\partial T}{\partial i_C} |_{C_{ст}} = \lambda_{гр} \frac{\partial T}{\partial i_C} |_{C_{гр}};$$

$$T|_{C_{ст}} = T|_{C_{гр}};$$

где  $C_{ст}$  – внешняя поверхность верхнего стержня, контактирующая с грунтом;  $C_{гр}$  – поверхность грунта, контактирующая верхним стержнем;  $i_C$  – нормаль к поверхности  $C$  (рисунок 2.11 справа).

Условие равенства тепловых потоков и температур на границе грунта и нагревателя:

$$\lambda_{гр} \frac{\partial T}{\partial i_E} |_{E_{гр}} = \lambda_{н} \frac{\partial T}{\partial i_E} |_{E_{н}};$$

$$T|_{E_{гр}} = T|_{E_{н}};$$

где  $E_{гр}$  – поверхность грунта, контактирующая с нагревателем;  $E_{н}$  – поверхность нагревателя, контактирующая с грунтом;  $i_E$  – нормаль к поверхности  $E$ ;  $\lambda_{н}$  – теплопроводность нагревателя (рисунок 2.11 справа).

Условие равенства тепловых потоков и температур на границе нижнего стержня и нагревателя:

$$\lambda_{\text{ст}} \frac{\partial T}{\partial i_B} |_{B_{\text{ст}}} = \lambda_{\text{н}} \frac{\partial T}{\partial i_B} |_{B_{\text{н}}};$$

$$T|_{B_{\text{ст}}} = T|_{B_{\text{н}}};$$

где  $B_{\text{ст}}$  – поверхность нижнего стержня, контактирующая с нагревателем;  $B_{\text{н}}$  – поверхность нагревателя, контактирующая с нижним стержнем;  $i_B$  – нормаль к поверхности  $B$  (рисунок 2.11 справа).

Условие равенства тепловых потоков и температур на границе верхнего стержня и нагревателя:

$$\lambda_{\text{ст}} \frac{\partial T}{\partial i_A} |_{A_{\text{ст}}} = \lambda_{\text{н}} \frac{\partial T}{\partial i_A} |_{A_{\text{н}}};$$

$$T|_{A_{\text{ст}}} = T|_{A_{\text{н}}};$$

где  $A_{\text{ст}}$  – поверхность верхнего стержня, контактирующая с нагревателем;  $A_{\text{н}}$  – поверхность нагревателя, контактирующая с верхним нагревателем;  $i_A$  – нормаль к поверхности  $A$  (рисунок 2.11 справа).

Условие нулевого теплового потока на границах области  $S$ :

$$\lambda_{\text{гр}} \frac{\partial T(0, y, z, \tau)}{\partial x} = 0;$$

$$\lambda_{\text{гр}} \frac{\partial T(x, 0, z, \tau)}{\partial y} = \lambda_{\text{ст}} \frac{\partial T(x, 0, z, \tau)}{\partial y} = 0;$$

$$\lambda_{\text{гр}} \frac{\partial T(x, y, 0, \tau)}{\partial z} = 0;$$

$$\lambda_{\text{гр}} \frac{\partial T(x_1, y, z, \tau)}{\partial x} = 0;$$

$$\lambda_{\text{гр}} \frac{\partial T(x, y_1, z, \tau)}{\partial y} = \lambda_{\text{ст}} \frac{\partial T(x, y_1, z, \tau)}{\partial y} = 0;$$

$$\lambda_{\text{гр}} \frac{\partial T(x, y, z_1, \tau)}{\partial z} = 0;$$

Условие начальной температуры:

$$T(x, y, z, 0) = T_0 = \text{const.}$$

Расчеты показали, что основная часть тепла уходит в конструкцию, при этом грунт нагревается не так сильно. Из-за этого температура термометра, установленного на определенном расстоянии от нагревателя, и температура

грунта на таком же расстоянии от нагревателя будут различаться. В таблице 2.12 представлены данные по итерационным расчетам с изменением величины конечных элементов.

Таблица 2.12.

## Анализ точности решения тепловой задачи при выборе размера

Размер конечного элемента, мм.	Температура нагревателя, °С		Температура верхней части стержня, °С		Температура грунта на расстоянии 10 мм от нагревателя, °С	Температура в стержне на расстоянии 10 мм от нагревателя, °С
	Max	Min	Max	Min		
10	-11,229	-11,232	-11,228	-22,999	-21,742	-17,733
5	-11,219	-11,222	-11,217	-22,999	-21,743	-17,66
2	-11,208	-11,211	-11,209	-22,998	-21,789	-17,51
1	-11,215	-11,216	-11,205	-22,998	-21,792	-17,513

Как видно, разница между температурой грунта и термометра в стержне на расстоянии 10 мм от нагревателя составляет около 4°С, что может привести к существенной погрешности при определении ТФХ грунта, например, с помощью модели полубесконечного тела.

Попробуем определить, как сильно элементы конструкции влияют на конечное распределение температуры. Измерим температуру в стержне на расстоянии 10 мм от нагревателя и сравним ее с невозмущенной элементами конструкции температурой грунта, отстоящей на таком же расстоянии от нагревателя (рисунок 2.12). В данных условиях температура в стержне минус 17,513 °С, температура грунта минус 21,792 °С. Разница температур составила 4,279 °С.

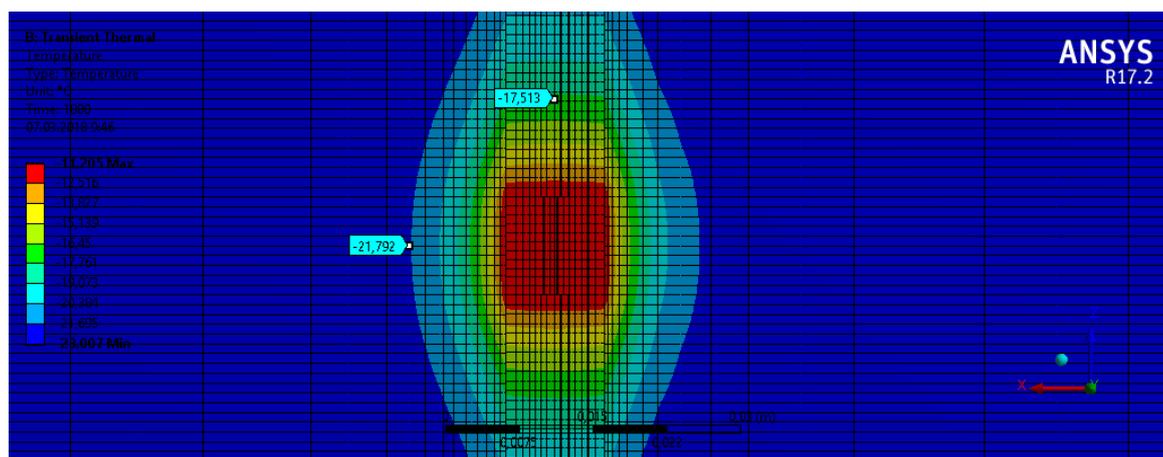


Рис. 2.12. Распределение температуры при решении тепловой задачи для проникающего термозонда.

На следующем этапе оценку влияния элементов конструкции попробуем провести с помощью ОЗТ (моделирование ситуации, как если бы мы в своих расчетах пренебрегали этим влиянием).

Для этого возьмем «измеренную» величину температуры на расстоянии 10 мм от нагревателя минус 17,51 °С (которую мы измерили на стеклопластиковом стержне), и попытаемся по ней определить теплопроводность грунта.

Решим ряд простых прямых нестационарных однопараметрических задач, в которых нам известны все параметры грунта, кроме теплопроводности. Зафиксировав эти параметры, будем варьировать величиной теплопроводности грунта, и рассчитывать реальную температуру грунта, находящегося на расстоянии 10 мм от нагревателя. При этом нашей целью будет достичь температуры минус 17,51 °С, чтобы по этому графику получить «измеренную» теплопроводность. Величину конечного элемента примем равным 2 мм, т.к. при данном размере мы гарантированно получим приемлемую точность вычислений (см. таблицу 2.12), но при этом машинное время расчетов будет не слишком высоким.

За исключением теплопроводности, все остальные исходные данные примем такими же, как и в предыдущей задаче.

Результаты расчетов представлены в таблице 2.13 и на графике (рисунок 2.13).

Таблица 2.13.

## Результаты решения ОЗТ для проникающего термозонда

Теплопроводность, Вт/(м*°С)	0,001	0,002	0,01	0,02	0,05	0,1
Температура грунта на расстоянии 10 мм от нагревателя, °С	-22,9986	-22,9814	-22,2123	-21,5757	-21,1694	-21,3622

Теплопроводность, Вт/(м*°С)	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4
Температура грунта на расстоянии 10 мм от нагревателя, °С	-21,6048	-21,801	-21,9521	-22,071	-22,1653	-22,2431

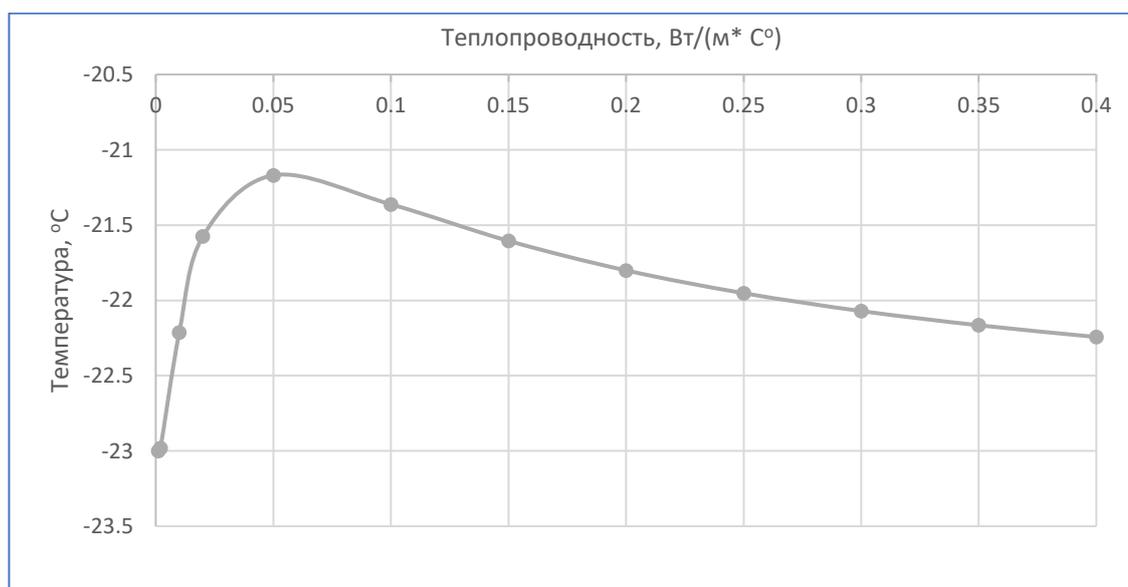


Рис. 2.13. График зависимости температуры грунта на расстоянии 10 мм от нагревателя от теплопроводности грунта

В полученных результатах наблюдается следующая закономерность – при увеличении теплопроводности грунта его температура сначала возрастает, а по достижении определенной величины  $\lambda$  начинает падать. Это объясняется тем, что при больших значениях теплопроводности грунта, начиная с некоторого значения  $\lambda$ , отвод тепла от нагревателя становится более интенсивным. По результатам данных расчетов, в точке, отстоящей на 10 мм от грунта, температура так и не достигает значения минус 17,52 °С.

Данная схема показывает достаточно сильное влияние элементов конструкции на распределение конечной температуры. Однако для лунных условий в перспективе она все же имеет право на существование, например, если удастся разработать новые материалы с удовлетворительными прочностными характеристиками и сверхнизкой теплопроводностью.

## **2.6. Термозонд с отделяющимся нагревателем**

Идея такого термозонда заключается в том, чтобы использовать все преимущества проникающего термозонда и убрать основной недостаток: «перетекание» тепла по стержню. Для этого необходимо разделить зонд и нагреватель на две не связанные между собой в тепловом отношении части.

Термозонд такого типа состоит из двух частей: стержень с термометрами и отделяемый нагреватель (рисунок 2.14). Принцип действия такого зонда заключается в следующем.

На первом этапе стержень с термометрами и нагревателем на конце опускается в скважину. Затем от стержня отделяется нагреватель и остается на дне скважины. Далее стержень отодвигается вверх на заданное расстояние. Включается нагреватель, и начинаются измерения.

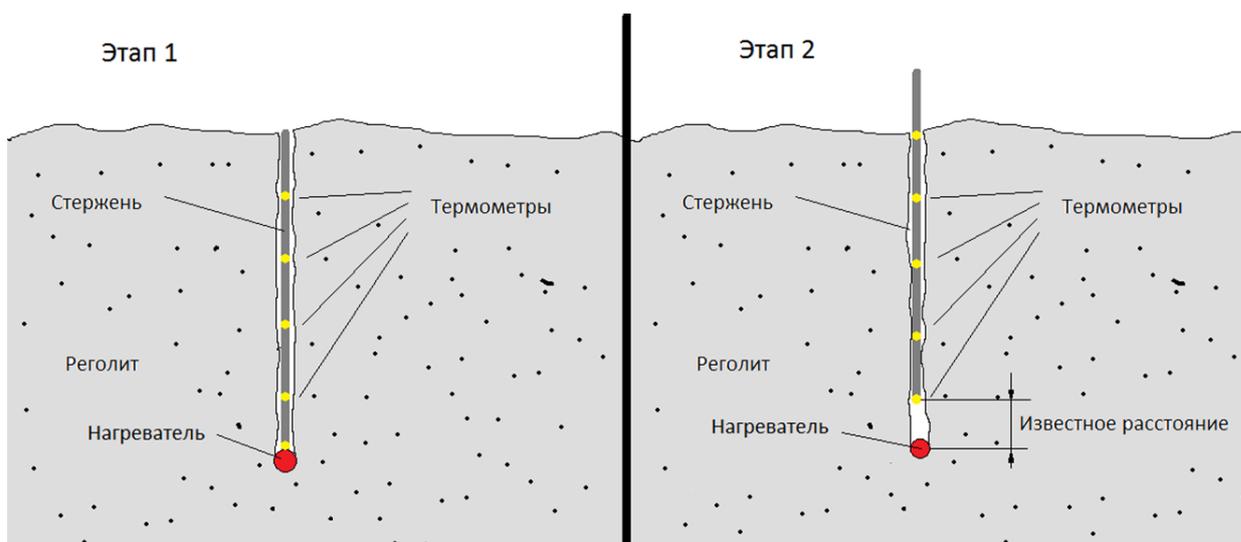


Рис. 2.14. Схема термозонда с отделяющимся нагревателем

Нагреватель состоит из корпуса, элементов питания, омического нагревателя и устройства дистанционного включения и выключения.

После отделения нагреватель включается по команде с Земли и выдает определенное количество тепла. Величину теплового потока можно измерить с помощью амперметра по следующей формуле:

$$\frac{dQ}{dt} = I^2 R_3 \quad (2.8)$$

где  $Q$  – количество теплоты,  $t$  – время,  $I$  – напряжение в цепи,  $R_3$  – сопротивление цепи.

Потенциальные плюсы данной схемы заключаются в отсутствии связи между нагревателем и остальным термозондом, вследствие чего распределение температуры может происходить с меньшими искажениями.

Как следствие, можно отметить потенциально более точное измерение ТФХ грунта.

Основным минусом данной схемы является возможность определения ТФХ только на одной глубине.

Данные миссий «Аполлон 15» и «Аполлон 17» показывают, что наиболее сильно теплопроводность грунта изменяется в приповерхностном слое грунта на глубине всего в несколько сантиметров (рисунок 1.23) [26].

Ввиду этого, основные точки для измерения ТФХ лунного грунта находятся на поверхности, где теплопроводность грунта имеет сверхнизкие значения, и на некоторой глубине. Эту задачу можно реализовать с помощью рекомендуемого термозонда.

Проведем решение прямой нестационарной задачи теплопроводности с помощью МКЭ, используя программную среду ANSYS для анализа распределения температуры в системе грунт-термозонд. Так же, как и ранее, это будет серия расчетов с последующим уменьшением конечных элементов с целью добиться определенной точности. ТФХ грунта примем характерными для глубины 1-1,5 м, по данным миссий «Аполлон».

Исходные данные представлены в таблице 2.14 и ниже:

Таблица 2.14.

#### Исходные данные для решения тепловой задачи

Наименование	Материал	Диаметр	Высота/Длина	Теплопроводность, Вт/(м* °С)	Теплоемкость, Дж/(кг* °С)
Стержень	Стеклопластик	30 мм	460 мм	0,4	1000
Нагреватель	Медный сплав	30 мм	30 мм	401	385
Грунт	Грунт	-	-	0,02	600

Расстояние от нагревателя до стержня: 10 мм.

Мощность нагревателя: 0,1 Вт;

Время нагрева: 10 часов;

Начальная температура системы: минус 23 °С.

Постановка задачи аналогична представленной в пункте 2.5.

Результаты расчетов приведены в таблице 2.15 и на рисунке 2.15:

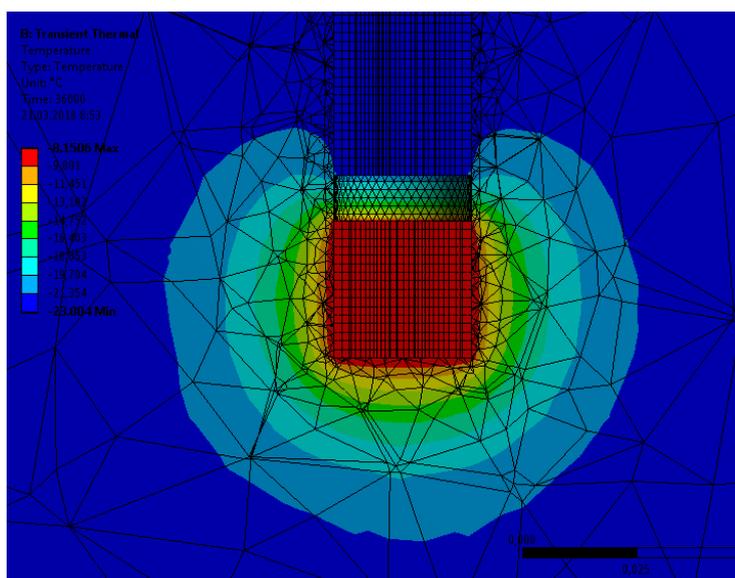


Рис. 2.15. Распределение температуры для термозонда с отделяющим нагревателем при решении тепловой задачи

Таблица 2.15.

Анализ точности решения тепловой задачи при выборе размера конечного элемента

Размер конечного элемента, мм.	Температура нагревателя, °C		Температура стержня в нижней точке (на расстоянии 10 мм от нагревателя) °C
	Max	Min	
10	-9,2105	-9,2139	-20,769
5	-8,4104	-8,4121	-21,146
2	-8,2749	-8,2766	-21,236

Самый малый размер конечного элемента, который соответствует наивысшей достигнутой точности решения задачи, составляет 2 мм. Дальнейшее уменьшение размера и повышение точности было ограничено вычислительной мощностью компьютера. При таком размере конечного элемента точность составила около 0,17 °C.

Как и в схеме с проникающим термозондом, попробуем определить величину влияния элементов конструкции (в данном случае – это

стеклопластиковый стержень) на конечное распределение температуры. Для этого нужно сравнить распределение температуры в невозмущенной среде (без элементов конструкции, кроме нагревателя), с распределением при учете всех элементов конструкции.

Оценка погрешности от влияния конструкции будет осуществляться следующим образом.

Этап 1. Определение погрешности с помощью решения прямой задачи.

Для этого необходимо использовать модель, учитывающую влияние на температурное поле элементов конструкции, и рассчитать распределение температур в областях, где находятся термометры, т.е. на контакте нижней кромки стержня и грунта, где расчетная температура составила минус 21,2°C.

Далее из модели исключаются все элементы конструкции, кроме нагревателя (рисунок 2.16), и при тех же исходных данных определяется температура грунта в том же месте. В нашем случае она равна минус 18,1 °С, т.е. разность температур составила 3,1°C. Чем меньше этот показатель, тем меньшее влияние оказывает конструкция термозонда на распределение температур, а следовательно, и на точность измерений.

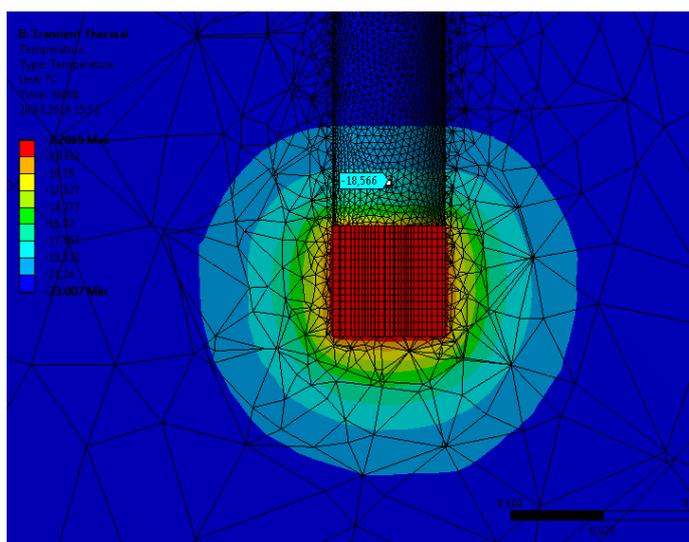


Рис. 2.16. Распределение температуры для термозонда с отделяющимся нагревателем (модель без стержня) при решении тепловой задачи.

## Этап 2. Определение погрешности с помощью решения ОЗТ.

В этом случае используется модель со всеми элементами конструкции, и после решения прямой задачи определяется температура в области, где находятся термометры. Будет принято, что это «измеренная» температура. В нашем случае, как мы уже показали, на нижней кромке стержня (в месте контакта с грунтом) эта температура будет равна минус 21,2 °С.

Далее из модели исключаются все элементы конструкции, кроме нагревателя. При тех же начальных условиях решается ряд простых прямых нестационарных однопараметрических задач, в которых известны все параметры грунта, а коэффициент теплопроводности варьируется. При каждом последующем расчете фиксируется температура грунта в месте, где он должен был бы контактировать с термометром. Таким образом, можно получить график реальной температуры грунта в зависимости от его теплопроводности.

Результаты расчетов представлены в таблице 2.16 и на графике (рисунок 2.17). Величину конечного элемента примем равным 2 мм.

Таблица 2.16.

### Результаты решения ОЗТ для термозонда с отделяющимся нагревателем

Теплопроводность, Вт/(м*° С)	Температура °С
0,0005	-22,1
0,0008	-21,3
0,0009	-21,1
0,001	-20,8
0,005	-17,4
0,01	-17,2
0,02	-18,1
0,025	-18,6
0,03	-19

0,035	-19,3
0,04	-19,6
0,1	-21,2
0,15	-21,7

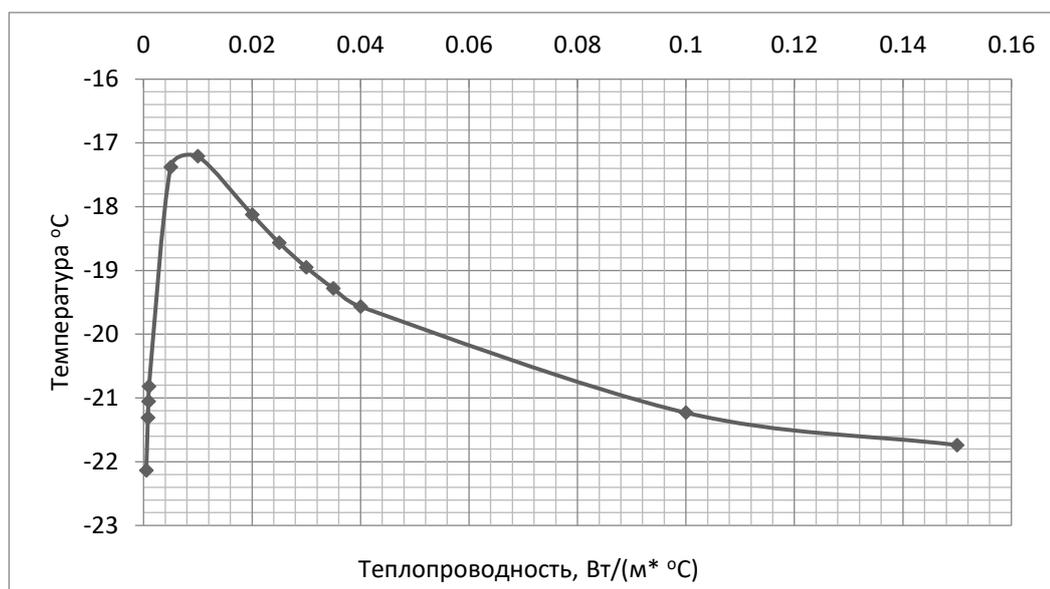


Рис. 2.17. График зависимости температуры от теплопроводности в точке 10 мм от нагревателя

Как видно из результатов решения задачи, при данных условиях «вычисленная» теплопроводность имеет два возможных значения: 0,0008 Вт/(м\*°C) и 0,1 Вт/(м\*°C). В первом случае рассчитанная величина теплопроводности составляет лишь 4 % от исходной величины (т.е. отклонение 96%), во втором отклонение составило 400%. Эти отклонения объясняются существенным теплоотводом через грунт в тело стержня с последующей теплоотдачей через его боковую поверхность. Величину этих отклонений нельзя рассматривать как характеристику точности термозонда; это лишь характеристика влияния конструкции на распределение температуры.

Проведенное моделирование отклонений измерений показывает существенное влияние конструкции на распределение температуры и опасность неучета этого обстоятельства в математической модели,

используемой для решения ОЗТ. Такой термозонд показал себя лучше, чем проникающий термозонд (схема использовалась в миссиях «Аполлон»), однако потенциальная ошибка при определении ТФХ лунного грунта может быть весьма большой.

## **2.7. Определение ТФХ лунного грунта при помощи солнечного тепла**

### **2.7.1. Способ измерения**

Предположим, что на поверхности Луны есть пробуренная на определенную глубину скважина. В нее помещен термозонд, например по схеме, используемой в миссиях «Аполлон-15» и «Аполлон-17». Зонд представляет собой стеклопластиковый стержень с установленными на нем через определенные промежутки термометрами, которые способны измерять температуру грунта на разной глубине.

При смене лунной ночи на день солнце начинает освещать остывшую поверхность грунта. Тепловой поток постепенно увеличивается, и тепловая волна все глубже проникает в слой грунта. Зная оптические свойства грунта (которые можно получить используя методы, подобные например [31]), зависимость интенсивности потока солнечного тепла от времени и изменение температуры от времени, по результатам измерений термометров термозонда на различных глубинах можно определить ТФХ лунного грунта.

### **2.7.2. Методы решения задачи по определению ТФХ**

Были проведены расчеты, позволяющие оценить эффективность такого метода измерений. В качестве искомого параметра ТФХ была взята теплопроводность.

В расчетах использовалась многослойная модель грунта с изменением теплопроводности в зависимости от глубины слоя, опирающаяся на данные измерений миссий «Аполлон» (рисунок 1.23). Модель состояла из трех верхних слоев и полубесконечного тела снизу. Поскольку, как можно видеть из рисунка 1.23, в верхних слоях грунта теплопроводность сильно меняется с

глубиной, а на глубинах больше 50 см изменяется достаточно слабо, в используемой модели нижние слои грунта заменяются полубесконечным телом с постоянным коэффициентом теплопроводности (рисунок 2.18).

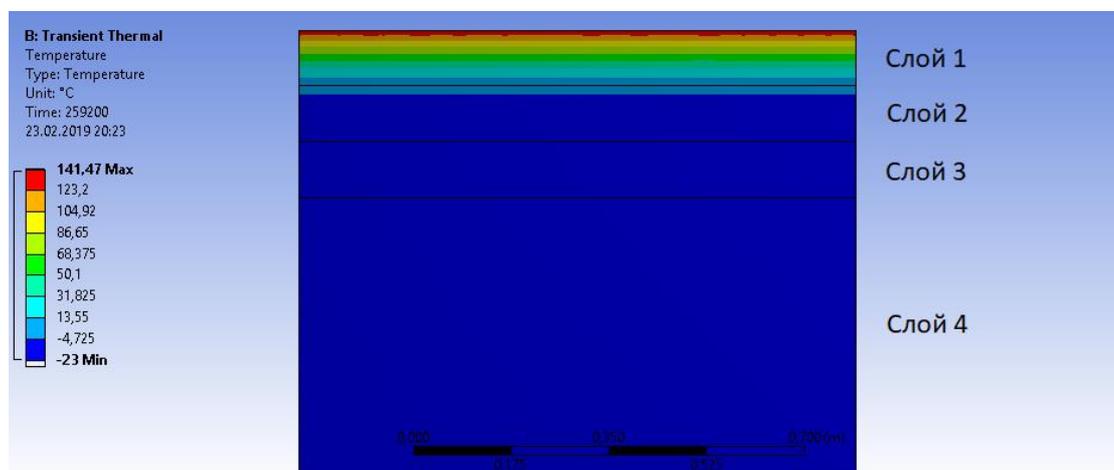


Рис. 2.18. Распределение температуры в численном эксперименте

Тепловой численный эксперимент проводился следующим образом. Сначала решалась прямая задача и определялись значения температуры в середине слоев. В задаче задавались ТФХ всех слоев, начальная температура системы, тепловой поток от солнца, степень черноты верхнего слоя и время проведения эксперимента. При решении вычислялись температуры средних точек трех слоев. Эти температуры назывались «измеренными» и имитировали показания термодатчиков, установленных на термозонде.

Далее, требовалось определить «неизвестный» параметр – теплопроводность каждого из трех слоев. Четвертый слой в рамках задачи не принимался во внимание и выполнял роль дальнейшего приемника тепла. Подразумевалось, что в четвертом (полубесконечном) слое с увеличением глубины теплопроводность изменяется слабо, тепловая волна в данную область практически не приходит (рисунок 2.18), и поэтому примерной оценки ТФХ четвертого слоя как некоторой постоянной величины будет достаточно для возможности решения данной задачи.

Также в данной задаче не учитывалось влияние конструкции термозонда на естественное распределение температуры.

Обратная задача теплопроводности решалась методом подбора. Это означало, что в каждом цикле подбора фиксировались коэффициенты теплопроводности всех слоев, кроме одного, в котором с определенным шагом изменялась теплопроводность, и решалось соответствующее множество прямых тепловых задач. Далее, при переходе к следующему циклу, в одном из предыдущих слоев теплопроводность изменялась на определенное значение шага, и операция повторялась. Таким образом, в определенных пределах решалось всё множество возможных задач теплопроводности. После этого выбирались наиболее близкие точки к «измеренным» значениям температуры, и в окрестностях их также проводилось подобное вычисление подбором, но с уже меньшим шагом с целью найти наиболее точное совпадение.

### 2.7.3. Исходные данные. Выбор размера конечного элемента.

#### Результаты решения задачи

Серия расчетов была проведена методом конечных элементов в программной среде ANSYS.

Исходные данные и постановка задачи приведены в таблице 2.17 и ниже:

Таблица 2.17.

#### Исходные данные для решения тепловой задачи

Наименование	Материал	Высота слоя, м	Теплопроводность, Вт/(м* С°)	Теплоемкость, Дж/(кг* С°)
Слой 1 (верхний)	реголит	0,1	0,006	500
Слой 2	реголит	0,1	0,013	500
Слой 3	реголит	0,1	0,017	500
Слой 4	реголит	Полубесконечное тело	0,02	500

Для упрощения задачи плотность солнечного теплового потока принята за константу и равна  $q_c=1000$  Вт/м<sup>2</sup>;

Время нагрева: 3 суток или  $\tau=259200$  секунд.

Начальная температура системы:  $T_0=-23^\circ\text{C}$ .

Степень черноты поверхности верхнего слоя:  $\varepsilon=0,7$ .

Постановка задачи следующая. Пусть задана некоторая область  $S(x', y', z')$  трехмерного пространства  $E_3(x, y, z)$ . При этом:  $0 < x' < x_1$ ;  $0 < y' < y_4$ ;  $0 < z' < z_1$  (рисунок 2.19 слева).

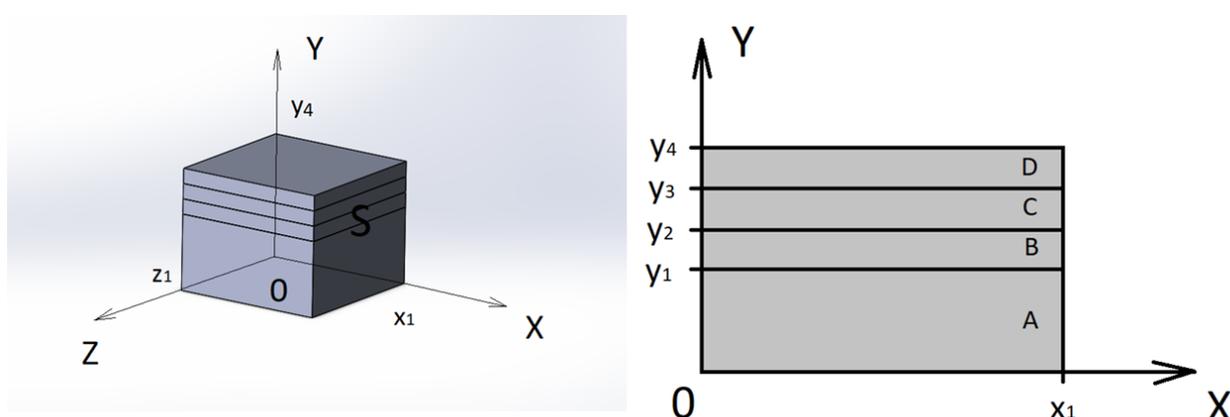


Рис. 2.19 Трехмерные тела, используемые в математической постановке задачи. Буквами показаны различные поверхности и области пространства

Внутри области  $S$  находится участок грунта. При этом, несмотря на то что этот участок грунта конечен, его размеры настолько велики, что позволяют имитировать бесконечное тело.

Участок грунта состоит из четырех слоев. На рисунке 2.19 справа изображена область  $S$  в разрезе.

Вся система состоит из четырех тел – четырех слоев грунта.

Уравнения теплопроводности.

Уравнение теплопроводности первого слоя грунта:

$$\frac{\partial T(A_1; \tau)}{\partial \tau} = a_{\text{гр}1} \left( \frac{\partial^2 T(A_1; \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(A_1; \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(A_1; \tau)}{\partial z^2} \right);$$

$$(\tau \geq 0; A_1 \in A).$$

Здесь  $A$  – область пространства, занятая первым слоем грунта (нижним),  $a_{\text{гр}1}$  – теплопроводность первого слоя грунта (рисунок 2.19 справа).

Уравнение теплопроводности первого слоя грунта:

$$\frac{\partial T(B_1; \tau)}{\partial \tau} = a_{\text{гр}2} \left( \frac{\partial^2 T(B_1; \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(B_1; \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(B_1; \tau)}{\partial z^2} \right);$$

$$(\tau \geq 0; B_1 \in B).$$

Здесь  $B$  – область пространства, занятая вторым слоем грунта,  $a_{\text{гр}2}$  – теплопроводность второго слоя грунта (рисунок 2.19 справа).

Уравнение теплопроводности первого слоя грунта:

$$\frac{\partial T(C_1; \tau)}{\partial \tau} = a_{\text{гр}3} \left( \frac{\partial^2 T(C_1; \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(C_1; \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(C_1; \tau)}{\partial z^2} \right);$$

$$(\tau \geq 0; C_1 \in C).$$

Здесь  $C$  – область пространства, занятая третьим слоем грунта,  $a_{\text{гр}3}$  – теплопроводность третьего слоя грунта (рисунок 2.19 справа).

Уравнение теплопроводности четвертого слоя грунта:

$$\frac{\partial T(D_1; \tau)}{\partial \tau} = a_{\text{гр}4} \left( \frac{\partial^2 T(D_1; \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(D_1; \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(D_1; \tau)}{\partial z^2} \right);$$

$$(\tau \geq 0; D_1 \in D).$$

Здесь  $D$  – область пространства, занятая четвертым слоем грунта (верхним),  $a_{\text{гр}4}$  – теплопроводность четвертого слоя грунта (рисунок 2.19 справа).

Граничные и начальные условия.

Условия равенства тепловых потоков и температур на контакте соседних слоев грунта:

$$\lambda_A \frac{\partial T_A(x, y_1, z, \tau)}{\partial y} = \lambda_B \frac{\partial T_B(x, y_1, z, \tau)}{\partial y};$$

$$T_A(x, y_1, z, \tau) = T_B(x, y_1, z, \tau);$$

$$\lambda_B \frac{\partial T_B(x, y_2, z, \tau)}{\partial y} = \lambda_C \frac{\partial T_C(x, y_2, z, \tau)}{\partial y};$$

$$T_B(x, y_2, z, \tau) = T_C(x, y_2, z, \tau);$$

$$\lambda_C \frac{\partial T_C(x, y_3, z, \tau)}{\partial y} = \lambda_D \frac{\partial T_D(x, y_3, z, \tau)}{\partial y};$$

$$T_C(x, y_3, z, \tau) = T_D(x, y_3, z, \tau);$$

где  $T_A, T_B, T_C, T_D$  и  $\lambda_A, \lambda_B, \lambda_C, \lambda_D$  – температуры и теплопроводности слоев грунта  $A, B, C, D$ .

Условие теплового потока на верхней поверхности области  $S$ :

$$\lambda_D \frac{\partial T_D(x, y_4, z, \tau)}{\partial y} + q = 0;$$

$$q = q_c - q_{\text{изл}};$$

$$q_c = \text{const};$$

$$q_{\text{изл}} = \varepsilon \sigma T_D^4(x, y_4, z, \tau);$$

где  $q_c$  – плотность солнечного теплового потока;  $q_{\text{изл}}$  – плотность излученного теплового потока с поверхности грунта (слой  $D$ );  $\varepsilon$  – степень черноты верхней поверхности грунта с координатами  $(x, y_4, z)$ ;  $\sigma = 5,670367(13) \cdot 10^{-8} \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}\right)$  – постоянная Стефана-Больцмана.

Условие нулевого потока на боковой поверхности области  $S$ :

$$\lambda_A \frac{\partial T_A(0, y, z, \tau)}{\partial x} = \lambda_B \frac{\partial T_B(0, y, z, \tau)}{\partial x} = \lambda_C \frac{\partial T_C(0, y, z, \tau)}{\partial x} = \lambda_D \frac{\partial T_D(0, y, z, \tau)}{\partial x} = 0;$$

$$\lambda_A \frac{\partial T_A(x, 0, z, \tau)}{\partial y} = \lambda_B \frac{\partial T_B(x, 0, z, \tau)}{\partial y} = \lambda_C \frac{\partial T_C(x, 0, z, \tau)}{\partial y} = \lambda_D \frac{\partial T_D(x, 0, z, \tau)}{\partial y} = 0;$$

$$\lambda_A \frac{\partial T_A(x, y, 0, \tau)}{\partial z} = \lambda_B \frac{\partial T_B(x, y, 0, \tau)}{\partial z} = \lambda_C \frac{\partial T_C(x, y, 0, \tau)}{\partial z} = \lambda_D \frac{\partial T_D(x, y, 0, \tau)}{\partial z} = 0;$$

$$\lambda_A \frac{\partial T_A(x_1, y, z, \tau)}{\partial x} = \lambda_B \frac{\partial T_B(x_1, y, z, \tau)}{\partial x} = \lambda_C \frac{\partial T_C(x_1, y, z, \tau)}{\partial x} = \lambda_D \frac{\partial T_D(x_1, y, z, \tau)}{\partial x} = 0;$$

$$\lambda_A \frac{\partial T_A(x, y, z_1, \tau)}{\partial z} = \lambda_B \frac{\partial T_B(x, y, z_1, \tau)}{\partial z} = \lambda_C \frac{\partial T_C(x, y, z_1, \tau)}{\partial z} = \lambda_D \frac{\partial T_D(x, y, z_1, \tau)}{\partial z} = 0;$$

Условие начальной температуры:

$$T(x, y, z, 0) = T_0 = \text{const.}$$

Поскольку расчеты проводились методом конечных элементов, требовалось сначала определить величину этих элементов для использования в дальнейшем решении.

Для этого была проведена серия расчетов. В каждом последующем расчете величина конечного элемента уменьшалась до тех пор, пока последние расчеты не совпадали по температурам с некоторой точностью (таблица 2.18).

Таблица 2.18.

Анализ точности решения тепловой задачи при выборе размера

Размер конечного элемента, мм.	Температура середины первого слоя грунта, °C
100	59,336
50	59,25
30	59,595

Как видно, при данной постановке задачи не удается добиться точности решения выше, чем несколько десятых градуса. А дальнейшее уменьшение величины конечного элемента сильно увеличивает время расчета.

Для дальнейших расчетов примем величину конечного элемента равной 50 мм. Это будет являться некоторым компромиссом между точностью и машинным временем расчета.

Соответственно, значения «измеренных» температур в серединах слоев были получены следующие (таблица 2.19):

Значения «измеренных» температур в серединах слоев

Температура середины первого слоя грунта, °C	Температура середины второго слоя грунта, °C	Температура середины третьего слоя грунта, °C
59,24982	-12,7729	-21,5879

Далее были проведены серии расчетов прямых задач теплопроводности. Фиксировались все параметры, кроме коэффициентов теплопроводности, которые изменялись в первых трех слоях с шагом 0,006 Вт/м\*°C, при этом значения были равны:  $\lambda_1=0,006$  Вт/м\*°C,  $\lambda_2=0,012$  и Вт/м\*°C  $\lambda_3=0,0018$  Вт/м\*°C. В таблице А.1 приложения А приведены результаты вычислений.

Наиболее близкими оказались точки с номерами расчетов 4, 13 и 22. Следующий этап – расчет в окрестностях этих точек с меньшим шагом в 0,001 Вт/м\*°C с целью найти максимальное совпадение расчетных с «измеренными» температурами. В таблицах А.2, А.3 и А.4 приложения А представлены результаты расчетов.

Как можно видеть, среди множества рассчитанных значений встречаются также значения, близкие к «измеренной» температуре, однако самым близким оказался расчет №8 в таблице 2.23 с такими искомыми значениями теплопроводности, которые соответствуют заданным.

Несмотря на то, что в численном эксперименте удалось определить теплопроводность грунта, в реальных условиях это будет сделать достаточно сложно.

В данном численном эксперименте не учитывалось искажение температурного поля от влияния термозонда; не учитывалось изменение теплового потока в зависимости от времени; была принята упрощенная

трехслойная модель грунта; выбор размера конечного элемента позволял решить задачу с точностью до нескольких десятых градуса; не учитывалось множество других факторов, таких, например, как погрешность измерения термометра. Также стоит отметить, что при решении обратной задачи методом подбора возникло много точек с неправильными коэффициентами теплопроводности и с близкими значениями температуры к «измеренным» величинам. Обобщая все вышесказанное, можно сделать вывод, что эти факторы могли привести к достаточно большой ошибке при определении теплопроводности грунта.

Тем не менее, для оценки возможности применения данного метода, требуется проверить его в реальных экспериментах в вакуумной камере с использованием имитатора солнечного света, например [38].

## **2.8. Выводы по главе 2**

В данной главе было рассмотрено несколько различных схем термозондов и способов измерения для определения ТФХ лунного грунта.

Рассматривая разные схемы, у остывающего термозонда можно выделить один существенный недостаток – зависимость его показаний от теплового сопротивления на контакте грунта и термозонда. А это тот параметр, который будет неизвестен, и сможет внести значительные погрешности при определении ТФХ лунного грунта.

Остальные термозонды лишены частично либо полностью этого недостатка. Для них не будет иметь значения наличие теплового сопротивления при контакте нагревателя с грунтом. Количество отданного тепла нагревателем в грунт можно будет оценить по изменению температуры самого нагревателя, а решение обратной задачи по температуре грунта на некотором расстоянии от нагревателя будет получено исходя из количества именно отданного тепла, а не изначальной мощности нагревателя. Именно по этим двум параметрам - отданному теплу и изменению температуры грунта в точках измерения - можно будет судить о ТФХ грунта.

Следующим существенным фактором, определяющим точность исследования ТФХ, является влияние самой конструкции термозонда. В силу того, что лунный грунт является суперэффективным теплоизолятором, тепло от нагревателя будет в значительной степени уходить в элементы конструкции и искажать картину измерений. В главе это продемонстрировано на нескольких модельных примерах.

В таблице 2.24 приведена сводка результатов моделирования и оценки влияния конструкции на точность результатов.

Таблица 2.24.

## Анализ термозондов для определения ТФХ лунного грунта

Характеристики	Поверхностный термозонд	Схема с использованием пенетратора	Проникающий термозонд (схема Apollo)	Термозонд с отделяющимся нагревателем
Мощность нагревателя	0,01 Вт	2 Вт	0,1 Вт	0,1 Вт
Время нагрева	180 мин	30 мин	30 мин	10 часов, или 600 мин.
Расстояние от нагревателя	5 мм	20 мм	10 мм	10 мм
Значение температуры связанное с элементом конструкции, °С	-	-15,239	-17,513	-21,236
Значение температуры грунта, °С (при моделировании без элементов конструкции)	19,759	-22,725	-21,792	-18,1239
Разница температур, °С (точность при моделировании прямой задачи)	-	7,486	4,279	3,1121

Величина отклонения теплопроводности	-	-	Температура вышла за пределы расчетной зависимости	96-400%
--------------------------------------	---	---	--	---------

Схема с использованием пенетратора, из-за высокой теплопроводности титанового корпуса, показала самый большой разброс погрешностей по температуре. Т.е. влияние корпуса оказалось слишком большим, по сравнению с другими схемами.

Проникающий термозонд показал результат по температуре практически в 2 раза лучше. Т.е., влияние стеклопластикового стержня меньше, чем в схеме с использованием пенетратора. Это логично, так как теплопроводность стеклопластика более чем в 20 раз меньше теплопроводности титанового сплава ВТ16. К тому же, этот термозонд обладает такими преимуществами, по сравнению с остальными, как простота и надежность конструкции, простота установки и использования.

Самые лучшие результаты по степени влияния конструкции на распределение температуры показал термозонд с отделяющимся нагревателем. При моделировании влияния с помощью прямой задачи, в которой использовались модели с конструкцией термозонда и без, разница температур составила 3.1 °С, что является лучшим показателем среди остальных рассмотренных в данной главе термозондов. Это утверждение справедливо и для результатов моделирования влияния конструкции с помощью ОЗТ. В целом, такой термозонд имеет перспективы для использования.

Повторимся, что в примерах моделирования, приведенных в этой статье, при расчете погрешности с помощью ОЗТ мы брали схемы без ключевых элементов конструкций лишь для того, чтобы показать масштабы влияния этих конструкций на конечное распределение температуры. Отклонения решения ОЗТ в таблице 2.24 лишь характеризуют величину данного влияния, а не отражают точность термозондов как таковых. При

реальных измерениях и реальных расчетах такой подход был бы неправильным. В общем случае в тепловой модели необходимо учитывать влияние всех элементов конструкции, которые могут оказать воздействие на конечное распределение температуры.

Поверхностный термозонд является достаточно простой конструкцией. Основной недостаток – возможность измерения ТФХ только в поверхностном слое. Однако, для простых миссий это выливается в простоту использования и отсутствие необходимости в бурении скважины. К тому же, его можно использовать в комплексе и с другими более сложными термозондами.

В любом случае, при выборе термозонда для какой-либо определенной миссии каждая из схем нуждается в реальном эксперименте для определения точности.

По поводу измерения ТФХ лунного грунта при учете солнечного тепла, можно сказать следующее. В [26] сказано, что при подобных наблюдениях, проведенных в миссиях «Аполлон», данные было сложно интерпретировать. Следует сделать вывод, что подобный метод измерения ТФХ грунта с помощью солнечного тепла может быть лишь вспомогательным, подтверждающим те или иные измерения. Для измерения ТФХ необходимо использовать термозонды с искусственными нагревателями, например рассмотренные выше [13, 18].

### **Глава 3. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СХЕМЫ ТЕРМОЗОНДОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА ЛУНЫ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЕ ГРУНТА**

#### **3.1. Постановка задачи**

Если обобщить все сказанное в предыдущих главах, то из описанных схем термозондов по измерению плотности теплового потока, можно выделить следующие схемы, имеющие перспективу использования:

- термозонд на основе ГДТП
- стержневой проникающий термозонд по схеме подобной той, которая использовалась в миссиях «Аполлон-15» и «Аполлон-17».

Исходя из результатов численного моделирования и данных по реальным измерениям на Луне [26], можно утверждать, что проникающий термозонд дает достаточно точные результаты по измерению теплового потока.

Что касается термозондов для определения ТФХ лунного грунта, то из рассмотренных выше наиболее эффективными оказались схемы:

- проникающий стержневой термозонд (по схеме подобной той, что использовалась в миссиях «Аполлон-15» и «Аполлон-17»);
- термозонд с отделяющимся нагревателем.
- поверхностный термозонд.

Основной недостаток поверхностного термозонда – невозможность измерения ТФХ грунта на разной глубине.

Основные недостатки проникающего термозонда: существенное искажение результатов измерений из-за совмещения нагревателя и термометра в одном узле. Из-за того, что теплопроводность материала стержня, как правило, на порядок превышает теплопроводность грунта, возникает перетекание тепла по стержню, приводя к неправильным значениям температур на измеряющих термометрах.

Основные минусы термозонда с отделяющимся нагревателем: во-первых он может измерить ТФХ только на одной глубине, там, где

находится нагреватель. Во-вторых, из-за особенностей конструкции происходит следующее явление. Тепло, распространяясь от нагревателя, достигает стержня. А поскольку теплопроводность его значительно выше окружающего грунта, то тепло начинает распространяться вверх по стержню. Тем самым показатели температуры на измеряющих термометрах уменьшаются, что приводит к искажению при измерениях (пусть и не таких сильных, как в проникающем термозонде).

Подводя итог, можно перечислить имеющиеся термозонды, для определения внутреннего теплового потока Луны и свойств ее грунта:

- термозонды для определения ТП: термозонд на основе ГДТП; проникающий стержневой термозонд;
- термозонды для определения ТФХ: проникающий стержневой термозонд, термозонд с отделяющимся нагревателем, поверхностный термозонд.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что перспективные схемы термозондов должны обладать следующими качествами.

Термозонды для измерения ТФХ:

- увеличенная точность за счет уменьшения влияния конструкции на распределение температуры
- возможность измерения разных глубинах

Термозонды для измерения плотности внутреннего ТП:

- увеличенная точность за счет уменьшения влияния конструкции на распределение температуры

Для реализации подобных экспериментов было бы удобно, чтобы возможность измерения как ТФХ, так и ТП была объединена в одном термозонде.

Учитывая все вышеперечисленное, а также принимая во внимание все плюсы и минусы различных схем, можно сделать вывод, что заглубляемая схема термозонда предпочтительней.

Далее будут предложены две схемы перспективных термозондов:

- разделенный термозонд;
- термозонд с увеличенным тепловым сопротивлением.

Будет описана их конструкция и проведены оценочные расчеты точности их измерений.

## **3.2. Разделяемый термозонд**

### **3.2.1. Схема зонда**

Как было показано выше, анализ различных схем термозондов приводит к выявлению такой проблемы, как влияние конструкции на естественное распределение тепла. Такой эффект проявляется, как правило, из-за конструктивного совмещения в одном узле как нагревателя, так и термометра, измеряющего температуру грунта. Это, в свою очередь, может приводить к искажениям в показаниях термометров, и, как следствие, влиять на характеристики точности термозонда. Следовательно, требуется каким-то образом отделить нагреватель от термометра, измеряющего температуру грунта.

Попробуем реализовать эту идею в разделяемом термозонде. Смысл состоит в том, чтобы создать несколько отдельных полностью автономных устройств, работающих в одной системе. Устройств будет два вида: нагреватель и измеритель. Здесь под словом «измеритель» будем понимать устройство для измерения температуры грунта.

Вся система будет состоять из нескольких измерителей и нагревателей, помещенных в пробуренную скважину и зафиксированных на определенных расстояниях относительно друг друга (рисунок 3.1).

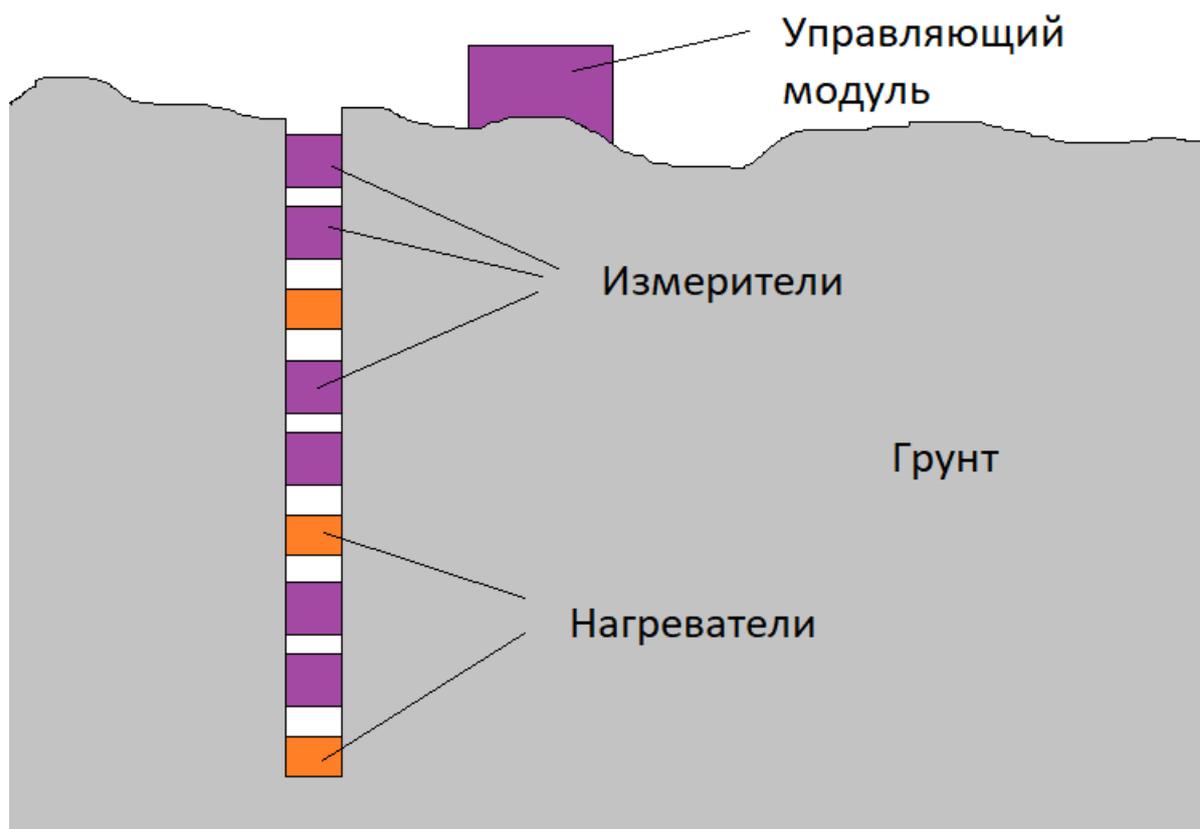


Рис. 3.1. Схема разделенного термозонда

Нагреватель состоит из: элемента питания; электронного блока управления, который отвечает за включение и выключение устройства, сбор данных о температуре и других различных показателях; термометров, измеряющих температуру устройства; омического нагревателя; передатчика, для дистанционной подачи команд электронному блоку, а также получения от него различной информации об измерениях. По команде, поданной дистанционно, будет включаться омический нагреватель и осуществляться нагрев грунта.

Измеритель состоит из: элемента питания; электронного блока управления, который отвечает за включение и выключение устройства, сбор данных о температуре и других различных показателях; термодатчиков, измеряющих температуру грунта; передатчика, для дистанционной подачи команд электронному блоку, а также получения от него различной информации об измерениях. По команде, поданной дистанционно, измеритель будет включаться и передавать данные о температуре грунта с

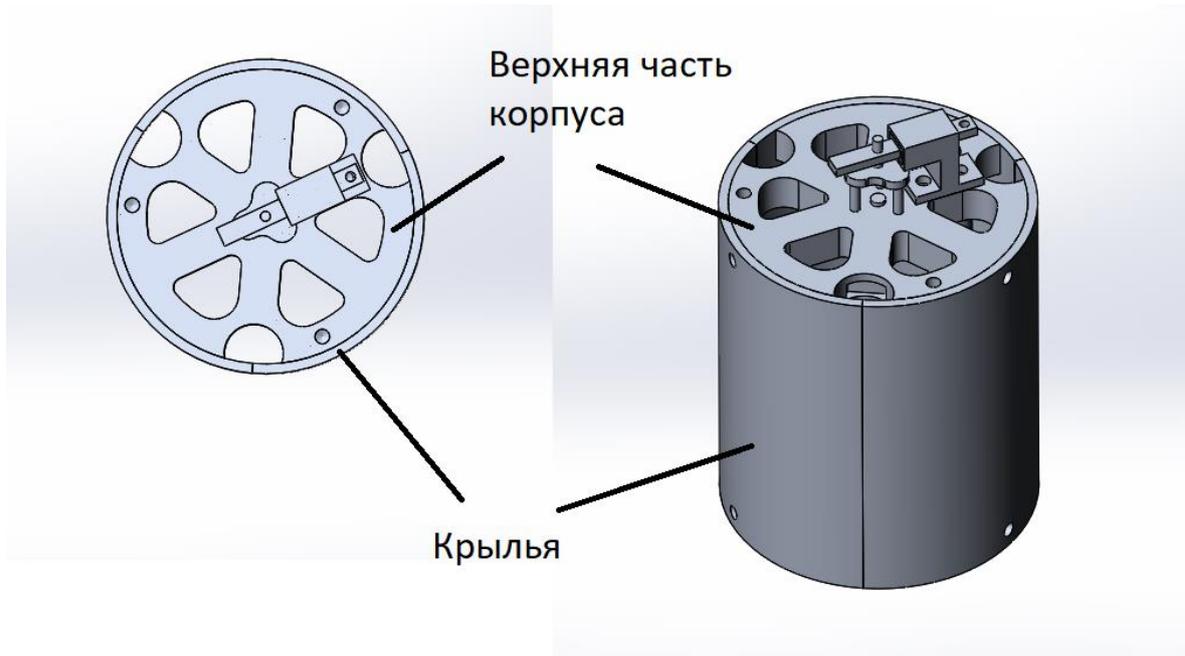
некоторой заданной периодичностью. Таким образом можно будет отслеживать распределение температуры в зависимости от времени.

Что касается измерения плотности ТП, то такой термозонд также должен показать улучшенные по точности результаты, поскольку, предположительно, несколько разделенных устройств не должны вызвать каких-либо существенных перетеканий тепла. Напротив, после того как система придет в температурное равновесие, они должны будут принять температуру окружающего их слоя, не создавая каких-либо существенных искажений.

### **3.2.2. Последовательность установки и использования разделенного термозонда. Вариант конструкции**

Поскольку разделенный термозонд обладает некоторыми особенностями установки, а именно: элементы его системы должны как-то фиксироваться в скважине, это должно отразиться на его конструкции. Один из возможных вариантов представлен ниже.

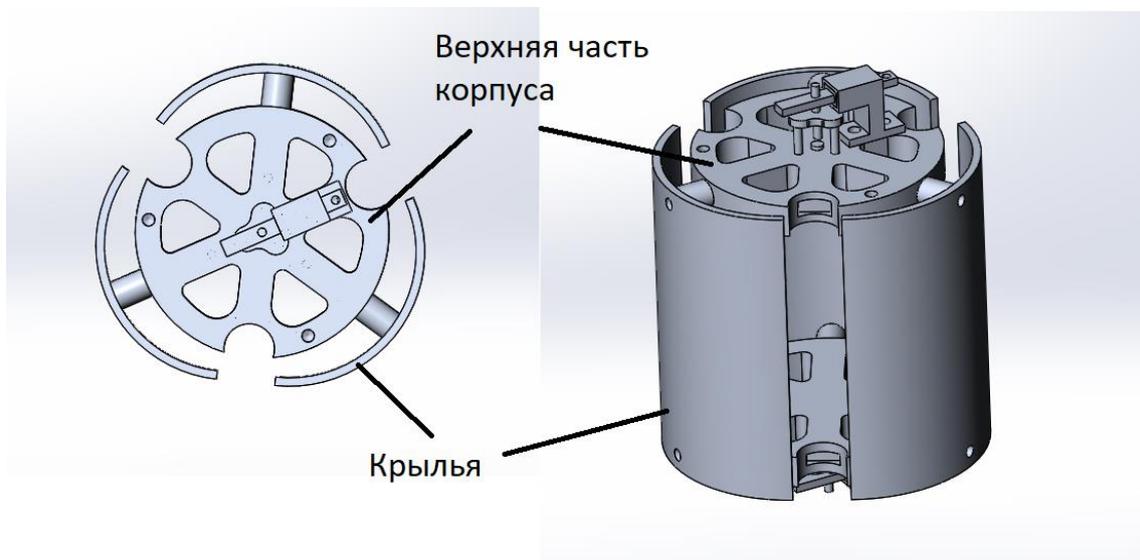
На рисунках 3.2 и 3.3 представлена конструкция одного из измерителей такого термозонда. Внутри корпуса предполагается установка элементов питания и всей остальной электроники. На так называемых крыльях устанавливаются термодатчики, скорее всего на нижней и верхней его частях.



Вид сверху

Вид сбоку

Рис. 3.2. Измеритель в транспортном положении



Вид сверху

Вид сбоку

Рис. 3.3. Измеритель в развернутом положении

Нагреватель представляет собой похожую конструкцию, с той лишь разницей, что на всей поверхности крыльев устанавливаются омические нагреватели.

В транспортном положении все элементы системы (а именно измерители и нагреватели) фиксируются на трех стержнях (рисунок 3.4).

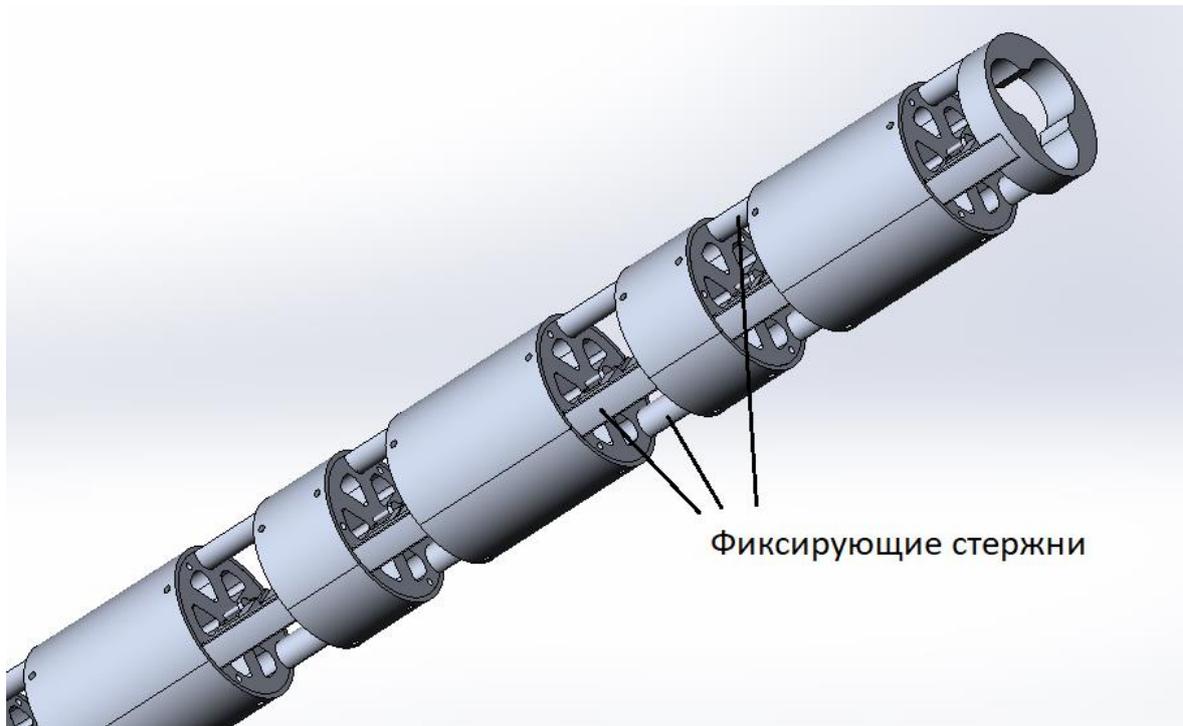


Рис. 3.4. Разделенный термозонд в транспортном положении

Элементы находятся на определенном расстоянии друг от друга (рисунок 3.5).

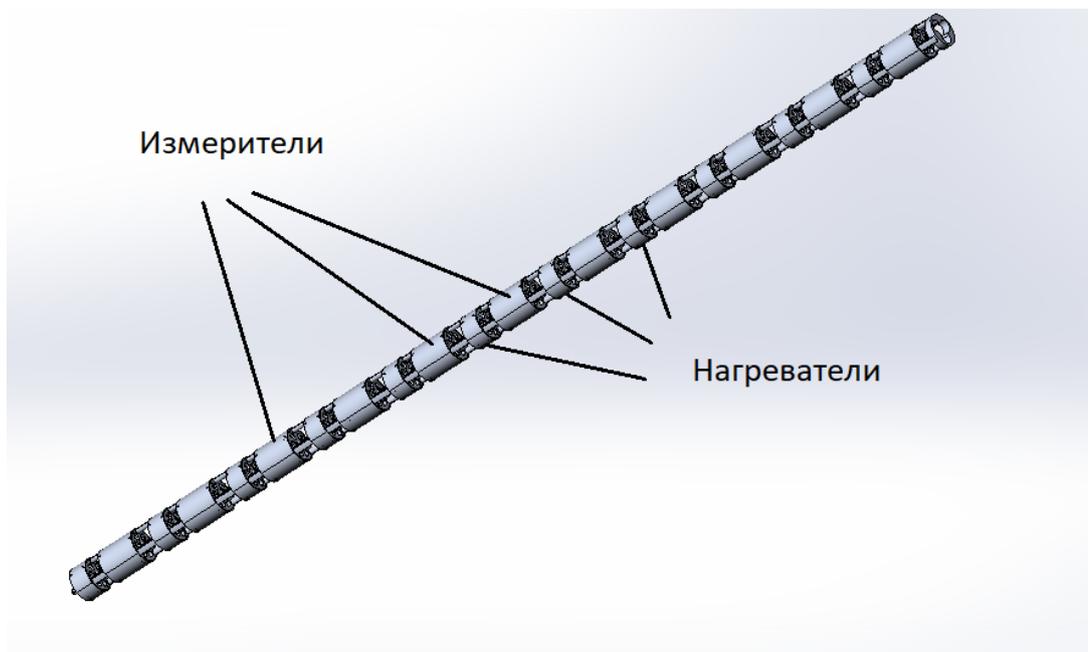


Рис. 3.5. Общий вид разделенного термозонда в транспортном положении

В фиксирующих стержнях реализован механизм зачековки раздвижных крыльев. Крылья способны раздвигаться под действием пружины, находящейся в верхних и нижних частях корпуса (рисунки 3.2, 3.3). Они необходимы, чтобы, разжимаясь в разные стороны, фиксировать элемент в скважине.

Последовательность установки зонда следующая. В заранее пробуренную скважину опускается вся конструкция. Затем расчехляются крылья на всех элементах и каждый из них фиксируется в скважине (рисунки 3.6, 3.7).

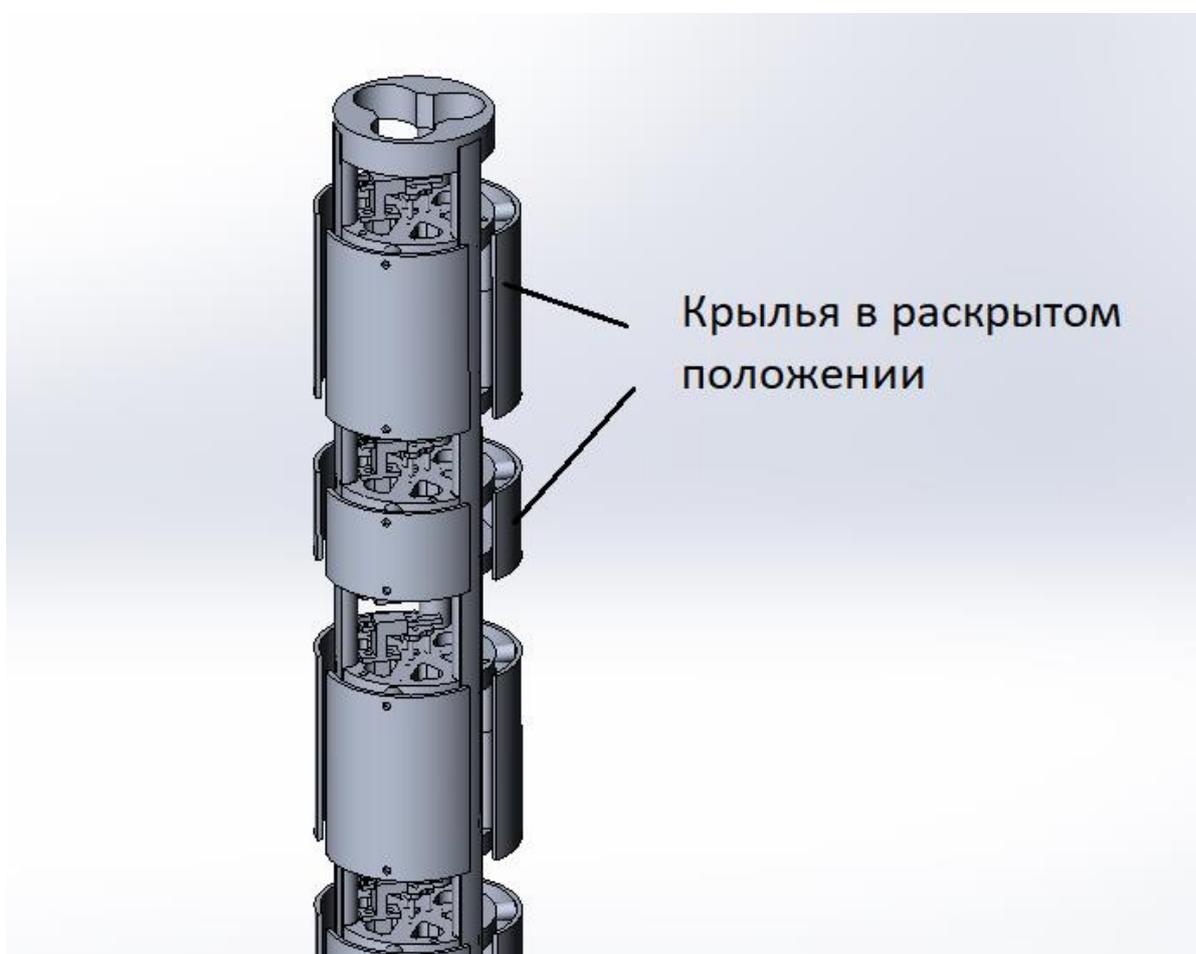


Рис. 3.6. Разделенный термозонд. Крылья в раскрытом положении

После чего срабатывает механизм фиксации каждого элемента на стержнях (спрятанный в них же), и стержни извлекаются вверх. Нагреватели и измерители остаются зафиксированными в скважине при помощи упирающихся в ее стенки крыльев (рисунки 3.6, 3.7).

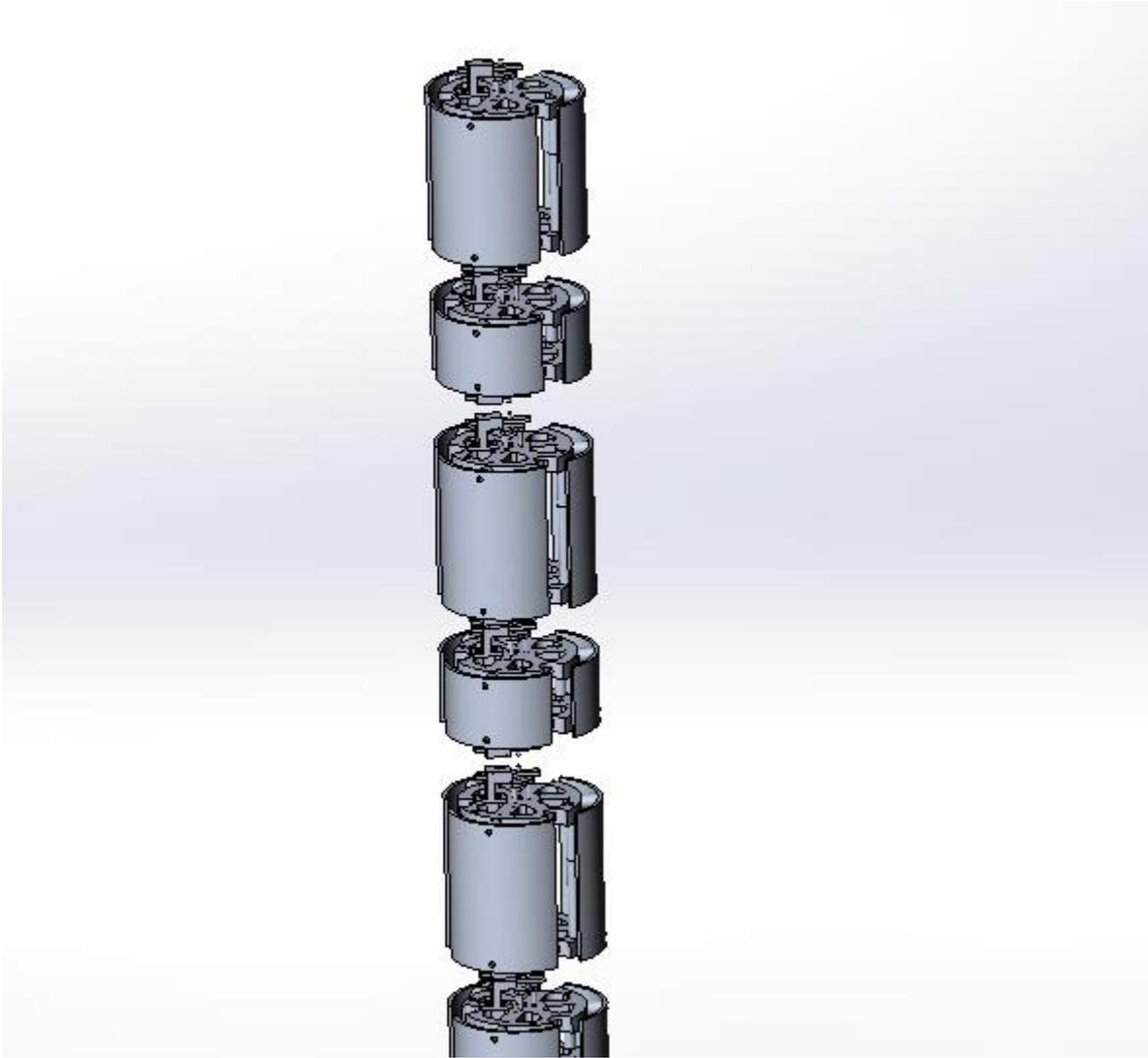


Рис. 3.7. Разделенный термозонд. Положение раскрытых элементов в скважине

Таким образом, каждый элемент системы не имеет тепловых контактов с другими.

Дополнительно для работы такого зонда понадобится управляющий модуль, установленный в непосредственной близости на поверхности (рисунок 3.1). В его задачи будет входить подача управляющих сигналов на нагреватели и измерители в скважине, прием информации от них и обмен информацией, например, с орбитальным аппаратом.

### 3.2.3. Измерение ТФХ лунного грунта с помощью разделяемого термозонда

Был проведен тепловой расчет прямой задачи теплообмена с целью выяснить распределение температуры и оценить какое влияние на него оказывает конструкция.

Исходные данные и постановка задачи приведены в таблице 3.1 и ниже:

Таблица 3.1.

Исходные данные для решения тепловой задачи

Наименование	Материал	Диаметр	Высота/Длина	Теплопроводность, Вт/(м* С°)	Теплоемкость, Дж/(кг* С°)
Измеритель (с двух сторон от нагревателя)	Нержавеющая сталь	60 мм	70 мм	15,1	434
Нагреватель	Медный сплав	60 мм	30 мм	401	385
Грунт	Грунт	-	-	0,02	600

Мощность нагревателя: 0,1 Вт;

Время нагрева: 10 часов;

Начальная температура системы: -23 °С.

Постановка задачи аналогична приведенной в пункте 2.5.

Следует сказать, что в расчетах использовались упрощенные модели нагревателя и измерителя в виде цилиндров. ТФХ грунта были взяты характерные для глубины в 1 метр. На рисунке 3.8 показано распределение температуры.

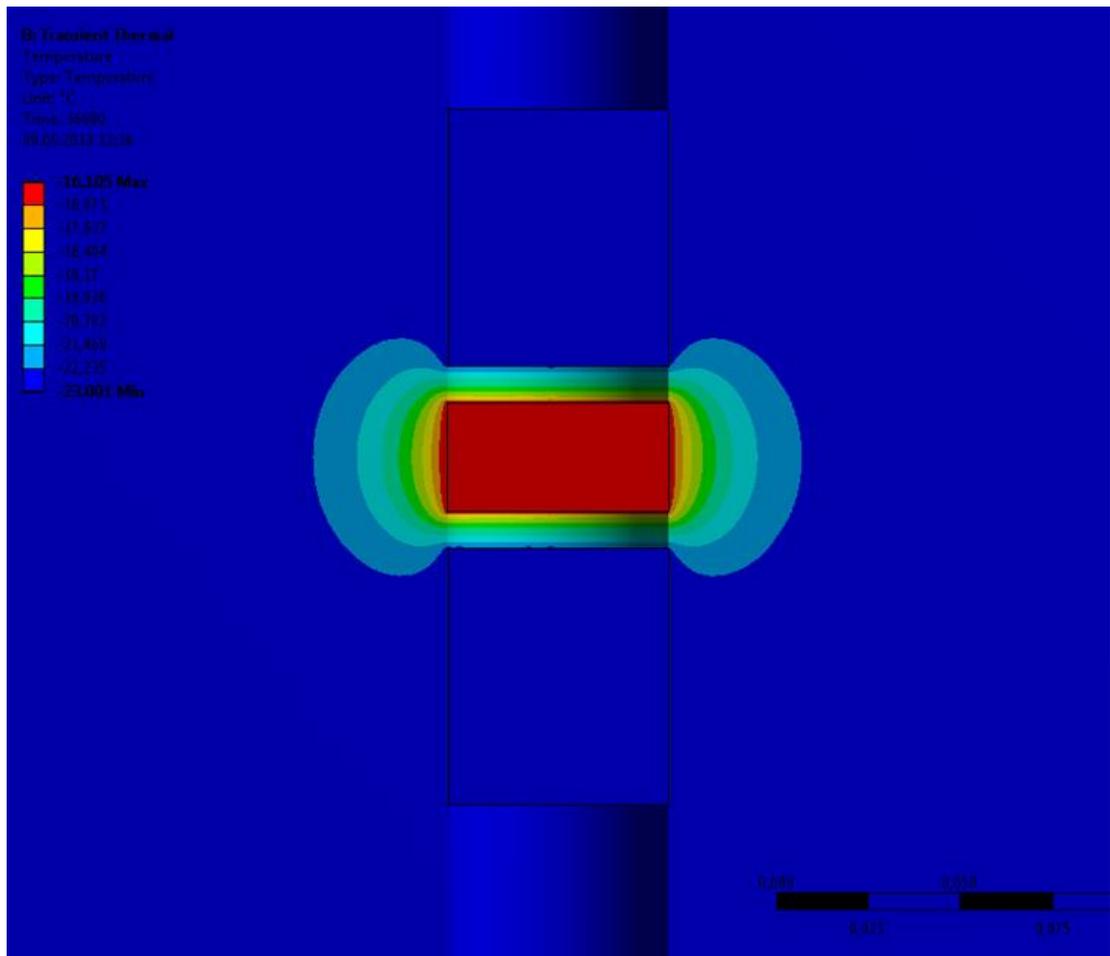


Рис. 3.8. Распределение температуры в разделяемом термозонде

Как видно из рисунка, тепло распространяется от нагревателя сначала свободно, но затем, встречаясь с измерителями, уходит в них через нижнюю кромку. Получается некоторое искажение относительно естественной картины распределения. Осталось выяснить, насколько сильно конструкция влияет на распределение тепла, что и будет показано ниже. Но сначала приведем расчет серии однотипных прямых задач теплообмена с различными величинами конечных элементов, с целью выяснить их оптимальный размер, исходя из точности решения. В таблице 3.1 приведены исходные данные, а в таблице 3.2, указанной ниже, приведены результаты расчетов.

Таблица 3.2.

Анализ точности решения тепловой задачи при выборе размера конечного элемента.

Размер конечного элемента, мм.	Минимальная температура измерителя, °С	Максимальная температура измерителя, °С
10	-22,74	-22,737
5	-22,741	-22,738
3	-22,758	-22,755
2	-22,751	-22,748

По результатам расчетов видно, что величины конечного элемента в 3 мм достаточно, чтобы получить точность результатов расчетов в одну сотую градуса Цельсия. Однако, поскольку мощность компьютера позволяет проводить подобные расчеты достаточно легко, в дальнейших расчетах выберем величину конечного элемента в 2 мм.

Максимальная температура измерителя, приведенная в таблице 3.2, находится на нижней кромке измерителя в месте контакта его с грунтом.

Для того, чтобы понять, насколько сильно конструкция влияет на распределение температуры, проведем расчет модели, в которой будет только нагреватель и не будут присутствовать измерители. Все исходные данные возьмем из таблицы 3.1. Величину конечных элементов примем равной 2 мм.

На рисунке 3.9 показано распределение температуры от нагревателя.

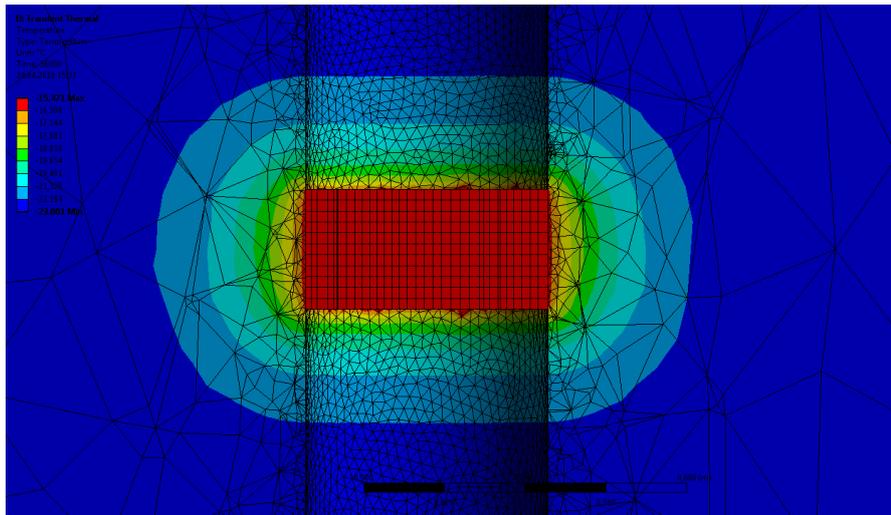


Рис. 3.9. Распределение температуры при использовании модели только с нагревателем. Разделяемый термозонд

Температура грунта в месте контакта его с нижней кромкой измерителя при использовании данной модели получилась равной минус 20,433 °С, это на 2,315 °С выше, чем «измеренная» температура в таблице 3.2.

По результатам расчета разброс температур оказался меньше, чем в рассмотренных ранее схемах термозондов. Следовательно, влияние конструкции этой схемы на распределение температуры оказалось также меньше. А это, как следствие, потенциально улучшает точность измерений ТФХ лунного грунта.

### 3.2.4. Измерение плотности внутреннего ТП Луны с помощью разделяемого термозонда

С помощью подобного термозонда можно также измерять ТП луны. Были проведены расчеты прямой стационарной задачи, с целью определить распределение температуры, которые позволят оценить влияние конструкции термозонда на точность результатов измерений.

Исходные данные примем следующие. Геометрические характеристики нагревателей и измерителей, как и характеристики материала из которого они изготовлены, приведены в таблице 3.1. Тепловой поток, как уже было сказано,  $q_6=0,0314$  Вт/м<sup>2</sup>. Модель грунта примем многослойную,

характеристики слоев приведены в таблице 1.1., степень черноты верхней поверхности грунта примем  $\varepsilon=0,72$ . Величина конечных элементов в решаемой задаче – 2 мм.

Задача решается для многослойной модели грунта, которая использовалась в задаче, описанной в разделе 1.7.3 (рисунок 1.23, таблица 1.1). Остальные условия и постановка задачи аналогичны представленным в пункте 1.7.2. Условие равенства тепловых потоков между слоями грунта аналогичны приведенным в пункте 2.7.3.

На рисунке 3.10 изображено распределение температуры по результатам решения данной задачи.

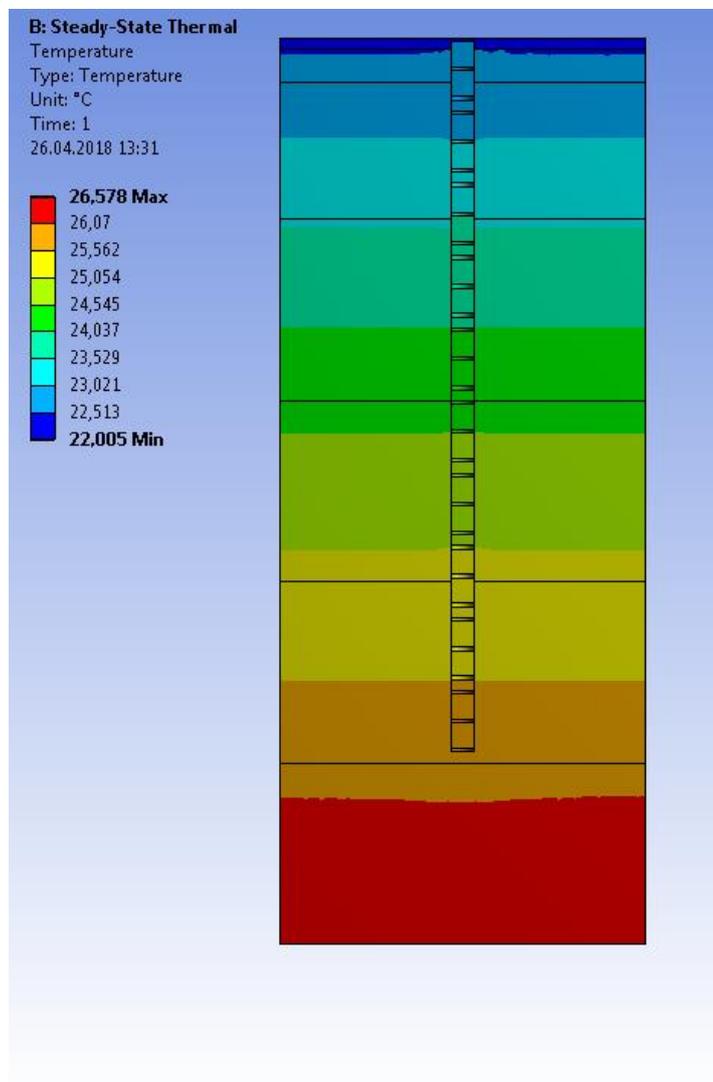


Рис. 3.10. Распределение температуры при измерении ТП Луны.

Разделяемый термозонд

Как можно наблюдать, такая схема термозонда практически не вносит каких-либо искажений в распределение температуры. Ошибка при определении теплового потока по «измеренным» данным не превышает 12% от изначально заданного.

### **3.3. Термозонд с высоким тепловым сопротивлением (ВТС)**

#### **3.3.1. Схема зонда. Принцип действия**

Анализ различных схем заглубляемых термозондов показывает, что воздействие конструкции термозонда на естественное распределение температуры в меньшей степени влияет на измерение плотности внутреннего ТП Луны, и в большей степени на определение ТФХ лунного грунта. Как показали расчеты, даже полное разделение измерителя и нагревателя в разделенном термозонде не привело к значительному снижению этого воздействия. Из-за того, что измерителям при полном отделении требуется иметь собственный аккумулятор, у них появляется достаточно большая теплоемкость. А из-за более высокой теплопроводности материала измерителя относительно грунта, они начинают забирать на себя значительную часть тепла от нагревателя. Из-за этого картина распределения температуры в нестационарной задаче сильно искажается. Следовательно, существует потребность в создании термозонда, где измеритель температуры будет максимально изолирован от нагревателя, и при этом иметь низкую теплоемкость или теплопроводность, чтобы не забирать на себя тепло от нагревателя.

Анализ и расчет различных конструкций привел к следующему решению (рисунок 3.11, 3.12).

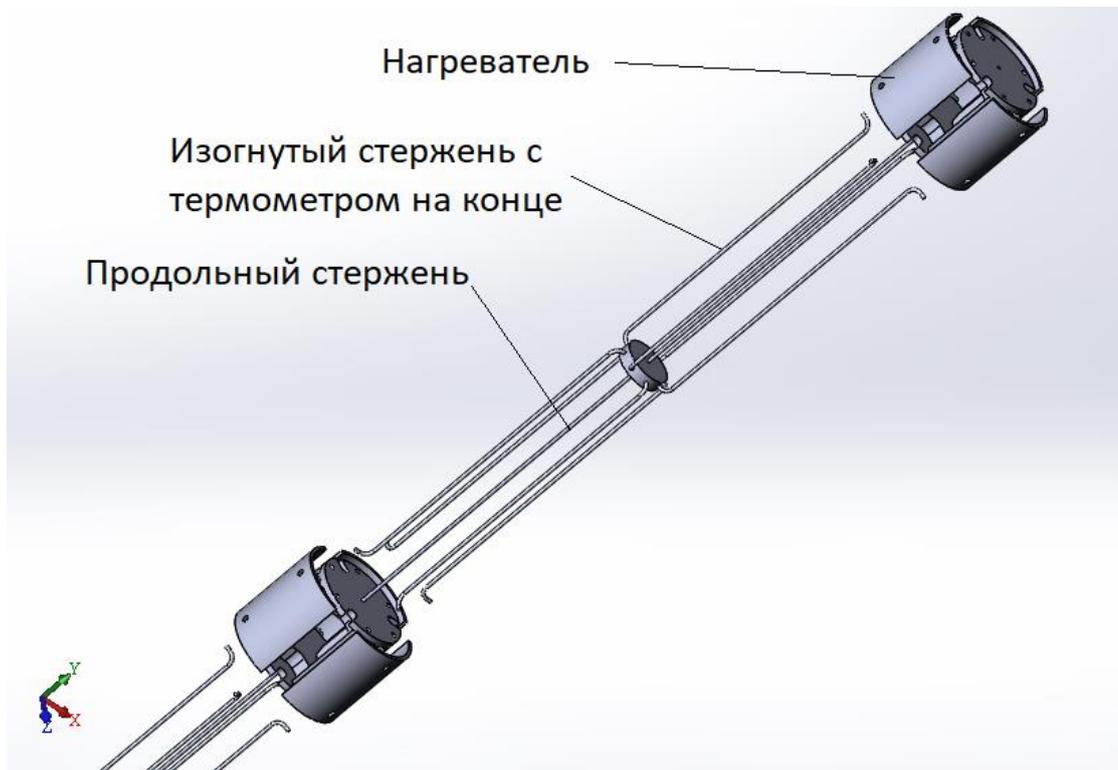


Рис. 3.11. Схема термозонда высокого теплового сопротивления



Рис. 3.12. Схема термозонда ВТС. Общий вид

Весь зонд представляет собой цельную конструкцию. Продольный стержень – соединяющий жесткий элемент. На него могут крепиться

электрические проводники для питания нагревателей и всего зонда, либо он может быть исполнен сам как проводник. Изогнутые стержни с термометром на конце – представляют из себя стеклопластиковые тонкие стержни, внутри которых вмонтирован тонкий провод. Провод, в свою очередь, соединен с термометром сопротивления на конце стержня, где осуществляется контакт с грунтом. Нагреватель имеет раскрывающиеся секторы, которые выполняют две функции: во-первых – фиксирование конструкции в скважине, во-вторых – обеспечение лучшего контакта нагревателя с грунтом.

Основная идея данной схемы заключается в следующем: создать настолько высокое тепловое сопротивление между нагревателем и термометром, чтобы прекратить взаимное их влияние друг на друга. Поскольку и продольные стержни, и изогнутые стержни достаточно тонкие и длинные, то они обладают высоким тепловым сопротивлением и низкой суммарной теплоемкостью. Материал продольного стержня – титан – выбран исходя из компромисса между низкой теплопроводностью, прочностью и высокой электропроводимостью.

Термозонд изначально должен находиться в специальной конструкции в форме трубы, защищающей термозонд при установке его в скважину. После установки эта защитная конструкция извлекается, раскрываются крылья нагревателей, и термозонд фиксируется в скважине. Термометры прилегают к грунту за счет упругости гибких изогнутых стержней, на которых они крепятся.

### **3.3.2. Измерение ТФХ лунного грунта с помощью термозонда ВТС. Влияние конструкции зонда на распределение температуры**

Был проведен расчет прямой задачи теплопроводности, целью которого было выяснить распределение температуры, и оценить, какое влияние на него оказывает конструкция.

Исходные данные и постановка задачи приведены в таблице 3.3 и ниже:

Таблица 3.3.

## Исходные данные для решения тепловой задачи

Наименование	Материал	Диаметр	Высота/Длина	Теплопроводность, Вт/(м* С°)	Теплоемкость, Дж/(кг* С°)
Изогнутый стержень термометра	Стеклопластик	1 мм	100 мм	0,4	1000
Нагреватель	Медный сплав	30 мм	30 мм	401	385
Продольный стержень	Титан	1 мм	110 мм	21,9	523
Грунт	Грунт	-	-	0,02	600

Мощность нагревателя: 0,1 Вт;

Время нагрева: 10 часов;

Начальная температура системы: -23 °С.

Пусть задана некоторая область  $S(x', y', z')$  трехмерного пространства  $E_3(x, y, z)$ . При этом:  $0 < x' < x_1$ ;  $0 < y' < y_1$ ;  $0 < z' < z_1$  (рисунок 3.13).

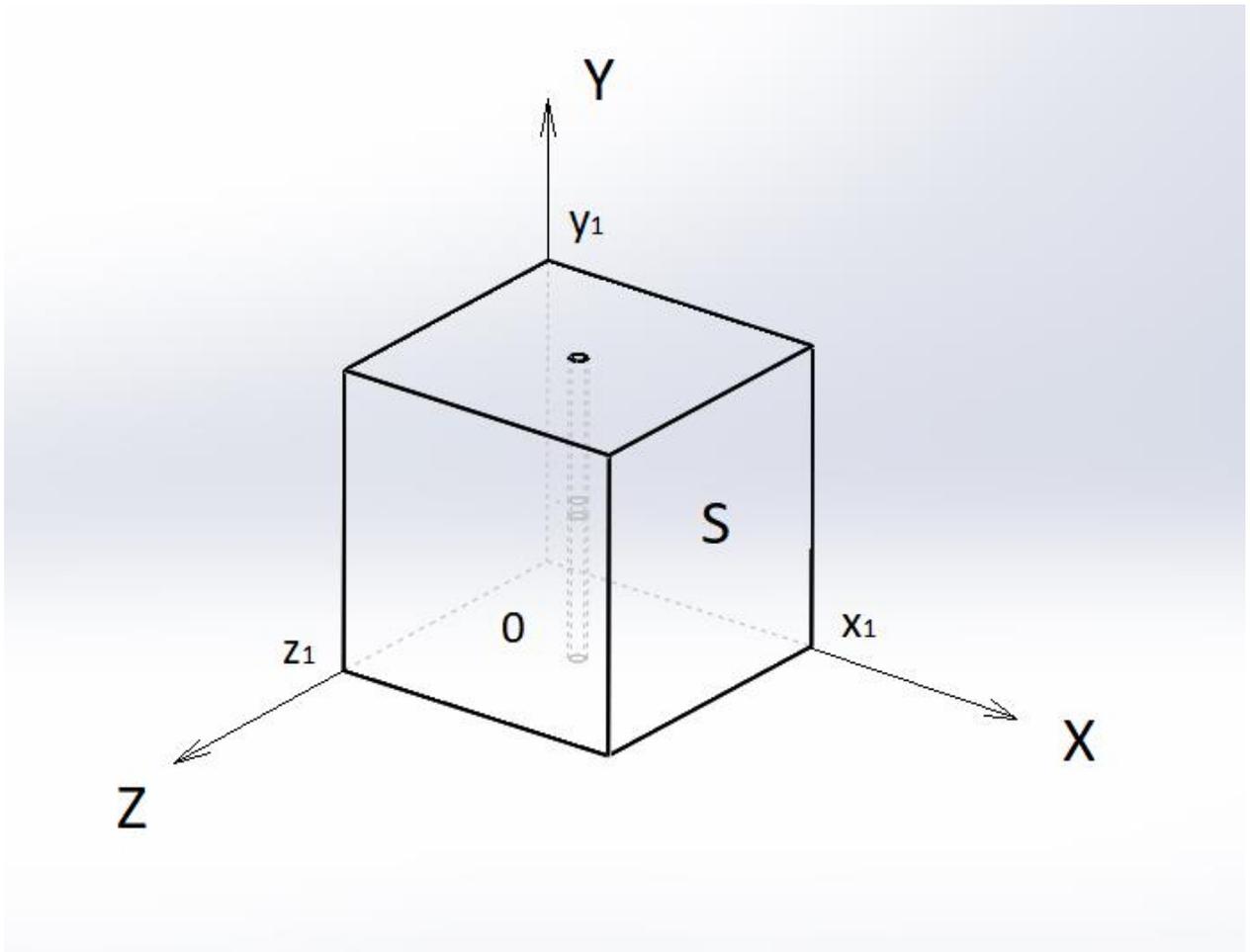


Рис. 3.13. Области пространства, используемые при постановке задачи

Внутри области  $S$  находится участок грунта и термозонд. При этом, несмотря на то что этот участок грунта конечен, его размеры настолько велики, что позволяют имитировать бесконечное тело.

В центре участка грунта находится термозонд. Он состоит из нагревателя, двух продольных стержней, двух переходников, и восьми изогнутых стержней. На рисунке 3.14 изображена область  $S$  в разрезе, на которой показан термозонд.

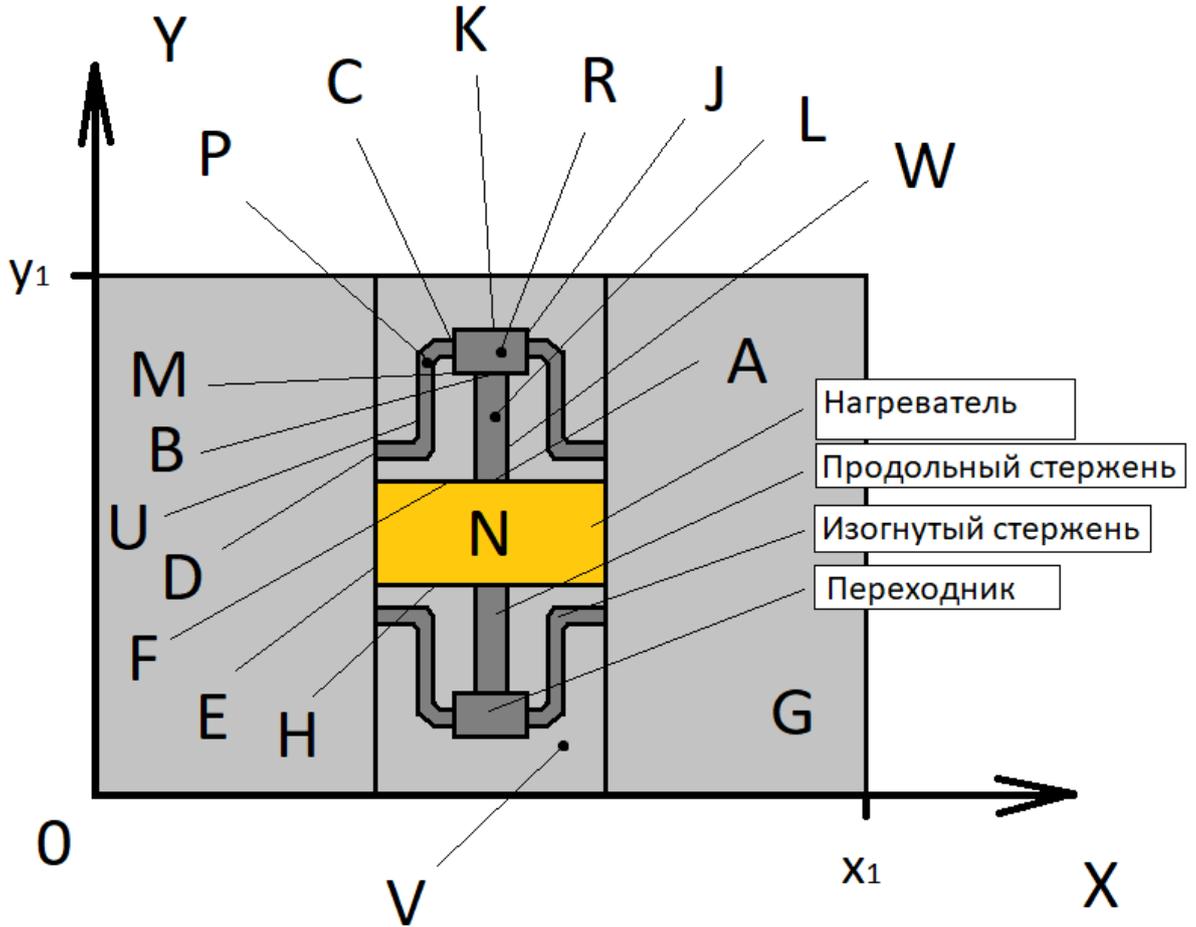


Рис. 3.14. Трехмерные тела, используемые в математической постановке задачи. Буквами показаны различные поверхности

Вся система состоит из 14 тел: грунта, нагревателя, двух продольных стержней, двух переходников и восьми изогнутых стержней.

Уравнения теплопроводности.

Уравнение теплопроводности для нагревателя:

$$\frac{\partial T(N_1; \tau)}{\partial \tau} = a_n \left( \frac{\partial^2 T(N_1; \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(N_1; \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(N_1; \tau)}{\partial z^2} \right) + \frac{Q(N_1; \tau)}{C_{vH}};$$

$$Q(N_1; \tau) = Const = 0,1 \text{ Вт};$$

$$(\tau \geq 0; N_1 \in N).$$

Здесь  $N$  – область пространства, занятая нагревателем,  $a_n$  – температуропроводность нагревателя,  $C_{vh}$  – объемная теплоемкость нагревателя,  $Q$  – мощность нагревателя.

Уравнение теплопроводности для грунта:

$$\frac{\partial T(G_1; \tau)}{\partial \tau} = a_r \left( \frac{\partial^2 T(G_1; \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(G_1; \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(G_1; \tau)}{\partial z^2} \right);$$

$$(\tau \geq 0; G_1 \in G).$$

Здесь  $G$  – область пространства, занятая грунтом,  $a_z$  – температуропроводность грунта.

Уравнение теплопроводности для изогнутого стержня:

$$\frac{\partial T(P_1; \tau)}{\partial \tau} = a_u \left( \frac{\partial^2 T(P_1; \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(P_1; \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(P_1; \tau)}{\partial z^2} \right);$$

$$(\tau \geq 0; P_1 \in P).$$

Здесь  $P$  – область пространства, занятая изогнутым стержнем,  $a_u$  – температуропроводность изогнутого стержня (рисунок 3.14).

Уравнение теплопроводности для переходника:

$$\frac{\partial T(R_1; \tau)}{\partial \tau} = a_n \left( \frac{\partial^2 T(R_1; \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(R_1; \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(R_1; \tau)}{\partial z^2} \right);$$

$$(\tau \geq 0; R_1 \in R).$$

Здесь  $R$  – область пространства, занятая переходником,  $a_n$  – температуропроводность переходника (рисунок 3.14).

Уравнение теплопроводности для продольного стержня:

$$\frac{\partial T(L_1; \tau)}{\partial \tau} = a_{пр} \left( \frac{\partial^2 T(L_1; \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(L_1; \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(L_1; \tau)}{\partial z^2} \right);$$

$$(\tau \geq 0; L_1 \in L).$$

Здесь  $L$  – область пространства, занятая продольным стержнем,  $a_{np}$  – температуропроводность продольного стержня (рисунок 3.14).

Аналогично записываются уравнения для всех остальных изогнутых стержней, для второго продольного стержня и второго переходника.

Граничные и начальные условия.

Условие равенства тепловых потоков и температур на границе грунта и нагревателя:

$$\lambda_{гр} \frac{\partial T}{\partial i_E} |_{E_{гр}} = \lambda_n \frac{\partial T}{\partial i_E} |_{E_n};$$

$$T|_{E_{гр}} = T|_{E_n};$$

где  $E_{гр}$  – поверхность грунта, контактирующая с нагревателем;  $E_n$  – поверхность нагревателя, контактирующая с грунтом;  $i_E$  – нормаль к поверхности  $E$ ;  $\lambda_n$  – теплопроводность нагревателя;  $\lambda_{гр}$  – теплопроводность грунта (рисунок 3.14).

Условие равенства тепловых потоков и температур на границе нагревателя и продольного стержня:

$$\lambda_n \frac{\partial T}{\partial i_A} |_{A_n} = \lambda_{np} \frac{\partial T}{\partial i_A} |_{A_{np}};$$

$$T|_{A_n} = T|_{A_{np}};$$

где  $A_n$  – поверхность нагревателя, контактирующая с продольным стержнем;  $A_{np}$  – поверхность продольного стержня, контактирующая с нагревателем;  $i_A$  – нормаль к поверхности  $A$ ;  $\lambda_n$  – теплопроводность нагревателя;  $\lambda_{np}$  – теплопроводность продольного стержня (рисунок 3.14).

Условие равенства тепловых потоков и температур на границе продольного стержня и переходника:

$$\lambda_{np} \frac{\partial T}{\partial i_B} |_{B_{np}} = \lambda_n \frac{\partial T}{\partial i_B} |_{B_n};$$

$$T|_{B_{np}} = T|_{B_n};$$

где  $B_{np}$  – поверхность продольного стержня, контактирующая с переходником;  $B_n$  – поверхность переходника, контактирующая с продольным стержнем;  $i_B$  – нормаль к поверхности  $B$ ;  $\lambda_n$  – теплопроводность переходника (рисунок 3.14).

Условие равенства тепловых потоков и температур на границе переходника и изогнутого стержня:

$$\lambda_u \frac{\partial T}{\partial i_C} |_{C_u} = \lambda_n \frac{\partial T}{\partial i_C} |_{C_n};$$

$$T|_{C_u} = T|_{C_n};$$

где  $C_u$  – поверхность изогнутого стержня, контактирующая с переходником;  $C_n$  – поверхность переходника, контактирующая с изогнутым стержнем;  $i_C$  – нормаль к поверхности  $C$ ;  $\lambda_u$  – теплопроводность изогнутого стержня (рисунок 3.14).

Условие равенства тепловых потоков и температур на границе изогнутого стержня и грунта:

$$\lambda_u \frac{\partial T}{\partial i_D} |_{D_u} = \lambda_{gp} \frac{\partial T}{\partial i_D} |_{D_{gp}};$$

$$T|_{D_u} = T|_{D_{gp}};$$

где  $D_u$  – поверхность изогнутого стержня, контактирующая с грунтом;  $D_{gp}$  – поверхность грунта, контактирующая с изогнутым стержнем;  $i_D$  – нормаль к поверхности  $D$ ;  $\lambda_{gp}$  – теплопроводность грунта (рисунок 3.14).

Условие нулевого теплового потока на нижней поверхности нагревателя:

$$\lambda_n \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_H = 0;$$

где  $H$  – нижняя поверхность нагревателя, за исключением части поверхности, контактирующей с нижним продольным стержнем.

Условие нулевого теплового потока на верхней поверхности нагревателя:

$$\lambda_n \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_F = 0;$$

где  $F$  – верхняя поверхность нагревателя, причем  $A \not\subset F$ .

Условие нулевого теплового потока на боковой поверхности продольного стержня:

$$\lambda_{\text{пр}} \frac{\partial T}{\partial i_W} \Big|_W = 0;$$

где  $W$  – боковая поверхность продольного стержня;  $i_W$  – нормаль к поверхности  $W$ .

Условие нулевого теплового потока на нижней поверхности переходника:

$$\lambda_n \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_M = 0;$$

где  $M$  – верхняя поверхность нагревателя, причем  $B \not\subset M$ .

Условие нулевого теплового потока на верхней поверхности переходника:

$$\lambda_n \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_K = 0;$$

где  $K$  – верхняя поверхность переходника.

Условие нулевого теплового потока на боковой поверхности переходника:

$$\lambda_n \frac{\partial T}{\partial i_J} \Big|_J = 0;$$

Где  $i_j$  – нормаль к поверхности  $J$ ;  $J$  – боковая поверхность переходника, причем  $C \notin J$ . Также  $J$  не включает в себя и другие подобные поверхности, где происходит контакт с изогнутыми стержнями.

Условие нулевого теплового потока на боковой поверхности изогнутого стержня:

$$\lambda_{и} \frac{\partial T}{\partial i_U} |_U = 0;$$

где  $U$  – боковая поверхность изогнутого стержня;  $i_U$  – нормаль к поверхности  $U$ .

Такие же граничные условия записываются и для других подобных поверхностей на аналогичных элементах.

Условие нулевого теплового потока на внутренней поверхности скважины, не контактирующей с элементами термозонда:

$$\lambda_{гр} \frac{\partial T}{\partial i_V} |_V = 0;$$

где  $V$  – внутренняя поверхность скважины, причем  $E \notin V$ ,  $D \notin V$ . Также в поверхность  $V$  не включаются и другие части поверхности скважины, контактирующие с элементами термозонда.

Условие нулевого теплового потока на границах области  $S$ :

$$\lambda_{гр} \frac{\partial T(0, y, z, \tau)}{\partial x} = 0;$$

$$\lambda_{гр} \frac{\partial T(x, 0, z, \tau)}{\partial y} = 0;$$

$$\lambda_{гр} \frac{\partial T(x, y, 0, \tau)}{\partial z} = 0;$$

$$\lambda_{гр} \frac{\partial T(x_1, y, z, \tau)}{\partial x} = 0;$$

$$\lambda_{\text{гр}} \frac{\partial T(x, y_1, z, \tau)}{\partial y} = 0;$$

$$\lambda_{\text{гр}} \frac{\partial T(x, y, z_1, \tau)}{\partial z} = 0;$$

Условие начальной температуры:

$$T(x, y, z, 0) = T_0 = \text{const.}$$

Следует сказать, что в расчетах использовались упрощенные модели нагревателя в форме цилиндра и продольного цилиндрического стержня. ТФХ грунта были взяты характерными для глубины в 1 метр. На рисунках 3.15, 3.16 показано распределение температуры в термозонде и окружающем грунте по результатам решения задачи теплопроводности.

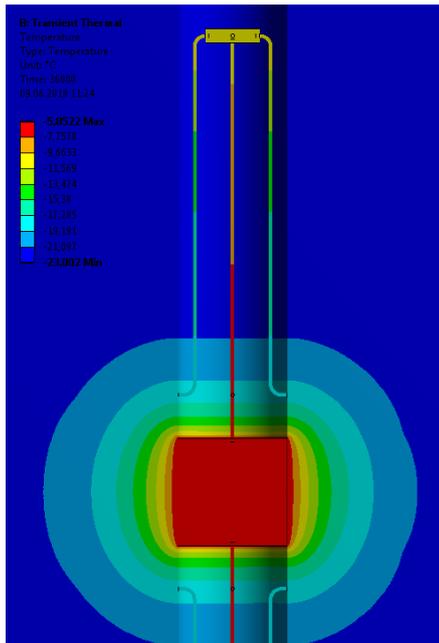


Рис. 3.15. Распределение температуры. Термозонд ТС

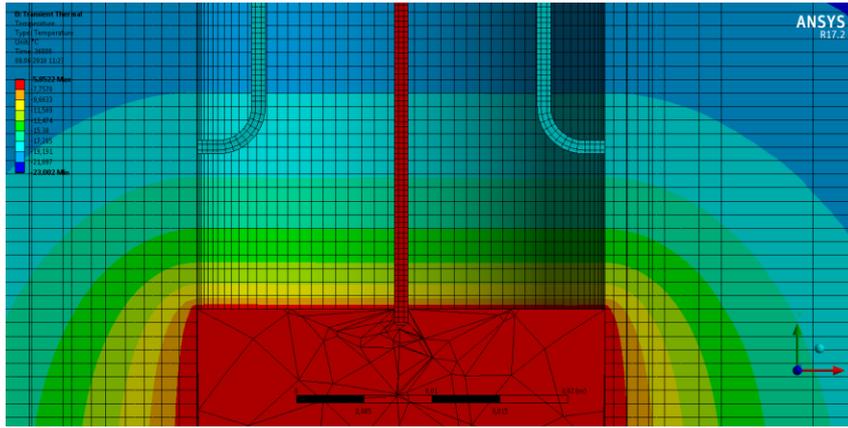


Рис. 3.16. Распределение температуры. Термозонд ВТС. Зона термометров

Как видно из рисунков, такая схема термозонда практически не искажает картину распространения тепла от нагревателя.

Проведем расчет серии однотипных прямых задач теплопроводности с различными размерами конечных элементов, с целью выяснить их оптимальную величину исходя из точности решения. В таблице 3.3 приведены исходные данные, а в таблице 3.4 приведены результаты расчетов.

Таблица 3.4.

Анализ точности решения тепловой задачи при выборе размера конечного элемента

Размер конечного элемента, мм.	Температура на контакте термометра с грунтом, °С
10	-17,791
5	-18,084
3	-18,074
1	-17,977

Примем для дальнейших расчетов размер конечного элемента в 1 мм, что дает точность расчетов около 0,15 °С.

Для того, чтобы понять, насколько сильно конструкция влияет на распределение температуры, проведем расчет модели, в которой будет только нагреватель и не будут присутствовать остальные элементы конструкции. Все исходные данные возьмем из таблицы 3.3. Величину конечных элементов примем равной 1 мм.

На рис. 3.17 показаны распределения температур по результатам решения задач для первой и второй модели.

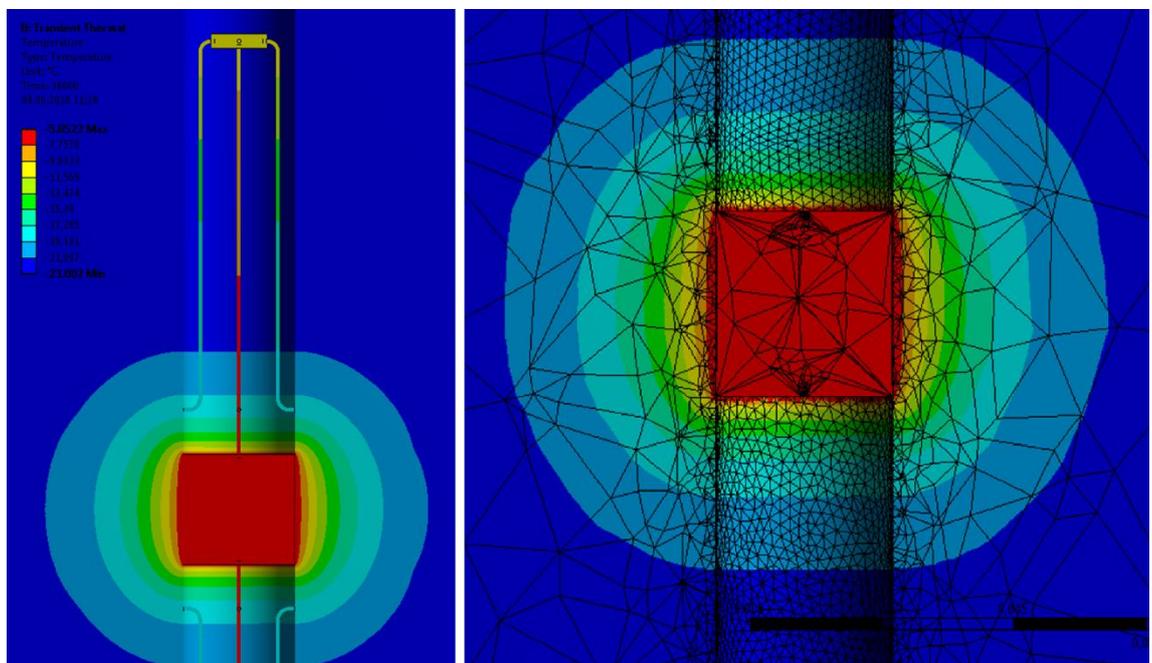


Рис. 3.17. Распределение температуры. Термозонд ВТС. Слева – расчет модели со всеми элементами конструкции; справа – расчет модели в которой оставлен только нагреватель.

Как видно из рисунка 3.17, картина распределения температуры при использовании термозонда ВТС и при исключении его конструкции из задачи практически идентична. Это говорит о том, что подобная схема зонда почти не вносит искажений в распределение температуры при его использовании.

В модели со всеми элементами конструкции температура в месте контакта термодатчика и грунта составила  $-17,98\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; тогда как в модели, где оставлен только нагреватель при тех же условиях температура составила  $-18,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Отклонения показаний температуры из-за влияния конструкции термозонда составили всего  $0,17\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Для решения обратной задачи теплообмена это является достаточно низким отклонением, позволяющим с высокой точностью определять ТФХ лунного грунта.

Для сравнения на рисунке 3.18 представлены такие же расчеты, для стержневого термозонда, описанного в предыдущей главе, который использовался в миссиях «Аполлон».

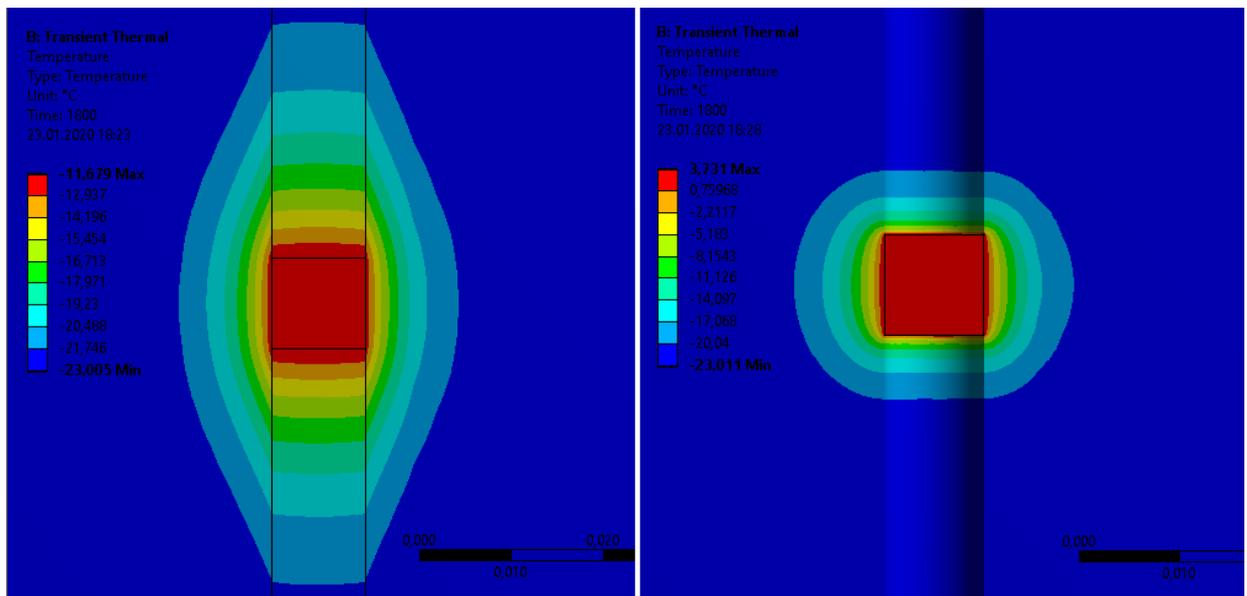


Рис. 3.18. Распределение температуры. Стержневой термозонд. Слева – расчет модели со всеми элементами конструкции; справа – расчет модели, в которой оставлен только нагреватель.

Как можно видеть из рисунка 3.18 результаты значительно хуже. Стержневой термозонд вносит существенные искажения в распределение температуры. В модели со всеми элементами конструкции температура в месте контакта термодатчика и грунта составила  $-15,59\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; тогда как в модели, где оставлен только нагреватель при тех же условиях температура

составила  $-18,67$  °С. Отклонения показаний температуры из-за влияния конструкции термозонда составили  $3,1$  °С.

### **3.3.3. Моделирование определения ТФХ. Сравнение с аналогом**

Моделирование операции определения ТФХ лунного грунта посредством термозонда с высоким тепловым сопротивлением будем проводить в сравнении с ближайшим аналогом – стержневым проникающим термозондом, использовавшимся в миссиях Аполлон, описанным в предыдущих главах [13, 26].

Для повышения достоверности результатов в расчетах будем учитывать тепловое сопротивление на контактах термозонда и грунта. Надо оговориться, что тепловое сопротивление на контакте термозонда и грунта может вносить значительные погрешности в измерения, поскольку этот параметр изначально неизвестен. Отсюда можно сделать вывод, что конструкция зонда должна быть такой, которая минимизирует влияние этого параметра.

Проведем серию оценочных расчетов всей конструкции двух термозондов с различными тепловыми сопротивлениями на контактах термозонда и грунта. Цель этой серии расчетов – понять перепад температуры в зоне контакта термометра и грунта. Два значения температуры измеряется практически в одной и той же точке, только одно значение температуры – со стороны термометра, а второе – со стороны грунта. В вычислениях будем использовать различные значения теплопроводности и теплоемкости грунта.

Исходные условия задачи примем для каждой из моделей такими же, как были использованы в расчетах выше.

Для термозонда ВТС величину конечных элементов примем  $1$  мм (таблица 3.4), начальные условия задачи возьмем из таблицы 3.3. При этом ТФХ грунта будут варьироваться. Мощность нагревателя будет  $0,1$  Вт; время

нагрева - 10 часов; начальная температура системы - минус 23 °С, расстояние от нагревателя до термометра 12 мм.

Постановка задачи и исходные данные аналогичны приведенным выше.

В таблицах А.5, А.6, А.7 приложения А приведены решения задачи для стержневого термозонда. В таблицах А.8, А.9, А.10 приложения А – решения для термозонда ВТС.

Как можно заметить, по результатам расчетов, при различных тепловых сопротивлениях схема термозонда, которая использовалась в миссиях Аполлон, показывает разницу температур на контакте термометра и грунта до 1,5 °С. В свою очередь, предлагаемая схема термозонда ВТС в самом худшем случае дает разницу до 0,35 °С.

Следовательно, термозонд ВТС не только меньше подвержен искажению температурного поля от влияния конструкции, но также менее зависим от таких факторов, как, например, влияние теплового сопротивления на контакте термозонда и грунта. Величину подобных факторов сложно предсказать, и, как следствие, затруднительно ввести в математическую модель.

Проведем моделирование определения ТФХ грунта с помощью двух выбранных схем зондов. Исходя из сказанного выше, реализуем серию расчетов изолированного нагревателя у каждой схемы, без влияния конструкции на распределение температуры. То есть будем использовать максимально простую модель, в которой не учитываются дополнительные факторы. Далее сопоставим эти данные с «измеренными», которые можно взять из таблиц 3.5-3.10, и, на основании этих данных, сделаем вывод о точности определения ТФХ грунта с помощью каждой из схем, и устойчивости их к случайным искажающим факторам.

Первое, что необходимо знать в этом процессе имитационного моделирования – это «измеренную» температуру термометром. Предположим, что окружающий грунт имеет теплопроводность 0,02 Вт/(м\*°С), теплоемкость 600 Дж/(кг\*°С), а сопротивление на контакте зонд-грунт

0,001 (м<sup>2</sup> °С)/Вт. Однако эти данные нам «неизвестны». Все, что есть на данном этапе – это «измеренные» температуры, мощность нагревателя, время нагрева, все геометрические параметры системы. Для термозонда ВТС – минус 17,9639 °С (таблица 3.9); для стержневого термозонда – минус 15,3858 °С (таблица 3.6).

Серию расчетов с нагревателями проведем двумя этапами. Сначала грубый расчет с большими интервалами между значениями теплопроводности и теплоемкости, затем, в выбранной области будет рассматриваться более узкий диапазон. Все расчеты реализуем также, как и ранее, для различных значений теплового сопротивления на контактах.

Сначала рассмотрим расчеты для стержневого проникающего термозонда, которые приведены в приложении А (таблицы А.11-А.13).

Как видно из расчетов, наиболее близкая точка по температуре к «измеренной» (-15,3858 °С) – это точка №2 со значением теплопроводности 0,01 Вт/(м\* °С), и теплоемкости 300 Дж/(кг\* °С) во всех трех таблицах (таблица 3.11-3.13). Эти значения достаточно близки по теплопроводности, однако весьма далеки по значению теплоемкости. Поскольку данная точка далека от истинной, последующий расчет в ее окрестности не имеет смысла. Здесь также стоит отметить, что разброс в значении «измеренной» температуры может достигать 1,5 °С, что дополнительно усложняет задачу поиска правильного решения.

Далее рассмотрим расчет для термозонда ВТС (приложение А таблицы А.14-А.16).

Значение «измеренной» теплопроводности равно минус 17,9639 °С. Наиболее близко в расчетах к данному значению во всех трех таблицах (таблицы 3.14-3.16) точка №7 со значением теплопроводности 0,01 Вт/(м\* С°), и теплоемкости 600 Дж/(кг\* С°).

На следующем этапе проведем расчет с меньшим шагом по ТФХ в окрестностях этой точки (приложение А, таблицы А.17-А.19).

Как видно из расчетов, наиболее близкие по значению температуры точки №8 и №12 во всех трех таблицах (таблицы 3.17-3.19). Решение №8 со значениями теплопроводности  $0,02 \text{ Вт}/(\text{м}^* \text{ }^\circ\text{C})$  и теплоемкости  $600 \text{ Дж}/(\text{кг}^* \text{ }^\circ\text{C})$  отражает искомые изначально заданные ТФХ грунта. Решение № 12 со значениями теплопроводности  $0,015 \text{ Вт}/(\text{м}^* \text{ }^\circ\text{C})$ , и теплоемкости  $700 \text{ Дж}/(\text{кг}^* \text{ }^\circ\text{C})$  является еще одним решением ОЗТ. Характеристики ТФХ грунта в точке 12 не соответствуют изначально заданным, однако являются к ним достаточно близкими. При этом в прямой задаче изначально заданные значения теплопроводности были  $0,02 \text{ Вт}/(\text{м}^* \text{ }^\circ\text{C})$ , и теплоемкости  $600 \text{ Дж}/(\text{кг}^* \text{ }^\circ\text{C})$ .

Результаты имитационного моделирования для стержневого термозонда и для термозонда ВТС представлены в таблицах 3.5 и 3.6:

Таблица 3.5.

Результаты имитационного моделирования для стержневого термозонда

	«Измеренная» температура и заданные характеристики ТФХ	Решения, полученные при решении ОЗТ теплопроводности
Температура в месте установки термометра	$-15,3858 \text{ }^\circ\text{C}$	$-17,3297^\circ\text{C}$
Теплопроводность грунта	$0,02 \text{ Вт}/(\text{м}^* \text{ }^\circ\text{C})$	$0,01 \text{ Вт}/(\text{м}^* \text{ }^\circ\text{C})$
Теплоемкость грунта	$600 \text{ Дж}/(\text{кг}^* \text{ }^\circ\text{C})$	$300 \text{ Дж}/(\text{кг}^* \text{ }^\circ\text{C})$

Таблица 3.6.

## Результаты имитационного моделирования для термозонда ВТС

	«Измеренная» температура и заданные характеристики ТФХ	Решения, полученные при решении ОЗТ теплопроводности (два наиболее близких решения)	
Температура в месте установки термометра	-17,9639 °С	-18,0389	-17,9756
Теплопроводность грунта	0,02 Вт/(м* °С)	0,02 Вт/(м* °С)	0,015 Вт/(м* °С)
Теплоемкость грунта	600 Дж/(кг* °С)	600 Дж/(кг* °С)	700 Дж/(кг* °С)

Как видно из результатов численного эксперимента, термозонд ВТС показал значительно более высокую точность чем стержневой термозонд при решении ОЗТ теплопроводности.

В реальном эксперименте скорее всего придется проводить дальнейший разносторонний анализ, учитывающий, например, изменение температуры термометров с течением времени, сопротивление на контактах термометров и нагревателей с грунтом, и другие факторы.

Несмотря на это, по результатам численного моделирования, данный подход в совокупности с термозондом ВТС показал эффективность при определении ТФХ лунного грунта.

### 3.3.4. Измерение плотности внутреннего ТП Луны с помощью термозонда ВТС

С помощью подобного термозонда можно также измерять плотность внутреннего теплового потока Луны. Проведем расчеты прямой стационарной задачи, с целью определить распределение температуры, которые позволят оценить влияние конструкции термозонда на точность результатов измерений.

Исходные данные примем следующие. Геометрические характеристики нагревателей и измерителей, как и характеристики материала из которого они изготовлены, приведены в таблице 3.3. Тепловой поток, как уже было сказано,  $q_0=0,0314$  Вт/м<sup>2</sup>. Модель грунта примем многослойную, характеристики слоев приведены в таблице 1.1. Степень черноты верхней поверхности грунта примем  $\varepsilon=0,72$ . Величина конечных элементов в решаемой задаче – 1 мм.

Так как задача решается для многослойной модели грунта, которая использовалась в задаче, описанной в разделе 1.7.3 (рисунок 1.25, таблица 1.1), условие теплового потока на нижнем слое, условие равенства тепловых потоков на границах слоев грунта, условие излучения с поверхности грунта и условие начальной температуры примем такими же. Постановку задачи примем аналогичной.

На рисунке 3.19 изображено распределение температуры по результатам решения данной задачи.

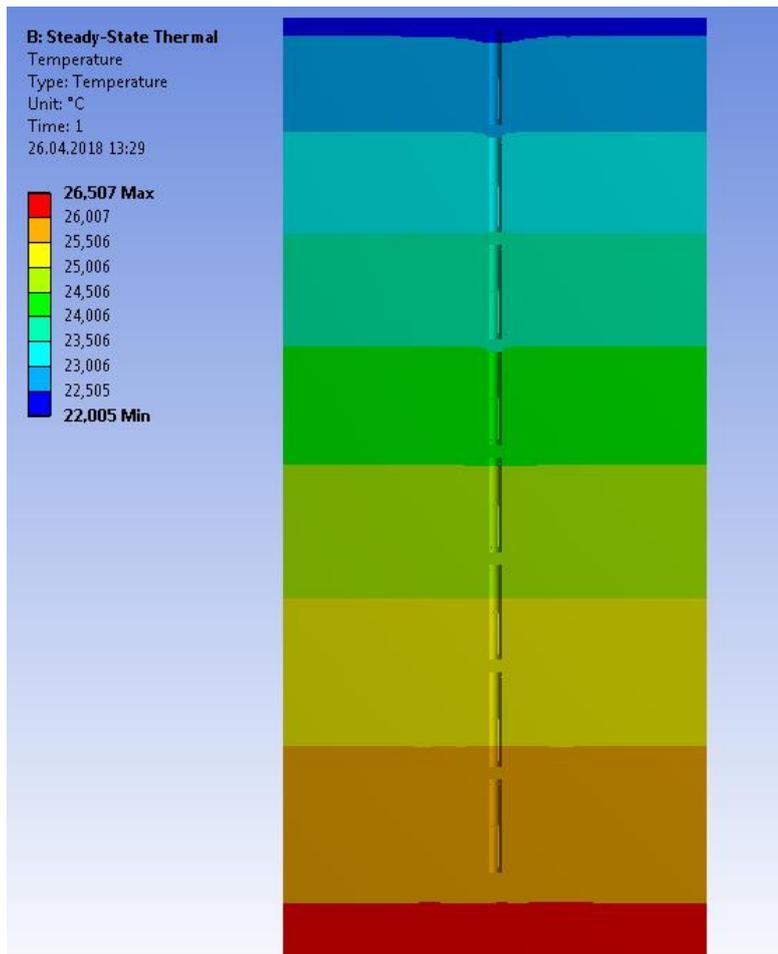


Рис. 3.19. Измерение плотности внутреннего ТП Луны.  
Распределение температуры. Термозонд ВТС

Как можно наблюдать, такая схема термозонда практически не вносит каких-либо искажений в распределение температуры. Ошибка при определении теплового потока по «измеренным» данным не превышает 11%.

### 3.4. Выводы по главе 3

В данной главе показаны две перспективные схемы термозондов, которые могут измерять как плотность внутреннего теплового потока Луны, так и теплофизические характеристики лунного грунта на различных глубинах.

По результатам численного моделирования наименьшее влияние элементов конструкции на естественное распределение температуры показал термозонд высокого теплового сопротивления (ВТС). В таблице 3.20

показана сводка отклонений температур при измерении различными термозондами от естественного распределения. Чем меньше значение разницы температур, тем меньше влияние конструкции термозонда, искажающее температурное поле.

Таблица 3.20.

Характеристика влияния конструкции на естественное распределение температуры.

Название схемы термозонда	Разница температур, °С
Схема с использованием пенетратора	7,49
Проникающий термозонд (схема Apollo)	4,28
Термозонд с отделяющимся нагревателем	3,11
Разделенный термозонд	2,32
Термозонд ВТС	0,17

Термозонд ВТС также показал значительно меньшую чувствительность к влиянию такого фактора, как величина теплового сопротивления на контакте термозонда и грунта.

При измерении ТФХ грунта в реальных условиях могут возникать и другие факторы, носящие случайный характер, которые подчас сложно предсказать и учесть в детерминированной постановке задачи. Поэтому преимуществом будут обладать те термозонды, которые имеют меньшую чувствительность к ним.

В последнем описанном численном эксперименте проводилась имитация определения ТФХ лунного грунта двумя схемами: термозондом ВТС и проникающим термозондом. При этом была проведена имитация различных естественных факторов, вносящих погрешности в решение. Однако, решение соответствующей ОЗТ, напротив, проводилось с помощью

самой простой модели, не учитывающей этих факторов. По итогам численного эксперимента термозонд ВТС показал значительно лучшие результаты по сравнению со стержневым термозондом. Следовательно, данная схема является более точной и стабильной к возможным погрешностям или к не учету упомянутых выше факторов.

Алгоритм для определения ТФХ лунного грунта при помощи термозонда ВТС может быть следующим:

1. Термозонд устанавливается в скважину, и включаются нагреватели на определенное время.

2. Фиксируются значения температур на термометрах, закрепленных на изогнутых стержнях.

3. Решается серия тепловых задач, в которых не учитываются различные естественные искажающие факторы. В серии решений выбирается крупный шаг по теплопроводности и теплоемкости.

4. Выбирается наиболее близкое значение температуры к измеренному из серии решений.

5. В окрестностях этой точки решается серия тепловых задач с уже меньшим шагом по теплопроводности и теплоемкости.

6. Находятся наиболее близкие точки к измеренной температуре. Это и будут первичные решения ОЗТ.

7. Проводится более тщательный анализ и расчет в данной области с учетом различных факторов, потенциально вносящих ошибки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам работы могут быть сделаны следующие выводы.

1. Проведен анализ различных схем термозондов для контактного измерения плотности внутреннего теплового потока Луны.
2. Выполнена апробация работоспособности схем термозондов для измерения плотности теплового потока на основе численных экспериментов. Оценена точность получаемых научных данных и возможность применения каждого из них.
3. Осуществлен анализ различных схем термозондов для измерения ТФХ лунного грунта.
4. Проведена апробация работоспособности схем термозондов для измерения ТФХ на основе численных экспериментов. Оценена точность получаемых научных данных и возможность применения каждого из них.
5. На основе численного эксперимента оценена возможность измерения ТФХ грунта при помощи солнечного тепла.
6. На основе различных конструкций термозондов по измерению плотности внутреннего теплового потока луны и определению ТФХ лунного грунта разработаны новые схемы термозондов с улучшенными характеристиками, способные измерять как ТФХ, так и плотность теплового потока.
7. Проведена апробация работоспособности новых схем термозондов на основе численных экспериментов, доказана эффективность термозонда высокого теплового сопротивления. Показана его устойчивость к естественным возмущающим факторам.
8. Разработанный термозонд высокого теплового сопротивления может использоваться как на автоматических станциях, так и в пилотируемых миссиях. По результатам исследований подана заявка на патент.

9. Проведенный обширный анализ различных схем термозондов по измерению как плотности теплового потока Луны, так и ТФХ лунного грунта может служить руководством для проектировщиков подобных приборов в вопросах выбора схем, или разработки новых на основе существующих.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

$f_m(\tau)$  – температура, измеренная  $m$ -й термопарой

$\tau_m$  – продолжительность процесса нагрева

$b, h$  – линейные размеры

$C$  – теплоемкость

$C_1, C_3$  – главные кристаллографические оси ГДТП

$c_i$  – массовая концентрация  $i$ -го компонента в образце

$d$  – диаметр

$E$  – термоэдс ГДТП

$e_x$  – термоэдс элемента ГДТП

$F$  – площадь элемента ГДТП

$I$  – напряжение в цепи

$l$  – высота

$M$  – количество термопар

$n$  – количество элементов в датчике ГДТП

$Q$  – количество теплоты

$q$  – плотность теплового потока

$R$  – тепловое сопротивление

$R_3$  – электрическое сопротивление цепи

$S$  – площадь поперечного сечения

$S_0$  – вольт-ваттная чувствительность элемента ГДТП

$t$  – время

$T$  – температура

$x$  – координата

$x_i$  – удельная теплоёмкость  $i$ -го компонента

$\varepsilon$  – степень черноты

$\theta$  – угол, под которым термоэлемент вырезан из монокристалла в ГДТП

$\lambda$  – теплопроводность

БДТП – батарейный датчик теплового потока

ГДТП – градиентный датчик теплового потока

МКЭ – метод конечных элементов

ОЗТ – обратная задача теплообмена

СОТР – система обеспечения терморегулирования

Термозонд ВТС – термозонд высокого теплового сопротивления

ТП – тепловой поток

ТФХ – теплофизические характеристики

ЧЭ – чувствительный элемент

ЭВТИ – экранно-вакуумная теплоизоляция

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдучевский, В.С., Анфимов В.С., Маров Н.А. и др. Теплофизические свойства лунного вещества, доставленного на Землю автоматической станцией «Луна-16» // Лунный грунт из Моря Изобилия: сб. статей. М.: «Наука», 1974. С. 553-558.
2. Алифанов О.М. Обратные задачи теплообмена. М.: Машиностроение, 1988. 280 с.
3. Артюхин, Е.А., Охалкин А.С. Восстановление параметров в обобщённом уравнении теплопроводности // ИФЖ. 1982. т.42, № 6. С.1013-1019.
4. Бастин Дж., Пандя С.Дж., Апсон Д.А. Термический градиент в верхних слоях Луны // Луна: сб. статей. М.: «Мир», 1975. С. 265-270.
5. Виноградов А.П. Предварительные данные о лунном грунте, доставленном автоматической станцией «Луна-16» // В кн.: Лунный грунт из Моря Изобилия. М., "Наука", 1974, с. 7-18.
6. Виноградов А.П. Предварительные данные о лунном грунте, доставленном автоматической станцией «Луна-20» // В кн.: Лунный грунт из материкового района Луны. М., "Наука", 1979, с.7-17.
7. Геращенко О.А. Основы теплотрии. Киев: Наукова думка, 1971. 192 с.
8. Головкин, А.Р., Дмитриев А.Н., Духовской Е.А., и др. Результаты исследования тепловых и электрических свойств грунта Луны и его аналогов // Лунный грунт из Моря Изобилия: сб. статей. Москва, 1974. С. 41-43.
9. Деревич, И.В., Фокина А.Ю. Математическая модель теплопереноса в грануле катализатора с точечными центрами реакции // Инженерно-физический журнал 2018 . Т. 91 , № 1 . С. 46 – 57.

10. Дудкин, К.К. Анализ возможности измерения внутреннего теплового потока Луны с помощью поверхностных термозондов // Тепловые процессы в технике. 2020. Т. 12. №5. С. 208–218.

11. Дудкин, К.К. Измерение плотности потока внутреннего тепла Луны // Гагаринские чтения – 2018: XLIV Международная молодежная научная конференция. Сборник тезисов докладов. – 2018. – Т. 3. – С. 44.

12. Дудкин, К.К., Алифанов О.М. Измерения плотности внутреннего теплового потока Луны проникающими термозондами // Тепловые процессы в технике. 2019. Т. 11. №6. С. 283–288.

13. Дудкин, К.К., Алифанов О.М. Измерения теплофизических характеристик лунного грунта в естественных условиях // Тепловые процессы в технике. 2018. Т. 10 №5. С 245-255.

14. Дудкин, К.К., Долгополов В.П. Использование инерционных космических зондов-пенетраторов для научных исследований Луны. // XL Академические чтения по космонавтике посвященные памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства. Сборник тезисов. – 2015. – С. 30.

15. Дудкин, К.К., Долгополов В.П. Использование инерционных космических зондов-пенетраторов для научных исследований Луны // 14-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2015». Тезисы. – 2015. – С. 55.

16. Дудкин, К.К. Использование инерционных космических зондов-пенетраторов для научных исследований Луны. // К.Э. Циолковский и этапы развития космонавтики. Материалы 50-х Научных чтений памяти К.Э. Циолковского. – 2015. – С. 291-292.

17. Дудкин, К.К., Алифанов О.М. Определение теплофизических характеристик лунного грунта при помощи солнечного тепла // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2019. 2/44. С. 74-80.

18. Дудкин, К.К., Алифанов О.М., Макаров В.П. Определение теплофизических характеристик поверхностного слоя лунного грунта в

естественных условиях // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2018. 4/42. С. 38-43.

19. Зезин Р.В., Дубин П.А. Статистический анализ камней по данным «Лунохода-1» // Природа. - 1971. - №11.

20. Иванов, Н.С. Методы измерения тепловых потоков в горных породах // Тепло и массообмен в мерзлых почвах и горных породах. Москва, 1961. С. 91-104.

21. Карслоу, Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964. 487 с.

22. Кларк, С.П. Справочник физических констант горных пород. М.: Мир, 1969. 544 с.

23. Кронрод, Е. В., Кусков О. Л., Кронрод В. А. Геохимические и геофизические ограничения на температурное поле Луны // Вестник ОНЗ РАН. 2011. №3.

24. Кротиков, В.Д., Троицкий В.С. Радиоизлучение и природа Луны // Успехи физ. наук. 1963. т. 81, вып. 4. С. 589-639.

25. Кусков, О. Л., Кронрод В. А., Кронрод Е. В. Термохимические ограничения на тепловой режим, состав и минералогию верхней мантии луны по сейсмическим моделям // Астрономический вестник. 2015. Т. 49. № 2. С. 83–99.

26. Лангсет М. С., Кейм С. Д. Непосредственные измерения теплового потока на Луне // Космохимия Луны и планет. Москва, 1975. С. 200-209.

27. Лыков, А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.

28. Любимова, Е.А. Термика Земли и Луны. М.: «Наука», 1968. 279 с.

29. Маров М.Я., Колесниченко А.В., Мануйлов К.К., Осипов В.П. Эксперимент "Термофоб": Прямые исследования теплофизических свойств грунта Фобоса // Астроном. Вест. 2010. Т. 44. №5. С. 393-402.

30. Матвеев Ю.А. Матвеев Ю.А., Алифанов О.М., Заговорчев В.А., Охапкин А.С. и др. Отчет о научно-исследовательской работе. Исследовательский проект 3 «Стратегии и инструменты исследования Лунной поверхности», Этап 1. 2014 г. // По договору на выполнение научно-исследовательской работы (программа стратегического развития) № 202-MRA от 1.11.2013 г. – Москва. - 2015.

31. Миронов Р.А., Забежайлов М. О., Черепанов В. В., Русин М. Ю. Определение оптических параметров частично прозрачных материалов методом инвариантного погружения // Оптика и спектроскопия. 2017. Т. 123, № 4. С. 642-649.

32. Орнатская О.И., Цейтлин Н.М., Альбер Я.И., Рязанцева И.П. Исследования тепловой истории Луны при наиболее вероятных концентрациях радиоактивных элементов // Препринт – 104. НИРФИ. - Горький, 1977. – 26 с.

33. Пат. 2714528 Российская Федерация, МПК G01K 13/00 (2006.01), E21B 47/07 (2012.01), B64G 4/00 (2006.01), G01N 25/18 (2006.01). Устройство для измерения теплофизических характеристик грунта / Дудкин К.К.; заявитель и патентообладатель Акционерное общество «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина». – № 2019119523; заявл. 24.06.2019; опубл. 18.02.2020, Бюл. № 5. – 26 с.

34. Пат. 9959 Российская Федерация, МПК G01K 17/06. Датчик теплового потока / Дивин Н.П.; заявитель и патентообладатель Санкт-Петербургский государственный технический университет. – № 98115419/20; заявл. 10.08.98; опубл. 16.05.99. – 3 с.; ил.

35. Ранкорн С., Конвекция в теле Луны // Луна. Москва, 1975. С. 271-278.

36. Ранкорн, С. Луна. Сборник статей. / под ред. Ранкорн С., Юри Г. // М.: Мир. 1975. 304 с.

37. Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.Ю. Измерение нестационарных тепловых потоков градиентными датчиками на основе

анизотропных монокристаллов висмута // Журнал технической физики. 2004. Т. 74, вып. 7. С. 114-120.

38. Семена Н. П. Внеосевой короткофокусный имитатор Солнца // Светотехника, 2007. № 5. С.33-37 (англ. версия: Semena N.P Extra-Axial Short Focus Solar Simulator // Light & Engineering, 2008. Vol. 16, No 3. P. 117-122).

39. Троицкий В.С. Результаты исследования Луны по ее собственному излучению // Изв. вузов. Радиофизика. 1967. т. 10, №9-10. С. 226.

40. Троицкий В.С., Тихонова Т.В. Тепловое излучение Луны и физические свойства ее верхнего покрова // Изв. вузов. Радиофизика. 1970. т. 13, №9. С. 1273-1311.

41. Флоренский К.П., Базилевский А.Т., Николаева О.В. Лунный грунт: свойства и аналоги. Модель 1974 года. М.: Академия наук СССР Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского, 1975. 50 с.

42. Фрикер Е., Рейнольдс Р.Т., Саммерс А.Л. Возможная тепловая история Луны // Луна. Москва, 1975. С. 279-287.

43. Шумаков Н.В. Метод последовательных интервалов в теплотрии нестационарных процессов. М.: Атомиздат, 1979. с. 216.

44. Apollo 15. – News NASA. Release №: 71-119K. Press Kit. July 15, 1971, pp. 51-55.

45. Bates J.R., Lauderdale W.W., Kernaghan H. ALSEP Termination Report // NASA Reference Publication 1036. – 1979.

46. Cremers C.J. Thermal conductivity of Apollo 16 lunar fines // Abstracts of papers submitted to the 5 Lunar Science Conf. Houston, Texas, NASA. 1974. V. 1. P. 148-150.

47. Cremers, C.J., Birkebak R.C., Dawson J.P. Thermal conductivity of fines from Apollo 11 // Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf., Geochim. Cosmochim. Acta Suppl. 1. - 1970. - V 3. - P. 2045-2050.

48. Cremers C.J., Birkebak R.C. Thermal conductivity of fines from Apollo 12 // Proc. II Lunar Sci. Conf., Geochim. Cosmochim. Acta Suppl. 2. 1971. V 3. P. 2311-2315.
49. Cremers, C.J. Thermophysical properties of Apollo 14 fines // J. Geophys. Res. 1975. V 80. No32. P. 4466-4470.
50. Divin N., Sapozhnikov S. Gradient heat-flux transducers: application for heat investigations // Proc. Intern Symposium in Power Machinery. Moskow. - 1995. - P. 79-81.
51. Divin N., Kirillov A., Sapozhnikov S. Messtechnik zur Untersuchung von Vorgängen in thermischen Energieanlagen // XXVIII. Kraftwerkstechnisches Kolloquium und 6. Kolloquium Messtechnik für Energieanlagen. Dresden. - 1996. - P. 26-28.
52. Dudkin K.K., Alifanov O. M., Makarov V. P. Determination of Thermophysical Characteristics of the Surface Layer of the Lunar Soil under Natural Conditions // Solar System Research. 2019. Vol. 53, No. 7. pp. 527–532.
53. Gagnepain-Beyneix J., Lognonné P., Chenet H., et al. A seismic model of the lunar mantle and constraints on temperature and mineralogy // Phys. Earth Planet. Inter. 2006. Vol. 159. pp. 140-166.
54. Grott M., Knollenberg J., Krause C. The Apollo lunar heat flow experiment revisited: a critical reassessment of the in situ thermal conductivity determination // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. E11005. doi: 10.1029/2010JE003612.
55. Heiken G., Duke M., McKay D.S. et al. Preliminary stratigraphy of the Apollo 15 drill core // Proceed. of the 4 Lunar Science Conf. – 1973. - vol. 1. - pp. 191–214.
56. Hemingway B.S., Robie R.A., Wilson W.H. Specific heats of lunar soils, basalt, and breccias from the Apollo 14, 15 and 16 landing sites between 90 and 350°K // Proceed. of the 4 Lunar Science Conf. Pergamon Press. - V. III. - P. 2481-2488.

57. Houston W.N., Mitchell J.K., Carrier W.D. Lunar soil density and porosity // Abstracts of paper submitted to the 5 Lunar Science Conf. – 1974. - vol. 1. - pp. 363–365.
58. Korotev R. L., Jolliff B. L., Zeigler R. A., et al. Feldspathic lunar meteorites and their implications for compositional remote sensing of the lunar surface and the composition of the lunar crust // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2003. Vol. 67. pp. 4895–4923.
59. Kronrod, E.V., Kuskov O. L., Kronrod T.M. Geochemical and geophysical constraints for thermal field of the Moon // *EPSC Abstracts*. – 2011. - Vol. 6, EPSC-DPS2011-16.
60. Kronrod, E.V., Kuskov O. L., Kronrod T.M. The lunar heat flow and the bulk composition // *EPSC Abstracts*. – 2012, - Vol. 7 EPSC2012-20.
61. Kronrod, E.V., Kuskov O. L., Kronrod T.M. Inversion of Seismic and Gravity Data for the Composition and Core Sizes of the Moon // *Izv. Phys. Solid Earth*. 2011. Vol 47. pp. 711-730.
62. Kuskov O. L., Kronrod V.A. Geochemical constraints on the model of the composition and thermal conditions of the Moon according to seismic data // *Izv. Phys. Solid Earth*. 2009. Vol 45. pp. 753–768.
63. Langseth M. G., Keihm S.J., Peters K. The revised lunar heat flow values // *Proc. Lunar Sci. Conf. 7th*. – 1976. – pp. 3143-3171.
64. M.G. Langseth, P.C. Sydney, L.C. John, et al., Heat-flow experiment // *Apollo 15: Preliminary Science Report, NASA SP-289*. 1972. Chapter 11. pp. 11.1-11.23.
65. M.G. Langseth, S.J. Keihm, J.L. Chute, Heat-flow experiment // *Apollo 17: Preliminary Science Report, NASA SP-330*, 1973. Chapter 9. pp. 9.1-9.24.
66. McKay D.S., Fruland R.M., Heiken G.H. Grain size distribution as an indicator of the maturity of lunar soils // Abstracts of papers submitted to the 5 Lunar Science Conf. – 1974. - vol. II. - pp. 480–482.

67. Meroni E., Zavatarelli S. Borexino and Geo-Neutrinos: Unlocking the Earth's Secrets // Nuclear Physics News. 2016. 26, №3. p. 21-23.
68. Michael W.H., Moments of inertia of the Moon // The Moon. Abstract of a conference paper. 1970. Vol 1. pp. 484-485.
69. Runcorn S.K., Gray B.M. The Mantles of the Earth and Terrestrial Planets / John Wiley & Sons, Inc. - New York, 1967. – 584 p.
70. Saito, Y., Tanaka, S., Takita, J., Horai, K. and Hagermann, A. Lost Apollo heat flow data suggest a different lunar bulk composition // 38th Lunar and Planetary Science Conference, League City, Texas, USA. – 2007, March 12-16.
71. Taylor, S.R., Taylor G.J., Taylor L.A. The Moon: A Taylor perspective // Geochim. Cosmochim. Acta. 2006. Vol. 70. pp. 594-5918.
72. Tikhonova T.V., Troitskii V.S. Effect of heat from within the Moon on its radio emission for the case of lunar properties which vary with depth // Sov. Astron. 1969. 13, N1. p. 120-128.
73. Tulloch S.M. Mars-94, penetrator thermometry instrument. A preliminary report. // University of Kent. – 1990.
74. Urey H. C. Kopal Z. Physics and astronomy of the Moon. Academic Press, New York, 1962. p. 481.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А.1.

Определение ТФХ лунного грунта при помощи солнечного тепла.  
Результаты расчета

№ расчета	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	T1	T2	T3
1	0,006	0,006	0,006	60,56295	-14,5857	-22,6709
2	0,012	0,006	0,006	84,55682	-1,50686	-21,9419
3	0,018	0,006	0,006	98,2534	8,701791	-21,2352
4	0,006	0,012	0,006	59,3958	-12,63	-22,1121
5	0,012	0,012	0,006	81,1614	3,393582	-20,2178
6	0,018	0,012	0,006	93,68207	16,03248	-18,4174
7	0,006	0,018	0,006	58,76181	-11,9039	-21,6868
8	0,012	0,018	0,006	79,26172	5,332021	-18,9287
9	0,018	0,018	0,006	91,0788	19,10556	-16,3209
10	0,006	0,006	0,012	60,56205	-14,6304	-22,5645
11	0,012	0,006	0,012	84,55189	-1,65288	-21,6279
12	0,018	0,006	0,012	98,24362	8,456995	-20,7392
13	0,006	0,012	0,012	59,38684	-12,8118	-21,8157
14	0,012	0,012	0,012	81,11523	2,838872	-19,3783
15	0,018	0,012	0,012	93,59424	15,13589	-17,1174
16	0,006	0,018	0,012	58,73939	-12,2121	-21,2382
17	0,012	0,018	0,012	79,1502	4,425554	-17,6801
18	0,018	0,018	0,012	90,87112	17,67018	-14,3993
19	0,006	0,006	0,018	60,56155	-14,6554	-22,5221
20	0,012	0,006	0,018	84,54912	-1,7346	-21,5103
21	0,018	0,006	0,018	98,23813	8,320072	-20,5598
22	0,006	0,012	0,018	59,38156	-12,9183	-21,6929
23	0,012	0,012	0,018	81,08808	2,514259	-19,0503
24	0,018	0,012	0,018	93,54266	14,61177	-16,6253
25	0,006	0,018	0,018	58,72585	-12,3975	-21,0468
26	0,012	0,018	0,018	79,08293	3,881447	-17,1757
27	0,018	0,018	0,018	90,746	16,8095	-13,645

Определение ТФХ лунного грунта при помощи солнечного тепла.  
 Результаты расчета в окрестностях точки 4

№ расчета	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	T1	T2	T3
1	0,005	0,011	0,005	53,47496	-15,56	-22,5048
2	0,006	0,011	0,005	59,54014	-12,7828	-22,2773
3	0,007	0,011	0,005	64,70861	-9,98857	-22,0548
4	0,005	0,012	0,005	53,38247	-15,414	-22,4524
5	0,006	0,012	0,005	59,39808	-12,5836	-22,2014
6	0,007	0,012	0,005	64,53427	-9,73499	-21,9576
7	0,005	0,013	0,005	53,29863	-15,2889	-22,4025
8	0,006	0,013	0,005	59,26916	-12,4125	-22,1292
9	0,007	0,013	0,005	64,36021	-9,5156	-21,863
10	0,005	0,011	0,006	53,47394	-15,5879	-22,4489
11	0,006	0,011	0,006	59,53833	-12,8234	-22,1968
12	0,007	0,011	0,006	64,70636	-10,0415	-21,9492
13	0,005	0,012	0,006	53,38118	-15,446	-22,3903
14	0,006	0,012	0,006	59,3958	-12,63	-22,1121
15	0,007	0,012	0,006	64,53173	-9,79533	-21,8407
16	0,005	0,013	0,006	53,29705	-15,3249	-22,3345
17	0,006	0,013	0,006	59,26638	-12,4645	-22,0315
18	0,007	0,013	0,006	64,357	-9,5832	-21,7352
19	0,005	0,011	0,007	53,47306	-15,6119	-22,4028
20	0,006	0,011	0,007	59,53678	-12,8581	-22,1307
21	0,007	0,011	0,007	64,70435	-10,0869	-21,8628
22	0,005	0,012	0,007	53,38007	-15,4735	-22,339
23	0,006	0,012	0,007	59,39384	-12,6698	-22,0388
24	0,007	0,012	0,007	64,52953	-9,84717	-21,745
25	0,005	0,013	0,007	53,29568	-15,3558	-22,2783
26	0,006	0,013	0,007	59,26399	-12,5092	-21,9514
27	0,007	0,013	0,007	64,35423	-9,64138	-21,6305

Определение ТФХ лунного грунта при помощи солнечного тепла.  
 Результаты расчета в окрестностях точки 13

№ расчета	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	T1	T2	T3
1	0,005	0,011	0,011	53,47043	-15,6833	-22,2813
2	0,006	0,011	0,011	59,53214	-12,9617	-21,9583
3	0,007	0,011	0,011	64,71708	-10,223	-21,6407
4	0,005	0,012	0,011	53,37674	-15,5557	-22,204
5	0,006	0,012	0,011	59,38798	-12,7887	-21,8473
6	0,007	0,012	0,011	64,52293	-10,002	-21,4956
7	0,005	0,013	0,011	53,2916	-15,4485	-22,1302
8	0,006	0,013	0,011	59,2568	-12,6431	-21,7415
9	0,007	0,013	0,011	64,33237	-9,81529	-21,3552
10	0,005	0,011	0,012	53,46992	-15,6971	-22,2611
11	0,006	0,011	0,012	59,53124	-12,9818	-21,9299
12	0,007	0,011	0,012	64,7161	-10,249	-21,6038
13	0,005	0,012	0,012	53,37609	-15,5716	-22,1815
14	0,006	0,012	0,012	59,38684	-12,8118	-21,8157
15	0,007	0,012	0,012	64,52164	-10,032	-21,4545
16	0,005	0,013	0,012	53,2908	-15,4665	-22,1055
17	0,006	0,013	0,012	59,25541	-12,6692	-21,7068
18	0,007	0,013	0,012	64,33094	-9,84921	-21,3101
19	0,005	0,011	0,013	53,46945	-15,7098	-22,2436
20	0,006	0,011	0,013	59,53041	-13,0001	-21,9052
21	0,007	0,011	0,013	64,7152	-10,273	-21,5718
22	0,005	0,012	0,013	53,37549	-15,5863	-22,1619
23	0,006	0,012	0,013	59,38579	-12,8329	-21,7882
24	0,007	0,012	0,013	64,52045	-10,0596	-21,4189
25	0,005	0,013	0,013	53,29007	-15,4831	-22,0839
26	0,006	0,013	0,013	59,25412	-12,6931	-21,6766
27	0,007	0,013	0,013	64,32962	-9,88041	-21,271

Определение ТФХ лунного грунта при помощи солнечного тепла.  
 Результаты расчета в окрестностях точки 22

№ расчета	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	T1	T2	T3
1	0,005	0,011	0,017	53,46789	-15,7519	-22,1921
2	0,006	0,011	0,017	59,52767	-13,0612	-21,8333
3	0,007	0,011	0,017	64,7122	-10,3525	-21,4787
4	0,005	0,012	0,017	53,37351	-15,635	-22,1043
5	0,006	0,012	0,017	59,3823	-12,9035	-21,7077
6	0,007	0,012	0,017	64,51646	-10,1513	-21,3149
7	0,005	0,013	0,017	53,28762	-15,5384	-22,0204
8	0,006	0,013	0,017	59,24982	-12,7729	-21,5879
9	0,007	0,013	0,017	64,32517	-9,98436	-21,1566
10	0,005	0,011	0,018	53,46756	-15,7607	-22,1826
11	0,006	0,011	0,018	59,52709	-13,0741	-21,82
12	0,007	0,011	0,018	64,71156	-10,3692	-21,4616
13	0,005	0,012	0,018	53,37309	-15,6452	-22,0936
14	0,006	0,012	0,018	59,38156	-12,9183	-21,6929
15	0,007	0,012	0,018	64,51562	-10,1706	-21,2957
16	0,005	0,013	0,018	53,28711	-15,55	-22,0086
17	0,006	0,013	0,018	59,24891	-12,7897	-21,5715
18	0,007	0,013	0,018	64,32423	-10,0063	-21,1354
19	0,005	0,011	0,019	53,46725	-15,7691	-22,1741
20	0,006	0,011	0,019	59,52655	-13,0861	-21,8081
21	0,007	0,011	0,019	64,71095	-10,3849	-21,4462
22	0,005	0,012	0,019	53,3727	-15,6549	-22,084
23	0,006	0,012	0,019	59,38087	-12,9323	-21,6795
24	0,007	0,012	0,019	64,50123	-10,1886	-21,2765
25	0,005	0,013	0,019	53,28662	-15,561	-21,9979
26	0,006	0,013	0,019	59,24805	-12,8056	-21,5567
27	0,007	0,013	0,019	64,32333	-10,0269	-21,1164

Таблица А.5.

Результаты расчетов ОЗТ для стержневого термозонда.  
Сопrotивление на контакте зонд-грунт 0,01 (м<sup>2</sup> °С)/Вт

№	Теплопроводность грунта, Вт/(м °С)	Теплоемкость грунта, Дж/(кг °С)	Температура со стороны грунта, °С	Температура со стороны термометра, °С
1	0,01	500	-14,8274	-13,4702
2	0,015	500	-15,4965	-14,3458
3	0,02	500	-16,0493	-15,0191
4	0,025	500	-16,5149	-15,5653
5	0,03	500	-16,9142	-16,0232
6	0,01	600	-15,095	-13,6855
7	0,015	600	-15,7503	-14,5626
8	0,02	600	-16,2896	-15,2312
9	0,025	600	-16,7421	-15,7701
10	0,03	600	-17,1289	-16,2196
11	0,01	700	-15,3294	-13,8745
12	0,015	700	-15,9718	-14,7521
13	0,02	700	-16,4988	-15,4159
14	0,025	700	-16,9397	-15,9481
15	0,03	700	-17,3156	-16,3902

Таблица А.6.

Результаты расчетов ОЗТ для стержневого термозонда. Сопrotивление  
на контакте зонд-грунт 0,001 (м<sup>2</sup> °С)/Вт

№	Теплопроводность грунта, Вт/(м °С)	Теплоемкость грунта, Дж/(кг °С)	Температура со стороны грунта, °С	Температура со стороны термометра, °С
1	0,01	500	-14,7115	-13,5554
2	0,015	500	-15,3782	-14,4636
3	0,02	500	-15,934	-15,1651
4	0,025	500	-16,4049	-15,736
5	0,03	500	-16,8109	-16,2157

6	0,01	600	-14,9784	-13,778
7	0,015	600	-15,6325	-14,6886
8	0,02	600	-16,1756	-15,3858
9	0,025	600	-16,6342	-15,9495
10	0,03	600	-17,0281	-16,4207
11	0,01	700	-15,2125	-13,9735
12	0,015	700	-15,8547	-14,8854
13	0,02	700	-16,3863	-15,5783
14	0,025	700	-16,8336	-16,1353
15	0,03	700	-17,2169	-16,599

Таблица А.7.

Результаты расчетов ОЗТ для стержневого термозонда.  
Сопротивление на контакте зонд-грунт 0,0001 (м<sup>2</sup> °С)/Вт

№	Теплопроводность грунта, Вт/(м °С)	Теплоемкость грунта, Дж/(кг °С)	Температура со стороны грунта, °С	Температура со стороны термометра, °С
1	0,01	500	-14,6998	-13,5644
2	0,015	500	-15,3664	-14,4759
3	0,02	500	-15,9225	-15,1804
4	0,025	500	-16,3942	-15,7538
5	0,03	500	-16,8008	-16,2358
6	0,01	600	-14,9667	-13,7877
7	0,015	600	-15,6208	-14,7019
8	0,02	600	-16,1644	-15,402
9	0,025	600	-16,6236	-15,9682
10	0,03	600	-17,0183	-16,4417
11	0,01	700	-15,2008	-13,9839
12	0,015	700	-15,843	-14,8995
13	0,02	700	-16,3751	-15,5953
14	0,025	700	-16,8233	-16,1549
15	0,03	700	-17,2074	-16,6208

Таблица А.8.

Результаты расчетов ОЗТ для термозонда ВТС. Сопротивление на контакте зонд-грунт 0,01 (м<sup>2</sup> °С)/Вт

№	Теплопроводность грунта, Вт/(м °С)	Теплоемкость грунта, Дж/(кг °С)	Температура со стороны грунта, °С	Температура со стороны термометра, °С
1	0,01	500	-16,5821	-16,2506
2	0,015	500	-17,1761	-16,9517
3	0,02	500	-17,768	-17,5906
4	0,025	500	-18,2863	-18,1353
5	0,03	500	-18,7268	-18,5931
6	0,01	600	-17,1048	-16,7436
7	0,015	600	-17,5903	-17,3498
8	0,02	600	-18,1007	-17,9139
9	0,025	600	-18,5588	-18,402
10	0,03	600	-18,9541	-18,8168
11	0,01	700	-17,5444	-17,1587
12	0,015	700	-17,9433	-17,6892
13	0,02	700	-18,387	-18,1919
14	0,025	700	-18,7949	-18,633
15	0,03	700	-19,1522	-19,0115

Таблица А.9.

Результаты расчетов ОЗТ для термозонда ВТС. Сопротивление на контакте зонд-грунт 0,001 (м<sup>2</sup> °С)/Вт

№	Теплопроводность грунта, Вт/(м °С)	Теплоемкость грунта, Дж/(кг °С)	Температура со стороны грунта, °С	Температура со стороны термометра, °С
1	0,01	500	-16,517	-16,3246
2	0,015	500	-17,1173	-17,0023
3	0,02	500	-17,7163	-17,634
4	0,025	500	-18,2407	-18,1763
5	0,03	500	-18,6863	-18,6331
6	0,01	600	-17,0424	-16,8335

7	0,015	600	-17,5334	-17,4105
8	0,02	600	-18,0503	-17,9639
9	0,025	600	-18,5141	-18,4474
10	0,03	600	-18,9141	-18,8597
11	0,01	700	-17,4844	-17,2618
12	0,015	700	-17,8881	-17,7586
13	0,02	700	-18,3376	-18,2478
14	0,025	700	-18,7509	-18,6823
15	0,03	700	-19,1126	-19,057

Таблица А.10.

Результаты расчетов ОЗТ для термозонда ВТС. Сопротивление на контакте зонд-грунт 0,0001 (м<sup>2</sup> °С)/Вт

№	Теплопроводность грунта, Вт/(м °С)	Теплоемкость грунта, Дж/(кг °С)	Температура со стороны грунта, °С	Температура со стороны термометра, °С
1	0,01	500	-16,5149	-16,3596
2	0,015	500	-17,1117	-17,0186
3	0,02	500	-17,7101	-17,6437
4	0,025	500	-18,2346	-18,183
5	0,03	500	-18,6805	-18,6382
6	0,01	600	-17,0418	-16,8734
7	0,015	600	-17,5285	-17,4291
8	0,02	600	-18,0444	-17,9748
9	0,025	600	-18,5082	-18,4548
10	0,03	600	-18,9084	-18,8651
11	0,01	700	-17,485	-17,3058
12	0,015	700	-17,8837	-17,7791
13	0,02	700	-18,332	-18,2596
14	0,025	700	-18,7451	-18,6902
15	0,03	700	-19,1069	-19,0628

Таблица А.11.

Результаты расчетов ОЗТ для стержневого термозонда. Широкий диапазон теплопроводности и теплоемкости. Отсутствуют все элементы конструкции, кроме нагревателя. Сопротивление на контакте зонд-грунт 0,01 (м<sup>2</sup> °С)/Вт

№	Теплопроводность грунта, Вт/(м °С)	Теплоемкость грунта, Дж/(кг °С)	Температура грунта в месте установки термометра, °С
1	0,001	300	-22,3948
2	0,01	300	-17,6273
3	0,1	300	-19,7772
4	1	300	-22,5322
5	10	300	-22,9046
6	0,001	600	-22,8867
7	0,01	600	-19,7936
8	0,1	600	-20,3003
9	1	600	-22,5644
10	10	600	-22,9315
11	0,001	900	-22,9706
12	0,01	900	-20,8499
13	0,1	900	-20,6467
14	1	900	-22,5816
15	10	900	-22,9405

Таблица А.12.

Результаты расчетов ОЗТ для стержневого термозонда. Широкий диапазон теплопроводности и теплоемкости. Отсутствуют все элементы конструкции, кроме нагревателя. Сопротивление на контакте зонд-грунт 0,001 (м<sup>2</sup> °С)/Вт

№	Теплопроводность грунта, Вт/(м °С)	Теплоемкость грунта, Дж/(кг °С)	Температура грунта в месте установки термометра, °С
1	0,001	300	-22,3806

2	0,01	300	-17,3695
3	0,1	300	-19,6466
4	1	300	-22,5258
5	10	300	-22,9023
6	0,001	600	-22,8829
7	0,01	600	-19,6002
8	0,1	600	-20,1745
9	1	600	-22,5582
10	10	600	-22,9303
11	0,001	900	-22,9694
12	0,01	900	-20,6983
13	0,1	900	-20,525
14	1	900	-22,575
15	10	900	-22,9396

Таблица А.13.

Результаты расчетов ОЗТ для стержневого термозонда. Широкий диапазон теплопроводности и теплоемкости. Отсутствуют все элементы конструкции, кроме нагревателя. Сопротивление на контакте зонд-грунт 0,0001 (м<sup>2</sup> °С)/Вт

№	Теплопроводность грунта, Вт/(м °С)	Теплоемкость грунта, Дж/(кг °С)	Температура грунта в месте установки термометра, °С
1	0,001	300	-22,379
2	0,01	300	-17,3297
3	0,1	300	-19,6169
4	1	300	-22,5207
5	10	300	-22,9017
6	0,001	600	-22,8825
7	0,01	600	-19,5696
8	0,1	600	-20,1449
9	1	600	-22,5531
10	10	600	-22,9298
11	0,001	900	-22,9692
12	0,01	900	-20,6739

13	0,1	900	-20,4959
14	1	900	-22,5701
15	10	900	-22,9392

Таблица А.14.

Результаты расчетов ОЗТ для термозонда ВТС. Широкий диапазон теплопроводности и теплоемкости. Отсутствуют все элементы конструкции, кроме нагревателя. Сопротивление на контакте зонд-грунт 0,01 (м<sup>2</sup> °С)/Вт

№	Теплопроводность грунта, Вт/(м °С)	Теплоемкость грунта, Дж/(кг °С)	Температура грунта в месте установки термометра, °С
1	0,001	300	-19,0275
2	0,01	300	-15,0798
3	0,1	300	-21,0811
4	1	300	-22,7521
5	10	300	-22,93
6	0,001	600	-21,3195
7	0,01	600	-17,1977
8	0,1	600	-21,2548
9	1	600	-22,7772
10	10	600	-22,9552
11	0,001	900	-22,1476
12	0,01	900	-18,4205
13	0,1	900	-21,3796
14	1	900	-22,7862
15	10	900	-22,9635

Таблица А.15.

Результаты расчетов ОЗТ для термозонда ВТС. Широкий диапазон теплопроводности и теплоемкости. Отсутствуют все элементы конструкции, кроме нагревателя. Сопротивление на контакте зонд-грунт 0,001 (м<sup>2</sup> °С)/Вт

№	Теплопроводность грунта, Вт/(м °С)	Теплоемкость грунта, Дж/(кг °С)	Температура грунта в месте установки термометра, °С
1	0,001	300	-19,0055
2	0,01	300	-15,0098
3	0,1	300	-21,0627
4	1	300	-22,7493
5	10	300	-22,9297
6	0,001	600	-21,3068
7	0,01	600	-17,1366
8	0,1	600	-21,2372
9	1	600	-22,7745
10	10	600	-22,955
11	0,001	900	-22,1398
12	0,01	900	-18,3656
13	0,1	900	-21,3617
14	1	900	-22,7835
15	10	900	-22,9634

Таблица А.16.

Результаты расчетов ОЗТ для термозонда ВТС. Широкий диапазон теплопроводности и теплоемкости. Отсутствуют все элементы конструкции, кроме нагревателя. Сопротивление на контакте зонд-грунт 0,0001 (м<sup>2</sup> °С)/Вт

№	Теплопроводность грунта, Вт/(м °С)	Теплоемкость грунта, Дж/(кг °С)	Температура грунта в месте установки термометра, °С
1	0,001	300	-19,0027
2	0,01	300	-14,9984
3	0,1	300	-21,059

4	1	300	-22,7479
5	10	300	-22,9295
6	0,001	600	-21,3052
7	0,01	600	-17,1264
8	0,1	600	-21,2335
9	1	600	-22,7731
10	10	600	-22,9548
11	0,001	900	-22,1388
12	0,01	900	-18,3563
13	0,1	900	-21,3579
14	1	900	-22,7821
15	10	900	-22,9632

Таблица А.17.

Результаты расчетов ОЗТ для термозонда ВТС. Узкий диапазон теплопроводности и теплоемкости. Отсутствуют все элементы конструкции, кроме нагревателя. Сопротивление на контакте зонд-грунт 0,01 (м<sup>2</sup> °С)/Вт

№	Теплопроводность грунта, Вт/(м °С)	Теплоемкость грунта, Дж/(кг °С)	Температура грунта в месте установки термометра, °С
1	0,01	500	-16,6371
2	0,015	500	-17,171
3	0,02	500	-17,7527
4	0,025	500	-18,2715
5	0,03	500	-18,7147
6	0,01	600	-17,1977
7	0,015	600	-17,6056
8	0,02	600	-18,0975
9	0,025	600	-18,5516
10	0,03	600	-18,947
11	0,01	700	-17,6683
12	0,015	700	-17,9756
13	0,02	700	-18,394
14	0,025	700	-18,7942
15	0,03	700	-19,1494

Таблица А.18.

Результаты расчетов ОЗТ для термозонда ВТС. Узкий диапазон теплопроводности и теплоемкости. Отсутствуют все элементы конструкции, кроме нагревателя. Сопротивление на контакте зонд-грунт 0,001 (м<sup>2</sup> °С)/Вт

№	Теплопроводность грунта, Вт/(м °С)	Теплоемкость грунта, Дж/(кг °С)	Температура грунта в месте установки термометра, °С
1	0,01	500	-16,5735
2	0,015	500	-17,1131
3	0,02	500	-17,7016
4	0,025	500	-18,2263
5	0,03	500	-18,6744
6	0,01	600	-17,1366
7	0,015	600	-17,5494
8	0,02	600	-18,0474
9	0,025	600	-18,5071
10	0,03	600	-18,9071
11	0,01	700	-17,6094
12	0,015	700	-17,9209
13	0,02	700	-18,3449
14	0,025	700	-18,7503
15	0,03	700	-19,1098

Таблица А.19.

Результаты расчетов ОЗТ для термозонда ВТС. Узкий диапазон теплопроводности и теплоемкости. Отсутствуют все элементы конструкции, кроме нагревателя. Сопротивление на контакте зонд-грунт 0,0001 (м<sup>2</sup> °С)/Вт

№	Теплопроводность грунта, Вт/(м °С)	Теплоемкость грунта, Дж/(кг °С)	Температура грунта в месте установки термометра, °С
1	0,01	500	-16,5629
2	0,015	500	-17,1033

3	0,02	500	-17,6929
4	0,025	500	-18,2185
5	0,03	500	-18,6673
6	0,01	600	-17,1264
7	0,015	600	-17,5398
8	0,02	600	-18,0389
9	0,025	600	-18,4994
10	0,03	600	-18,9001
11	0,01	700	-17,5996
12	0,015	700	-17,9116
13	0,02	700	-18,3364
14	0,025	700	-18,7426
15	0,03	700	-19,1028