

На правах рукописи



Дудкин Константин Кириллович

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

Специальность

01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника»

Автореферат диссертации

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: Доктор технических наук, профессор, академик РАН
Алифанов Олег Михайлович

Официальные оппоненты: **Деревич Игорь Владимирович**
доктор технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», профессор

Миронов Роман Александрович
кандидат физико-математических наук, акционерное общество «Обнинское научно-производственное предприятие «Технология» им. А.Г. Ромашина», начальник сектора

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук

Защита состоится «20» сентября 2021 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.08, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»,
<https://mai.ru/upload/iblock/a7c/4v2xfragd9n18cxsgpqkf463tsirtq2q/Dissertatsiya-Dudkin.pdf>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.125.08
д.т.н., профессор

Зуев Юрий Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Одна из основных проблем в изучении Луны – это эволюция термических процессов, т.е. понимание того, как менялись процессы теплопереноса и распределение температурных зон внутри Луны за определённое геологическое время. Изучение термических процессов внутри небесного тела во многом является ключом к пониманию его эволюции в целом.

Для правильного понимания термических процессов, протекающих на Луне, необходимо выяснить плотность внутреннего **теплового потока (ТП)** из ее недр, которая имеет место в настоящее время.

Для определения плотности теплового потока 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.

В ряде работ Г.С. Юри, Н.В. Шумакова, М.С. Лангсета, С. Ранкорна, О.И. Орнатской, Y. Saito, В. А. Кронрод, Е. В. Кронрод, О. Л. Кускова и др. приводятся результаты исследований по проблеме теплового состояния Луны, рассчитываются модели распределения тепла внутри ее недр; описываются и анализируются различные способы определения плотности внутреннего теплового потока Луны и определения ТФХ ее грунта.

Однако, несмотря на продолжающееся развитие математических моделей и методов анализа различных экспериментальных данных о тепловом состоянии недр, практически все авторы указывают на то, что продолжает иметь место потребность в новых измерениях на поверхности Луны. Дело в

том, что, во-первых, контактные измерения в естественных условиях слишком малочисленны (миссии «Аполлон-15» и «Аполлон-17»); а во-вторых, подобные измерения имели ряд недостатков (в том числе связанных с влиянием конструкции на распределение температуры), что отрицательно сказывалось на точности получаемых результатов.

Следовательно, актуальными **задачами** являются: измерение плотности **внутреннего теплового потока** Луны; измерение **ТФХ лунного грунта**. Причем данные измерения необходимо проводить в естественных условиях непосредственно на поверхности Луны.

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.

Новизна приведенных результатов исследований

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.

Практическая значимость приведенных результатов исследований

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) [7, 8, 9, 10].

Публикации по теме диссертации.

По теме диссертации опубликовано 10 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 5 работ [1, 2, 3, 4, 5], 1 патент на изобретение [6].

Вклад автора в проведенное исследование. 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. Работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы диссертации, приводится перечень исследований, проведенных в этой области, формулируются цели и задачи работы, анализируются основные проблемы, связанные, например, с недостаточным количеством измерений ТФХ грунта и плотности внутреннего ТП на поверхности Луны, недостаточной их точностью, наличием погрешностей различного рода. Отмечена научная новизна и практическая значимость результатов исследований. Приведены основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту, сведения об апробации результатов работы и описана структура диссертации.

В первой главе рассмотрен вопрос контактного измерения плотности внутреннего теплового потока Луны. Приводятся результаты измерений различными методами. Сравниваются показатели измерений, проведенных дистанционным способом, с измерениями, которые были выполнены одним из контактных методов на поверхности Луны в миссиях «Аполлон-15» и «Аполлон-17».

Научная задача по измерению плотности внутреннего теплового потока Луны контактным способом разделяется на две подзадачи:

- измерение с помощью незаглубляемых зондов;
- измерение с помощью заглубляемых зондов.

Рассмотрено несколько схем незаглубляемых зондов: термозонд с термоизолированной поверхностью, термозонд с термоизолированной боковой поверхностью, Н-образный термозонд, БДТП (батарейный датчик теплового потока) и ГДТП (градиентный датчик теплового потока).

Проведено математическое моделирование, имитирующее работу термозондов, проанализированы его результаты. По результатам расчетов термозонд с термоизолированной поверхностью, термозонд с

термоизолированной боковой поверхностью, Н-образный термозонд и БДТП показали слабую эффективность для лунных условий эксплуатации. В свою очередь, ГДТП имеет перспективы применения.

Заглубляемые термозонды представлены только проникающим стержневым термозондом по схеме, использовавшейся в миссиях «Аполлон». Термозонд представляет из себя стержень, с размещенными на нем термодатчиками. 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.

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 собственно стержень начнет проходить большее количество тепла, чем через окружающий грунт, тем самым внося методическую погрешность в показания термозонда.

В качестве материала стержня при численном моделировании был выбран стеклопластик. Теплопроводность стержня термозонда принималась равной $\lambda_r=0,2$ Вт/м·°С. Плотность теплового потока Луны $q_l=0,0314$ Вт/м², диаметр стержня 10 мм, длина 1 м.

Численное моделирование для определения эффективности подобного термозонда проводилось для двух различных моделей грунтов: с однородными теплофизическими характеристиками неизменными по глубине (теплопроводность лунного грунта $\lambda_{zp}=0,002$ Вт/м·°С, теплоемкость лунного грунта $C_{zp}=600$ Дж/(кг·°С)), и с изменяющимися ТФХ при увеличении глубины (таблица 1). Данные ТФХ грунта для второй модели были взяты из исследований, проведенных в миссиях «Аполлон-15» и «Аполлон-17».

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

Постановка задачи для однородной модели грунта следующая. 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).

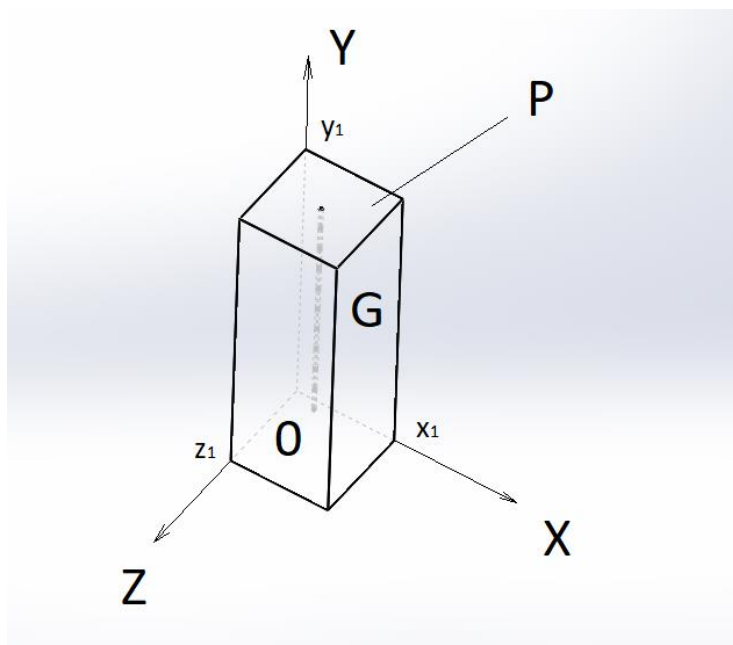


Рис. 1. Общий вид области S

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 2 схематически изображена область S в разрезе, на которой показан термозонд и обозначены зоны, используемые в математической записи постановки задачи.

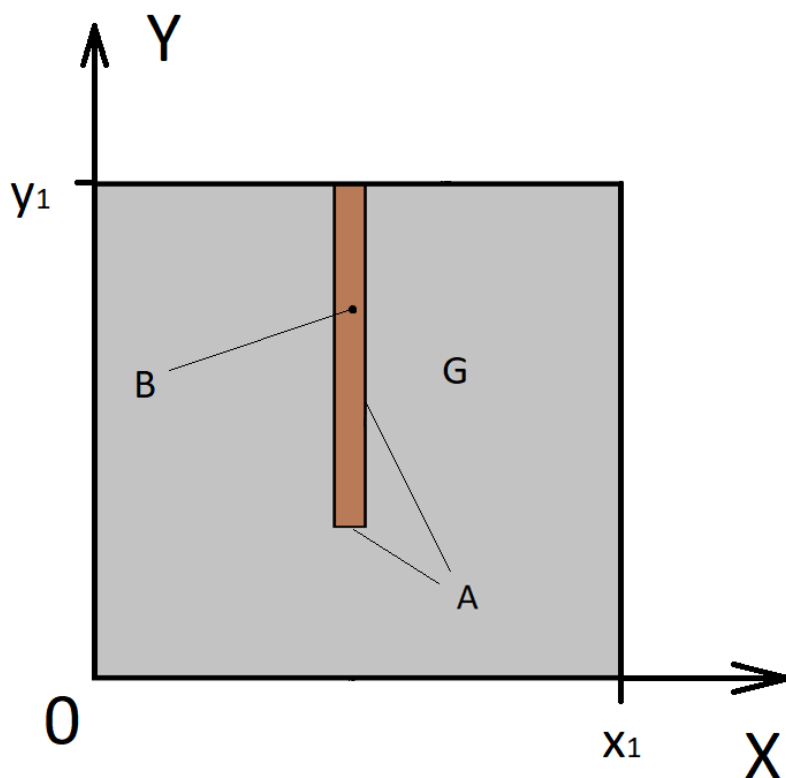


Рис. 2. Область S в разрезе

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

Уравнения теплопроводности.

Уравнение теплопроводности для грунта в области ($G_1 \subset G$):

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

Здесь G – область пространства, занятая грунтом.

Уравнение теплопроводности для термозонда в области ($B_1 \subset B$):

$$\frac{\partial^2 T(B_1)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(B_1)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(B_1)}{\partial z^2} = 0.$$

Здесь B – область пространства, занятая термозондом.

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

$$\lambda_{\text{т}} \left. \frac{\partial T}{\partial i_A} \right|_{A_{\text{т}}} = \lambda_{\text{гр}} \left. \frac{\partial T}{\partial i_A} \right|_{A_{\text{гр}}};$$

$$T|_{A_{\text{т}}} = T|_{A_{\text{гр}}};$$

где A_m – поверхность термозонда, контактирующая с грунтом; $A_{\text{гр}}$ – поверхность грунта, контактирующая с термозондом; i_A – нормаль к поверхности A (рисунок 2).

Условие теплового потока на нижней поверхности области S :

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

где $q_{\text{л}}$ – 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 :

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

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

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

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

Для многослойной модели грунта постановка задачи аналогична, с тем лишь отличием, что на границах соседних слоев грунта задается равенство тепловых потоков и температур.

Моделирование проводилось в программной среде Ansys методом конечных элементов. По его результатам выяснено, что подобная схема имеет следующий недостаток: конструкция зонда вносит определенные искажения в естественное распределение температуры (рисунок 3).

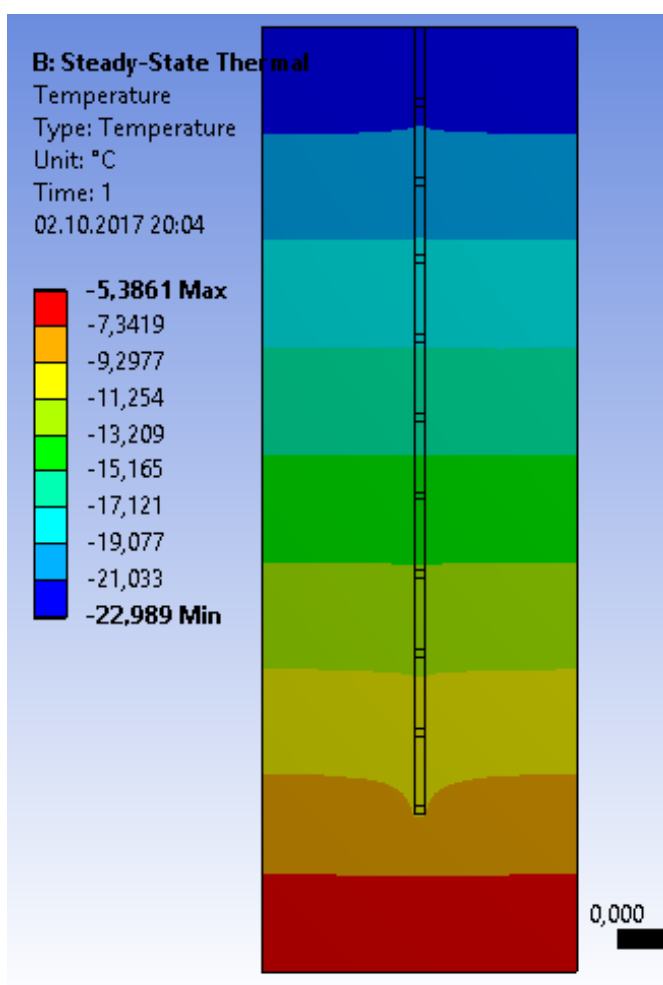


Рис. 3. Распределение температуры для проникающего термозонда при использовании модели грунта с постоянными теплофизическими характеристиками

По результатам моделирования работы термозонда вычислялись значения температур в местах установки термодатчиков. По ним рассчитывалась плотность внутреннего теплового потока с использованием

ТФХ окружающего грунта (без учета искажений, вносимых конструкцией зонда). По результатам сравнения полученного таким образом значения плотности ТП и изначально заданного термозонд показал величину ошибки теплового потока, не превышающую 20% для двух различных моделей грунта.

Во второй главе рассмотрен вопрос контактного измерения теплофизических характеристик лунного грунта. Приведены значения ТФХ реголита по результатам лабораторных анализов образцов, доставленных советскими автоматическими аппаратами Луна-16 и Луна-20, а также по результатам миссий «Аполлон».

Поскольку, как показали исследования, теплопроводность лунного грунта сильно изменяется в приповерхностном слое, и гораздо слабее на глубине от нескольких сантиметров и глубже, в данной главе принято разделение термозондов на два вида:

- заглубляемые;
- незаглубляемые.

Незаглубляемые термозонды представлены поверхностным и остывающим термозондом. Заглубляемые – схемой с использованием пенетратора, проникающим термозондом и термозондом с отделяющимся нагревателем.

Было проведено имитационное численное моделирование с целью определения эффективности каждой из схем.

Остывающий термозонд имеет существенный недостаток – зависимость от теплового сопротивления на контакте термозонда и грунта (этот параметр неизвестен).

Поверхностная схема термозонда имеет определенные перспективы применения.

Схема с использованием пенетратора была разработана для марсианских условий его эксплуатации в составе проекта Марс-96. Однако, при сверхнизких значениях теплопроводности лунного грунта имеет место

сильное влияние конструкции пенетратора на естественное распределение температуры.

Схема проникающего термозонда подобна той, которая использовалась в миссиях «Аполлон-15» и «Аполлон-17». Термозонд представляет из себя стержень с размещенными на нем термодатчиками и нагревателями (рисунок 4).

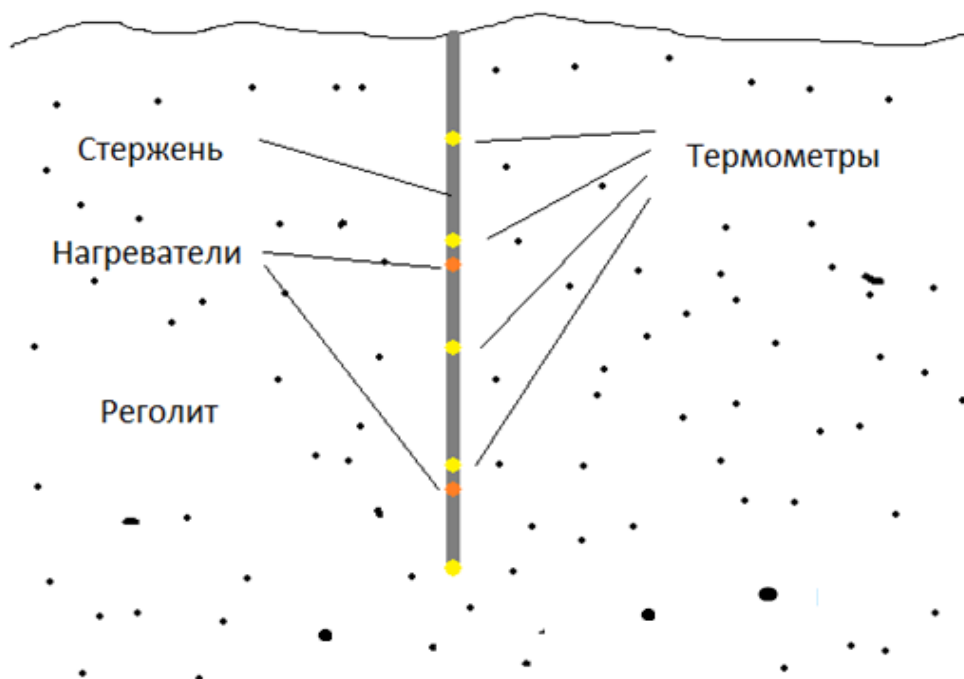


Рис. 4. Схема проникающего термозонда

Численное моделирование работы зонда проводилось на локальном отрезке стержня, с одним нагревателем. Участок грунта в разрезе с локальным участком термозонда представлен на рисунке 5.



Рис. 5. Общий вид модели стержневого термозонда, используемой в расчете. Вид представлен в разрезе

Исходные данные задачи представлены в таблице 2:

Таблица 2

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.

Распределение температуры по результатам решения задачи показано на рисунке 6.

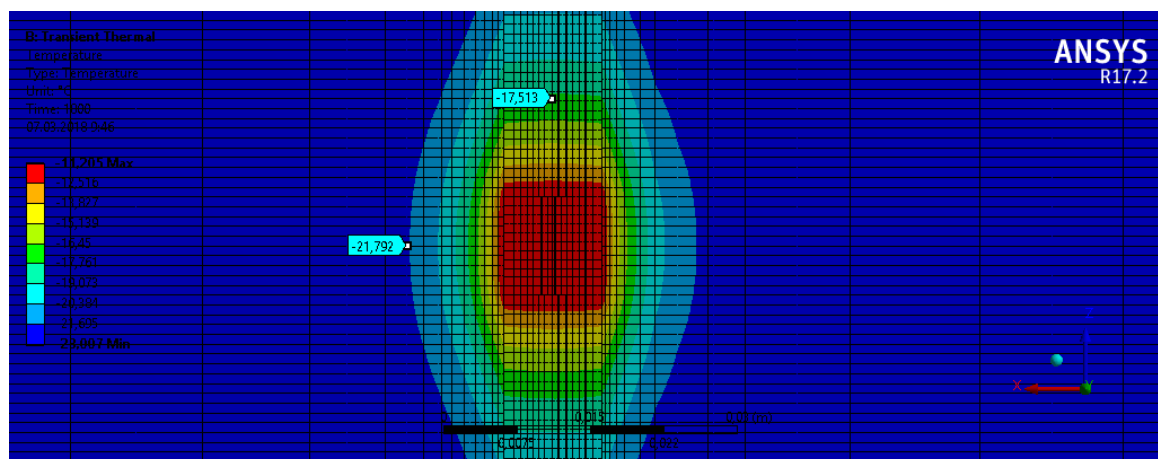


Рис. 6. Распределение температуры при решении тепловой задачи для проникающего термозонда.

На рисунке 6 видно, что конструкция зонда за счет более высокой теплопроводности материала стержня относительно реголита влияет на распределение температуры. Тепло начинает уходить в стержень термозонда, а не в грунт, как этого требует эксперимент. Разница между температурой грунта и термометра в стержне на расстоянии 10 мм от нагревателя составляет около $4,3^{\circ}\text{C}$, что может привести к существенной погрешности при определении ТФХ грунта, например, с помощью модели полубесконечного тела.

Термозонд с отделяющимся нагревателем, предложенный в настоящей работе, является попыткой создать усовершенствованную схему проникающего термозонда, в которой будет отсутствовать «перетекание» тепла через элементы конструкции от нагревателя к термометрам.

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 7). 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.

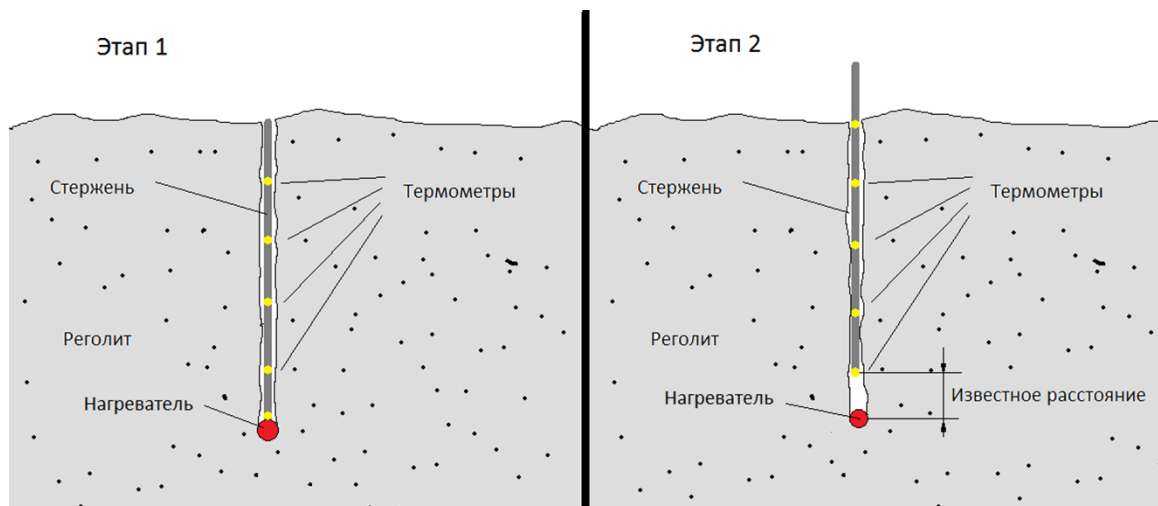


Рис. 7. Схема термозонда с отделяющимся нагревателем

Оценка влияния конструкции на распределение температуры проводилась следующим образом. Сначала проводилось имитационное моделирование работы такого зонда и находилось значение температуры в месте установки термодатчика. Затем из модели убирались все элементы конструкции зонда кроме нагревателя и находилось второе значение температуры в месте установки термодатчика. Сравнивая эти два значения температуры, проводилась оценка влияния конструкции термозонда на распределение температуры.

Исходные данные брались такими же, как и для стержневого термозонда (таблица 2). Расстояние от нагревателя до термометра также равнялось 10 мм.

По результатам моделирования отклонения показаний температуры из-за влияния конструкции термозонда составили 3,1 °С.

В конце главы приведен анализ возможности измерения ТФХ лунного грунта с помощью проникающего термозонда, при использовании непосредственно солнечного тепла. По результатам моделирования показано, что подобный способ может использоваться только как вспомогательный, из-за низкой точности получаемых результатов.

В третьей главе проанализированы предыдущие термозонды по определению плотности внутреннего ГП Луны и ТФХ ее грунта. Выделены основные схемы термозондов, которые имеют перспективы применения. Выполнен анализ преимуществ и недостатков каждой из схем. Определены требования, которым должны отвечать перспективные термозонды, способные измерять как плотность внутреннего ГП Луны, так и ТФХ грунта.

Предложены две перспективные схемы термозондов:

- разделенный термозонд
- термозонд высокого теплового сопротивления (ВТС).

Конструкция разделенного термозонда представляет собой полностью отделенные друг от друга нагреватели и измерители температуры с автономными источниками питания. Это сделано для того, чтобы минимизировать «перетекание» тепла от нагревателя к термометру по элементам конструкции.

Вся система будет состоять из нескольких измерителей и нагревателей, помещенных в пробуренную скважину и зафиксированных на определенных расстояниях относительно друг друга (рисунок 8). Устройства фиксируются посредством раздвижных секторов, которые распираются в стенки скважины.

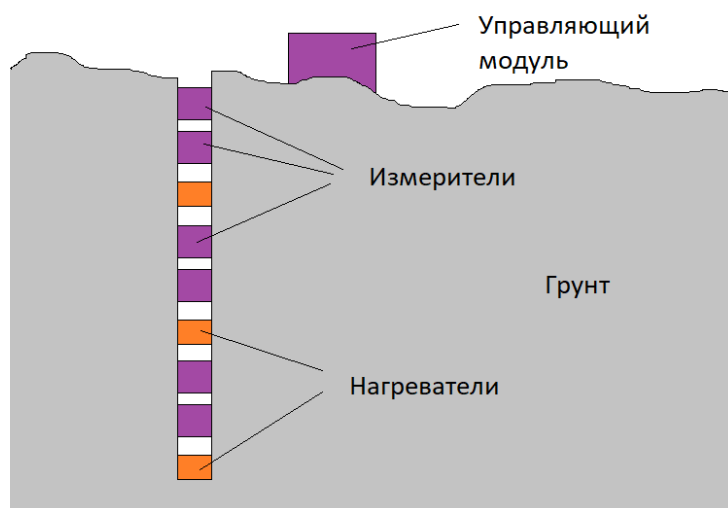


Рис. 8. Схема разделенного термозонда

По результатам имитационного численного моделирования измерения ТФХ лунного грунта было выявлено, что подобный термозонд, хоть и в меньшей степени (относительно рассмотренных выше схем термозондов), но влияет на естественное распределение температуры. Отклонения показаний температуры из-за влияния конструкции термозонда составили 2,3 °С. Значения мощности нагревателя и расстояние от него до термодатчика были взяты такими же, как и для стержневого термозонда (таблица 2).

По результатам моделирования работы разделенного термозонда в режиме измерения плотности внутреннего ТП Луны отклонение от искомого значения не превышало 11%.

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. Чтобы снизить влияние конструкции зонда на распределение температуры, было найдено решение в виде схемы термозонда высокого теплового сопротивления (ВТС).

На рисунках 9, 10 приведена одна из возможных реализаций схемы термозонда ВТС.

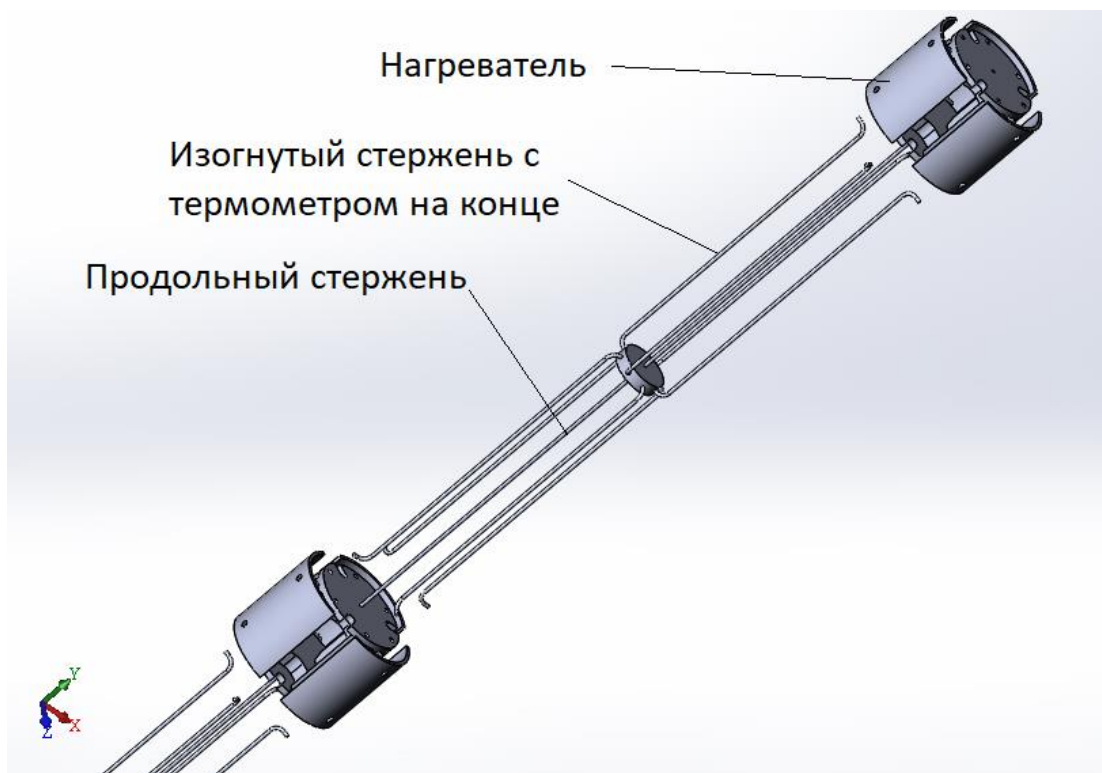


Рис. 9. Схема отдельной секции термозонда высокого теплового сопротивления



Рис. 10. 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, внутрь 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.

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

Исходные данные приведены в таблице 3 и ниже:

Таблица 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.

Тепловые контакты между элементами конструкции термозонда приняты идеальными.

Постановка задачи следующая. Пусть задана некоторая область $S(x', y', z')$ трехмерного пространства $E_3(x, y, z)$. При этом: $0 < x' < x_1$; $0 < y' < y_1$; $0 < z' < z_1$ (рисунок 11).

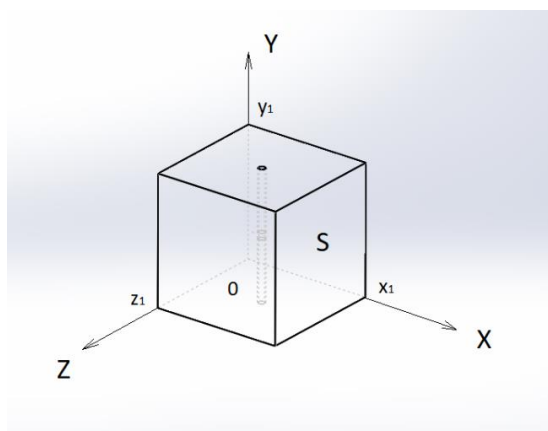


Рис. 11. Общий вид области S

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 12 изображена область S в разрезе, на которой показан термозонд.

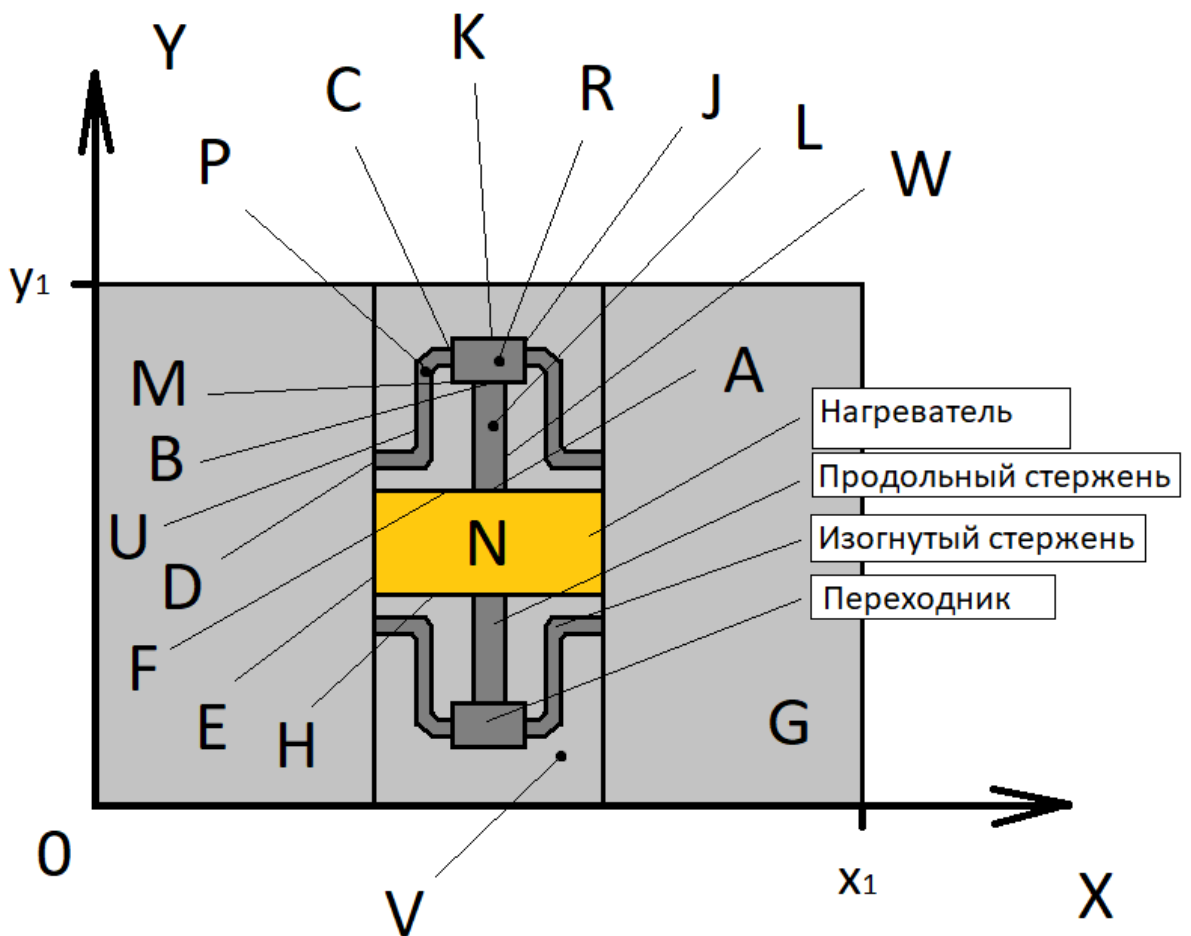


Рис. 12. Область S в разрезе

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

Уравнения теплопроводности.

Уравнение теплопроводности для нагревателя в области ($\tau > 0; N_1 \subset N$):

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

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

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

Уравнение теплопроводности для грунта в области ($\tau > 0; G_1 \subset G$):

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

Здесь G – область пространства, занятая грунтом, a_r – температуропроводность грунта.

Уравнение теплопроводности для изогнутого стержня в области

($\tau > 0; P_1 \subset P$):

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

Здесь P – область пространства, занятая изогнутым стержнем, a_n – температуропроводность изогнутого стержня.

Уравнение теплопроводности для переходника в области ($\tau > 0; R_1 \subset R$):

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

Здесь R – область пространства, занятая переходником, a_n – температуропроводность переходника.

Уравнение теплопроводности для продольного стержня в области

($\tau > 0; L_1 \subset L$):

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

Здесь L – область пространства, занятая продольным стержнем, $a_{пр}$ – температуропроводность продольного стержня (рисунок 12).

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 ; λ_n – теплопроводность нагревателя; $\lambda_{гр}$ – теплопроводность грунта (рисунок 12).

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

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

$$T |_{A_n} = T |_{A_{пр}};$$

где A_n – поверхность нагревателя, контактирующая с продольным стержнем; $A_{пр}$ – поверхность продольного стержня, контактирующая с нагревателем; i_A – нормаль к поверхности A ; λ_n – теплопроводность нагревателя; $\lambda_{пр}$ – теплопроводность продольного стержня (рисунок 12).

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

$$\lambda_{\text{пр}} \frac{\partial T}{\partial i_B} |_{B_{\text{пр}}} = \lambda_{\text{п}} \frac{\partial T}{\partial i_B} |_{B_{\text{п}}};$$

$$T|_{B_{\text{пр}}} = T|_{B_{\text{п}}};$$

где $B_{\text{пр}}$ – поверхность продольного стержня, контактирующая с переходником; $B_{\text{п}}$ – поверхность переходника, контактирующая с продольным стержнем; i_B – нормаль к поверхности B ; $\lambda_{\text{п}}$ – теплопроводность переходника.

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

$$\lambda_{\text{и}} \frac{\partial T}{\partial i_C} |_{C_{\text{и}}} = \lambda_{\text{п}} \frac{\partial T}{\partial i_C} |_{C_{\text{п}}};$$

$$T|_{C_{\text{и}}} = T|_{C_{\text{п}}};$$

где $C_{\text{и}}$ – поверхность изогнутого стержня, контактирующая с переходником; $C_{\text{п}}$ – поверхность переходника, контактирующая с изогнутым стержнем; i_C – нормаль к поверхности C ; $\lambda_{\text{и}}$ – теплопроводность изогнутого стержня.

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

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

$$T|_{D_{\text{и}}} = T|_{D_{\text{гр}}};$$

где $D_{\text{и}}$ – поверхность изогнутого стержня, контактирующая с грунтом; $D_{\text{гр}}$ – поверхность грунта, контактирующая с изогнутым стержнем; i_D – нормаль к поверхности D ; $\lambda_{\text{гр}}$ – теплопроводность грунта (рисунок 12).

Условие нулевого теплового потока на нижней поверхности нагревателя:

$$\lambda_{\text{н}} \frac{\partial T}{\partial y} |_{\text{н}} = 0;$$

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 $A \notin F$.

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 $B \notin M$.

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:

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

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

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

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

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

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

Условие начальной температуры:

$$T(x, y, z, 0) = T_0 = const.$$

В результате решения задачи находилось значение температуры в месте контакта термодатчика и грунта. Затем, из модели исключались все элементы конструкции кроме нагревателя и решалась аналогичная задача. По результатам решения находилось второе значение температуры в месте контакта термодатчика и грунта. Полученные два значения температуры сравнивались и оценивалось влияние конструкции на распределение температуры.

На рисунке 13 показаны распределения температур по результатам решения задач для первой и второй модели.

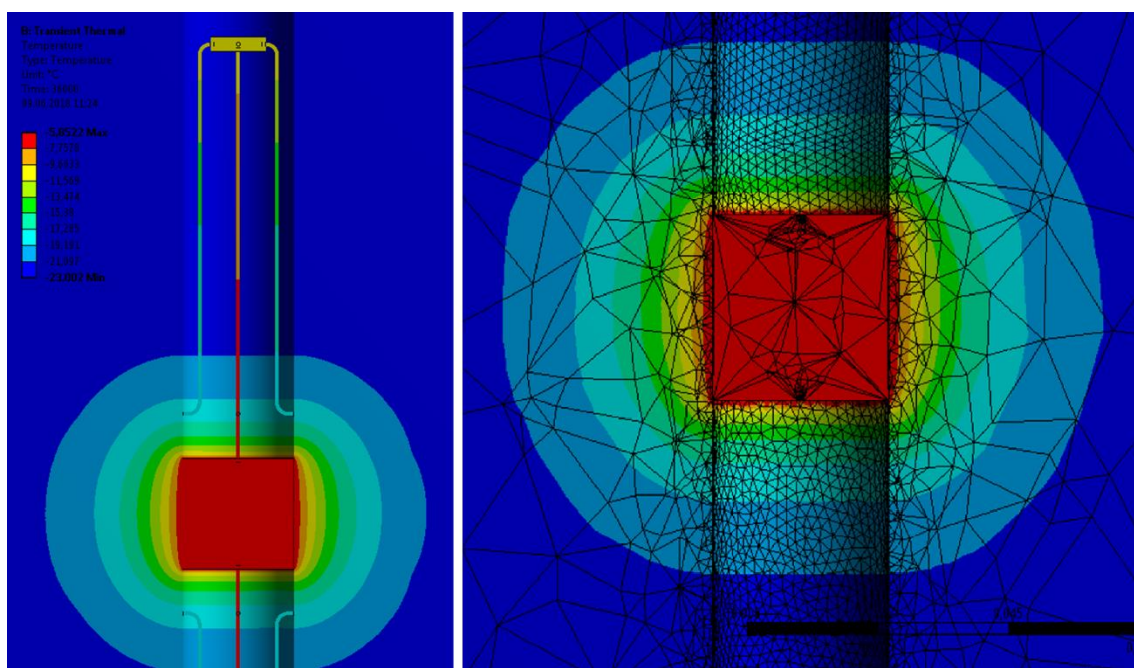


Рис. 13. Распределение температуры. Термозонд ВТС. Слева – расчет модели со всеми элементами конструкции; справа – расчет модели, в которой оставлен только нагреватель.

Как видно из рисунка 13, картина распределения температуры при использовании термозонда ВТС и без учета влияния конструкции на температурное поле практически идентична. Из этого можно сделать вывод,

что предложенная схема зонда практически 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 $0,17\text{ }^{\circ}\text{C}$. Этот анализ позволяет сделать вывод, что данная схема зонда позволит определять ТФХ лунного грунта с достаточно высокой достоверностью.

Для сравнения на рисунке 14 представлены такие же расчеты, для стержневого термозонда, описанного в предыдущей главе, который использовался в миссиях «Аполлон».

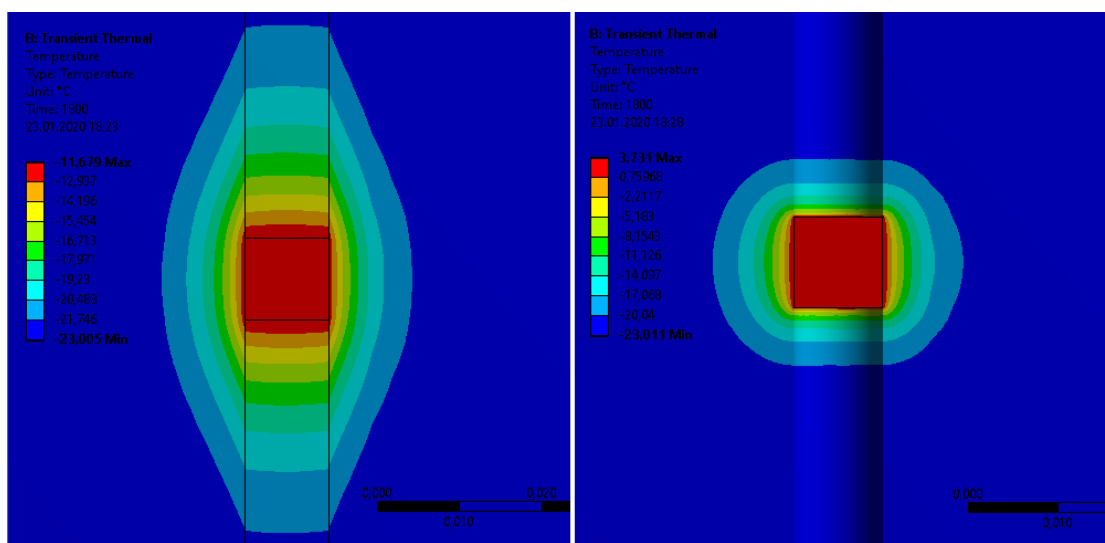


Рис. 14. Распределение температуры. Стержневой термозонд.

Слева – расчет модели со всеми элементами конструкции; справа – расчет модели в которой оставлен только нагреватель.

Как можно видеть из рисунка 14, 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 $-18,67\text{ }^{\circ}\text{C}$. Отклонения показаний температуры из-за влияния конструкции термозонда составили $3,1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Анализ данной схемы термозонда показал, что влияние теплового сопротивления на контакте термозонда и грунта будет не столь существенным при измерении ТФХ лунного грунта. Следовательно, чем меньше чувствительность зонда к этому параметру, тем достоверность результатов лучше. Была проведена серия расчетов с различными значениями теплового сопротивления на контакте зонда и грунта от $0,01(\text{м}^2\text{ }^{\circ}\text{C})/\text{Вт}$ до $0,0001(\text{м}^2\text{ }^{\circ}\text{C})/\text{Вт}$. Стержневой термозонд показал расхождение температуры в местах установки термодатчиков до $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. В свою очередь, схема термозонда ВТС в самом худшем случае дает разницу до $0,35\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На следующем этапе было проведено имитационное моделирование определения ТФХ лунного грунта с помощью термозонда ВТС и стержневого термозонда для сравнения результатов. Моделирование проводилось следующим образом. Сначала решалась прямая задача теплопроводности для двух схем термозондов с одинаковыми условиями по ТФХ грунта; в результате для каждой схемы находилась так называемая «измеренная» температура в местах установки термодатчиков. Затем, решалась обратная задача методом подбора. А именно, из моделей двух схем термозондов исключались все элементы конструкции, кроме нагревателей, и решались серии прямых задач, в которых варьировались значения теплоемкости и теплопроводности грунта. В результате находились разные значения температур в местах установки термодатчиков для разных значений ТФХ грунта. После этого температуры сравнивались с «измеренными» и выбирались соответствующие им ТФХ лунного грунта.

По результатам данного моделирования показания стержневого термозонда не соответствовали изначально заданным. Наиболее близкое решение было со значением теплопроводности $0,01\text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$ и теплоемкости $300\text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$. При этом заданные значения теплопроводности были $0,02\text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$, и теплоемкости были $600\text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$.

Результаты термозонда ВТС оказались значительно лучше. Было найдено два решения: первое – со значениями теплопроводности $0,02 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ и теплоемкости $600 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{°C)}$, которое соответствуют изначально заданным параметрам; и второе – со значениями теплопроводности $0,015 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$, и теплоемкости $700 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{°C)}$, которое не соответствуют изначально заданным параметрам, однако является достаточно близким. При этом в прямой задаче изначально заданные значения теплопроводности были $0,02 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$, и теплоемкости $600 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{°C)}$.

Как и предполагалось, численные расчеты показали неединственность решения задачи, но при этом среди этих решений было найдено одно, которое весьма близко к искомому. Поэтому можно сделать предварительный вывод, что, если измерять температуру в двух или более точках, решение соответствующей обратной задачи будет единственно, а его точность будет достаточно высокой. Внести в схему датчика дополнительные термодатчики не представляет трудность.

Как можно наблюдать из численных экспериментов, проведенных выше, термозонд ВТС гораздо меньше искажает распределение температуры при измерении ТФХ, чем остальные схемы термозондов. Также он 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 различные другие факторы, вносящие отклонения, которые сложно предсказать и учесть в решении. 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 неучету упомянутых выше факторов.

На заключительном этапе проводилось математическое моделирование работы термозонда ВТС в режиме определения плотности внутреннего ТП Луны. Была оценена ошибка в определении плотности ТП, которая не превысила 12%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 схем 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. Предложенная схема термозонда высокого теплового сопротивления может использоваться как на автоматических станциях, так и в пилотируемых миссиях. По результатам исследований получен 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.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

Патенты

6. 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.

Другие публикации

7. Дудкин К.К. Измерение плотности потока внутреннего тепла Луны // Гагаринские чтения – 2018: XLIV Международная молодежная научная конференция. Сборник тезисов докладов. – Москва: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2018. – Т. 3. – С. 44.

8. Дудкин К.К., Долгополов В.П. Использование инерционных космических зондов-пенетраторов для научных исследований Луны. // XI Академические чтения по космонавтике посвященные памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства. Сборник тезисов. – Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – С. 30.

9. Дудкин К.К., Долгополов В.П. Использование инерционных космических зондов-пенетраторов для научных исследований Луны // 14-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2015». Тезисы. – Москва: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2015. – С. 55.

10. 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. – Калуга: Изд-во «Эйдос», 2015. – С. 291-292.