

УДК 629.787

# Измерения теплофизических характеристик лунного грунта в естественных условиях

К. К. Дудкин<sup>1,2</sup>, О. М. Алифанов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) «МАИ», Москва;

<sup>2</sup> АО «НПО Лавочкина», г. Химки, Моск. обл.;

e-mail: lordkonst@mail.ru; o.alifanov@yandex.ru

Поступила в редакцию 24.07.2018

Рассматриваются различные виды контактных датчиков для исследования теплофизических характеристик лунного грунта. Анализируются их схемы и принципы работы. Представлены результаты имитационного моделирования работы датчиков и выделены основные типы датчиков, которые потенциально могут быть применимы на космических аппаратах, предполагающих посадку на лунную поверхность.

Ключевые слова: лунный грунт, теплопроводность, теплофизические характеристики, датчик теплопроводности, исследование Луны.

## Введение. История измерений. Характеристики грунта. Классификация датчиков

Измерение теплофизических характеристик (ТФХ) лунного грунта является важной научной задачей.

Во-первых, понимание ТФХ грунта позволит оценивать величину тепловых потоков из недр Луны; а это, в свою очередь, позволит понять тектоническую историю и процессы эволюции планеты в целом. Во-вторых, по оценке тепловых потоков будет возможно понять тектоническую активность Луны в настоящее время. В-третьих, понимание ТФХ грунта необходимо с чисто практической точки зрения: например, для строительства лунной базы.

Измерение теплофизических характеристик грунта непосредственно на Луне было проведено 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. В этих зондах были установлены восемь платиновых термометров сопротивления и четыре термодпары для измерений

на 11-ти уровнях глубины под поверхностью. Четыре термометра на каждом из зондов были оборудованы нагревателями, управляемыми с Земли (рис. 1).

Температурные данные со всех термометров передавались на Землю каждые 7.2 мин.

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 ч наблюдений. Данный термозонд позволял провести

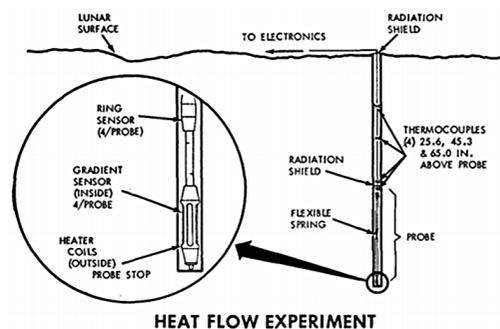


Рис. 1. Схема применения термозондов в миссиях «Аполлон-15» и «Аполлон-17» [1]

\* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-08-00687-а.

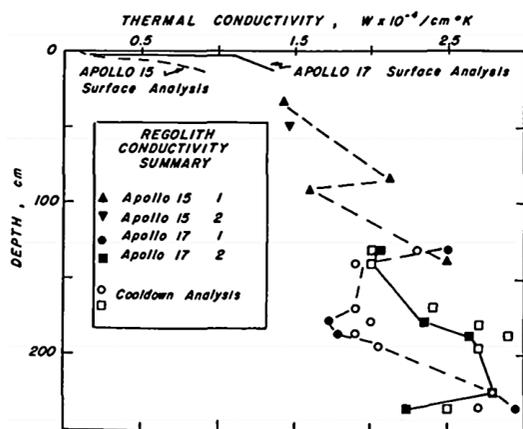


Рис. 2. Зависимость теплопроводности лунного грунта от глубины, по результатам миссий «Аполлон-15» и «Аполлон-17» [1]



Рис. 3. Классификация схем заглубляемых термозондов

измерения ТФХ на всех датчиках, т. е. на восьми 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 [1].

В данной статье не будут рассматриваться способы измерения ТФХ, использующие в своей основе эффекты естественного изменения теплового состояния лунного грунта.

На рис. 2 приведены результаты определения теплопроводности лунного грунта в зависимости от глубины, полученные в миссиях «Аполлон-15» и «Аполлон-17» [1].

Видно, что наиболее сильно теплопроводность грунта изменяется в приповерхностном слое на глубине всего в несколько сантиметров (табл. 1), в то время как при дальнейшем увеличении глубины ее изменение не так существенно.

Из этого можно сделать вывод, что задачу по определению ТФХ грунта Луны можно разделить на две подзадачи: измерение ТФХ в поверхностном слое (до нескольких сантиметров

с использованием незаглубляемого термозонда) и определение значений ТФХ по глубине до нескольких метров с помощью заглубляемого термозонда.

Таблица 1. Распределение теплопроводности грунта в зависимости от глубины

Глубина, см	Теплопроводность грунта $\lambda$ , Вт/(м·К)
0–3	0.001–0.011
3–220	0.011–0.03

Реализация каждой из этих подзадач будет иметь свои технические особенности.

В данной статье анализируются потенциально возможные схемы заглубляемых термозондов для измерения ТФХ лунного грунта по глубине до нескольких метров.

### 1. Заглубляемые термозонды

Рассматриваются три схемы заглубляемых термозондов для определения ТФХ лунного грунта (рис. 3).

#### 1.1. Схема с использованием пенетратора

Для измерения ТФХ лунного грунта (в будущей миссии «Луна-ресурс») планировалось использовать наработки, полученные при создании пенетратора – ударного проникающего зонда. Два таких зонда входили в состав миссии «Марс-96»\* и имели возможность внедряться в грунт планеты. 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 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 рис. 4.

Измерение температуры предполагалось проводить датчиками, разносимыми от корпуса пенетратора специальными устройствами (системой разворачивания) для того, чтобы чувствительные элементы датчиков измеряли температуру в практически невозмущенной в тепловом отношении

\* Миссия «Марс-96» не была реализована из-за отказа разгонного блока, который должен был вывести межпланетную станцию на траекторию полета к Марсу.

области грунта. Эти датчики задействовались и в экспериментах по определению ТФХ.

Для определения ТФХ предполагалось использовать подход, основанный на применении 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 (см. рис. 4) по аналогии с [3].

В окончательном варианте для измерения температуры использовались терморезисторы, что позволило отказаться от устройств 12, 20, предназначенных для измерения абсолютной температуры свободных спаев термопар.

Следуя [4], для моделирования теплового режима грунта в первом приближении возможно 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 – коэффициентов объемной теплоемкости  $C$  и теплопроводности  $\lambda$  из условий:

$$C \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, x \in (0, b), \tau \in (0, \tau_m]; \quad (1)$$

$$-\lambda \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = q_1(\tau); \quad (2)$$

$$-\lambda \frac{\partial T(b, \tau)}{\partial x} = q_2(\tau); \quad (3)$$

$$T(x, 0) = T_0(x); \quad (4)$$

$$T(x_m, \tau) = f_m(\tau), m = \overline{1, M}, \quad (5)$$

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

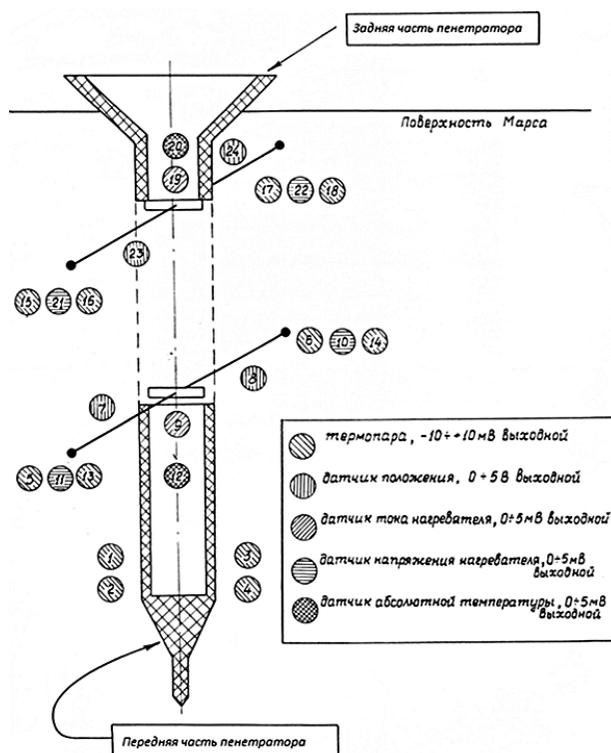


Рис. 4. Принципиальная схема размещения датчиков эксперимента «Термометрия»

времени;  $f_m(\tau)$  – температура, измеренная  $m$ -й термопарой;  $M$  – количество термопар.

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

$$J(C, \lambda) = \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \int_0^{\tau_m} \chi_m(\tau) [T(x_m, \tau) - f_m(\tau)]^2 d\tau, \quad (6)$$

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

Для численного решения обратной задачи (1)–(6) был разработан алгоритм, аналогичный описанному в [5]. Задача (1)–(6) трактовалась как задача оптимального управления, где управляющим воздействием является вектор параметров  $R = \{C, \lambda\}$ .

Решение данной экстремальной задачи строилось с использованием градиентных методов минимизации [6].

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

Таблица 2. Исходные данные для решения тепловой задачи

Наименование	Материал	Диаметр	Высота/Длина	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Теплоемкость, Дж/(кг·К)
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

Примечание: мощность нагревателя – 2 Вт; время нагрева – 30 мин; начальная температура системы – минус 23 °С.

Таблица 3. 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

проводились для упрощенной модели, где в качестве пенетратора рассматривался только его полый корпус, находящийся в тепловом контакте с цилиндрическим выдвигным 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 табл. 2.

Серия расчетов была проведена методом конечных разностей в программной среде ANSYS. В каждом последующем расчете уменьшался размер конечных элементов. Предполагалось, что расчеты будут вестись до совпадения результатов двух последних итераций с точностью до сотых градуса. Однако из-за относительной сложности

модели и в виду ограниченной вычислительной мощности компьютера расчеты проводились до уровня точности 0.7 °С. В табл. 3 представлены данные по итерационным расчетам с изменением величины конечных элементов.

Как видно из рис. 5, из-за низкой теплопроводности грунта значительная часть тепла распределяется по корпусу пенетратора.

Эту картину подтверждают значения температур, приведенные в табл. 3. Соответственно, термометр, установленный на корпусе пенетратора, будет показывать искаженные данные, если в качестве модели для обратной задачи теплопроводности будет браться модель бесконечной пластины.

## 1.2. Проникающий датчик

Схема этого датчика подобна той, которую использовали в миссиях «Аполлон-15» и «Аполлон-17». Основа конструкции – стержень, в котором через определенные расстояния установлены нагреватели и термометры (рис. 6).

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.

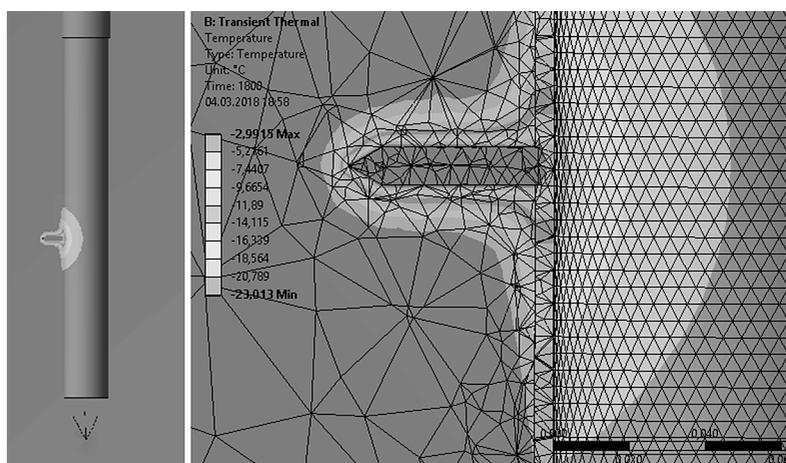


Рис. 5. Распределение температуры при решении тепловой задачи для схемы с использованием пенетратора

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.

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 породы. Ошибка, вносимая переменным коэффициентом теплоотдачи зонд–порода, может быть при этом довольно значительна.

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

Тепловой расчет был проведен на участке стержня с одним нагревателем, находящимся между двух частей основного стержня. Модель состояла из стеклопластикового стержня и медного нагревателя. Грунт однослойный, с усредненными значениями для глубины от 0.5 м до 1 м – по данным миссий «Аполлон». Надо сказать, что материал стержня выбран не случайно. Дело в том, что стеклопластик обладает достаточ-

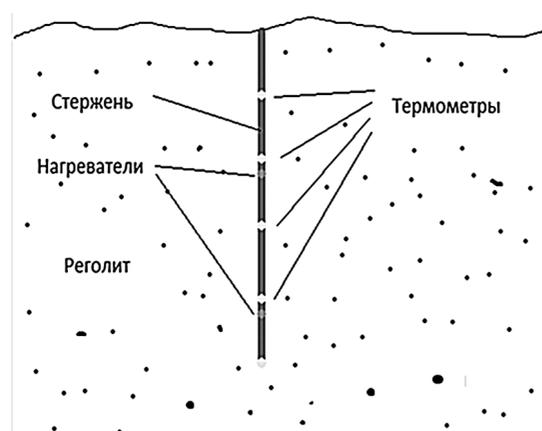


Рис. 6. Схема проникающего датчика

но 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 миссиях «Аполлон» NASA также в качестве материала стержня использовали стеклопластик.

Исходные данные приведены в табл. 4.

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 табл. 5 представлены данные по итерационным расчетам с изменением величины конечных элементов.

Как видно, разница между температурами 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

Таблица 4. Исходные данные для решения тепловой задачи

Наименование	Материал	Диаметр	Высота/Длина	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Теплоемкость, Дж/(кг·К)
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

Примечание: мощность нагревателя – 0.1 Вт; время нагрева – 30 мин; начальная температура системы – минус 23 °С.

Таблица 5. Анализ точности решения тепловой задачи при выборе размера конечного элемента

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

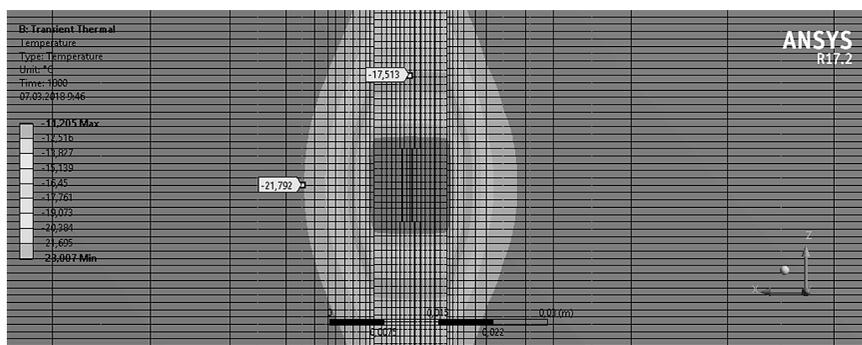


Рис. 7. Распределение температуры при решении тепловой задачи для проникающего датчика

Таблица 6. Результаты решения ОЗТ для проникающего датчика

Теплопроводность, Вт/(м·К)	Температура грунта на расстоянии 10 мм от нагревателя, °С	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Температура грунта на расстоянии 10 мм от нагревателя, °С
0.001	-22.9986	0.15	-21.6048
0.002	-22.9814	0.2	-21.801
0.01	-22.2123	0.25	-21.9521
0.02	-21.5757	0.3	-22.071
0.05	-21.1694	0.35	-22.1653
0.1	-21.3622	0.4	-22.2431

с невозмущенными элементами конструкции температурой грунта, отстоящей на таком же расстоянии от нагревателя (рис. 7). В данных условиях температура в стержне минус 17.513 °С, температура грунта минус 21.792 °С. Разница температур составила 4.279 °С.

На следующем этапе оценку влияния элементов конструкции попробуем провести с помощью

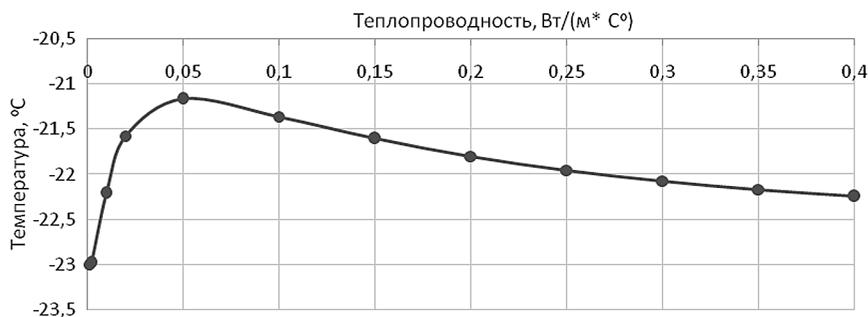


Рис. 8. Зависимость температуры грунта на расстоянии 10 мм от нагревателя от теплопроводности грунта

ОЗТ (моделирование ситуации, как если бы мы в своих расчетах пренебрегли этим влиянием).

Для этого примем «измененную» величину температуры на расстоянии 10 мм от нагревателя, равной минус 17.51 °С (которую мы измерили на стеклопластиковом стержне, округлив до сотых), и попытаемся по ней определить теплопроводность грунта.

Будем решать ряд простых прямых нестационарных однопараметрических задач, в которых нам известны все параметры грунта, кроме теплопроводности. Зафиксировав эти параметры, будем варьировать величину теплопроводности грунта и рассчитывать реальную температуру грунта, находящегося на расстоянии 10 мм

от нагревателя. При этом нашей целью будет достичь температуру минус 17.51 °С, чтобы по этому графику получить «измеренную» теплопроводность. Величину конечного элемента примем равным 2 мм, так как при данном размере мы гарантированно получим приемлемую точность вычислений (см. табл. 5), 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 табл. 6 и на рис. 8.

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.

### 1.3. Датчик с отделяющимся нагревателем

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

Термозонд такого типа состоит из двух частей: стержень с термометрами и отделяемый нагреватель (рис. 9). Принцип действия 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.

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:

$$\frac{dQ}{dt} = I^2 R,$$

где  $Q$  – количество теплоты;  $t$  – время;  $I$  – напряжение в цепи;  $R$  – сопротивление цепи.

Эта величина получится достаточно точно измеренной, так как отсутствуют какие-либо «тепловые мосты» в виде стержней, связывающих проводов и др. Нагреватель контактирует только с грунтом, и все тепло уходит только туда.

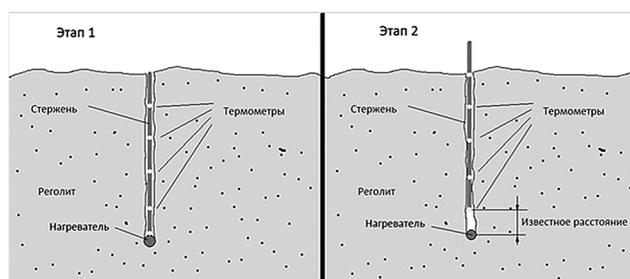


Рис. 9. Схема датчика с отделяющимся нагревателем

Плюсы данной схемы:

- достаточно точное определение расстояния до термометра;
- достаточно точное определение выделяемого тепла;
- отсутствие искажения распределения температуры из-за перетекания тепла от нагревателя по стержню.

Как следствие этих плюсов, можно отметить более точное измерение ТФХ грунта.

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

Данные с «Аполлона-15» и «Аполлона-17» показывают, что наиболее сильно теплопроводность грунта изменяется в приповерхностном слое грунта на глубине всего в несколько сантиметров (см. табл. 1, рис. 2) [1].

Ввиду этого, интереснее всего было бы измерить ТФХ грунта в двух точках: на поверхности, где теплопроводность грунта имеет сверхнизкие значения, и на некоторой глубине. Эту задачу можно реализовать с помощью рекомендуемого термозонда.

Проведем расчет прямой нестационарной задачи теплопроводности методом конечных элементов, используя программную среду ANSYS для анализа распределения температуры в системе грунт–термозонд (рис. 10). Так же, как и ранее, это будет серия расчетов с последующим уменьшением конечных элементов с целью добиться определенной точности. ТФХ грунта будем брать характерными для глубины 1–1.5 м по данным миссий «Аполлон».

Исходные данные приведены в табл. 7.

Результаты расчетов приведены в табл. 8.

Самый малый размер конечного элемента, который соответствует наивысшей достигнутой точности решения задачи, составляет 2 мм. Дальнейшее уменьшение размера и повышение точности было ограничено вычислительной мощ-

Таблица 7. Исходные данные для решения тепловой задачи

Наименование	Материал	Диаметр, мм	Высота/Длина, мм	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Теплоемкость, Дж/(кг·К)
Стержень	Стеклопластик	30	460	0.4	1000
Нагреватель	Медный сплав	30	30	401	385
Грунт	Грунт	–	–	0.02	600

Примечания: расстояние от нагревателя до стержня – 10 мм; мощность нагревателя – 0.1 Вт; время нагрева – 10 ч; начальная температура системы – минус 23 °С.

Таблица 8. Анализ точности решения тепловой задачи при выборе размера конечного элемента

Размер конечного элемента, мм	Температура нагревателя, °С		Температура стержня в нижней точке (на расстоянии 10 мм от нагревателя), °С
	Max	Min	
10	-9.2105	-9.2139	-20.769
5	-8.4104	-8.4121	-21.146
2	-8.2749	-8.2766	-21.236

ностью компьютера. При таком размере конечного элемента точность составила ~0.17 °С.

Как и в схеме с проникающим датчиком, попробуем определить степень 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.

Оценивать погрешность от влияния конструкции будем следующим образом.

*Этап 1.* Определение погрешности с помощью решения прямой задачи.

Для этого необходимо использовать математическую модель теплопереноса, 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 °С.

Далее из модели исключаются все элементы конструкции, кроме нагревателя, и при тех же исходных данных определяется температура грунта в месте, где он должен был бы контактировать с термометром (рис. 11). В нашем случае она равна минус 18.1 °С, т.е. разность температур составила 3.1 °С. Чем меньше этот показатель, тем меньшее влияние оказывает конструкция датчика на распределение температур и, следовательно, на точность измерений.

*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. Это будет «измеренная» температура. В нашем случае, как мы уже

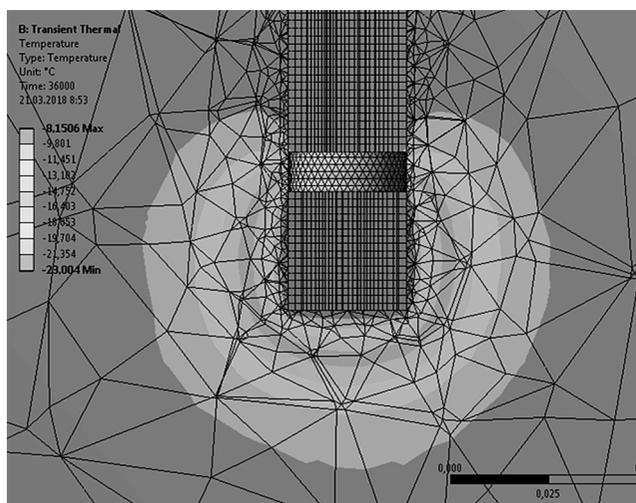


Рис. 10. Распределение температуры для датчика с отделяющимся нагревателем при решении тепловой задачи

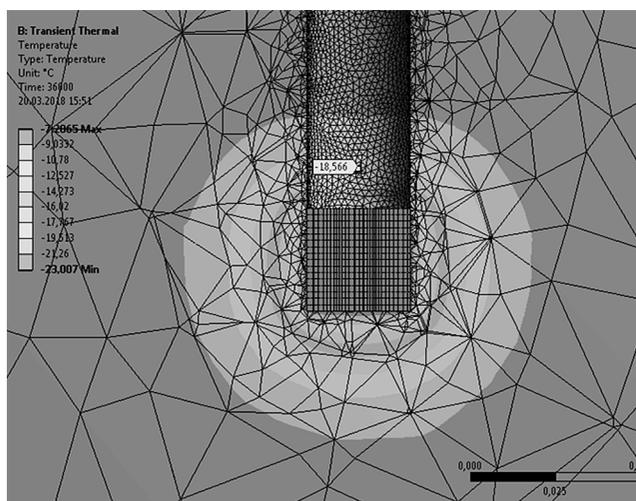


Рис. 11. Распределение температуры для датчика с отделяющимся нагревателем (модель без стержня) при решении тепловой задачи

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 табл. 9 и на рис. 12. Величину конечного элемента прием равным 2 мм.

**Таблица 9. Результаты решения ОЗТ для датчика с отделяющимся нагревателем**

Теплопроводность, Вт/(м·К)	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

Как видно из решения, при данных условиях «измеренная» теплопроводность имеет два возможных значения: 0.0008 и 0.1 Вт/(м·К). В первом случае теплопроводность составляет лишь 4% от исходной величины (т.е. погрешность равна 96%), во втором – погрешность составила 400%. Эти погрешности объясняются существенным теплоотводом через грунт в тело стержня с последующей теплоотдачей через его боковую поверхность. Величину этих погрешностей нельзя рассматривать как характеристику точности датчика; это лишь характеристика влияния конструкции на распределение температуры.

Проведенное моделирование погрешностей измерений показывает существенное влияние конструкции на распределение температуры и опасность неучета этого обстоятельства в математической модели, используемой для решения ОЗТ.

## Заключение

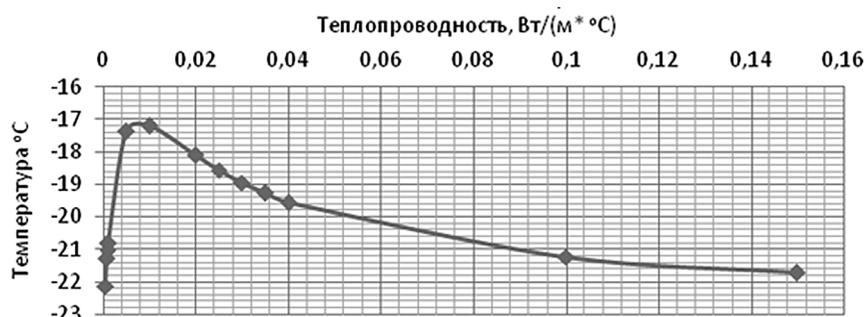
В статье рассмотрено несколько различных схем датчиков для измерения теплофизических характеристик лунного грунта.

Существенным фактором, определяющим точность исследования ТФХ, является влияние самой конструкции датчика. 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 статье это продемонстрировано на нескольких модельных примерах.

В табл. 10 приведена сводка результатов моделирования и оценки влияния конструкции на точность результатов.

Датчик с использованием пенетратора из-за высокой теплопроводности титанового корпуса показал самый сильный разброс погрешностей по температуре, т.е. влияние корпуса оказалось слишком большим по сравнению с другими схемами.

Проникающий датчик при сравнении «измеренной» температуры и истинной показал разброс почти в два раза меньше, чем схема с использованием пенетратора, 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 датчик обладает



**Рис. 12.** Зависимость температуры от теплопроводности в точке на расстоянии 10 мм от нагревателя

Таблица 10. Анализ датчиков для определения ТФХ лунного грунта

Название датчика	Мощность нагревателя, Вт	Время нагрева, мин	Расстояние от нагревателя, мм	Значение температуры, связанной с элементом конструкции, °С	Значение температуры грунта, °С (при моделировании без элементов конструкции)	Разница температур, °С (точность при моделировании прямой задачи)	Точность при моделировании обратной задачи
Схема с использованием пенетратора	2	30	20	-15.239	-22.725	7.486	–
Проникающий датчик (схема Apollo)	0.1	30	10	-17.513	-21.792	4.279	Температура вышла за пределы расчетной зависимости
Датчик с отделяющимся нагревателем	0.1	600	10	-21.236	-18.1239	3.1121	96–400%

такими преимуществами, по сравнению с остальными, как простота и надежность конструкции, простота установки и использования.

Самые лучшие результаты по степени влияния конструкции на тепловой поток показал датчик с отделяющимся нагревателем. При моделировании влияния с помощью прямой задачи, в которой использовались модели с конструкцией датчика и без, разница температур составила 3.1 °С, что является лучшим показателем среди остальных датчиков. Это утверждение справедливо и для результатов моделирования влияния конструкции с помощью ОЗТ. В целом, такой датчик имеет перспективы для использования по следующим соображениям:

- относительная простота конструкции;
- относительная простота использования;
- тот факт, что он измеряет температуру на конечной глубине, не является критическим недостатком (см. табл. 1), особенно при использовании в сочетании с поверхностным датчиком.

Повторимся, что в примерах моделирования, приведенных в этой статье, при расчете погрешности с помощью ОЗТ рассматривались схемы без ключевых элементов конструкций лишь для того, чтобы показать масштабы влияния этих конструкций на конечное распределение температуры. Погрешности решения ОЗТ в табл. 10 лишь характеризуют величину данного влияния, а не отражают точность датчиков как таковых.

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

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лангсет М. С., Кейм С. Д.** Непосредственные измерения теплового потока на Луне. В кн.: Космохимия Луны и планет. Труды Советско-Американской конференции по космохимии Луны и планет 4–8 июня 1974 г. М.: «Наука», 1975. С. 200–209.
2. **Алифанов О. М.** Обратные задачи теплообмена. М.: Машиностроение, 1988. 280 с.
3. **Tulloch S. M.** Mars-94, penetrator thermometry instrument. A preliminary report, marh, 1990. University of Kent.
4. **Маров М. Я., Колесниченко А. В., Мануйлов К. К., Осипов В. П.** Эксперимент «Термофоб»: прямые исследования теплофизических свойств грунта Фобоса // *Астрономический вестник*. 2010. Т. 44. № 5. С. 422–430.
5. **Артюхин Е. А., Охупкин А. С.** Восстановление параметров в обобщённом уравнении теплопроводности // *ИФЖ*. 1982. Т. 42. № 6. С. 1013–1019.
6. **Матвеев Ю. А., Алифанов О. М., Заговорчев В. А., Охупкин А. С.** и др. Стратегии и инструменты исследования Лунной поверхности. Этап 1. Отчет о научно-исследовательской работе. Исследовательский проект 3. 2014. По договору на выполнение научно-исследовательской работы (программа стратегического развития) № 202-MRA от 1.11.2013. Москва, 2015.

## Lunar regolith thermo-physical characteristics measuring in natural conditions

K. K. Dudkin<sup>1,2</sup>, O. M. Alifanov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Moscow aviation institute (national research university), Moscow

<sup>2</sup>NPO Lavochkin, Khimki, Moscow region

e-mail: lord-konst@mail.ru; o.alifanov@yandex.ru

The article considers various types of thermo-touch-probes, penetrating up to several meters, for lunar regolith thermo-physical characteristics (TPC) exploration. Schemes of thermo-probes are divided into three groups: with penetrator application; penetrating thermo-probe; a drill probe with separable heater. The scheme applying penetrator was developed for the “Mars-96” mission. However, this mission failed due to the failure of the upper-stage rocket of the interplanetary station system for placing into the flight trajectory to Mars. The regolith heating was supposed to be performed by the retractable heater, and the temperature was being measured by thermometers installed on the penetrator hull. However, calculations revealed that the strong distortions of temperature distribution pattern occurred due to the too large difference between the lunar regolith and penetrator’s structural elements thermal conductivity under lunar conditions, which increases significantly the error of the regolith TPC determining. Penetrating probe is a rod in which heaters and thermometers are installed at predetermined distances. The rod was placed into a drilled in advance drill-hole. The heaters were turned on, and TPC was determined by thermometers’ measurements result and thermal conductivity inverse problem solving. This scheme was applicable enough under lunar conditions, but due to the too large difference of thermal conductivity of the lunar regolith and the rod material (fiber glass) the temperature distribution pattern, like in previous case, was distorted. Nevertheless, the structure’s impact was nearly two times lower than for the scheme employing the penetrator. The drill probe with separated heater consist of two parts: rode with meters and separable heater. The probe is lowered into the drill-hole in the regolith, and then the heater is separated from the probe and left on the bottom of the hole. After this, the rod is moved upward on a short pre-determined distance. The structure’s impact of this particular thermo-probe appeared the least of the considered cases. Thermo-probe of this scheme can be employed for the regolith TPC determining in the future lunar missions.

Keywords: lunar regolith, thermo-probes, thermophysical parameters, lunar exploration.

### REFERENCES

1. **Langseth, M. G., Keihm, S. J.** In situ measurements of lunar heat flow. In: *J. H. Pomeroy and N. J. Hubbard (eds.). The Soviet-American Conference on Cosmochemistry of the Moon and Planets, June 4–8, 1974, Moscow.* NASA Special Publication 370, Part I, pp. 283–293.
2. **Alifanov O. M.** *Obratnye zadachi teploobmena* [Inverse heat transfer problems]. Moscow: Mashinostroenie, 1988. 280 p. In Russ.
3. **Tulloch S. M.** Mars-94, penetrator thermometry instrument. A preliminary report, marh, 1990. University of Kent.
4. **Marov M. Y., Kolesnichenko A. V., Manuilov K. K., Osipov V. P.** The Thermophob experiment: Direct investigations of the thermophysical properties of the regolith of Phobos. *Solar System Research.* 2010, vol. 44, no. 5, pp. 393–402.
5. **Artyukhin E. A., Okhapkin A. S.** Determination of the parameters in the generalized heat-conduction equation from transient experimental data. *Journal of engineering physics,* 1982, vol. 42, iss. 6, pp. 693–698. |
6. **Matveev Yu. A., Alifanov O. M., Zagovorchev V. A., Ohapkin A. S.** et al. *Strategii i instrumenti issledovaniya Lunnoi poverhnosti. Etap 1. Ochet o nauchno-issledovatel'skoi rabote. Issledovatel'skij proekt 3. 2014. Po dogovoru na vipolnenie nauchno-issledovatel'skoi raboti (programma strategicheskogo razvitiya) № 202-MRA ot 1.11.2013* [Lunar surface research strategies and tools. Stage 1. Report on research work. Research project 3, 2014. According to the contract for the implementation of research work (strategic development program) No. 202-MRA of 1.11.2013]. Moscow, 2015. In Russ.