

Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 3. С. 103–112
Thermal processes in engineering, 2023, vol. 15, no. 3, pp. 103–112

Научная статья
УДК 620.1.05
DOI: 10.34759/tpt-2023-15-3-103-112

Перспективные термозонды для исследования свойств грунта Луны

О.М. Алифанов¹, К.К. Дудкин¹, А.В. Нетелев¹✉, Л.М. Чернова¹

¹ *Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия*
✉ netelev@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрены два варианта исполнения конструкции термозондов, позволяющих проводить измерения в средах с низким коэффициентом теплопроводности. Лунный грунт обладает очень низким коэффициентом теплопроводности. При создании термозондов необходимо обеспечить минимальное влияние конструкции на картину поля температур. Для оценки работоспособности предложенных конструкций были проведены сравнения температур в точках установки измерительных элементов термозонда при влиянии конструкции и без нее. Моделирование процесса функционирования термозонда осуществлялось в среде ANSYS. Результаты моделирования подтвердили работоспособность конструкций зонда с высоким тепловым сопротивлением конструкции.

Ключевые слова: термозонд, имитационное моделирование, теплофизические свойства грунта, оценка эффективности конструкции

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ грант № 20-08-01-012-А.

Для цитирования. Алифанов О.М., Дудкин К.К., Нетелев А.В., Чернова Л.М. Перспективные термозонды для исследования свойств грунта Луны // Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 3. С. 103–112. DOI: 10.34759/tpt-2023-15-3-103-112

Original article

Prospective thermal probes for Lunar soil properties studying

О.М. Alifanov¹, К.К. Dudkin¹, А.В. Netelev¹✉, Л.М. Chernova¹

¹ *Moscow aviation institute (National Research University), Moscow, Russia*
✉ netelev@mail.ru

Abstract. The article considers two versions of the thermal probes design, which allow measurements in a low thermal conductivity media. Lunar soil is of extremely low thermal conductivity coefficient. Minimal effect of the structure on the temperature field pattern should be ensured while thermal probes design. To evaluate the proposed structures operability, comparison of the temperatures at the installation points of the thermo probe measuring elements were performed both with the account for the effect of the structure and without it. Thermal probe functioning simulation was implemented with the ANSYS software. Simulation results confirmed the operability of the probe designes with high thermal resistance of the structure.

Keywords: thermal probe, simulation modeling, soil thermo-physical properties of the, design efficiency evaluation

Funding. The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, grant no. 20-08-01-012-А.

For citation. Alifanov O.M., Dudkin K.K., Netelev A.V., Chernova L.M. Prospective thermal probes for Lunar soil properties studying. *Thermal processes in engineering*, 2023, vol. 15, no. 3, pp. 103–112 (In Russ.). DOI: 10.34759/tpt-2023-15-3-103-112

Введение

Одна из фундаментальных проблем, которую предстоит решить при реализации программы строительства долгосрочных объектов на поверхности Луны, – получение достоверной информации о теплофизических свойствах лунного грунта. Не все конструкции современных термозондов удовлетворяют требованиям точности при измерении теплофизических характеристик (ТФХ) лунного грунта [1–3]. Это обусловлено тем, что поверхностный слой лунного грунта, состоящий преимущественно из мелкодисперсных частиц, имеет очень низкий коэффициент теплопроводности [4, 5]. Вследствие этого конструкция самого зонда является тепловым мостом и вносит существенные искажения в картину теплового состояния при определении ТФХ лунного грунта. Реализуемой точности измерений недостаточно для решения коэффициентной обратной задачи теплопереноса [5, 6].

На основе теплового анализа конструкций термозондов [1–3] был сделан вывод о том, что следующие зонды обладают наибольшей эффективностью с точки зрения достоверности показаний:

- поверхностный термозонд;
- проникающий стержневой термозонд (схема, использовавшаяся в миссиях «Аполлон-15» и «Аполлон-17») [7, 8];
- термозонд с отделяющимся нагревателем.

Но все эти конструкции имеют свои недостатки.

Недостатком поверхностного термозонда является невозможность проводить измерения ТФХ лунного грунта на глубине.

Недостатком проникающего термозонда – существенное искажение результатов измерений из-за совмещения нагревателя и термометра в одном узле. Это приводит к перетеканию тепла по стержню, следовательно, к искажению поля температур.

Минусы термозонда с отделяющимся нагревателем:

- зонд может проводить измерения только на одной глубине, там, где находится нагреватель;
- тепло, распространяясь от нагревателя, достигает стержня, а поскольку теплопроводность стержня значительно выше теплопроводности грунта, то тепло начинает распространяться вверх по стержню.

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

- конструкция зонда не должна влиять на распределение тепла в окружающем грунте;
- конструкция зонда должна позволять проводить измерения на разных глубинах.

На основании приведенных данных было разработано две схемы перспективных термозондов:

- зонд с разделенными нагревательными и измерительными блоками;
- зонд с увеличенным тепловым сопротивлением.

Схема зонда с разделенными измерительными и нагревательными блоками

Идея, лежащая в основе термозонда с раздельными нагревательными и измерительными блоками, заключается в использовании для измерений и нагрева нескольких отдельных полностью автономных и не контактирующих между собой блоков, работающих в одной измерительной системе.

Вся система состоит из нескольких блоков измерителей и нагревателей, помещенных в пробуренную скважину и зафиксированных на определенных расстояниях относительно друг друга (рис. 1), и управляющего модуля сбора и обработки данных.

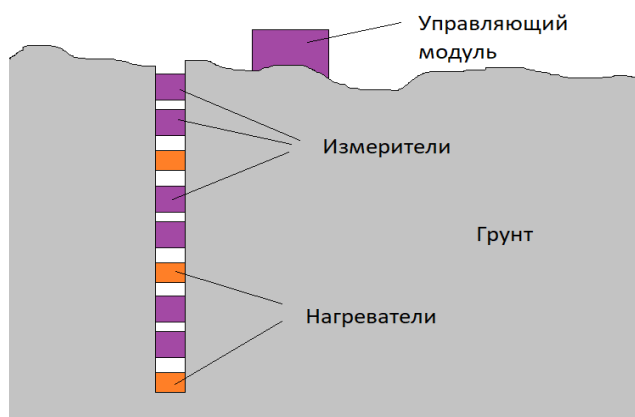


Рис. 1. Схема термозонда с раздельными измерительными и нагревательными блоками

Нагреватель включает в себя элемент питания, электронный блок управления, термометры, измеряющие температуру устройства, омический нагреватель, передатчик для дистанционной подачи и получения команд от модуля сбора и обработки данных.

Измеритель состоит из элемента питания, электронного блока управления, термодатчиков, измеряющих температуру грунта, передатчика для дистанционной подачи команд электронному блоку, а также получения от него различной информации об измерениях.

Особенностью зонда является то, что его блоки жестко фиксируются в скважине с помощью раздвижных секторов – «крыльев». На рис. 2 и 3 представлена конструкция одного из измерительных блоков такого термозонда. Внутри корпуса находятся элементы питания и служебные системы.

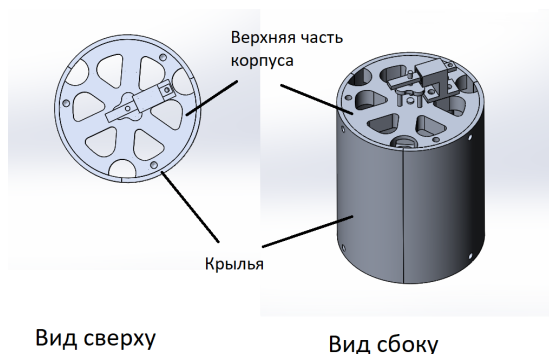


Рис. 2. Измерительный блок в транспортном положении

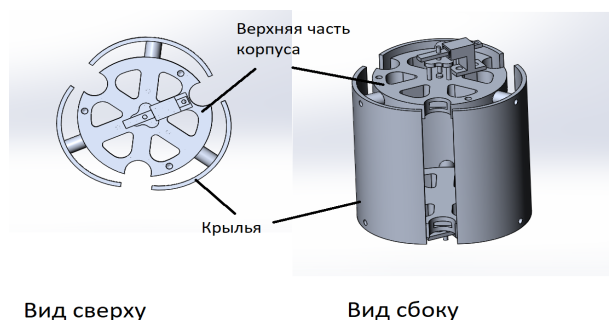


Рис. 3. Измерительный блок в развернутом положении

По всей поверхности секторов нагревательного блока устанавливаются омические нагреватели.

В транспортном положении блоки фиксируются на трех стержнях на расстоянии друг от друга (рис. 4, 5).

Сектора («крылья») зафиксированы у корпуса блока и раздвигаются под действием пружины, находящейся в верхних и нижних частях корпуса (рис. 2, 3).

После установки зонда стержни извлекаются, а нагревательные и измерительные блоки остаются зафиксированными в скважине при помощи упирающихся в ее стенки «крыльев» (рис. 6, 7).

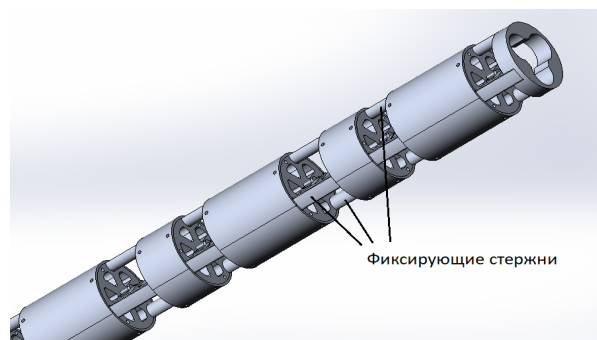


Рис. 4. Термозонд в транспортном положении

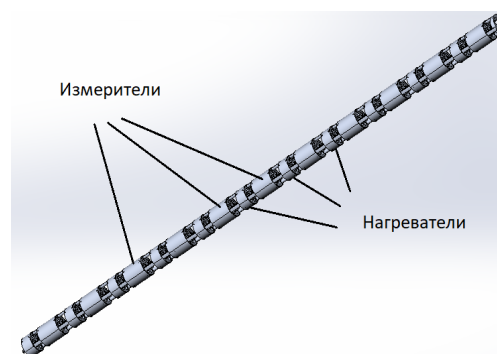


Рис. 5. Общий вид термозонда в транспортном положении



Рис. 6. Разделенный термозонд. Крылья в раскрытом положении

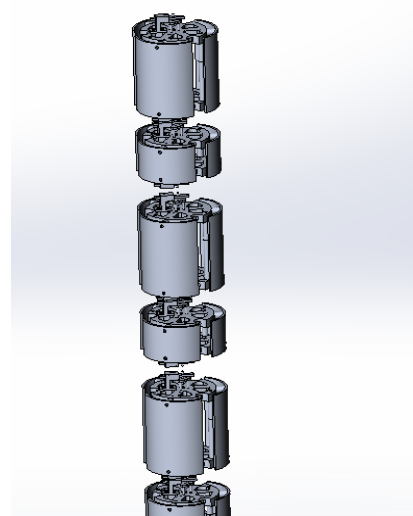


Рис. 7. Разделенный термозонд. Положение раскрытых элементов в скважине

Таким образом, элементы системы не имеют тепловых контактов между собой, обладают хорошим тепловым контактом с поверхностью скважины и зафиксированы друг от друга на выбранном расстоянии.

Оценка эффективности конструкции термозонда с разделенными нагревательными и измерительными блоками

С целью оценки эффективности разработанной схемы зонда был проведен анализ влияния конструкции нагревателя на показания термодатчиков, установленных в «крыльях» измерительного блока термозонда. Анализ проводился путем сравнения температурного поля в грунте при наличии конструкции измерительного блока и температурного поля без блока. Значения поля температур были получены в результате модельного эксперимента в среде ANSYS.

Геометрические характеристики зонда и ТФХ его материалов приведены в табл. 1.

Для модельного эксперимента были выбраны следующие исходные данные:

- мощность нагревателя 0.1 Вт;
- время прогрева 10 часов;
- начальная температура системы грунт – термозонд $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В расчетах использовались упрощенные модели нагревателя и измерителя в виде цилиндров. ТФХ лунного грунта приведены в табл. 2. В расчетах моделировался куб грунта со стороной 1 м. Это позволило рассматривать модель грунта как полубесконечное тело с тепловым потоком на границе расчетной области, равным 0 Вт/м^2 .

Посредством моделирования [11] было получено значение характеристического размера конечного элемента для использования в расчетах -2 мм . Такой размер позволил получить точность результатов расчетов в $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Результаты расчета теплового состояния системы термозонд – грунт после 10 часов прогрева приведены на рис. 8.

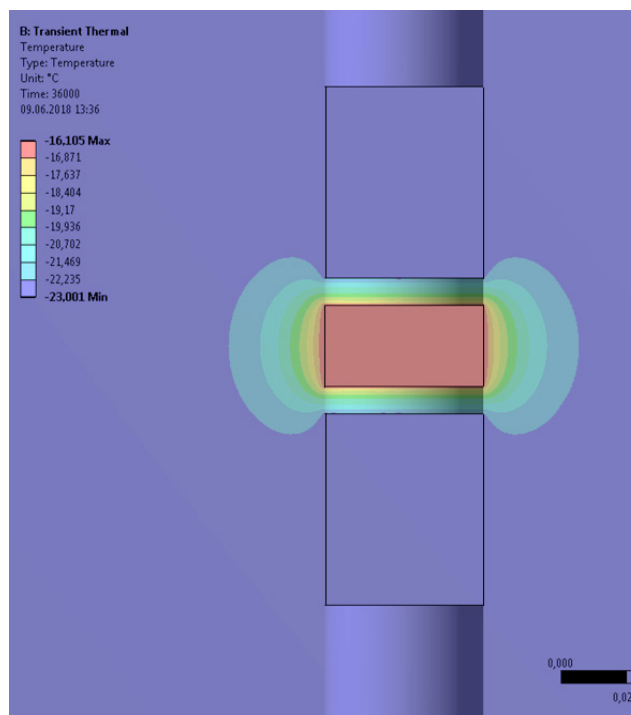


Рис. 8. Распределение температуры в разделяемом термозонде

Как видно из рис. 8, тепло распространяется от нагревателя сначала свободно, но затем, встречаясь с измерительным блоком, проникает

Таблица 1. Теплофизические и геометрические характеристики термозонда

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

Таблица 2. ТФХ лунного грунта [9, 10]

№ слоя	Толщина слоя, мм	Теплопроводность, Вт/(м·°C)	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

в него через нижнюю кромку. Это приводит к искажению естественной картины распределения тепла.

Для того чтобы понять, насколько сильно конструкция влияет на распределение температуры, был проведен расчет теплового состояния системы термозонд – грунт без блока измерительного элемента. Результаты расчета приведены на рис. 9.

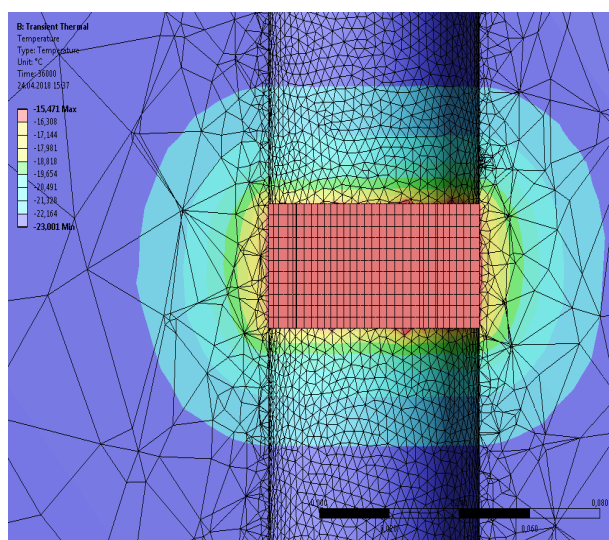


Рис. 9. Распределение температуры при использовании модели только с нагревателем. Разделяемый термозонд

Оценка влияния конструкции на измерительные данные проводилась путем сравнения температуры грунта в месте его контакта с нижней кромкой измерительного блока. Температура при наличии в модельном эксперименте измерительного блока имела значение $-22.748\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в модельном эксперименте без измерительного блока $-20.433\text{ }^{\circ}\text{C}$. Разница в показаниях составила $2.315\text{ }^{\circ}\text{C}$.

По результатам расчета разброс температур оказался меньше, чем в существующих схемах термозондов [1–3]. Следовательно, влияние конструкции этой схемы на распределение температуры ниже, чем в поверхностных, стержневых зондах и зондах с отделяющимся нагревателем. Следовательно, это потенциально улучшает точность измерений ТФХ лунного грунта.

Схема зонда высокого температурного сопротивления

Как видно из анализа зонда с отдельными измерительными и нагревательными блоками, даже полное разделение блоков не привело

к исключению влияния конструкции на температурное поле (рис. 8). Кроме того, автономность измерительного блока приводит к увеличению его размеров. При высокой теплопроводности материала измерительного блока относительно теплопроводности грунта измерительный блок аккумулирует в себе значительную долю тепла от нагревателя. Это и приводит к искажению температурного поля. Следовательно, существует потребность в создании термозонда, где измеритель температуры будет максимально изолирован от нагревателя и при этом будет иметь низкую теплоемкость и теплопроводность, чтобы не приводить к оттоку тепла от нагревателя.

С учетом результатов моделирования работы зонда с отдельными блоками был предложен новый вариант конструкции зонда высокого теплового сопротивления (ВТС), приведенный на рис. 11 и 12. Зонд представляет собой единую жесткую конструкцию. Продольный стержень – соединяющий силовой элемент. Он же является электрическим проводником для питания нагревателей. Термопары установлены в изогнутые стержни из материала с низким коэффициентом теплопроводности (например, стеклопластик). Контакт с грунтом осуществляется только торцом стержня, в котором установлен королек термопары. Другой конец стержня закреплен на измерительном блоке. Измерительный блок имеет меньший диаметр, чем скважина, в которую устанавливается термозонд, что минимизирует влияние измерительного блока на картину распределение температуры.

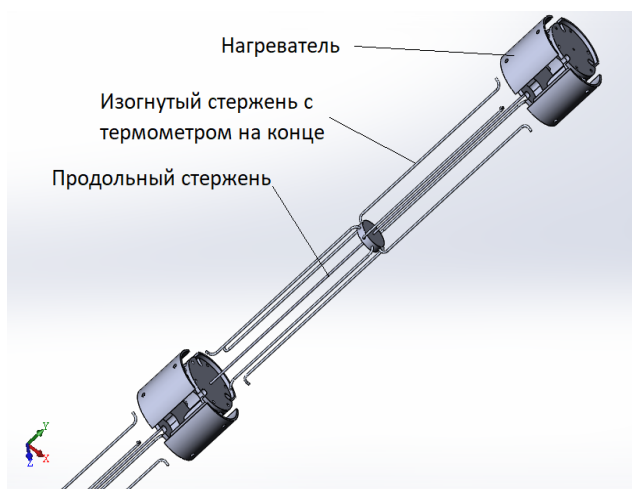


Рис. 10. Схема термозонда ВТС

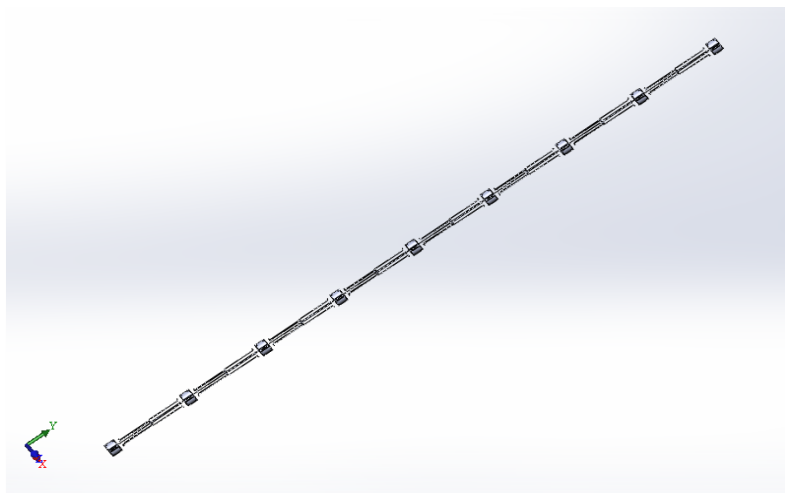


Рис. 11. Схема термозонда ВТС. Общий вид

Нагреватель выполнен по такой же схеме, что и в схеме зонда с отдельными блоками. Он имеет раскрывающиеся сектора – «крылья», которые фиксируют конструкцию в скважине и обеспечивают контакт нагревателя с грунтом.

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

Термозонд находится в транспортном контейнере цилиндрической формы. 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.

Оценка эффективности конструкции термозонда ВТС

Оценка эффективности конструкции термозонда ВТС проводилась аналогично оценке эффективности конструкции зонда с отдельными блоками.

Геометрические и теплофизические характеристики зонда приведены в табл. 3.

Исходные данные для построения поля температур:

- мощность нагревателя 0.1 Вт;
- время нагрева 10 часов;
- начальная температура системы: $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$.

ТФХ лунного грунта приведены в табл. 2. В расчетах также использовался куб грунта со стороной 1 м.

Выборный с помощью моделирования [11] размер конечного элемента в расчетах составил 1 мм. Точность расчетов при этом была $0.15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Использовались упрощенные модели нагревателя в форме цилиндра и продольного цилиндрического стержня. Поверхности стержней с термопарами, нагревателя, продольного стержня, измерительного блока, не контактирующие с грунтом в силу отсутствия на Луне атмосферы, в расчетах принимались теплоизолированными.

На рис. 12 и 13 показано распределение температуры в термозонде и окружающем грунте. Как видно из рисунков, такая схема термозонда практически не искажает картину распространения тепла от нагревателя.

На рис. 14 показаны распределения температур по результатам решения задач для конструкции термозонда при наличии измерительного блока и без него.

Для оценки влияния конструкции термозонда ВТС на поле температур так же, как

Таблица 3. Исходные данные для решения тепловой задачи

Наименование	Материал	Диаметр	Высота/Длина	Теплопроводность, Вт/(м \cdot °C)	Теплоемкость, Дж/(кг \cdot °C)
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

и для отдельного термозонда, был проведен расчет теплового состояния для конструкции, в которой присутствовал только нагреватель, при этом измерительные блоки не вносят возмущений в поле температур.

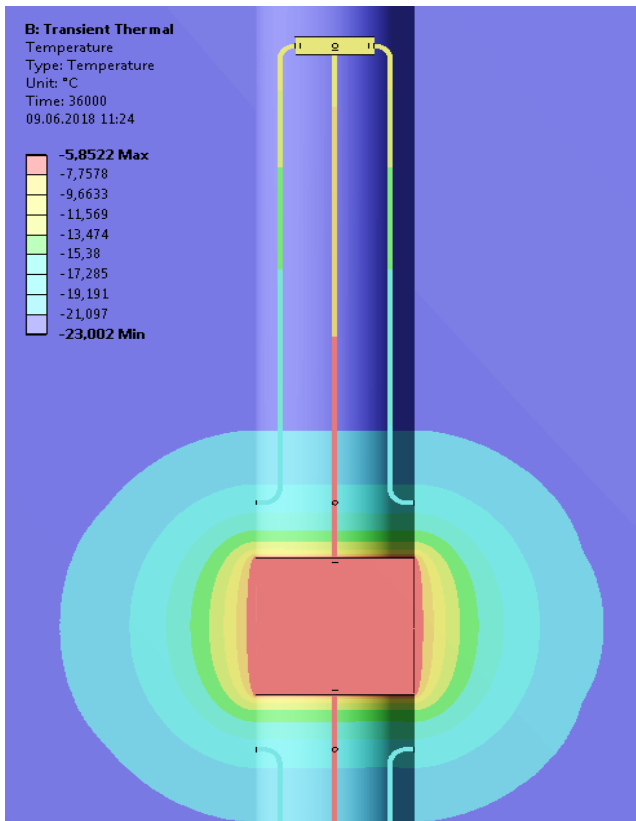


Рис. 12. Распределение температуры. Термозонд ВТС

Как видно из рис. 14, картина распределения температуры при использовании термозонда ВТС и в расчетном случае при исключении из его конструкции измерительного блока практически идентична. Это говорит о том, что подобная схема зонда почти не вносит искажений в распределение температуры при измерениях.

В модели при наличии всех элементов конструкции температура в месте контакта термодатчика и грунта составила $-17.98\text{ }^{\circ}\text{C}$, тогда как в модели только с нагревателем при тех же условиях $-18.15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Отклонения показаний температуры из-за влияния конструкции термозонда составили всего $0.17\text{ }^{\circ}\text{C}$, что сопоставимо с точностью расчета модели.

Для сравнения на рис. 15 представлены результаты моделирования (с учетом влияния конструкции и без нее) для стержневого термозонда, использовавшегося в миссиях «Аполлон» [1, 12].

На рис. 15 показано, что результаты измерений стержневого термозонда сильно искажены наличием конструкции. В модели со всеми элементами конструкции термозонда 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 нагрева, температура составила $18.67\text{ }^{\circ}\text{C}$. Отклонения показаний температуры из-за влияния конструкции термозонда составили $3.1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

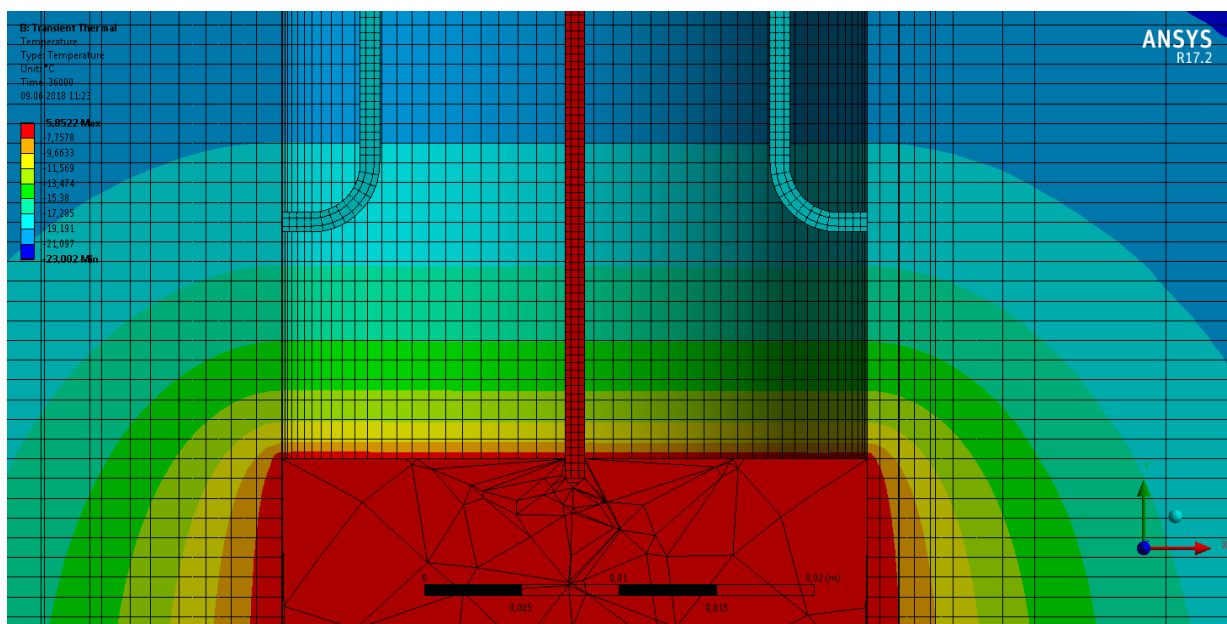


Рис. 13. Распределение температуры. Термозонд ВТС. Область контакта термометров с грунтом

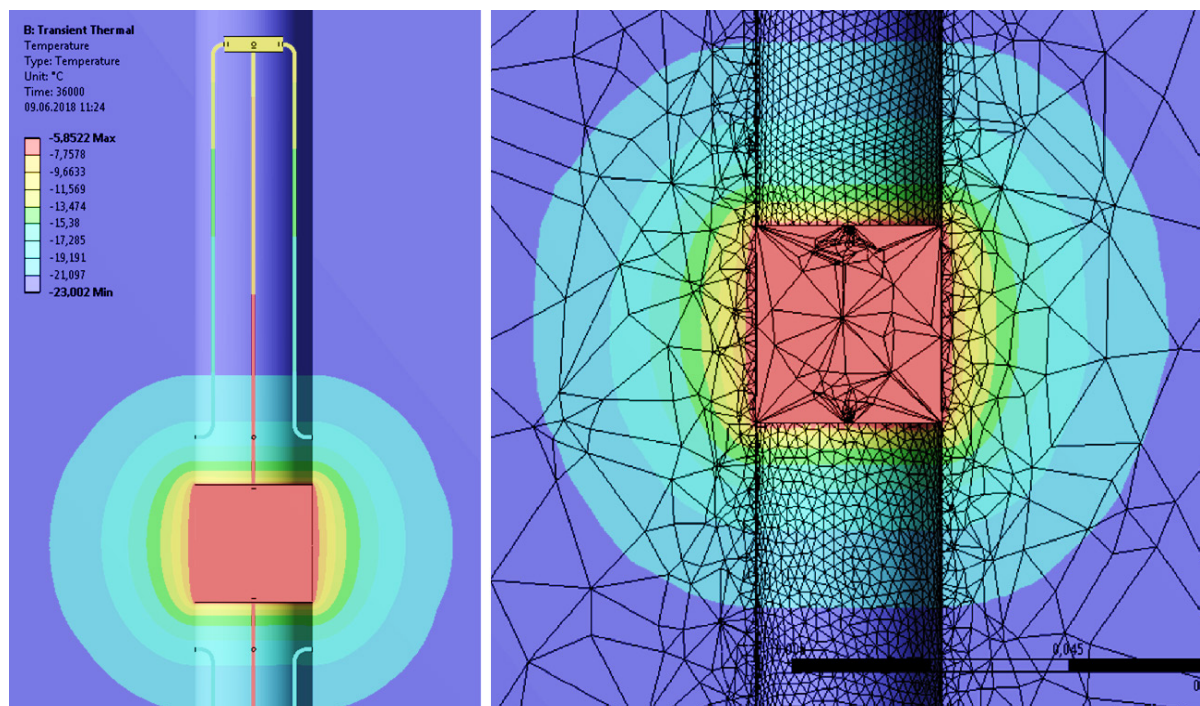


Рис. 14. Распределение температуры. Термозонд ВТС. Слева – расчет модели со всеми элементами конструкции; справа – расчет модели, в которой оставлен только нагреватель

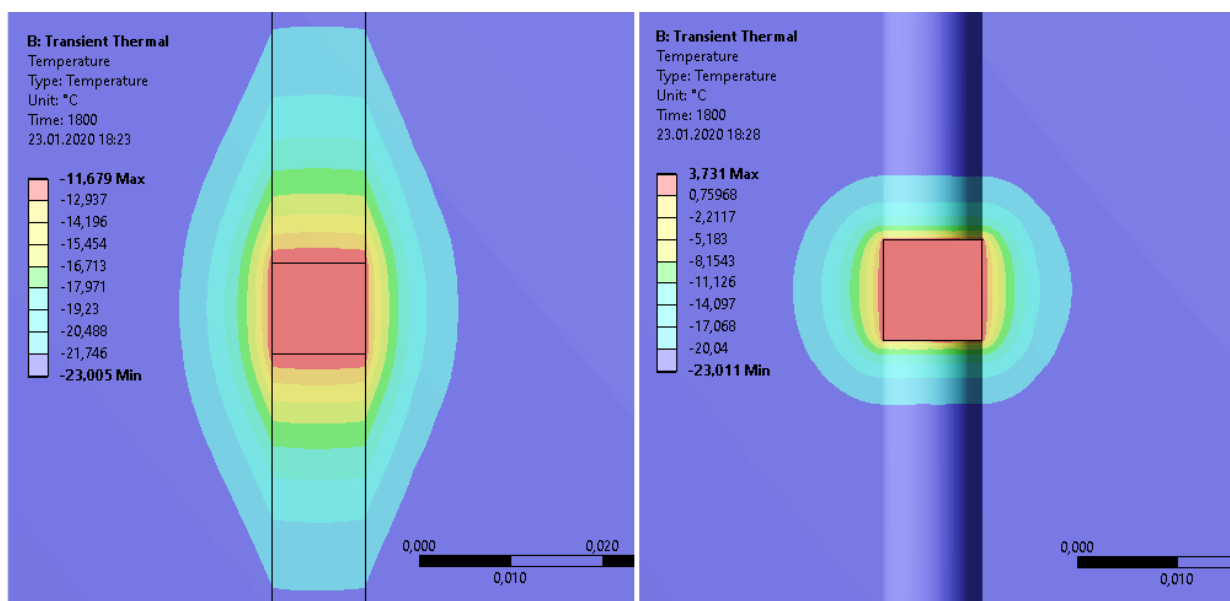


Рис. 15. Распределение температуры. Стержневой термозонд. Слева – расчет модели со всеми элементами конструкции; справа – расчет модели, в которой оставлен только нагреватель

Заключение

По результатам численного моделирования наименьшее влияние элементов конструкции на естественное распределение температуры было выявлено при использовании термозонда ВТС. В табл. 4 показана сводка отклонений температур от естественного распределения в области

контакта измерительных элементов с грунтом при измерении различными термозондами. Данные по зонду-пенетратору, проникающему зонду и термозонду с отделяющимся нагревателем приведены в работе К.К. Дудкина, О.М. Алифанова «Измерения теплофизических характеристик лунного грунта в естественных условиях» [1].

Таблица 4. Влияние конструкции на естественное распределение температуры в зоне контакта измерительного элемента с грунтом

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

Точность измерений, реализованная при использовании зонда ВТС, позволяет использовать полученные данные в решении обратной задачи теплопроводности для определения ТФХ лунного грунта.

Список источников

1. 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.
2. Алифанов О.М., Дудкин К.К., Нетелев А.В., Салосина М.О., Чернова Л.М., Чумаков В.А. Анализ способа определения теплофизических характеристик лунного грунта при его нагреве солнечным светом // Тепловые процессы в технике. 2022. Т. 14. № 1. С. 2–8.
3. Дудкин К.К., Алифанов О.М. Определение теплофизических характеристик лунного грунта при помощи солнечного тепла // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2019. № 2. С. 74–80.
4. Зезин Р.В., Дубин П.А. Статистический анализ камней по данным «Лунохода-1» // Природа. 1971. № 11. С. 12–14.
5. Алифанов О.М. Обратные задачи теплообмена. Москва, 1988. 280 с.
6. Артюхин Е.А., Охупкин А.С. Восстановление параметров в обобщенном уравнении теплопроводности // Инженерно-физический журнал. 1982. Т. 42. № 6. С. 1013–1019.
7. APOLLO 15. *News NASA. Release № 71-119K*. Press Kit. July 15, 1971, pp. 51–55.
8. Langseth M.G., Keihm S.J., Chute J.L. Heat-flow experiment. *Apollo 17: Preliminary Science Report, NASA SP-330*, 1973, chapter 9, pp. 9.1–9.24.
9. Виноградов А.П. Предварительные данные о лунном грунте, доставленном автоматической станцией «Луна-16» // Лунный грунт из Моря Изобилия: сб. статей. Москва, 1974. С. 7–18.
10. Авдеевский 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. Москва, 1974. С. 553–558.
11. Молчанов А.М., Щербakov М.А., Янышев Д.С., Куприков М.Ю., Быков Л.В. Построение сеток в задачах авиационной и космической техники. МАИ-Калуга, 2013. 260 с.
12. 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. *Proceeding of the 4 Lunar Science Conference*, 1973, vol. III, pp. 2481–2488.

References

1. Dudkin K.K., Alifanov O.M. Izmereniya teplofizicheskikh kharakteristik lunnogo grunta v estestvennykh usloviyakh [Measurements of the thermophysical characteristics of lunar soil in natural conditions]. *Thermal processes in engineering*, 2018, vol. 10, no. 5. pp. 245–255.
2. Alifanov O.M., Dudkin K.K., Netelev A.V., Salosina M.O., Chernova L.M., Chumakov V.A. Analiz sposoba opredeleniya teplofizicheskikh kharakteristik lunnogo grunta pri ego nagreve solnechnym svetom [Analysis of a technique for thermos-physical characteristics determining of lunar soil under its heating by the sunlight]. *Thermal processes in engineering*, 2022, vol. 14, no. 1. pp. 2–8. DOI: 10.34759/tpt-2022-14-1-2-8
3. Dudkin, K.K., Alifanov O.M. Opredelenie teplofizicheskikh kharakteristik lunnogo grunta pri pomoshchi solnechnogo tepla [Determination of the thermophysical characteristics of the lunar soil using solar heat]. *Vestnik nauchno proizvodstvennogo ob'edineniya imeni S.A. Lavochkina*, 2019, no. 2 (44), pp. 74–80.
4. Zezin R.V., Dubin P.A. Statisticheskii analiz kamnei po dannym «Lunokhoda-1» [Statistical analysis of stones according to Lunokhod-1 data]. *Priroda*, 1971, no. 11, pp. 12–14.
5. Alifanov O.M. Obratnye zadachi teploobmena [Inverse problems of heat transfer]. Moscow, 1988, 280 p.
6. Artyukhin E.A., Okhapkin A.S. Vosstanovlenie parametrov v obobshchennom uravnenii teploprovodnosti [Recovery of parameters in the generalized heat equation]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*, 1982, vol. 42, no. 6, pp. 1013–1019.
7. APOLLO 15. *News NASA. Release № 71-119K*. Press Kit. July 15, 1971. pp. 51–55.
8. Langseth M.G., Keihm S.J., Chute J.L. Heat-flow experiment. *Apollo 17: Preliminary Science Report, NASA SP-330*, 1973, chapter 9, pp. 9.1–9.24.
9. Vиноградов А.П. Predvaritel'nye dannye o lunnom grunte dostavlennom avtomaticheskoi stantsiei «Luna-16» [Preliminary data on lunar soil delivered by the automatic station “Luna-16”]. *Lunnyi grunt iz Morya Izobiliya: sbornik statei*. Moscow, 1974, pp. 7–18.
10. Avdееvskii V.S., Anfimov V.S., Marov N.A. et al. Teplofizicheskie svoystva lunnogo veshchestva, dostavlenno na Zemlyu avtomaticheskoi stantsiei «Luna-16» [Thermophysical properties of the lunar matter delivered to the Earth by the automatic station “Luna-16”]. *Lunnyi grunt iz Morya Izobiliya: sbornik statei*. Moscow, 1974, pp. 553–558.
11. Molchanov A.M., Shcherbakov M.A., Yanyshev D.S., Kuprikov M. Yu., Bykov L.V. Postroenie setok v zadachakh aviatsionnoi i kosmicheskoi tekhniki [Mesh construction in problems of aviation and space technology]. Moscow, 2013, 260 p.

12. 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. *Proceeding of the 4 Lunar Science Conference*, 1973, vol. III, pp. 2481–2488.

Статья поступила в редакцию 02.02.2023; одобрена после рецензирования 10.02.2023; принята к публикации 20.02.2023

The article was submitted on 02.02.2023; approved after reviewing on 10.02.2023; accepted for publication on 24.03.2023