

# ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА НА ДИССЕРТАЦИЮ

Дудкина

Константина Кирилловича

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

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Актуальность темы диссертации. Бурное развитие аэрокосмической техники, реальные проекты межпланетных полетов ставят принципиально новые задачи по изучению механических и теплофизических свойств грунтов новых планет. Луна является ближайшей к Земле планетой, представляющей научный и практический интерес. Результаты исследований поверхности Луны с помощью неуправляемых и управляемых космических аппаратов содержат фрагментарные данные о механических и теплофизических характеристиках (ТФХ) лунного грунта. Для практического освоения Луны необходимы широкомасштабные экспериментальные исследования всех параметров материала поверхности Луны.

Ядерные трансформации трансурановых элементов в объеме Луны приводят к постоянному тепловому потоку, направленному из объема Луны к ее поверхности. Экспериментальное измерение этого теплового потока представляет не только научную, но и практическую ценность.

Ожидаемые в ближайшее время запуски космических аппаратов к Луне будут сопровождаться научными исследованиями теплового состояния и ТФХ лунного грунта. В диссертационной работе Константина Кирилловича Дудкина рассмотрены перспективные методики и конструктивные особенности измерительной аппаратуры для определения теплового потока в объеме Луны и ТФХ лунного грунта. В связи с вышесказанным можно утверждать об актуальности научных исследований, проведенных в ходе работы над диссертацией.

Наиболее существенные принципиально новые научные и практические результаты диссертации. В диссертационной работе можно выделить ряд принципиально новых результатов, представляющих как научный, так и практический интерес.

Отдел документационного  
обеспечения МАИ

1. В диссертации представлен критический анализ различных методик и конструкций измерительной аппаратуры для определения теплового потока Луны и теплофизических свойств. Рассмотрены реализованные экспериментальные методики, а также методики и аппаратура, предлагаемые для будущих миссий по исследованию поверхности Луны.
2. В диссертационной работе на основе численных имитационных экспериментов выделен класс экспериментальных устройств (термозондов) и методик измерения и обработки данных для изучения теплового потока в объеме Луны. Новизной численных экспериментов является использование коммерческой сертифицированной программы ANSYS Workbench для расчета тепловых трехмерных полей вблизи термозондов.
3. Принципиально новым результатом является разработка конструкции термозонда, методики измерения и обработки данных по совместному определению как теплового потока в объеме Луны, так и ряда теплофизических свойств лунного грунта. При этом рассмотрены перспективные модификации методологии измерений, которые можно реализовать как в автоматическом, так и в управляемом режимах наблюдений.

Достоверность результатов диссертации. Диссертационная работа теоретическая, выполнена с помощью коммерческого пакета ANSYS. Расчеты основаны на классических уравнениях баланса энергии и непротиворечивых граничных условиях, отражающих специфику решенных задач. Достоверность результатов основана на корректности численного моделирования, проведенного на основе широко используемого в научных и инженерных расчетах коммерческого пакета. Точность трехмерного численного моделирования задач теплопроводности зависит от разностной интерпретации уравнений и граничных условий. В диссертации проведено тщательное исследование сходимости результатов по мере измельчения разностной сетки. О достоверности результатов свидетельствует сопоставление результатов расчета с фрагментарными экспериментальными данными, полученными в ходе пилотируемых и автоматических экспедиций к Луне.

Практическая значимость результатов диссертации. В связи с ожидаемым в ближайшем будущем освоением Луны, сведения о тепловой обстановке на поверхности Луны и о механических и теплофизических свойствах лунного грунта имеют первостепенное практическое значение. Практический интерес представляет анализ существующих методик экспериментального определения теплового потока в приповерхностном слое грунта и его ТФХ. В диссертационной работе предложен ряд конструкций термозондов и

методик измерений, которые могут работать как в управляемом, так и в автоматическом режимах.

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложения. Работа содержит 159 страниц текста. Список использованной литературы включает 74 наименования. Диссертация написана литературным русским языком.

Автореферат соответствует тексту диссертации, отражает основные результаты работы, ее новизну и положения, выносимые автором на защиту.

По материалам диссертации опубликованы 10 печатных работ, из них 5 работ в журналах, рекомендованных ВАК РФ, имеется также 1 патент на изобретение. Результаты диссертации обсуждались на российских и международных конференциях.

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, ее научная новизна, практическая ценность полученных результатов. Во введении обозначены основные положения, выносимые автором на защиту, и структура диссертационной работы.

В первой главе рассмотрены аппаратура и методики измерения теплового потока в приповерхностном слое грунта, реализованные в управляемых и неуправляемых миссиях на Луну. Рассмотрены принципиальные отличия различных термозондов по измерению теплового потока и ТФХ лунного грунта. Поставлена математическая задача о расчете распределения температуры близи термозонда для измерения теплового потока на Луне. Численный эксперимент проведен методом конечных объемов на основе коммерческой программы ANSYS. Проведен анализ структуры и характерного размера конечных элементов на точность расчета температуры. Тепловой поток из глубины Луны к поверхности в два раза меньше, чем на Земле. Измерение таких малых по величине тепловых потоков представляет сложную техническую задачу, решение которой требует разработки уникальной специализированной аппаратуры и методики обработки полученных данных. Отмечается, что с целью получения достоверных сведений о величине теплового потока, необходимо создание термозондов, вносящих минимальное искажение в тепловое поле грунта Луны. Проведены численные имитационные эксперименты, позволяющие отработать методику измерений теплового потока с минимальной погрешностью.

Во второй главе представлены результаты анализа различных способов контактного измерения теплофизических характеристик лунного грунта. Сложность измерений обусловлена уникально низким коэффициентом теплопроводности грунта Луны. Основной целью этой части диссертации является экспериментальная оценка коэффициента теплопроводности грунта на различной глубине от поверхности. Рассмотрены две методики измерений. Поверхностный метод, когда источник теплового излучения находится на поверхности, не учитывает контактного теплового сопротивления между аппаратурой и грунтом. В работе рассмотрен метод измерения теплопроводности с помощью термозондов, заглубленных в поверхностный слой грунта. Исследован проникающий в грунт термозонд с чередующимися зонами локального нагрева. С целью исключения потока тепла в материал зонда, коэффициент теплопроводности которого существенно выше, чем у лунного грунта, предложена методика измерения на основе термозонда с отделяющимся в ходе измерения нагревательным элементом. Представлен численный анализ нагрева термозонда с помощью солнечного излучения.

В третьей главе рассмотрены преимущества и недостатки разработанных в диссертации термозондов для одновременного определения как теплового потока, так и теплопроводности грунта Луны. В результате анализа данных имитационного эксперимента выделены две конструкции термозонда. Для измерения теплового потока подходит термозонд с высоким тепловым сопротивлением, который минимально искажает температурное поле в грунте в зоне измерения. Минимальная погрешность в измерении коэффициента теплопроводности достигается при использовании термозонда с удаленной зоной нагрева. В этой же главе представлена оригинальная техническая конструкция термозонда из титановых проволок с устройством для закрепления зонда внутри шахты. Путем численного эксперимента изучено влияние конструктивных элементов термозонда на погрешность расчета коэффициента теплопроводности. Путем имитационных расчетов исследована возможность измерения с помощью предложенной конструкции термозонда теплового потока в приповерхностном слое Луны.

В заключении представлены основные научные и практические достижения диссертационной работы. Подчеркивается прикладное значение полученных в диссертации результатов, оценивается эффективность и реализуемость предложенных в диссертационной работе конструктивных решений и методик обработки экспериментальной информации для расчетов теплового потока и коэффициента теплопроводности лунного грунта.

По диссертации имеются замечания.

1. В тексте часто указывается ошибка с точностью до десятых долей процента. В реальной ситуации это не имеет практического смысла. В указании ошибки в процентах можно ограничиться только целыми значениями, например, вместо 13.8% писать 14%.
2. При обсуждении точности расчетов, например, в пункте 3.3.3 температуры указаны с точностью четырех знаков после десятичной точки. Это также не имеет практического смысла. Достаточно оценивать точность с двумя знаками после десятичной точки. Предел допускаемой основной погрешности измерений эталонного термометра  $\pm 0.02^\circ\text{C}$ .
3. Выводы в диссертации слишком детализированы. Достаточно трех-четырех крупных результатов, отражающих основные этапы решения проблемы.
4. Стр. 37 неудачные обозначения. Одной и той же буквой  $T$  обозначены температура и область моделирования. Нет необходимости также каждый раз приводить значение постоянной Стефана – Больцмана.
5. В граничном условии в постановке задачи 1.7.3 необходимо согласно гипотезе Фурье поставить правильный знак  $-\lambda_{\text{гр}} \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} + q_{\text{л}} = 0$ . Тепловой поток пропорционален антиградиенту температуры. Аналогичное замечание и для текста автореферата.
6. В постановке задачи 2.5 необходимо записать тепловой поток в лунном грунте. Или объяснить, почему его можно не учитывать.
7. При расчете распределения температуры в слое грунта со ступенчатой аппроксимацией теплопроводности по высоте грунта Луны следовало бы решать задачу с переменной гладкой аппроксимацией коэффициента теплопроводности в уравнении. Это позволило бы обобщить возможные экспериментальные данные с более детальной картиной изменения свойств по высоте слоя грунта.
8. Метод решения обратной задачи путем «подбора» 2.7.2 является архаичным и чисто эмпирическим. Возможно, что решение обратной некорректной задачи можно было бы сформулировать в рамках минимизации функционала типа А.Н. Тихонова.

Сделанные замечания и пожелания не снижают принципиальных результатов и выводов диссертационной работы. Диссертационная работа Константина Кирилловича

Дудкина выполнена на высоком научном и техническом уровне и является законченной научно-квалификационной работой.

Диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям Положения ВАК РФ о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к диссертациям, представленным на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника, а ее автор Дудкин Константин Кириллович заслуживает ученой степени кандидата технических наук по этой специальности.

Доктор технических наук, профессор  
Профессор кафедры «Прикладная математика»  
Факультета фундаментальных наук  
Московского государственного технического университета  
им. Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет)

*Деревич*

26.08.2021

Игорь Владимирович Деревич

Полное наименование организации	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)
Место нахождения	РФ, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
Почтовый адрес	РФ, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
Телефон организации	+7 (499) 263-6391
Адрес электронной почты; адрес официального сайта организации	bauman@bmstu.ru http://www.bmstu.ru

Подпись Деревича И.В. заверяю:

26.08.2021



А. Г. Матвеев

Зам. нач. управления кадров

Тел: 8499-263-67-69

*С отзывом ознакомлен*

*[Signature]*  
30.08.212.