



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

13 НОЯ 2025

№ 11204 /

6468/25-52

на №

от

Ученому секретарю
диссертационного совета 24.2.327.06
доктору технических наук, доценту
Краеву В.М.

О направлении отзыва официального
оппонента

125993, г. Москва, А-80, ГСП-3,
Волоколамское ш., д.4
МАИ, Ученый совет

Уважаемый Вячеслав Михайлович!

Направляю Вам отзыв официального оппонента, доктора технических наук, заведующего лабораторией астрофизических рентгеновских детекторов и телескопов федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт космических исследований Российской академии наук» Семены Николая Петровича на диссертационную работу Кочнева Кирилла Владиславовича «Математическая модель плавления лунного реголита», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.14. – «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Приложение: отзыв на 6 листах, в двух экземплярах

Заместитель директора

А.А.Лутовинов

Исполнитель: Семена Н.П. (495)333-2366



117997, МОСКВА, ГСП-7, ПРОФСОЮЗНАЯ УЛ. 84/32 e-mail: iki@cosmos.ru Тел.: (495) 333 5212 ФАКС: (495) 333 1248
ОКПО: 02698692 ОГРН: 1027739475279 ИНН/КПП: 7728113806/772801001 333 2588 333 5178
333 1000

ОТДЕЛ КОРРЕСПОНДЕНЦИИ
И КОНТРОЛЯ ИСПОЛНЕНИЯ
ДОКУМЕНТОВ МАИ

«18» 11 2025г.

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Кочнева Кирилла Владиславовича

«Математическая модель плавления лунного реголита»,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 1.3.14. – «Теплофизика и теоретическая теплотехника»

В диссертационной работе Кочнева К. В., представленной к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук, рассматривается возможность использованию лунного реголита в качестве конструкционного материала при создании лунных обитаемых баз. Для придания реголиту нужных свойств предлагается его спекать или плавить с помощью концентрированного солнечного излучения.

В работе решаются задачи по математическому и экспериментальному обоснованию этой возможности. Основной решаемой задачей при этом является разработка и проверка методики определения параметров математической модели, описывающей поглощение тепла и теплоперенос в сыпучих материалах в процессе их спекания или плавления при воздействии интенсивного теплового потока. Для этого использован метод восстановления параметров модели из решения обратной тепловой задачи. Исходные данные для ее решения формируются из результатов физического теплового эксперимента, адаптированного для этих целей. После восстановления параметров проводился прямой эксперимент с целью подтверждения корректности созданной методики. Данный эксперимент состоял в спекании имитатора реголита с помощью интенсивно лазерного излучения.

В последнее время со стороны практически всех развитых государств наблюдается резкое повышение интереса к созданию лунных обитаемых баз. Причиной этого является возможность создания на Луне инфраструктуры для дальнейшего освоения Солнечной системы, формирование более оперативной системы мониторинга космического пространства, возможность размещения мониторинговых систем в спектральных диапазонах, непрозрачных для земной атмосферы, обеспечение доступа к природным ресурсам Луны и т.д. Не последнюю роль при этом играет закрепление наиболее привлекательных территорий лунной поверхности за конкретными государствами.

Очевидно, что с Земли на Луну невозможно доставить все конструкционные материалы, необходимые для таких баз. Поэтому

моделирование, позволяющее создать технические средства, формирующие конструкционные материалы для лунных баз, используя только местный реголит и солнечное излучение, является весьма актуальной задачей.

Плавление реголита – это один из способов получения твердых структур заданной геометрической формы. Предложенная автором математическая модель плавления лунного реголита необходима для определения технических характеристик устройства, которое смогло бы перерабатывать лунный грунт в конструкционные материалы. Особенно следует отметить важность математического моделирования в решении поставленной задачи, ввиду сложности воспроизведения лунных условий в рамках наземного эксперимента.

Научная новизна работы определяется впервые реализуемым комплексным подходом к исследуемой проблеме определения комплекса неизвестных характеристик процесса плавления сыпучих материалов при поверхностном радиационном нагреве.

Достоверность и обоснованность полученных результатов проведенных исследований основывается на применении автором классических, многократно апробированных математических моделей и методов моделирования, а также на широком использовании экспериментальных данных и накопленных знаний о свойствах лунного грунта.

Работа имеет высокую практическую значимость, поскольку разработанная математическая модель плавления лунного реголита может быть использована при создании технических средств, предназначенных для строительства объектов лунной инфраструктуры. Также следует отметить, что в работе предлагаются новые практические подходы, которые могут быть использованы для применения разработанных алгоритмов и экспериментальных методик к исследованию различных сыпучих материалов в технике, а также в геофизике.

Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 9 печатных работах, в том числе: 3 – в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России по специальности 1.3.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Результаты работы прошли апробацию при их представлении на шести российских научных конференциях.

Работа состоит из четырех глав. Первая глава посвящена сбору и анализу информации о свойствах лунного грунта (реголита). В ней формируется представление о его химическом, минералогическом и

гранулометрическом составе. Для решения проблемы дефицита настоящего лунного реголита на Земле произведен обзор его имитаторов, произведенных искусственно из земных компонентов. Приводится информация о степени разработанности технологий переработки реголита в рамках мировой науки. Представлены результаты анализа различных подходов к использованию лунного грунта для строительства объектов лунной инфраструктуры. Сделан вывод о целесообразности использования технологий спекания и сплавления.

Во второй главе рассматривается проблема выбора обоснованных математических моделей теплопереноса в сыпучих материалах с учетом плавления при поверхностном концентрированном радиационном нагреве. Представлены результаты компьютерного моделирования оплавления реголита движущимся источником тепла в программном продукте Ansys, предложены и реализованы несколько стратегий обработки реголита. Приводится постановка задачи восстановления параметров математической модели плавления сыпучего материала.

В третьей главе рассматриваются вопросы расчетно-экспериментального определения теплофизических характеристик сыпучих материалов, что необходимо для дальнейшего определения параметров математической модели плавления. Кратко представлен метод итерационной регуляризации для решения коэффициентной обратной задачи теплопроводности, описывается экспериментальная установка, сформулированы требования к образцам, условиям проведения и параметрам испытаний. Последний раздел главы посвящен обработке результатов проведенных экспериментальных исследований.

В четвертой главе рассматриваются экспериментально-расчетные исследования оплавления имитатора лунного грунта с использованием лазерной установки. Представлен алгоритм параметрической идентификации математической модели плавления сыпучего материала. Приведены физическая и математическая модели процесса теплообмена в образце, схема испытаний и методика их проведения. Проведена апробация разрабатываемой методологии при определении теплофизических свойств (коэффициента поглощения и удельной теплоты плавления) оплавливающегося сыпучего материала.

По моему мнению, работа имеет два основных недостатка. Во-первых, излишне упрощена модель теплопереноса в плавящемся (спекаемом) материале. Во-вторых, методика эксперимента, результаты которого используются для решения обратной задачи, может привести к заметным

ошибкам определения теплофизических параметров при решении обратной задачи. При этом имеется способ существенного сокращения этих ошибок.

Первый недостаток можно пояснить следующим образом. Модель теплопереноса в диссертации рассматривает сыпучий материал (далее вещество) как однородный слой с неизменными термооптическими характеристиками поверхности и теплофизическими характеристиками в его объеме. Это оправдано в случае либо тонкого слоя вещества, либо использования для решения обратной задачи только тех данных эксперимента, которые фиксируются после полного расплавления (спекания) слоя вещества под воздействием внешнего теплового потока.

Из работы следует, что ни одно из этих условий не соблюдается. Поэтому уточненная математическая модель должна учитывать несколько последовательных стадий теплового состояния вещества. На первой стадии при воздействии излучения на поверхность вещества меняется его термооптические свойства за счет плавления (спекания) поверхностного слоя. Соответственно меняется как абсолютный поглощенный поток, так и соотношения поглощенного и излученного потоков. На второй стадии в толще материала перемещается фронт плавления от поглощающей поверхности к обратной поверхности. Модель должна учитывать, что этот фронт разделяет материал на два слоя с разными теплофизическими характеристиками. На завершающей стадии этот фронт доходит до тыльной стороны материала. Это должно служить критерием окончания процесса спекания (плавления). Данная модель все равно будет упрощенной, поскольку не учитывает постоянного изменения термооптических и теплофизических характеристик вещества при непрерывном изменении его температуры, а не только агрегатного состояния. Но она позволит получить гораздо более точные результаты, по сравнению с теми которые дает модель диссертанта.

Что касается второго недостатка, то его можно прокомментировать следующим образом. Для решения обратной задачи в диссертации используются результаты динамических экспериментов, в которых наблюдается постоянное изменение, как потоков, так и температур (при поддержании значения одной из температур на стационарном уровне с непонятной целью). На первый взгляд это позволяет получить большой объем данных для решения обратной задачи с целью одновременного восстановления, как теплопроводности, так и теплоемкости вещества. Однако такой подход приводит к практически неустраняемым ошибкам из-за невозможности полной синхронизации всех датчиков температуры по

времени. Такие эксперименты требуют продолжительной начальной калибровки измерительной системы. При этом все равно сохраняется возможность неправильного определения теплофизических характеристик вещества при корректно решенной обратной задаче за счет взаимной компенсации ошибок определения теплопроводности и теплоемкости. Эта проблема устраняется при разделении эксперимента на две стадии. На первой стадии достигаются стационарные значения температур в веществе при стационарных воздействующих потоках, что позволяет достоверно определить теплопроводность вещества при нулевых значения производных температур. На второй стадии при известной теплопроводности из динамических режимов достаточно точно восстанавливается теплоемкость за счет большого объема используемых избыточных данных при использовании методов максимального правдоподобия.

В оправдание диссертанту можно сказать, что и уточнение математической модели и усложнение методики эксперимента потребуют достаточно существенного увеличения, как расчетных ресурсов, так и продолжительности эксперимента, что на данной стадии работы возможно не вполне оправданно. Поэтому для предварительных усредненных оценок теплофизических характеристик вещества с подходом диссертанта можно согласиться.

Кроме содержательных недостатков имеются некоторые погрешности или спорные моменты, связанные со стилем изложения, а также некоторые описки.

Во введении неоправданно акцентируется внимание на привлечение к исследованию Луны частных компаний. Для целей и задач диссертации это не имеет никакого значения.

Диссертант употребляет некоторые термины либо неточно, либо придумывает новые термины при имеющихся общепринятых. В частности термин «идентификация тепловой модели» целесообразно заменить термином «определение или восстановление параметров тепловой модели». А использованный в диссертации термин «тепловой эффект плавления» в классических источниках обозначается как «удельная теплота плавления».

Не расшифрованы некоторые аббревиатуры, в частности «ДСК» и «Тпр». На рисунке 4.13 ошибочно проставлено время 25 сек. вместо 500 сек.

Отмеченные недостатки не снижают ценности и практической значимости работы. Результаты научного исследования имеют значение для развития теплофизики в целом и методов решения обратных задач теплообмена в частности и могут найти широкое применение в отрасли.

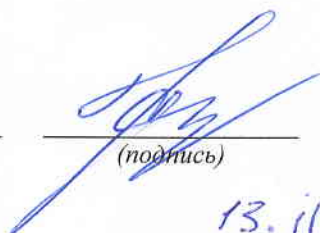
Автореферат и опубликованные работы полностью отражают содержание диссертации. Автореферат дает правильное и всестороннее представление о проделанной работе, содержит в кратком виде необходимую информацию, характеризующую полученные результаты, основные положения и выводы к диссертации.

По научному уровню, полученным результатам, содержанию и оформлению представленная диссертационная работа соответствует требованиям п.п. 9–14 «Положения о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Кочнев Кирилл Владиславович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Официальный оппонент:

Заведующий лабораторией
астрофизических рентгеновских
детекторов и телескопов ИКИ РАН,
д.т.н

(должность)



/Семена Н. П./

(Фамилия И.О.)

13.11.2025

Семена Николай Петрович

Организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ
РАН)

адрес: 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32

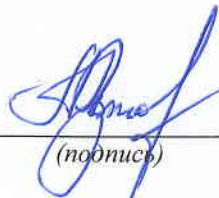
e-mail: semena@cosmos.ru

тел.: +7(495)-333-23-66

Подпись Семены Николая Петровича удостоверяю:

Заместитель директора ИКИ РАН,
чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н.

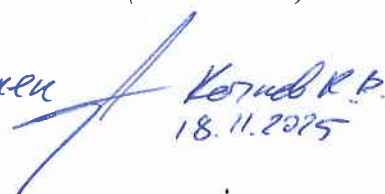
(должность)



/Лутовинов А.А./

(Фамилия И.О.)

с отзывом ознакомлен



18.11.2025