

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»**

На правах рукописи



Кочнев Кирилл Владиславович

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЛАВЛЕНИЯ ЛУННОГО РЕГОЛИТА

Специальность: 1.3.14 — «Теплофизика и теоретическая теплотехника»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва — 2025

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

Научный руководитель: **Ненарокомов Алексей Владимирович**
доктор технических наук, профессор

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

Семена Николай Петрович
доктор технических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт космических исследований Российской академии наук», заведующий лабораторией

Ведущая организация: Акционерное общество «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина»

Защита состоится «08» декабря 2025 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.327.06, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»:
https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=185215

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Учёный секретарь диссертационного
совета 24.2.327.06,
д.т.н., доцент



Краев В.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Актуальность и своевременность рассматриваемой задачи по разработке расчетно-экспериментального метода идентификации математических моделей плавления сыпучих материалов, в частности имитатора лунного грунта, для разработки новых технологий применительно к строительству лунной инфраструктуры подтверждается тем, что множество организаций и компаний по всему миру, как государственных, так и частных, занимаются разработками технологий, связанных с освоением Луны.

С 2000 по 2024 года собственные автоматические межпланетные станции (АМС) к Луне отправили Россия, США, Европа, Китай, Индия, Япония, Израиль. Важно отметить, что три аппарата, предназначенные для посадки на Луну, были построены на частные средства: Beresheet (Израиль), Nakuto-R (Япония), IM-1 (США). Важно, что космические исследования перестали быть прерогативой государств: небольшие компании могут быть более эффективными в определенных случаях. К тому же, увеличение числа участников второй лунной гонки побуждает к ускорению работ и улучшению технических решений. Если говорить о лидерстве, то, на данный момент, это определенно Китай: с 2007 года в ходе реализации программы Чанъэ автоматическими аппаратами были осуществлены выход на орбиту Луны, мягкая посадка на ее поверхность, доставка лунохода Юйту, доставка лунного грунта на Землю, первая в истории доставка лунного грунта на Землю с обратной стороны Луны.

Среди основных разработчиков проектов лунных станций, предполагающих эксплуатацию человеком, можно выделить Европейское космическое агентство (ЕКА) и Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства (НАСА). Указанные агентства на протяжении многих лет ведут исследования и опытно-конструкторские работы в области космической робототехники, связи, логистики и

строительства. В сентябре 2024 года в Кёльне (Германия) состоялось открытие Европейской лаборатории лунных исследований LUNA. Испытательный стенд LUNA имитирует участок лунной поверхности площадью около 700 м². Он предназначен для тестирования технологий, связанных с исследованием Луны, а также для отработки операций на поверхности для подготовки к будущим пилотируемым полетам.

Также, что более актуально в контексте данной работы, существует проект Международной научной лунной станции (МНЛС), разрабатываемый совместно Россией и Китаем. Планируется, что станция будет обитаемой, но при этом должна иметь возможность длительно функционировать в автономном режиме. Согласно заявлению главы «Роскосмоса» Юрия Борисова, «российско-китайская экспансия Луны начнется после 2036 года». Обозначенная дата, с одной стороны говорит о востребованности разработок по лунной тематике «здесь и сейчас», с другой стороны предоставляет достаточно времени для их воплощения.

Степень разработанности темы исследования

Исследование процессов плавления лунного реголита с целью получения перспективных конструкционных материалов для строительства лунных баз предполагает учет множества факторов, влияющих на свойства получаемого образца. К таким факторам относятся: минеральный и гранулометрический состав лунного реголита, вид термической обработки, плотность упаковки реголита, среда, в которой производится термическая обработка и др. Ввиду обширности задач, исследования носят точечный характер и их результаты лишь в общих чертах дают представление о влиянии различных факторов на полученный образец, в частности, режимов технологических процессов.

Цели и задачи работы

Целью данной работы является разработка комплекса алгоритмических и методических средств для идентификации математических моделей

плавления лунного реголита, базирующихся на методологии обратных задач теплообмена.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- сбор, анализ и систематизация данных о свойствах лунного реголита;
- сбор и анализ информации о физических моделях лунного реголита, применяемых в мировой практике при проведении исследований;
- сбор и анализ информации о тепловых экспериментах над лунным реголитом и его имитаторами, произведенных в мировой практике;
- выбор и анализ математической модели плавления сыпучих материалов, адекватной рассматриваемым физическим процессам;
- разработка алгоритма идентификации математической модели плавления сыпучих материалов, основанный на методологии обратных задач теплообмена;
- выбор материала, имитирующего свойства исследуемого объекта, и позволяющего реализовать экспериментальную часть исследования;
- разработка экспериментальной методики для определения теплофизических характеристик сыпучих материалов на основе методологии коэффициентных обратных задач теплопроводности;
- разработка экспериментальной методики для определения параметров математической модели плавления сыпучих материалов на основе методологии обратных задач теплообмена;
- проведение экспериментальных исследований для апробации метода.

Объектом исследования является математическая модель теплопереноса в образце имитатора лунного реголита, подвергающегося термической обработке.

Предмет исследования – метод параметрической идентификации математической модели плавления сыпучих материалов, основанный

на решении обратных задач теплообмена, предполагающая применение внутренних контактных средств измерения температуры.

Научная новизна

Научная новизна работы определяется впервые реализуемым комплексным подходом к исследуемой проблеме определения комплекса неизвестных характеристик процесса плавления сыпучих материалов при поверхностном радиационном нагреве: на первом этапе расчетно-экспериментальных исследований определяются теплофизические характеристики материала до начала плавления, а на втором – параметры математической модели плавления.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы заключается в применении методов обратных задач теплообмена для исследования процесса оплавления сыпучих материалов, в частности – реголита.

Практической ценностью данной работы является:

- создание алгоритмических и методических средств расчетно-экспериментального исследования процессов оплавления сыпучих материалов;
- разработка методики проведения тепловых испытаний для реализации разрабатываемого метода;
- разработка прикладного программного обеспечения, используемого для экспериментальной апробации метода.

Указанное выше позволяет сделать вывод о том, 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.

Работа имеет высокую практическую значимость, поскольку разработанная математическая модель плавления лунного реголита может

быть использована для определения технических характеристик аппаратов, предназначенных для строительства объектов лунной инфраструктуры.

Методы исследования

Теплофизические характеристики имитатора лунного реголита, необходимые для построения математической модели его плавления, были определены расчетно-экспериментальным методом на базе методологии обратных задач теплопереноса. Искомые теплофизические характеристики имитатора реголита были определены в результате решения коэффициентной обратной задачи обработки данных эксперимента на тепловакуумном стенде методом итерационной регуляризации. Для определения параметров математической модели плавления реголита под воздействием поверхностного концентрированного теплового радиационного излучения была проведена серия экспериментов с применением лазерной установки. Идентификация математической модели плавления производилась с помощью разработанного алгоритма решения обратной задачи теплообмена определения вектора неизвестных параметров анализируемой математической модели.

Положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся следующие результаты проведенных автором исследований:

1. Комплексный расчетно-экспериментальный метод идентификации модели теплопереноса с учетом процессов плавления в сыпучем материале;
2. Методика и технические средства экспериментального исследования теплофизических характеристик сыпучих материалов с использованием контактного нагрева образцов;
3. Методика и технические средства экспериментального исследования параметров математической модели плавления с использованием радиационного нагрева и контактных средств измерения температуры;

4. Результаты реализации разработанного метода идентификации применительно к трехмерной нестационарной модели теплопереноса в образце материала под воздействием лазерного излучения.

Достоверность и обоснованность полученных результатов проведенных исследований основывается на корректности используемых общепринятых математических моделей плавления, строгости используемых математических методов обратных задач теплообмена, оценках их устойчивости и сходимости путём численного моделирования и по результатам сравнения экспериментальных данных с расчетными.

Апробация результатов работы

Положения и результаты работы докладывались на следующих научных конференциях:

1. Шестая Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Колачёвские чтения» Ступинский филиал МАИ, 2021 г.
2. Международная конференция «Космические системы», МАИ, 2021 г.
3. XXIII Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках», Екатеринбург, 2021 г.
4. XXII Научно-техническая конференция учёных и специалистов ПАО «РКК «Энергия», 2021 г.
5. Королёвские чтения, АО «НПО Лавочкина», 2022 г.
6. XXIV Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках», посвященная столетию академика В. Е. Алемасова. Казань, 2023 г.

Публикации по теме диссертации

По теме диссертации опубликовано 9 работ, из них в рецензируемых научных изданиях рекомендуемых ВАК при Минобрнауки России по специальности

1.3.14. — «Теплофизика и теоретическая теплотехника» опубликованы 3 работы.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 167 страниц, включающих 113 рисунков, 29 таблиц. Список литературы включает 75 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена сбору и анализу информации о свойствах лунного грунта (реголита). В ней формируется представление о его химическом, минералогическом и гранулометрическом составе. Приводится информация о степени разработанности технологий переработки реголита в рамках мировой науки. Для решения проблемы дефицита настоящего лунного реголита на Земле произведен обзор его имитаторов, произведенных искусственно из земных компонентов. Представлены результаты анализа различных подходов к использованию лунного грунта для строительства объектов лунной инфраструктуры. Сделан вывод о целесообразности использования технологии послойного спекания лунного грунта с использованием концентраторов солнечной энергии.

Реголит представляет собой сыпучий материал, покрывающий поверхность Луны. Можно выделить два основных типа районов, составляющих поверхность Луны – материковая часть и область лунных морей. Материковый реголит состоит из анортозитовых пород, а морской – из базальтовых.

Толщина слоя реголита зависит от района. В лунных морях средняя толщина реголитового покрова составляет 4 метра, тогда как на материках она может достигать 10-15 м.

Химические составы морского и материкового реголита различаются не слишком сильно. Большую часть для обоих типов грунта составляет SiO_2 , который занимает более 40%. Также реголит богат на оксиды алюминия, титана и железа. В таблице 1 приведены результаты исследования образцов, доставленных космическими аппаратами Луна-16 и Луна-20.

Таблица 1 – Массовые концентрации соединений в лунном реголите, %

	SiO_2	Al_2O_3	TiO_2	FeO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	MnO	Cr_2O_3	P_2O_5
Л-16	41,7	15,33	3,39	16,64	8,78	12,49	0,34	0,10	0,21	0,28	0,12
Л-20	44,4	22,9	0,56	7,03	9,7	15,2	0,55	0,10	0,12	–	0,14

Примерно половина типичного лунного реголита по весу состоит из частиц, размер которых меньше разрешения человеческого глаза. Размер частиц лунного реголита контролируется двумя основными механизмами противоположного действия. Первый – это дробление в результате метеоритной и микрометеоритной бомбардировки, которое уменьшает размер частиц. Второй процесс – агглютинация – это увеличение размера частиц за счет налипания брызг стекла, образовавшихся в результате удара.

Исследования, посвященные разработке перспективных термических технологий обработки реголита, показывают, что для этих технологий целесообразным является использование более мелких фракций реголита.

Мелкообломочный реголит по морфологии можно разделить на 3 группы: 1-я шарики стекла и металла; 2-я остроугольные обломки различных пород, минералов и стекол; 3-я спеки и шлаки (рисунок 1, таблица 2).

Эксперименты, связанные с исследованием Луны и созданием соответствующих технологий, проводятся на имитаторах лунного грунта, созданных из земных компонентов. Имитаторы реголита создаются под конкретные задачи и из всех его свойств – физико-механических, теплофизических, электромагнитных, гранулометрических, химических и др. – обычно воспроизводят только необходимые в данном эксперименте.

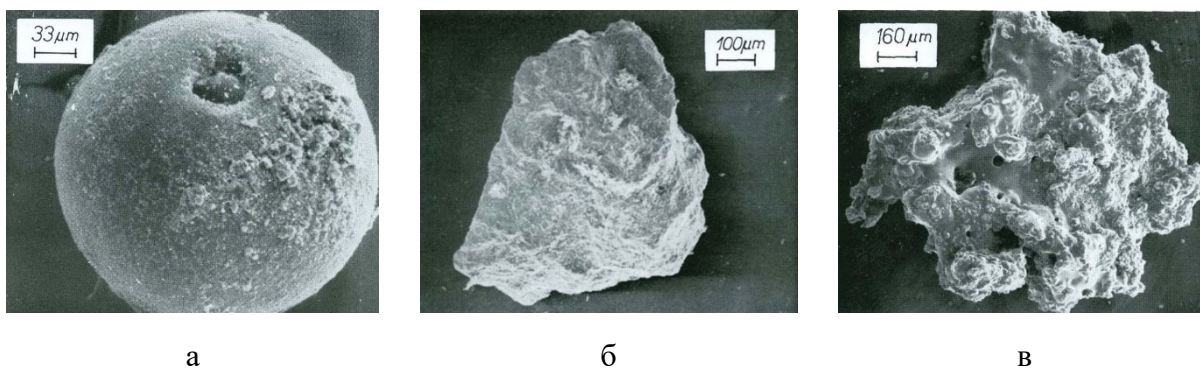


Рисунок 1 – Типы частиц лунного реголита: а – стеклянный шарик; б – обломок базальта; в – агглютинат

Таблица 2 – Относительное число частиц различных морфологических групп в составе реголита.

Морфологическая группа	Относительное число частиц, % в размерных фракциях, мм			
	Морской реголит Л-16		Материковый реголит Л-20	
	0,45-0,9	+0,9	0,45-0,9	+0,9
1. Шарики	1,2	0,5	0,4	0
2. Обломки пород, минералов и стекол	64,7	76,3	81,5	85,3
3. Спеки, шлаки	34,1	23,2	18,1	14,7

Собственные имитаторы лунного реголита есть у каждой страны, занимающейся его изучением. Основные эксперименты по тепловой обработке имитаторов лунного реголита за рубежом произведены над JSC-1A, JSC-2A, EAC-1, EAC-1A, поэтому их характеристики подробно рассмотрены в диссертации.

На данный момент существует множество технологий обработки реголита, которые могут быть применены для производства конструкционных материалов на Луне. Их можно разделить на две группы – «холодные» и «горячие». К «холодным» относятся технологии с относительно низкой энергоемкостью: частицы реголита склеиваются между собой сторонним связующим веществом. В качестве примера можно привести проект Европейского космического агентства, согласно которому автоматический

аппарат должен формировать купол лунной базы, впрыскивая связующее вещество в слой насыпанного реголита.

В «горячих» технологиях сторонние связующие вещества не предусмотрены – реголит нагревается до высоких температур и конструкционный материал получается путем спекания, или сплавления лунного грунта. Выбор «горячих» технологий представляется более рациональным, как требующий только реголита, доступного повсеместно в лунных условиях, и энергии. В качестве источника энергии могут быть использованы солнечные концентраторы. Даже в земных условиях исследователям удавалось спекать объекты из имитаторов лунного реголита с помощью концентраторов солнечной энергии (рис. 2). В условиях Луны, где отсутствует атмосфера и связанные с ней потери мощности, солнечные концентраторы становятся значительно более эффективными.

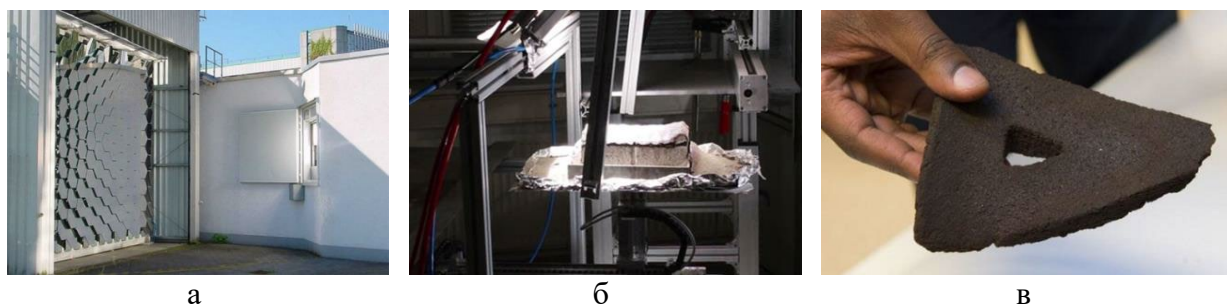


Рисунок 2 – Спекание образца из имитатора реголита в солнечной печи:
а – солнечная печь; б – процесс спекания; в – полученный образец

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. Моделирование произведено в программном продукте Ansys, предложены и реализованы несколько стратегий обработки реголита. На рисунке 3 показано расчетное распределение тепла внутри обрабатываемого образца в зависимости от перекрытия между последовательными проходами теплового луча по

поверхности образца. Приводятся постановки задачи параметрической идентификации математической модели плавления сыпучего материала.

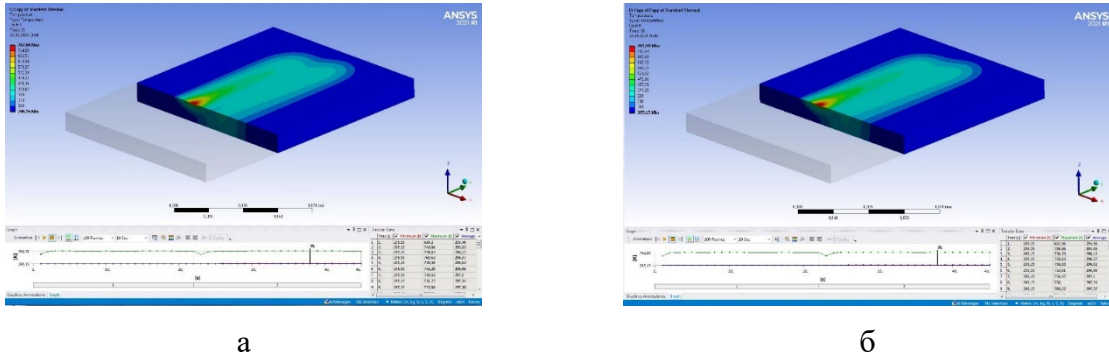


Рисунок 3 – Распределение тепла в образце в зависимости от процента перекрытия между последовательными проходами луча концентрированной энергии по поверхности образца при прочих неизменяемых параметрах. а – 0% перекрытия; б – 10% перекрытия

Для проведения тепловых расчетов в данной работе слой имитатора реголита моделировался как твердое сплошное тело. Для этого тела вычислялись эффективные теплоемкость и теплопроводность.

Уравнение теплопроводности записывается в трехмерной системе координат как:

$$C(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v + q_{nl}, \quad (1)$$

$$x \in (-a/2, +a/2), y \in (-a/2, +a/2), z \in (0, d), \tau \in (0, \tau_m]$$

где λ – теплопроводность; ρ – плотность; C – теплоемкость; T – температура; t – время.

Внутреннее тепловыделение при нагреве описывается как:

$$q_v(x, y, z, \tau) = \frac{3A_s Q}{\pi r^2 (d - z)} \exp \left[-\frac{3(x^2 + y^2)}{r^2} \right]. \quad (2)$$

И внутреннее теплопоглощение за счет плавления определяется как

$$q_{nl}(x, y, z, \tau) = \beta(T) \rho \Delta H, \quad (3)$$

где ΔH – удельная теплота плавления симулятора грунта,

$$\beta(T) = \begin{cases} 0, & \text{если } T \leq T_s \\ \left(\frac{\partial T / \partial \tau}{T_s - T_L} \right) & \text{если } T_s \leq T \leq T_L \\ 0, & \text{если } T \geq T_L \end{cases}$$

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 посвящен обработке результатов проведенных экспериментальных исследований.

Решение поставленной задачи производилось путем минимизации целевого функционала

$$J(\bar{u}) = \sum_{m=1}^M \int_0^{\tau_m} [T(X_m, \tau) - f_m(\tau)]^2 d\tau, \quad (4)$$

где $\bar{u}$ – вектор неизвестных характеристик; M – количество точек, в которых проводились измерения; τ_m – продолжительность расчетного участка прогрева; X_m – координаты точек в которых проводились измерения; f_m – измеренные значения температур.

Для описания теплопереноса в сыпучих материалах использовалась одномерная математическая модель теплопереноса:

$$c_{\text{эф}}(T(\tau, x)) \frac{\partial T(\tau, x)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{\text{эф}}(T(\tau, x)) \frac{\partial T(\tau, x)}{\partial x} \right), \quad (5)$$

$$x \in (0, L), \tau \in (0, \tau_m].$$

$$T(x, 0) = T_0(x), \quad x \in [0, L] \quad (6)$$

$$-\lambda_{эф}(T(0,\tau))\frac{\partial T(0,\tau)}{\partial x}=q_1 \quad (7)$$

$$-\lambda_{эф}(T(L,\tau))\frac{\partial T(X_L,\tau)}{\partial x}=q_2, \tau \in (0,\tau_m]. \quad (8)$$

где $\lambda_{эф}$ и $c_{эф}$ – неизвестные эффективные характеристики теплопроводности и теплоемкости образца сыпучего грунта; L – толщина расчетной области; τ_m – продолжительность процесса прогрева; q_1 и q_2 – тепловые потоки на двух границах образца материала; $T_0(x)$ – распределение температуры в начальный момент времени.

Для того что бы сформировать функционал (4), помимо задачи (5) - (8), необходима экспериментальная информация о тепловом состоянии исследуемого материала в некоторых точках:

$$T(X_m,\tau)=T_m^{эксн}(\tau), m=1,M, \quad (9)$$

где X_m – координаты M точек, в которых производилось измерение температуры.

Для проведения тепловых испытаний образцов сыпучих материалов в рамках данной работы использовался тепловакуумный стенд ТВС-1М, входящий в состав комплекса ВТС-ОЗТ. Стенд обеспечивает возможность проведения испытаний в условиях нестационарного радиационного и радиационно-кондуктивного нагрева при температурах от комнатной до 2000°C и темпах нагрева до 100°C/с в воздушной среде или в среде инертных газов при давлении до 1,6 бар, или в вакууме при давлении от 1×10^{-7} бар.

В тепловых испытаниях исследованию подвергался образец ПК-1 – кварцевый песок, представляющий собой смесь пылевидных, мелкозернистых и среднезернистых фракций обогащенного кварцевого песка природного происхождения с размерами частиц $0+ \div 0,63$ мм и с содержанием двуокси кремния (SiO_2) $\approx 95\%$. В рамках данной работы было произведено три испытания образцов сыпучих материалов: пробное, штатное в воздушной среде, штатное в вакууме.

Для тепловых испытаний образцов сыпучих материалов на стенде ТВС-1М был использован экспериментальный модуль ЭМ-2ВСМ (рис. 4), разработанный и изготовленный в рамках данной работы. Конструкция модуля учитывает особенности и свойства исследуемых сыпучих материалов.

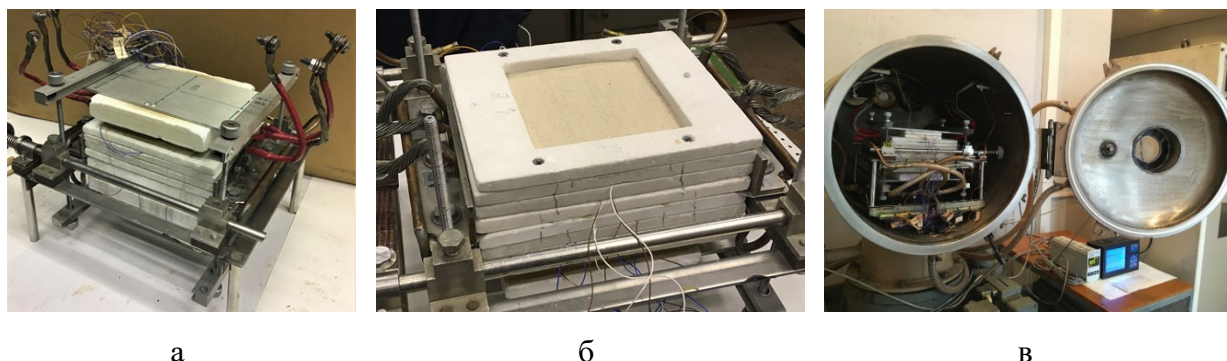


Рисунок 4 – Подготовка к проведению испытаний: а – собранный модуль ЭМ-2ВСМ; б – процесс формирования исследуемого образца из сыпучего материала; в- общий вид стенда ТВС-1М

После проведения экспериментов методами решения обратных задач теплопроводности были получены искомые теплофизические характеристики имитатора лунного реголита (рис. 5, рис. 6).

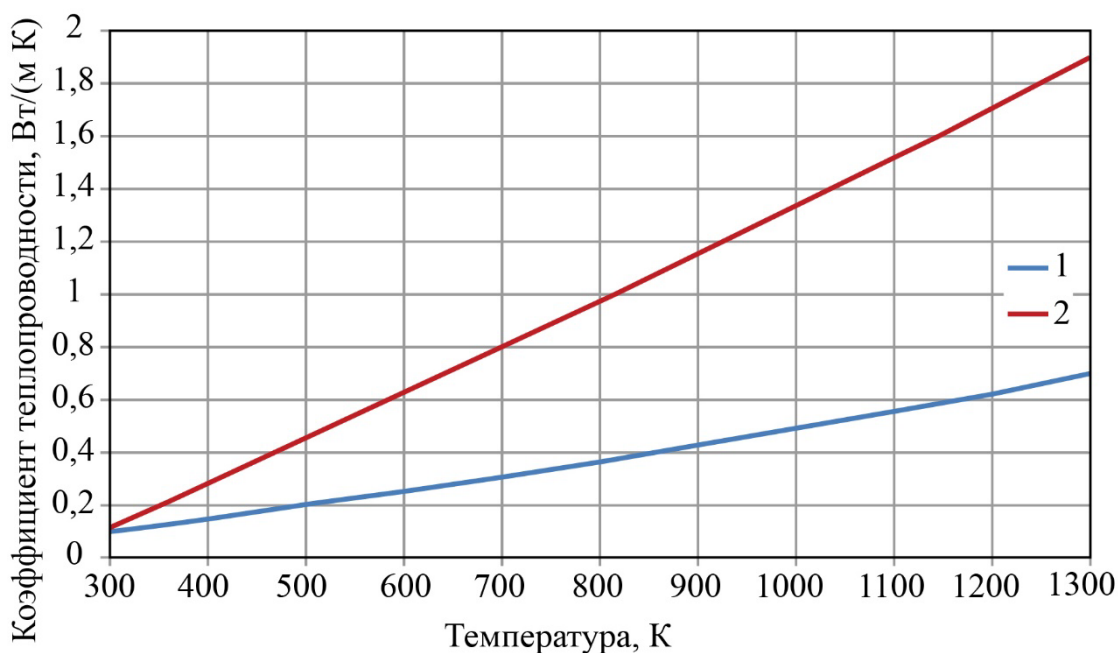


Рисунок 5 – Полученное значение коэффициента теплопроводности для симулятора лунного грунта: 1 - эксперимент в вакууме, 2 - эксперимент в воздушной среде

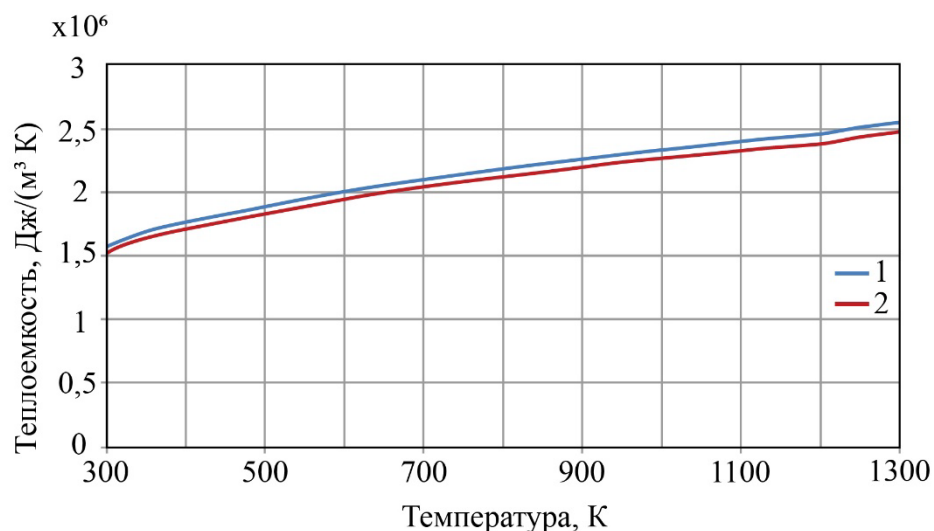


Рисунок 6 – Полученное значение коэффициента объемной теплоемкости для симулятора лунного грунта: 1 – эксперимент в вакууме, 2 – эксперимент в воздушной среде.

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.

Задача описания процесса теплового воздействия, может быть сформулирована следующим образом (рис. 7) Ограниченная пластина размером $a \times a$ толщиной d подвергается воздействию нормально падающего теплового потока q_l . На остальных гранях предполагается теплоизолированность. Измерение температуры проводится только в двух внутренних точках.

Математическая модель теплопереноса в рассматриваемой системе представляет собой краевую задачу, представленную в главе 2.

Особенностью среды, в которой должно происходить спекание является отсутствие теплопередачи за счет конвекции. Сам реголит, как было сказано

ранее, является прекрасным теплоизолятором. В связи с этим в математической модели считается, что исследуемый образец является теплоизолированным с пяти сторон. Шестая поверхность образца подвергается тепловой обработке. С нее происходит потеря тепла за счет излучения и испарения легкоплавких компонентов.

Начальные и граничные условия с учетом нагрева и излучения можно записать как:

$$T(x, y, z, 0) = T_0(x, y, z), \quad (10)$$

$$x \in [-a/2, +a/2], y \in [-a/2, +a/2], z \in [0, d],$$

$$-\lambda(T) \frac{\partial T(-a/2, y, z, \tau)}{\partial x} = 0, \quad (11)$$

$$y \in [-a/2, +a/2], z \in [0, d]$$

$$-\lambda(T) \frac{\partial T(a/2, y, z, \tau)}{\partial x} = 0, \quad (12)$$

$$y \in [-a/2, +a/2], z \in [0, d]$$

$$-\lambda(T) \frac{\partial T(x, -a/2, z, \tau)}{\partial y} = 0, \quad x \in [-a/2, +a/2], z \in [0, d] \quad (13)$$

$$-\lambda(T) \frac{\partial T(x, a/2, z, \tau)}{\partial y} = 0, \quad x \in [-a/2, +a/2], z \in [0, d] \quad (14)$$

$$-\lambda(T) \frac{\partial T(x, y, 0, \tau)}{\partial z} = 0, \quad x \in [-a/2, +a/2], y \in [-a/2, +a/2], \quad (15)$$

$$-\lambda(T) \frac{\partial T(x, y, d, \tau)}{\partial z} = q_l - \varepsilon \sigma T^4(x, y, d, \tau) - q_{исп}, \quad (16)$$

$$x \in [-a/2, +a/2], y \in [-a/2, +a/2],$$

В рассматриваемом случае тепловое воздействие лазера, поглощенное верхней свободной поверхностью порошкового слоя, аппроксимируется по нормальному распределению:

$$q_l(x, y, \tau) = \frac{2A_s Q}{\pi r^2} \exp \left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{r^2} \right], \quad (17)$$

где Q – тепловая мощность излучаемого лазером; r – радиус луча лазера; A_s – поглощающая способность материала.

В качестве неизвестных параметров в данной работе рассматриваются $A_s Q$ и ΔH , предполагаемые константами. Для упрощения записи введено обозначение: $Q_l = A_s Q$. При этом, в случае, когда определяемые характеристики являются постоянными величинами, весьма эффективным является применение метода последовательных приближений с использованием линейной оценки приращения вектора неизвестных характеристик на s -ой итерации $\Delta \bar{u}^s$, задаваемого на каждой итерации следующим образом:

$$J(\bar{u}^{s+1}) = \min J(u^s + \Delta \bar{u}^s) \quad (18)$$

Для проведения экспериментальных исследований плавления симулятора лунного реголита использовалась комплексная установка, в состав которой входит промышленный робот KUKA KR30HA и волоконный иттербиевый лазер IPG типа ЛС-1,5 (рисунок 8).

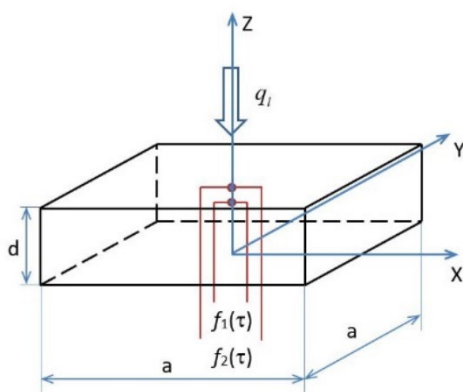
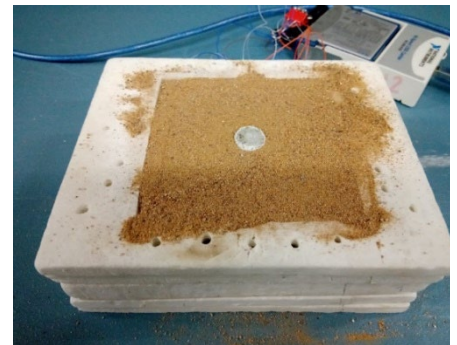


Рисунок 7 – Схема процесса теплопереноса в симуляторе лунного грунта



а



б

Рисунок 8 – Этапы эксперимента:
а – воздействие лазера на образец; б – корпус с установленными термопарами и образцом сыпучего материала после воздействия лазера

В результате, по экспериментальным данным были определены значения комплекса $Q_l = A_s Q$ (рис. 9) и теплового эффекту плавления ΔH

(рис. 10). На этих рисунках представлены значения данных характеристик в зависимости от номера итераций.

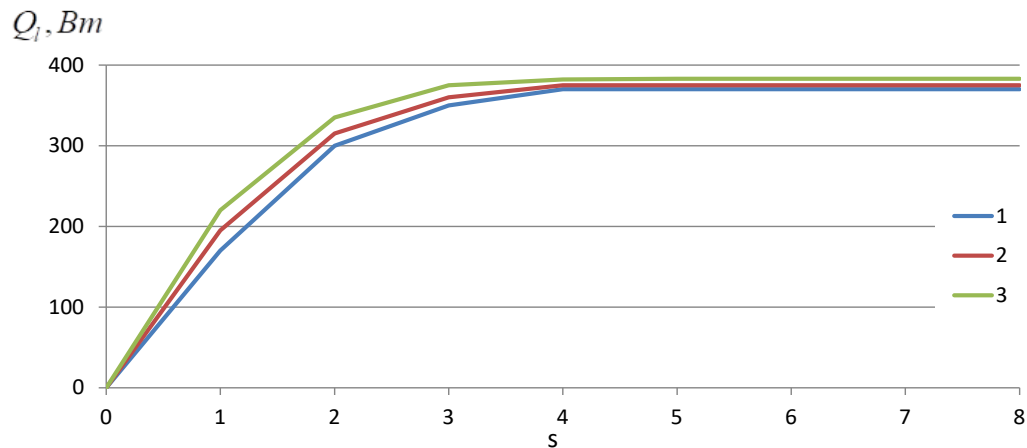


Рисунок 9 – Зависимость определяемой поглощенной мощности лазера Q_l от номера итерации s для различных режимов нагрева: 1 – время нагрева лазером = 7 секунд, 2 – 14 секунд, 3 – 28 секунд.

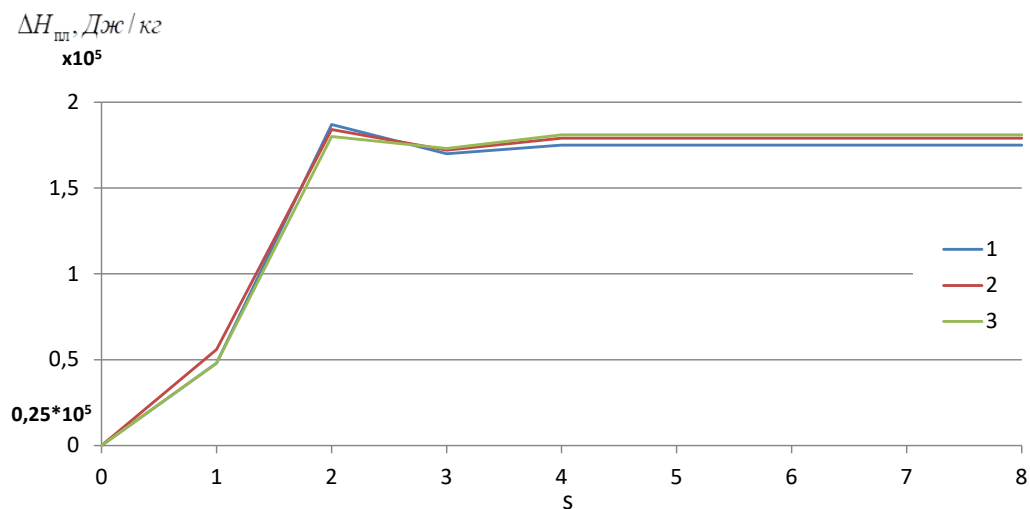


Рисунок 10 – Зависимость определяемой удельной теплоты плавления ΔH от номера итерации s для различных режимов нагрева: 1 – время нагрева лазером – 7 секунд, 2 – 14 секунд, 3 – 28 секунд.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа посвящена решению задачи параметрической идентификации математической модели плавления лунного грунта при послойном спекании лунного грунта с использованием концентраторов солнечной энергии.

К основным научным положениям и выводам, которые сформулированы и доказаны в диссертации и позволили решить поставленные в работе задачи, следует отнести следующие:

1. Проведенный анализ свойств лунного реголита и различных технологий его использования для строительства объектов лунной инфраструктуры показал целесообразность использования технологии послойного спекания лунного грунта с использованием концентраторов солнечной энергии.

2. Проведен анализ существующих математических моделей оплавления порошковых материалов при использовании аддитивной технологии, выбрана математическая модель, адекватная рассматриваемым физическим процессам и разработан вычислительный алгоритм для численного решения задачи моделирования оплавления сыпучего материала.

3. На основе общего подхода к решению обратных задач математической физики был разработан алгоритм решения задач параметрической идентификации математических моделей плавления сыпучих материалов методом итерационной регуляризации с использованием векторного параметра спуска при решении обратных задач по определению нескольких параметров.

4. Был выбран материал, имитирующий свойства исследуемого объекта (реголита) и позволяющего реализовать экспериментальную часть исследования.

5. Были проведены экспериментально-расчетные исследования теплофизических характеристик (коэффициенты теплопроводности и объемной теплоемкости) сыпучего материала. Построены физическая и математическая модели процесса теплообмена в образце, разработана математическая формулировка коэффициентной обратной задачи теплопроводности в одномерном случае. На основе экспериментальных данных были определены искомые зависимости $C(T)$, $\lambda(T)$.

6. Были проведены экспериментально-расчетные исследования параметров математической модели плавления сыпучего материала (поглощенной тепловой мощности и удельного теплового эффекта плавления) под воздействием поверхностного концентрированного теплового радиационного излучения. Построены физическая и математическая модели процесса теплообмена в образце, разработан алгоритм и программное обеспечение для решения соответствующей обратной задачи в трехмерной постановке. Проведена серия теплофизических экспериментов, по результатам которых определен комплекс параметров математической модели плавления исследуемого имитатора лунного грунта.

Разработанная методология может быть также использована для повышения эффективности и качества исследований в других отраслях науки и техники, в которых возникает необходимость разработки технологий с использованием сыпучих материалов, а именно: аддитивных технологиях в машиностроении, геологии, геофизике и т.д.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Публикации в рецензируемых научных изданиях:

1. Кочнев К.В., Ненарокомов А.В. Технологии обработки лунного реголита для последующего использования// Тепловые процессы в технике. 2020. Т. 12. № 6. С. 51–61. DOI: 10.34759/tpt-2022-15-2-51-61
2. Кочнев К.В., Ненарокомов А.В. Моделирование теплообмена в симуляторе лунного реголита. Постановка задачи // Тепловые процессы в технике. 2021. Т. 13. № 6. С. 242–252. DOI: 10.34759/tpt-2021-13-6-264-268
3. Кочнев К.В., Ненарокомов А.В. Моделирование процесса спекания лунного реголита. Разработка прототипа экспериментальной установки // Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 2. С. 51-61. DOI: 10.34759/tpt-2023-15-2-51-61

Публикации в материалах научных конференций:

1. Кочнев, К. В. Применение реголита для строительства лунных баз / К. В. Кочнев // Сборник тезисов Шестой Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Колачёвские чтения». – 2021. – С. 85-86.
2. Кочнев, К. В. Система определения углового положения МКА / Е. В. Чебаков, А. В. Ненарокомов, Д. Л. Ревизников, С. А. Будник, К. В. Кочнев // Сборник тезисов Международной конференции «Космические системы». – 2021. С. 60-61.
3. Кочнев, К. В. Моделирование теплообмена в симуляторе лунного реголита / К. В. Кочнев // Сборник тезисов XXIII Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках». – 2021. – С. 198 – 199.
4. Кочнев, К. В. Автоматическая лаборатория лунного базирования / К. В. Кочнев // Сборник тезисов XXII Научно-технической конференции учёных и специалистов, посвященной 60-летию полета Ю.А. Гагарина, 75-летию ракетно-космической отрасли и основания ПАО «РКК «Энергия». – 2021. – С. 546.
5. Кочнев, К. В. Автоматическая лаборатория для отработки процесса спекания лунного реголита / К. В. Кочнев // Сборник тезисов XLVI Академических чтений по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых - пионеров освоения космического пространства. Т. 4.– 2022. – С. 32–33.
6. Кочнев, К. В. Постановка эксперимента по спеканию симулятора лунного реголита в земных условиях / К. В. Кочнев // Сборник тезисов XXIV Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках», посвященная столетию академика В. Е. Алемасова. – 2023. – С. 350 – 351.