

## Отзыв официального оппонента на диссертацию

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

Актуальность темы диссертации. Проекты по освоению Луны активно развиваются в технологически развитых странах Мира: Россия, США, Европа, Китай, Индия, Япония, Израиль. В связи с большим объемом полезных ископаемых, являющихся критическими для современных наукоемких технологий, добыча уникальных полезных ископаемых на Луне является актуальной практической задачей. Разработка ценных природных материалов требует создания стационарных станций. Для создания стационарных технологических центров требуются строительные материалы, которые нереально доставлять с Земли. Поэтому исследование технологий получения строительных блоков из лунного грунта (реголита) является актуальной научной и практической задачей. Диссертационная работа Кочнева К.В. посвящена экспериментальному и теоретическому моделированию спекания и плавления реголита при различных способах теплового воздействия.

Наиболее существенные принципиально новые научные и практические результаты диссертации. В работе исследованы технологии спекания и плавления реголита при нестационарных тепловых воздействиях, вызванных концентрированным солнечным излучением, объемными источниками тепла, лазерным излучением. Впервые разработана теоретическая модель и компьютерная реализация определения теплофизических параметров мелкодисперсного насыпного слоя реголита в процессе спекания и плавления методами обратных задач теплопроводности. Практическое значение имеют оригинальные экспериментальные методики сбора и обработки результатов нагрева, спекания и плавления аналогов реголита и сопоставления с данными расчетов на основе обратных задач теплопроводности.

Достоверность результатов диссертации.

Достоверность используемых в работе методов подтверждается использованием фундаментальных законов тепло- и массопереноса. Результаты численных экспериментов

согласуются с экспериментальными данными, полученными автором диссертации при различных сценариях тепловой обработки аналогов лунного грунта.

Практическая значимость результатов диссертации.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы при разработке технологии изготовления строительных материалов из реголита путем спекания на Луне в концентраторах солнечного излучения. Научное и практическое значение имеет реализованный в диссертации метод обратных задач для определения теплофизических свойств и энтальпии плавления различных по структуре мелкодисперсных сыпучих материалов.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, введения, заключения и списка литературы. Объем работы составляет 167 страниц. Список литературы содержит 75 источников. Диссертация содержит 113 рисунков и 29 таблиц.

Автореферат соответствует содержанию диссертации, отражает новизну, основные достижения диссертационного исследования и результаты, защищаемые автором. Автореферат и диссертация написаны литературным русским языком.

По материалам диссертации опубликованы 3 статьи в рецензируемых журналах, входящих в список ВАК. Результаты работы неоднократно докладывались на престижных международных и российских конференциях.

В первой главе представлен обзор состояния проблемы. Отмечается большой практический интерес технологически развитых стран Мира к освоению Луны путем создания стационарных обитаемых и роботизированных станций. Отмечаются уникальные свойства реголита, его сложный гранулометрический и минеральный состав. Обсуждаются существующие методики тепловой обработки реголита с целью получения материалов пригодных для строительства дорожных покрытий. Представлены методики получения искусственного лунного грунта и свойства существующих в мире аналогов природного реголита. Отмечается существенная зависимость теплофизических свойств аналогов реголита от структуры насыпного слоя, температуры и способов тепловой обработки. Рассмотрена технология спекания мелкодисперсного реголита в солнечном концентрированном излучении. Практическая реализации может быть достигнута с помощью «Луноходов», разработанных в Советском Союзе и России. Обсуждается возможность имитации концентрированного солнечного излучения на Земле с помощью высокоэнергетического лазерного луча.

Вторая глава посвящена описанию математической модели спекания лунного грунта. Отмечаются большая порозность и широкий дисперсионный состав насыпного реголита, существенно влияющая на переменность теплофизических свойств грунта при спекании. Сформулирована математическая модель трехмерной теплопроводности в приближении однородного твердого тела, но с переменными коэффициентами, теплопроводности, теплоемкости и плотности. В коммерческом коде Ansys создана программа численного моделирования процесса прогрева пластины твердого материала. Представлены результаты численного моделирования теплового состояния образца в зависимости от сценария изменения во времени тепловой мощности луча и его траектории на поверхности образца. В этой же главе представлена математическая формулировка метода обратной задачи теплопроводности для определения теплофизических свойств спекаемого материала по массиву точечных данных о температуре во времени и внутри объема образца. Обсуждаются различные экспериментальные методы имитации нагрева материала с целью сбора информации для решения обратной задачи теплопроводности. Описан алгоритм решения обратной задачи на основе минимизации целевого функционала, представляющего дисперсию отклонения измеренных и рассчитанных значений температур в объеме образца. При минимизации используется методика сопряженной задачи теплообмена. В этой же главе представлено подробное описание экспериментальной методики определения теплофизических свойств имитатора лунного грунта на стендах, созданных соискателем. Процесс прогрева образцов реализован в атмосфере и в вакууме, что существенно сказалось на результатах расчета теплофизических свойств аналогов реголита. Следует отметить оригинальность и современное технологическое оснащение экспериментальных установок. Экспериментальные работы отличаются тщательностью подготовки, проведения опытов и современной компьютерной обработкой. Представлены термограммы изменения температуры внутри образцов при различных сценариях прогрева в печи. По результатам тепловых испытаний удастся восстановить плотность теплового потока на поверхности образца, как в вакууме, так и в атмосфере. Представлено сопоставление результатов расчета и измерений температур в вакууме и в атмосфере. По результатам обработки методом обратной задачи получены зависимости коэффициента теплопроводности испытуемого аналога в вакууме и в воздушной среде. Теплопроводность в атмосфере выше, чем в вакууме, что можно объяснить конвективными эффектами. При этом теплоемкость материала в обоих экспериментах практически одинакова.

В четвертой главе представлена математическая модель и результаты экспериментального исследования процесса плавления искусственного лунного грунта.

Эта работа не имеет аналогов и представляет принципиальный интерес при расчете методами обратной задачи теплопроводности энтальпии фазового перехода материала, меняющего свою структуру в процессе теплового воздействия. Представлена математическая формулировка задачи в трехмерной постановке при локальном воздействии лазерного излучения на поверхность плоского образца. Подробно описана методика минимизации целевого функционала. Проведена верификация метода обратной задачи теплопроводности на основе сопоставления результатов расчета с экспериментальными данными эталонного материала. Реализована экспериментальная установка по лазерному облучению материалов. Следует отметить высокопрофессиональный уровень подготовки, проведении экспериментальных исследований и современные методики обработки результатов. Представлены результаты предварительных отладочных экспериментов. Исследована структура спекаемых материалов в зависимости от мощности лазера и сценария прохода луча по поверхности образца. Показано, что выбор безопасного режима спекания требует кропотливых пробных экспериментов с целью установления мощности и времени облучения образцов. Представлены термограммы данных термопар в объеме облучаемых образцов. На основе обработки результатов экспериментом методом обратной задачи получены данные по поглощенной мощности лазера и удельной теплоте плавления имитатора лунного грунта.

В заключении сформулированы основные выводы по диссертации. Отмечаются основные достижения работы, их новизна, взаимосвязь результатов, полученных в различных разделах диссертации, с общей стратегией исследования. Подчеркивается, что все разработанные в диссертации результаты имеют несомненное практическое и научное значение.

#### По диссертации имеются замечания

По мнению оппонента в названии диссертации необходимо было подчеркнуть экспериментальную составляющую работы, которая выполнена на высокопрофессиональном уровне и заслуживает высокой оценки. Название «Математическая модель плавления...» не отражает уникальной методики экспериментальных исследований. В диссертации на основе решения обратных задач теплопроводности представлена надежная методика прогноза теплофизических свойств и энтальпии плавления сыпучих материалов в процессе спекания. Экспериментальная часть работы не вызывает замечаний. В то же время по представлению теоретической части имеется ряд комментариев.

1. Уравнение (2.1) записано с опечатками. В операторе Лапласа все производные указаны для одной переменной. В уравнениях (2.1) и (4.1)  $q_{\text{пл}} > 0$  (см. (2.3)) должно входить со знаком «минус». В том виде как записаны уравнения теплота плавления приводит к росту температуры.
2. В формуле (2.3) не ясен смысл функции  $\beta(T)$ . Фазовый переход имеет границу при температуре плавления, на которой происходит скачок энтальпии. В случае формулы (2.3) фазовый переход занимает существенный объем. Предложенная аппроксимация нуждается в комментарии.
3. В формуле (2.2) непонятна расходимость при  $z \rightarrow d$ . В чем физическая причина такой расходимости.
4. В формулах (2.12) и (2.14) присутствует давление  $P_0$ . Это давление атмосферы или насыщенных паров?
5. Как оценивается энтальпия испарения в (2.12), (2.14)?
6. Процедура минимизации функционала в обратной задаче требует решения уравнений теплопроводности с переменными коэффициентами. Желательно пояснить какой алгоритм используется, явная или неявная схема расчета по времени.
7. На стр. 79 сказано, что «обратные задачи обладают физической некорректностью». Есть понятие некорректности по Адамару, которое никак не связано с физической интерпретацией.
8. Непонятна необходимость условий (3.10), (3.11) при реализации алгоритма обратной задачи. Это обычные условия непрерывности температуры и теплового потока.
9. В формулах (4.6), (4.18), (4.22) пропущен знак «минус» в экспоненте.
10. При описании итерационной процедуры (с. 133) начальное приближение не может быть нулевым. Нулевое начальное приближение не «запустит» итерационный процесс.

### Заключение

Несмотря на замечания диссертационная работа представляет собой завершенное исследование и имеет несомненный научный и практический интерес. Практические рекомендации работы достаточно обоснованы. Диссертация и автореферат полностью соответствуют критериям, установленным Положением, раскрывают суть поставленных задач и методологию их решения.

Считаю, что полученные в диссертации результаты вносят существенный вклад в разработку как методов математического моделирования, так и экспериментальных

методик тепловой обработки лунного грунта, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Автор диссертации Кирилл Владиславович Кочнев, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.14 — Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Доктор технических наук, профессор  
Профессор кафедры прикладной математики  
Факультета фундаментальных наук  
Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)

*Деревич*

Игорь Владимирович Деревич

*07.11.25*

|                                                                     |                                                                                                                                                                                                            |
|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Полное наименование организации                                     | Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет)" |
| 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;<br>адрес официального сайта<br>организации | bauman@bmstu.ru<br>http://www.bmstu.ru                                                                                                                                                                     |

«ВЕРНО»

Подпись Деревича И.В. заверяю:



НАЧАЛЬНИК ОТДЕЛА  
*Деревич*  
ДЕРЕВИЧ А.Н.  
ОТДЕЛ ПО ОРГАНИЗАЦИИ РАБОТЫ  
ЕДИННОЙ ПРИЕМНОЙ УКСИА  
МГТУ ИМЕНИ Н.Э. БАУМАНА

*С отзывом ознакомлен* *Кочнев К.В.* *12.11.2025*