

УТВЕРЖДАЮ

Ректор ФГБОУ ВО «Тверской
государственный
технический университет»,
д.ф.-м.н., профессор

« 13 »



А. В. Твардовский

2023 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тверской государственный технический университет» на диссертационную работу ОРЕХОВА ВЛАДИМИРА АЛЕКСАНДРОВИЧА, выполненную на тему **«Моделирование сложного совмещённого тепломассообменно-химического процесса (на примере высокотемпературного обжига рудного фосфатного сырья)»**, представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

1. Степень актуальности темы диссертационного исследования

В настоящее время одной из актуальных задач, стоящих перед различными отраслями промышленности, такими как химическая, горнообогатительная, металлургическая и многие другие, является цифровая трансформация производства, сопровождаемая оптимизацией системы управления основными технологическими процессами. Этот тренд является особенно актуальным для энергоёмких производств, позволяя решить проблему рационального использования топливно-сырьевых ресурсов с помощью методов математического и компьютерного моделирования процессов протекающих в производственно-технологическом оборудовании отраслей промышленности основанных на теплотехнологии, например для комплексной термической подготовки дисперсного сырья, включающей нагрев, сушку или обжиг исходных материалов, например, рудного фосфатного сырья. Для этого необходимо достаточно полно подойти к методам расчёта и моделирования процессов термической подготовки и переработки сырья.

В своей диссертации Орехов В.А. достаточно убедительно обосновывает, что в настоящее время недостаточно исследованы подходы к моделированию наиболее важных технологических свойств сырья, являющиеся основой для создания компьютерных программ, которые позволяли бы проводить вычислительные эксперименты по тепломассопереносу в аппаратах термической обработки сырья, в том числе в горнообогатительной отрасли, при описании процессов термической подготовки дисперсных рудных материалов. Это связано с тем, что рудные материалы имеют неоднородный полиминеральный состав с включениями органических соединений, различными примесями и включениями, которые вступают во взаимозависимые реакции, что приводит к изменениям структуры и состава материалов и сопровождается изменениями теплофизических свойств материалов. Таким образом, математическое и компьютерное моделирование протекающих в аппаратах термической подготовки процессов способствует более глубокому пониманию механизмов происходящих в структуре обрабатываемых материалов превращений и позволит выбирать наиболее рациональные режимы работы технологического оборудования.

Резюмируя сказанное, можно сделать вывод об актуальности темы диссертации Орехова В.А. и перспективности практического применения результатов исследований по разработке математических и компьютерных моделей сложного совмещенного тепломассообменно-химического процесса термической подготовки дисперсного сырья.

2. Краткая характеристика диссертационной работы и обоснование степени новизны полученных результатов

Диссертация Орехова В.А. состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 129 наименований, и одного приложения.

Диссертация содержит 205 страниц машинописного текста, 49 рисунков и 9 таблиц.

Список литературы включает основные современные публикации по рассматриваемой проблематике, на которые в тексте диссертации сделаны корректные ссылки.

Все представленные материалы, содержащиеся в диссертации, оформлены в соответствии с предъявляемыми требованиями, снабжены необходимым количеством рисунков и таблиц. Автореферат адекватно отражает содержание диссертации.

Во введении достаточно убедительно обоснована актуальность темы диссертации, а также четко сформулированы научные задачи исследования. Корректно определены объект и предмет исследования, положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации результатов.

В первой главе (стр. 15-40) проведен аналитический обзор современных научных диссертационных исследований по моделированию сложных тепло-массообменно-химических процессов по специальности 1.2.2. Математическое

моделирование, численные методы и комплексы программ. Рассмотрены технологические особенности термической подготовки дисперсного рудного сырья при температурном воздействии. Описаны технологические особенности термической подготовки дисперсного рудного сырья при температурном воздействии, приведены методы экспериментального исследования теплофизических свойств твердых композиционных материалов, представлены теоретические разработки по моделированию теплофизических свойств композиционных материалов.

К промежуточным результатам первой главы, которые в последующем были использованы для обоснования основных научных положений диссертации, относятся следующие:

1. В современных исследованиях актуальным трендом является валидация и сопоставление результатов математического и компьютерного моделирования процессов, протекающих в материалах, с данными натурных экспериментов, которые позволяют оценить степень достоверности результатов моделирования;

2. Важное значение для задач математического и компьютерного моделирования тепломассообменно-химических процессов имеет экспериментальная информация по теплофизическим свойствам материалов, её структурирование, хранение и обработка;

3. Для проведения исследований по определению теплофизических свойств композиционных материалов возможно использовать методы нестационарной и стационарной теплопроводности;

4. Определение теплофизических свойств исследуемых материалов возможно также при помощи способа решения инверсной задачи теплопроводности при помощи численных методов.

Также с использованием результатов, отраженных в первой главе диссертации, более детально, чем во введении, обоснованы актуальность и практическая значимость выбранного направления исследования.

Во второй главе (стр. 41-71) содержатся результаты моделирования кинетики эндотермической гетерогенной реакции на примере диссоциации карбонатов.

К результатам второй главы, которые обладают научной новизной, можно отнести следующие положения.

1. Предложена математическая модель, описывающая сложный совмещенный тепломассообменно-химический процесс температурного разложения карбонатных включений в структуре дисперсного фосфатного рудного сырья.

2. Обнаружено влияние скорости нагрева поверхности фосфорсодержащих образцов на кинетику термического разложения карбонатных составляющих.

3. Проведены вычислительные эксперименты с использованием разработанной автором компьютерной модели, реализующей решение системы уравнений описывающей процесс термической декарбонизации.

4. Обнаружена зависимость между кинетикой термического разложения карбонатов и скоростью нагрева фосфоритового сырья, основанная на результатах анализа результатов вычислительных экспериментов.

5. Выявлены закономерности, которые позволят спрогнозировать энерго-ресурсоэффективные режимы температурной обработки дисперсных материалов на примере обжига фосфорсодержащего рудного сырья посредством интенсификации процессов тепло- и массообмена.

6. Исследованы параметры структурно-кинетического уравнения по результатам неизотермического эксперимента. Полученные результаты пригодны для практического использования в объектах термической подготовки сырьевых материалов.

В третьей главе (стр. 72-133) предложены методы моделирования теплофизических свойств рудных фосфатных материалов от их температуры и концентрации включений.

К результатам третьей главы относятся следующие положения.

1. Выявлено влияние химического и минералогического состава рудного фосфатного сырья на величину термических деформаций нагреваемых образцов.

2. Проведено математическое моделирование теплоемкости и теплопроводности фосфатного рудного сырья при условиях, близких к практически применяемым в действующих аппаратах термической подготовки.

3. Обоснован механизм появления значительных градиентов температур в образцах, появляющихся в результате нестационарных условий нагрева и действия тепловых эффектов реакции разложения карбонатных составляющих, что ограничивает возможность использования традиционных методов определения истинной и эффективной теплоемкостей исследуемых образцов.

4. Разработана информационная система, которая позволяет осуществлять ввод и хранение данных о технологических, теплофизических свойствах и химическом составе образцов в цифровом виде, производить их обработку поиск и хранение.

5. На базе разработанной информационной системы предложена программа расчета теплофизических свойств рудного фосфатного сырья, отличающаяся учетом объемных и массовых долей основных порообразующих минералов.

6. Разработан алгоритм для программы расчета теплоемкости и теплопроводности образцов свойств на основе анализа химического состава материала.

В четвертой главе (стр. 134–178) содержатся основные результаты математического и компьютерного моделирования совмещенного тепломассообменного процесса высокотемпературной обработки реагирующих рудных фосфатных материалов в плотном слое. В данной главе содержатся следующие результаты, обладающие теоретической и практической значимостью.

1. Значительные изменения температур газа-теплоносителя в объеме плотного слоя и на выходе из него, эффективность обжига и неравномерность степени превращения реагирующих компонентов возникают даже при незначительных различиях в теплофизических свойствах исследуемых фосфатных рудных материалов.

2. Существенные искажения результатов моделирования могут возникать из-за отсутствия расчётов по температурной зависимости коэффициента теплопроводности.

3. По результатам математического и компьютерного моделирования тепло-массообменно-химического процесса высокотемпературной обработки в плотном слое рудного фосфатного сырья автором были сделаны научно обоснованные выводы о том, что предварительное измельчение и разделение полифракционного рудного сырья на монофракции и обеспечение равномерности их засыпки позволяет обеспечить более равномерный нагрев колосниковых решеток.

4. Разработана компьютерная модель и методика вычислительного поиска оптимальных и предельных режимов протекания сложного совмещенного тепло-массообменно-химического процесса высокотемпературного обжига рудного фосфатного сырья в плотном слое многослойной массы засыпки.

5. Определены оптимальные режимы функционирования современных обжиговых машин конвейерного типа, предназначенных для обжига кускового и дисперсного рудного фосфатного сырья.

6. Предложенная компьютерная модель и методика численного поиска оптимальных режимов тепло-массообменно-химического процесса могут использоваться для оперативной режимной адаптации промышленных установок обжига.

3. Теоретическая значимость полученных в диссертации результатов

Разработанные в диссертации математические и компьютерные модели сложного совмещенного тепло-массообменно-химического процесса термической подготовки дисперсного фосфорсодержащего сырья, включающие описания термически активируемых реакций разложения карбонатов, численные методы расчетов, позволяют прогнозировать протекающие в результате высокотемпературной обработки процессы в структуре исследуемых материалов, что, в свою очередь позволяет оперативно настраивать технологические режимы работы оборудования температурной обработки различных сыпучих материалов с применением методики термоаналитических экспериментов.

Предложенная информационная система, содержащая паспорт свойств, позволяет сохранить в электронном виде экспериментальные температурные зависимости, теплофизические и химические свойства рудного сырья для их последующей обработки, хранения и анализа.

4. Практическая значимость результатов диссертации

Практическая значимость результатов диссертации подтверждается возможностью использования предложенной автором информационной системы для разработки баз данных и составления паспорта технологических и теплофизических свойств ряда фосфоритов, необходимых для теплотехнических расчетов термически активируемых сложных совмещенных тепло-массообменно-химических процессов и режимной адаптации аппаратов термической подготовки рудных материалов.

О практической значимости результатов диссертации также свидетельствует их использование в проектно-конструкторской деятельности предприятий: ООО «НИИМАШ», ООО «РусЭнергоПроект» а также в НИР и учебном процессе филиала ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске.

5. Достоверность и обоснованность результатов диссертации

Достоверность и обоснованность научных результатов, выводов и рекомендаций диссертации определяются системным подходом к проблематике исследований, корректным применением методов анализа, применением строгого математического аппарата и обоснованного аналитического подхода при построении математических, компьютерных моделей исследуемых процессов, а также при численных методах решения с использованием разработанного программного комплекса.

Предложения и выводы, содержащиеся в диссертации, не противоречат известным теоретическим и практическим результатам, содержащимся в трудах отечественных и зарубежных ученых по вопросам математического и компьютерного моделирования совмещенных тепломассообменно-химических процессов.

6. Соответствие полученных результатов паспорту специальности

Научные положения, выводы и рекомендации диссертации соответствуют следующим пунктам паспорта специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ:

п.4. Разработка новых математических методов и алгоритмов интерпретации натурального эксперимента на основе его математической модели;

п.5. Разработка новых математических методов и алгоритмов валидации математических моделей объектов на основе данных натурального эксперимента или на основе анализа математических моделей;

п.6. Разработка систем компьютерного и имитационного моделирования, алгоритмов и методов имитационного моделирования на основе анализа математических моделей.

7. Рекомендации ведущей организации по практическому использованию результатов диссертационной работы

Предложенные в диссертации инструменты могут практически использоваться для отыскания рациональных и энергоэффективных режимов работы технологического оборудования термической подготовки дисперсного сырья.

По мнению ведущей организации, возможными заинтересованными предприятиями в применении результатов диссертационного исследования Орехова В.А. могут выступать не только предприятия горнообогатительного комплекса, связанные с высокотемпературной обработкой рудного сырья, но и предприятия химической отрасли, занимающиеся сушкой дисперсных материалов, а также предприятия сельскохозяйственного комплекса, связанные с сушкой зерновых и бобовых культур.

8. Дискуссионные вопросы и замечания по диссертационной работе

1. В пункте 2.2 автором предполагается, что диффузия газообразного продукта происходит беспрепятственно и не оказывает влияния на скорость реакции декарбонизации, чем обусловлено данное предположение (с.53)?
2. В пункте 3.3 не пояснено, какие трудности методического характера возникают при протекании эндотермических реакций декарбонизации в образцах при определении теплоёмкости фосфатного сырья (с.92).
3. Что означает подпрограмма «ИНТЕРПОЛИЦИИ» на рисунке 3.5.1 (с.121)?
4. В таблице 4.2.1 нет описания, что за величина принята как ξ_i (с.149).
5. В пункте 4.4 не совсем понятно, каким образом предварительное грохочение сырья и разделение его на монофракции способствует улучшению условий эксплуатации колосниковой решётки (с.177).

Указанные замечания и дискуссионные вопросы не снижают научной значимости результатов диссертационного исследования, могут рассматриваться как рекомендации по дальнейшему расширению научных исследований.

9. Оценка соответствия диссертации требованиям «Положения о присуждении ученых степеней»

Основные результаты диссертации опубликованы в 35 печатных научных работах, в том числе в 6 статьях в журналах, входящих в список рекомендованных ВАК. Работы опубликованы в установленные сроки, необходимые для ознакомления с полученными результатами широкой научной общественности и специалистов, занимающихся решением практических задач в области моделирования химических процессов. Проведенное изучение диссертационной работы Орехова В.А. позволяет сделать вывод о том, что она представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой решена задача моделирования совмещенных тепломассобенно-химических процессов термической обработки дисперсного сырья, что имеет существенное значение для различных

энергоемких отраслей промышленности и производств, основанных на тепло-массообменно-химических процессах.

Подводя итог сказанному, можно заключить, что диссертационная работа удовлетворяет критериям, сформулированным в п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года №842 (в действующей редакции), а ее автор Орехов Владимир Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Отзыв заслушан и утвержден на заседании кафедры «Информационные системы» ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет» протоколом №_3_от «_10_» ноября 2023 года.

Заведующий кафедрой «Информационные системы»
ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»
доктор технических наук, профессор


13.11.2023 Палух Борис Васильевич


Палуха Б.В.
ПОДОПИСАЮ
и.о. секретаря Совета
Тверского государственного
технического университета
13.11.2023

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тверской государственный технический университет»

(ФГБОУ ВО «ТвГТУ»)

Адрес: 170026, Тверская область, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22

ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

Тел.: +7 (4822) 78-89-00. Веб-сайт: <http://tstu.tver.ru/>.

E-mail: common@tstu.tver.ru

Зход. № 05-7771
«28» 11 2023г.
ПОДПИСЬ

