

В диссертационный совет 24.2.312.08, созданный на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет»

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук, доцента Мошева Евгения Рудольфовича на диссертацию Орехова Владимира Александровича: «МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНОГО СОВМЕЩЁННОГО, ТЕПЛОМАССОБМЕННО-ХИМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА (НА ПРИМЕРЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОБЖИГА РУДНОГО ФОСФАТНОГО СЫРЬЯ)», представленную к защите на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

1. Актуальность темы

Высокоэффективная и рентабельная работа большинства предприятий химической, металлургической, горнообогатительной и др. отраслей промышленности невозможна без оптимизации специфичных для них теплообменных, массообменных и химических процессов, которые в существенной мере определяют качество конечного продукта и являются весьма энергозатратными. А сама оптимизация невозможна без широкого применения методов математического и компьютерного моделирования, способствующих при этом более полному пониманию основных закономерностей протекания указанных выше процессов. Представленная диссертационная работа посвящена моделированию сложного совмещённого, тепломассообменно-химического процесса обжига рудного фосфатного сырья и поэтому является безусловно актуальной. Актуальность темы диссертационной работы также подтверждается соответствием основных разделов исследования – стратегии развития химического и нефтехимического комплекса до 2024 года и на период до 2035 года подготовленной с учётом национальных целей и стратегических задач, определённых указами Президента Российской Федерации от 7 мая 2018г. № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» и от 21 июля 2020г. № 474 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года».

2. Структура работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и задачи, описаны выбранные методы исследования, представлены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен аналитический обзор современных научных исследований по моделированию сложных тепломассообменных химико-энерготехнологических процессов. Рассмотрены технологические особенности термической подготовки полидисперсного рудного сырья при температурном воздействии. Приведены методика проведения натуральных экспериментов по исследованию теплофизических свойств фосфоритового агломерата и методы экспериментального исследования теплофизических свойств твёрдых композиционных материалов. Представлены теоретические разработки по моделированию теплофизических свойств композиционных материалов.

Во второй главе получено математическое описание совмещённых тепломассообменно-химических процессов (СТМХП) деструкции карбонатов в фосфоритовых окатышах, с учётом тепловых и технологических особенностей функционирования обжиговых конвейерных машин. Научно обосновано возникновение значительных градиентов температур в исследуемых образцах, связанное с нестационарными условиями нагрева и действием тепловых эффектов реакций декарбонизации, что ограничивает возможность использования существующих методов неизотермической кинетики для определения вида и параметров кинетических уравнений. Представлена математическая модель, описывающая влияние скорости нагрева фосфорсодержащего

сырья на СТМХП декарбонизации, протекающие при высокотемпературном обжиге. Изучено влияние неизотермичности на точность термоаналитических исследований, проводимых с использованием методов неизотермической кинетики с различными скоростями нагрева образцов фосфоритных руд. Предложена математическая модель, позволяющая учесть широкий диапазон изменения параметров кинетических уравнений СТМХП декарбонизации. Исследованы параметры структурно-кинетического уравнения по результатам неизотермического эксперимента, сопровождаемого градиентами температур в исследуемом образце в диапазоне температур химико-технологической системы обжига фосфатного сырья.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований термических деформаций фосфатного сырья, оказывающие существенное влияние на протекание сложного СТМХП термической обработки в обжиговых конвейерных и агломерационных машинах. Выявлено влияние на величину термических деформаций химического и минералогического состава фосфатного сырья, поступающего на переработку. Определены параметры термической деформации в процессе нагрева, с учетом скорости нагрева. Установлено, что термические деформации в области высоких температур, способствуют размягчению и оплавлению фосфатных материалов, тем самым способствуя негативным процессам газодинамики в плотном слое фосфоритовых окатышей на конвейере обжиговой машины или в спекаемом слое на ленте агломерационной машины. Проведено математическое моделирование теплофизических свойств (ТФС): теплоёмкости и теплопроводности фосфорсодержащих рудных материалов в диапазонах температур и скоростях нагрева действующих тепло-технологических аппаратах термической обработки рудного сырья. При этом обнаружено существенное влияние эндотермической гетерогенной реакции декарбонизации на указанные ТФС.

Экспериментально исследованы температурно-концентрационная и температурно-временная зависимость теплоёмкости рудных образцов фосфатов, от тепловых условий протекания реакции декарбонизации в образцах, при структурных модификациях, в результате изменения химического состава образцов. Установлено влияние изменения структуры образцов в диапазоне температур обжига сырья и скоростей нагрева на теплоёмкость фосфоритов. Научно обосновано возникновение значительных градиентов температур в исследуемых образцах, в результате нестационарных условий нагрева и действия тепловых эффектов реакции декарбонизации, что ограничивает возможность использования традиционных методов определения истинной и эффективной теплоёмкостей образцов. Определена взаимосвязь между гетерогенными эндотермическими структурными превращениями и теплофизическими условиями эндотермического процесса декарбонизации, что позволяет повышать энергоресурсоэффективность термической обработки фосфатного сырья при обогащении на обжиговых конвейерных и агломерационных машинах.

Предложен паспорт свойств, позволяющий сохранить в электронном виде экспериментальные температурные зависимости коэффициента теплопроводности материала при первом его нагреве и в отожженном состоянии, удельной истинной теплоёмкости при первом и втором нагреве, эффективной теплоёмкости при первом нагреве, относительного линейного расширения, электрической проводимости и плотности материала при нагреве. Для реализации указанного паспорта разработана информационная система, позволяющая осуществлять ввод и хранение данных о химическом составе, теплофизических и технологических свойствах образцов в цифровом виде, производить их поиск и обработку.

В четвёртой главе приведены особенности методики экспериментального обследования температурного режима функционирования обжиговой конвейерной машины. Показаны результаты моделирования аэродинамики полифракционного плотного слоя рудного сырья, а также моделирования влияния коэффициента теплопроводности фосфатного рудного сырья на эффективность СТМХП в динамической плотной многослойной массе. Приведена методика вычислительных экспериментов по определению предельных и оптимальных режимов СТМХП обжига кускового и окомкованного рудного фосфатного сырья на конвейере обжиговой машины. В вычислительных экспериментах обнаружено, что в равных условиях обжиг рассеянного по фракциям рудного сырья более эффективен, так как способствует снижению температур газа-

теплоносителя на колосниковой решётке и повышению степени декарбонизации фосфатного сырья. Разработана методика и компьютерная модель вычислительного поиска предельных и оптимальных режимов сложного СТМХП обжига. Определены оптимальные режимы обжига кускового рудного фосфатного сырья и окатышей на постели кускового материала применительно к современным обжиговым машинам конвейерного типа. Научно обосновано, что наиболее высокая степень декарбонизации фосфатного рудного сырья достигается нагревом в обжиговой машине конвейерного типа в полученном оптимальном режиме. Отмечается, что методика численного поиска и разработанная компьютерная модель могут использоваться для оперативной режимной адаптации промышленных установок обжига к теплофизическим, реакционным и прочностным свойствам рудного фосфатного сырья.

3. Новизна научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, состоит в том, что при выполнении исследований получены следующие основные научные результаты, обеспечивающие определённое приращение знаний в предметной области специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ:

1. Разработана математическая модель СТМХП, позволяющая получать количественное описание кинетики процессов высокотемпературного разложения реагирующих компонентов в диапазонах температур реального функционирования оборудования термической обработки, отличающаяся учётом влияния скорости нагрева образцов дисперсного сырья.

2. Разработана математическая модель, описывающая особенности внутреннего теплообмена в термически активируемых включениях исследуемых образцов, позволяющая оценить термодинамическую составляющую завершённости СТМХП и отличающаяся учётом кинетики реакции, с различными скоростями нагрева дисперсного сырья.

3. Предложен численный метод расчёта теплофизических свойств прореагировавшего и непрореагировавшего и образцов, теплофизических свойств, температуры и расхода продуваемого газообразного теплоносителя с учётом влияния термических условий на примере обжига рудного фосфатного сырья.

4. Разработана математическая модель, которая позволяет выявить зависимости между динамикой полей концентраций реагирующих включений в исследуемых образцах, скоростью нагрева образцов, характеризующих степень завершённости протекания СТМХП в элементарных зёрнах и плотной многослойной массе дисперсной засыпки.

5. Предложена архитектура программного комплекса, позволяющая реализовать предложенные модели, методы и алгоритмы, осуществлять вычислительные эксперименты, осуществлять запись, обработку, расчёт и хранение данных по теплофизическим свойствам фосфоритов, исходя из их химического и структурного состава.

4. Степень обоснованности научных положений и выводов, сформулированных в диссертации

Диссертация характеризуется достаточно высокой степенью обоснованности научных положений и выводов, а также достоверностью исследований, что подтверждается:

- обоснованным описанием построения физических моделей, являющихся основой для дальнейшего математического и компьютерного моделирования СТМХП;

- корректным применением и строгостью математического аппарата для построения математических моделей протекания сложных СТМХП;

- согласованностью полученных новых результатов и информационной базы диссертации с содержащимися в трудах (монографиях, научных статьях, диссертациях) отечественных и зарубежных исследователей по анализируемой проблематике;

- валидацией предложенных моделей с результатами натуральных экспериментов;

- результатами практического использования в деятельности предприятий ООО «НИИМАШ», ООО «РусЭнергоПроект», а также в научно-исследовательских разработках и учебном процессе филиала федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске.

5. Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая и практическая значимость работы подтверждается тем, что разработанные математические и компьютерные модели, а также численные методы их реализации, рассмотренные автором на примере термической обработки фосфатного рудного дисперсного сырья, применимы к широкому классу нерудных полидисперсных материалов, которые подвергаются аналогичным процедурам термической обработки в химической, металлургической, пищевой и прочих отраслях промышленности. Также автором разработаны физические, математические, компьютерные модели и программное обеспечение, позволяющее повысить энергоэффективность технологического оборудования на стадии теплоподготовки. Научные результаты и выводы диссертации Орехова В. А. могут быть использованы при разработке и проектировании аппаратов термической подготовки полидисперсного сырья, стратегий и моделей повышения энергоэффективности производства предприятиями и организациями в целях снижения уровня потребления топливно-энергетических ресурсов при одновременном повышении качества готовой продукции; образовательными организациями при формировании учебных курсов по математическому моделированию СТМХП в различных отраслях промышленности.

6. Замечания и недостатки диссертации

По результатам изучения материала диссертации отмечаются следующие недостатки и замечания:

1. В тексте диссертации не описана подпрограмма «Интерполяция», с помощью которой, очевидно, производится интерполяция данных по теплопроводности и теплоёмкости. Какая интерполяция использовалась в подпрограмме (рис.3.5.1, с.124)?

2. При моделировании теплофизических свойств фосфоритов на странице 87 диссертантом заявлено, что решалась инверсная задача теплопроводности. На странице 89 диссертации (рис. 3.2.1) и на странице 90 (рис. 3.2.2) приведены полученные результаты решения данной задачи. Однако обратные задачи являются некорректными по Адамару, поэтому для их решения обычно применяют «регуляризующие» алгоритмы. Автору следовало бы подробнее пояснить, каким образом данное обстоятельство было учтено при реализации выбранных алгоритмов расчётов, результаты которых приведены на указанных рисунках.

3. В первой главе диссертации, на мой взгляд, недостаточно представлена информация о современных научных исследованиях в области моделирования процессов термической обработки железорудного сырья в обжиговых конвейерных и агломерационных машинах, проводимых такими исследователями уральской научной школы как В.В. Буткарёв и А.А. Брагин.

4. По тексту диссертации автор не всегда использует единицы измерения величин, соответствующие международной системе СИ, а именно, для значений температуры используются две шкалы: Кельвина и Цельсия, например рис. 2.1.1 и 2.1.2 на с. 49 и 50, соответственно. Кроме того, в качестве единицы измерения плотности на рис. 3.4.1, с. 116 используется единица г/см^3 , в таблице 4.1.1 используется единица измерения расхода воздуха $\text{м}^3/\text{мин}$.

Однако указанные замечания и недостатки не влияют на основные теоретические, а также прикладные результаты диссертации и не снижают общую положительную оценку проделанной Ореховым В.А. научной работы.

7. Заключение

Полученные автором научные и практические результаты достоверны, сформулированные выводы и заключения аргументированы. Диссертационная работа оформлена согласно требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата технических наук.

Содержание диссертационной работы соответствует формуле и пунктам области исследования Паспорта специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ – в первую очередь, пунктам: 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. Результаты

расчётов, полученные с помощью предложенных автором моделей, хорошо коррелируются с результатами натуральных измерений показателей СТМХП.

Автореферат даёт полное представление о выполненной диссертационной работе и содержит в сжатом виде необходимую информацию.

Оппонируемая диссертация является законченной научно-квалификационной работой, выполненной автором на высоком научном уровне. Представленные в работе оригинальные результаты исследований дают основание квалифицировать их как совокупность новых научно-обоснованных решений по созданию математических и компьютерных моделей СТМХП термической подготовки рудного фосфатного сырья, предлагают практическое применение созданных моделей, чем способствуют ускорению научно-технического прогресса. Полученные автором результаты исследования осуществляют значительный вклад в развитие предприятий химической, металлургической, горнообогатительной и др. отраслей промышленности с точки зрения повышения энергоресурсоэффективности энергоёмких производственно-технологических линий предприятий, функционирующих в указанных отраслях реального сектора экономики, что позволяет считать диссертацию соответствующей требованиям п.9 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. (в действующей редакции).

Опубликованные работы отражают основное содержание диссертации. Количество публикаций в рецензируемых изданиях, в которых излагаются основные научные результаты диссертации, соответствует нормативу, установленному в п.13 Положения.

В соответствии с требованиями раздела II Положения диссертация обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и выводы, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствует о личном вкладе Орехова В.А. в науку. Предложенные автором диссертации методы, модели и алгоритмы аргументированы и оценены относительно других известных решений.

Считаю, что диссертационная работа Орехова Владимира Александровича на тему «Моделирование сложного совмещённого тепломассообменно-химического процесса (на примере высокотемпературного обжига рудного фосфатного сырья)» отвечает всем критериям и требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, сформулированным в Положении и нормативных правовых документах Минобрнауки России, а сам Орехов Владимир Александрович заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент:

заведующий кафедрой «Оборудование и автоматизация химических производств» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», доктор технических наук, доцент

20.11.23 

Мошев Евгений Рудольфович

Почтовый адрес: 614990, Пермский край, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29


Телефон: 8 (342) 219-80-67. Электронный адрес: erm@pstu.ru

Шифр научной специальности, по которой защищена докторская диссертация:

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (химическая технология)

Подпись официального оппонента Мошева Евгения Рудольфовича д.т.н., доцента федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» заверяю, учёный секретарь Учёного совета Пермского национального исследовательского политехнического университета, кандидат исторических наук



 В.И. Макаревич
20.11.2023

Вход. № 05-4792
«04» 12 2023г.
подпись 