

На правах рукописи



Бобков Владимир Иванович

**Методическое и программно-
информационное обеспечение принятия
решений по оптимизации
энергоресурсоэффективности химико-
энерготехнологических систем
производства фосфоритовых окатышей**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена на кафедре Логистики и экономической информатики в Международном Институте Логистики Ресурсосбережения и Технологической Инноватики (НОЦ) ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева»

Научный консультант: академик РАН, заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор
Мешалкин Валерий Павлович
директор Международного института логистики ресурсосбережения и технологической инноватики (НОЦ), заведующий кафедрой Логистики и экономической информатики Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Лаптева Татьяна Владимировна
профессор кафедры "Системотехники" ФГБОУ ВО Казанского Национального Исследовательского Технологического Университета

доктор технических наук, профессор
Русинов Леон Абрамович
заведующий кафедрой Автоматизации процессов химической промышленности ФГБОУ ВО Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)

доктор технических наук, профессор
Лабутин Александр Николаевич
заведующий кафедрой «Технической кибернетики и автоматике (ТКиА)» ФГБОУ ВО Ивановского государственного химико-технологического университета

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Защита состоится 18 декабря 2018 года в 11:00 на заседании диссертационного совета Д 212.204.16 при РХТУ им. Д. И. Менделеева (125047 г. Москва, Миусская пл., д. 9) в конференц-зале (ауд. 443).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре РХТУ им. Д.И. Менделеева и на интернет-сайте: <http://diss.mustr.ru>

Автореферат диссертации разослан _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.204.16



Дударов С.П.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Проблема рационального использования сырьевых и топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) особенно важна для энергоемких промышленных производств, к которым относятся конвейерные обжиговые машины для производства фосфоритовых окатышей, представляющие собой сложные химико-энерготехнологические системы (ХЭС). Режимы функционирования ХЭС и завершенность протекающих в них взаимосвязанных химико-энерготехнологических процессов (ХЭТП) - сушки, прокали и спекания окатышей, обеспечивающих конечную прочность движущейся на конвейере плотной многослойной массы окатышей, определяют качество их термической обработки. Изменения физико-химического или гранулометрического состава исходного минерального фосфатного сырья, поступающего в ХЭС, требуют проведения дорогостоящих экспериментальных исследований по определению теплофизических и физико-химических свойств сырья, в соответствии с которыми необходимо осуществлять перенастройку параметров технологических режимов сложной ХЭС обжиговой конвейерной машины.

Выбор рациональных технологических схем и адаптация оптимальных технологических режимов ХЭС к периодически изменяющимся свойствам фосфатного сырья представляют собой сложную научно-техническую проблему, для решения которой необходимы дорогостоящие экспериментальные исследования, а иногда и не осуществимые из-за особенностей протекания ХЭТП во времени при больших температурах в химически активных средах. Наряду с этим существующие в настоящее время методики расчёта технологических режимов энергоресурсоэффективных ХЭТП термической подготовки фосфатного сырья являются эмпирическими. Оптимизация режимов обжига движущейся плотной многослойной массы фосфоритовых окатышей в сложной ХЭС позволит повысить энергоресурсоэффективность ХЭС в результате интенсификации и оптимизации тепло-массообменных процессов (ТМП) по минимуму затрат на электрическую и тепловую энергию.

На основании вышеизложенного проблема разработки методического и программно-информационного обеспечения системного анализа и процедур принятия решений по оптимизации энергоресурсоэффективности ХЭС производства фосфоритовых окатышей является актуальной научной проблемой, успешное решение которой обеспечит повышение энергоресурсоэффективности ХЭС и высокое качество готовых окатышей.

Степень научной разработанности темы исследования.

Различные проблемы повышения энергоэффективности сложных ХЭС и обеспечения энергоресурсосбережения в ХЭТП успешно решены в трудах как зарубежных ученых: Бергмана И., Фезера М., Хасби Д., Чоджой М.Х., Энрайта М., так и отечественных ученых: академиков РАН Лаверова Н.П., Львова Д.С., Макарова А.А., Леонтьева Л.И., Кузыка Б.Н., Мешалкина В.П., Никипелова А.Д. и Фаворского О.Н.; членов-корреспондентов РАН Гизазуллина Х.Н. и Данилова-Данильяна В.И.; профессоров Воротилова В.А., Гладкого Ю.Н., Гумерова А.А., Завадников В.О., Колосовского Н.Н., Кузнецова С.А., Ляпина С.Ю., Маркова В.Д., Орешина В.П., Пилипенко И.В., Пчелинцева О.С., Родионова И.А. и др.

В России в начале 2000-х годов по инициативе и при организационно-методическом руководстве академика РАН Саркисова П.Д. создано новое направление многоуровневой подготовки специалистов по энерго- и ресурсосберегающим процессам в промышленности, которое в настоящее время активно развивается научной школой академика РАН Мешалкина В.П., успешно выполняющей научные исследования по разработке методологии автоматизированного инжиниринга энергоре-

сурсосберегающих ХЭТС, методов оптимизации энергоресурсоэффективности ХЭТС, методов стратегического управления энергоресурсосбережением на предприятиях и в цепях поставок химического, металлургического и нефтегазохимического комплексов.

Различные организационно-управленческие и финансово-экономические проблемы управления энергосбережением в промышленности в последние годы рассмотрены в докторских диссертациях Богачковой Л.Ю., Дамбиева Ц.Ц., Кузьменко В.В., Курбатова В.Л., а также в кандидатских диссертациях, выполненных в МГУ имени М.В. Ломоносова, РХТУ имени Д.И. Менделеева, ИПУ имени В. А. Трапезникова РАН, НИУ МЭИ, ряде других НИИ РАН, а также университетов России.

Научными исследованиями по энергосбережению при термической подготовке окомкованного и дисперсного минерального сырья занимались такие российские учёные: академик РАН Мешалкин В.П., профессора Абзалов В.М., Бабошин В.М., Базилевич Т.Н., Борисова Л.И., Буткарёв А.П., Гальперина С.Я., Ершов В.А., Карабасов Ю.С., Лифсон М.И., Майзель Г.М., Пашков Н.Ф., Сулименко Е.И., Талхаев М.П., Юсфин Ю.С.; и зарубежные учёные: Fukuyo H., Joseph T.L., Kast W., Krischer O., Miyashita T., Sakamoto N., Tigerschiold M.J. и другие.

Существенный вклад в изучение теплофизических процессов агломерации и обжига окатышей внесли профессора: Бабушкин Н.М., Боковников Б.А., Братчиков С.Г., Буткарев А.П., Валавин В. С., Карабасов Ю.С., Китаев Б.И., Лобанов В.И., Майзель Г.М., Шкляр Ф.Р., Юсфин Ю.С., Ярошенко Ю.Г. и др. По термическому способу получения фосфора выполнено много научных исследований, накоплен большой экспериментальный материал по исследованию физико-химических процессов, технологических особенностей процессов агломерации, обжига кускового и окомкованного фосфоритового сырья.

К сожалению, решению проблемы повышения энергоресурсоэффективности ХЭТС производства фосфоритовых окатышей в настоящее время посвящено немного исследований. Энергоёмкие ХЭТП обжига фосфоритовых окатышей в этих ХЭТС сопровождаются повышенным количеством возврата и низкой прочностью некондиционных окатышей. Учитывая фактическое обеднение состава минерального сырья в России, проблема интенсификации, повышения производительности и показателей энергоресурсоэффективности ХЭТС имеет не только важное научно-техническое, но и большое организационно-экономическое значение.

Актуальность темы настоящей диссертационной работы также подтверждается соответствием основных разделов диссертации следующим нормативно-правовым документам:

- Национальная технологическая инициатива (НТИ), предложенная Президентом РФ В.В. Путиным в послании Федеральному собранию от 04 декабря 2014г.

- «Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации», утвержденная в Указе Президента РФ №642 от 01 декабря 2016г.

- Указ Президента РФ №889 от 04 июня 2008г. «О некоторых мерах по повышению энергетической и экологической эффективности Российской экономики».

- Указ Президента РФ, утверждённый от 7 июля 2011г. №899. Перечень приоритетных направлений: «пункт 8. Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика» и перечень критических технологий «13. Технологии информационных, управляющих, навигационных систем».

- Указ Президента РФ, подписанный 7 мая 2018г. «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года».

- План фундаментальных исследований РАН на период до 2025 года: «пункт 4. Информатика: разработка фундаментальных проблем искусственного ин-

теллекта, распознавание образов, оптимизации, проблемно-ориентированных систем и экспертных систем, основанных на знаниях».

Цель диссертационной работы: создание методического и программно-информационного обеспечения принятия решений по оптимизации энергоресурсоэффективности сложных многостадийных химико-энерготехнологических систем производства фосфоритовых окатышей, что позволит обеспечить выпуск высококачественных окатышей при минимальных затратах на топливно-энергетические ресурсы.

Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие **взаимосвязанные научно-технические задачи:**

1. Анализ потенциала повышения энергоресурсоэффективности сложной многостадийной ХЭТС производства фосфоритовых окатышей.

2. Системный анализ ХЭТП сушки фосфоритовых окатышей, разработка математической и компьютерной моделей распространения локализованного фронта испарения в одиночном окатыше в процессе сушки в ХЭТС конвейерной обжиговой машины.

3. Разработка многомасштабной математической модели ХЭТП сушки движущейся плотной многослойной массы фосфоритовых окатышей на конвейере ХЭТС.

4. Системный анализ, разработка математической и компьютерной моделей ХЭТП прокали и спекания в одиночном фосфоритовом окатыше.

5. Разработка многомасштабной математической модели ХЭТП прокали и спекания в движущейся на конвейере ХЭТС плотной многослойной массе фосфоритовых окатышей.

6. Содержательная и математическая постановки задачи оптимизации, разработка алгоритма оптимального управления энергоресурсоэффективностью ХЭТП сушки фосфоритовых окатышей.

7. Разработка многоуровневого алгоритма оптимального управления энергоресурсоэффективностью ХЭТП прокали и спекания фосфоритовых окатышей с использованием метода дискретного динамического программирования.

8. Разработка архитектуры, программно-информационного обеспечения и режимов функционирования автоматизированной системы поддержки принятия решений по оптимальному управлению энергоресурсоэффективностью ХЭТС производства окатышей.

9. Системный анализ структуры, аппаратурно-технических и технологических особенностей конвейерной обжиговой машины ОК-520/536Ф как сложной ХЭТС. Разработка научно-обоснованных инженерно-технологических рекомендаций по оптимизации режимов функционирования и аппаратно-технического оформления конвейерной машины ОК-520/536Ф.

Методы реализации поставленной цели и задач. Методы системного анализа (формализация, абстрагирование, декомпозиция иерархическое упорядочение); методы многомасштабного математического моделирования и динамического программирования; методы теории оптимального управления; методы условной оптимизации; методы вычислительной математики; методология модульного и объектно-ориентированного программирования; методология создания проблемно-ориентированных комплексов программ и информационных систем поддержки принятия решений.

Объект исследования. Конвейерная обжиговая машина производства фосфоритовых окатышей как сложная химико-энерготехнологическая система.

Предмет исследования. Технологическая структура, физико-химические и технологические режимы функционирования сложной ХЭТС; процедуры многомасштабного математического моделирования ХЭТП, входящих в состав ХЭТС; методи-

ки, алгоритмы и процедуры принятия решений по оптимизации режимов функционирования сложных ХЭТС для разработки научно-обоснованных технологических и инженерно-технических рекомендаций по повышению энергоресурсоэффективности действующих и проектируемых ХЭТС конвейерных обжиговых машин.

Научная новизна диссертационной работы.

1. На основе результатов системного анализа сложной многостадийной ХЭТС производства фосфоритовых окатышей, в которой осуществляется совокупность энергоёмких ХЭТП сушки, прокалки (или диссоциации карбонатов) и спекания окатышей, обеспечивающих их конечную прочность, обосновано, что при многомасштабном моделировании ХЭТП движущейся многослойной массы окатышей следует рассматривать три уровня явлений и процессов: 1-й уровень – ХЭТП в отдельном окатыше; 2-й уровень – ХЭТП вертикальной многослойной укладки окатышей; 3-й уровень – ХЭТП движущейся вертикальной многослойной укладки окатышей.

Системный анализ ХЭТС и ХЭТП позволил выявить потенциал повышения энергоресурсосбережения при эксплуатации ХЭТС, проведении ХЭТП и увеличить энергоресурсоэффективность ХЭТС в целом.

2. На основе результатов системного анализа физико-химического процесса дегидратации при сушке окатышей разработана математическая модель распространения локализованного фронта испарения в окатыше, отличающаяся учетом зависимости кинетики влагосодержания в окатыше как крупнопористом влажном теле, а также особенностей распространения локализованного фронта испарения от поверхности окатыша к центру, что позволяет интенсифицировать процесс нагревания для ускорения сушки окатышей при термической подготовке фосфатного сырья и контролировать фильтрующийся через высушенный слой окатыша поток паров воды, чтобы предотвратить разрушение окатышей.

3. Разработана многомасштабная математическая модель сложного многостадийного ХЭТП сушки движущейся плотной многослойной массы окатышей в ХЭТС обжиговой конвейерной машине, отличающаяся учетом эффекта перераспределения влаги по высоте движущейся многослойной массы окатышей, в результате которого в отдельных горизонтах-слоях массы наблюдается избыточная влажность окатышей, что позволяет автоматизировать процедуру принятия решений по выбору технологических режимов функционирования ХЭТС с целью предотвращения образования горизонтов переувлажнения, негативно сказывающегося на газопроницаемости слоя и вызывающее необоснованный рост энергопотребления при снижении производительности ХЭТС в целом.

4. Разработаны математические модели сложных многостадийных взаимозависимых ХЭТП прокалки и спекания окатышей в зоне высокотемпературного обжига ХЭТС обжиговой машины, отличающиеся учетом негативного процесса остеклования и последующего разрушения окатышей при нарушении температурного режима ХЭТП, что позволяет выявить и использовать потенциал повышения энергоресурсосбережения в производственных системах термической подготовки сырья горнообогатительных предприятий фосфорной и металлургической промышленности.

5. Разработаны многомасштабные математические модели сложных ХЭТП прокалки и спекания движущейся плотной многослойной массы окатышей, отличающиеся учетом физико-химических и гранулометрических свойств фосфатного сырья, что позволяет повысить энергоресурсоэффективность термической обработки окатышей в зоне высокотемпературного обжига ХЭТС.

6. Предложены алгоритм оптимального управления и методика проведения вычислительных экспериментов по оптимизации энергоресурсоэффективности ХЭТП сушки движущейся плотной многослойной массы окатышей, отличающиеся исполь-

зованием метода дискретного динамического программирования и процедур контроля эффекта перераспределения влаги по высоте многослойной засыпки окатышей, что позволяет предотвращать появление горизонтов переувлажнения, негативно влияющего на газопроницаемость массы окатышей и приводящую к необоснованному росту энергопотребления, снижению производительности ХЭТС в целом.

7. Созданы многоуровневый алгоритм оптимального управления энергоресурсоэффективностью многостадийных взаимозависимых ХЭТП прокалки и спекания, отличающиеся применением метода дискретного динамического программирования, что позволяет предотвращать негативный процесс остеклования окатышей и эндотермический режим ХЭТП при формировании затухающей тепловой волны, движущейся вглубь многослойной массы, и интенсифицировать ХЭТП прокалки и спекания.

8. Разработаны многоуровневые алгоритмы принятия решений по оптимальному управлению энергоресурсоэффективностью ХЭТС производства окатышей, отличающиеся учётом зависимости показателей качества готовых окатышей от характеристик фосфатного сырья (химический состав, гранулометрический, концентрация карбонатов, начальное влагосодержание, температура), а также влияния управляющих воздействий температуры и скорости подачи газа-теплоносителя в движущуюся массу окатышей, что позволяет использовать выявленный потенциал повышения энергоресурсосбережения для увеличения энергоресурсоэффективности ХЭТС.

9. Разработана методика обработки информации и принятия научно-обоснованных инженерно-технологических и аппаратно-технических решений по оптимизации технологических режимов и оптимальному управлению энергоресурсоэффективностью ХЭТС производства окатышей, отличающиеся использованием методологии системного подхода и процедур проведения вычислительных экспериментов, что позволяет определять энергоресурсоэффективные режимы функционирования и осуществлять мероприятия по повышению энергоресурсоэффективности ХЭТС.

10. Проведен системный анализ структуры и технических особенностей обжиговой конвейерной машины ОК-520/536Ф как сложной многостадийной ХЭТС. Разработаны архитектура и программно-информационное обеспечение поддержки принятия решений по оптимальному управлению энергоресурсоэффективностью ХЭТС, применение которой позволяет определять энергоресурсоэффективные режимы функционирования действующих обжиговых конвейерных машин при увеличении остаточного ресурса, а также предлагать научно-обоснованные рекомендации по интенсификации, модернизации и повышению производительности ХЭТС.

Практическая значимость диссертационной работы.

1. Разработаны алгоритмы оптимизации энергоресурсоэффективности режимов термической обработки окомкованного фосфатного сырья, применение которых позволяет получать высококачественные готовые окатыши, снижать долю возврата, экономить расходы тепловой и электрической энергии на проведение энергоёмких ХЭТП сушки, прокалки и спекания в сложной ХЭТС производства окатышей.

2. Разработаны архитектура и программное обеспечение автоматизированной системы оптимизации режимов функционирования ХЭТС обжиговых конвейерных машин, применение которой позволяет определять оптимальные энергоресурсоэффективные режимы функционирования действующих и проектируемых ХЭТС.

3. Разработаны научно-обоснованные инженерно-технологические рекомендации по оптимизации режимов функционирования и аппаратно-технического оформления ХЭТС обжиговой машины ОК-520/536Ф с учётом её технических и конструктивных особенностей, реализация которых позволяет оптимизировать энергоресурсоэффективность ХЭТС и повысить качество готовых окатышей.

4. Применение результатов научно-технических разработок и реализация предложенных на их основе научно-обоснованных рекомендаций по обеспечению оптимальной энергоресурсоэффективности ХЭТС производства жёлтого фосфора использованы в ТОО «Казфосфат» «Новоджамбульский фосфорный завод» (Республика Казахстан) позволило повысить качество выпускаемой продукции при существенном снижении удельной энергоемкости.

5. Практическое применение разработанных методик и алгоритмов в ОАО «Уральский институт металлов» позволило определять теплофизические и физико-химические свойства сырья, а также рассчитывать оптимальные параметры режимов работы ХЭТС обжиговых машин.

На основе использования полученных научно-технических результатов, выводов и разработанного программно-информационного обеспечения принятия решений по оптимизации энергоресурсоэффективности ХЭТС определён оптимальный режим функционирования обжиговой машины типа ОК, который позволяет сформировать в движущейся многослойной массе окатышей более мощную по сравнению с традиционным режимом устойчивую тепловую волну, глубже проникающую вглубь слоя, что обеспечивает оптимизацию параметров ХЭТП сушки, прокали и спекания окатышей. Научно-обоснованные значения оптимальных параметров технологических режимов ХЭТС обеспечивают оптимальную энергоресурсоэффективность и производительность при значительном улучшении качества готовых окатышей.

6. Полученные научно-обоснованные выводы и инженерно-технологические результаты могут быть использованы для определения оптимальных технологических режимов действующих ХЭТС обжиговых машин конвейерного типа для производства металлургических окатышей.

7. Полученные основные научные и практические результаты использованы при ежегодной актуализации учебных планов и основных образовательных программ для обучения на кафедре Логистики и экономической информатики магистров по направлению 18.04.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии» по магистерской программе «Энергоресурсоэффективные высоконадежные производства и цепи поставок нефтегазохимического комплекса», а также при обучении аспирантов по направлениям: 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации (химическая технология)», 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» и 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (химическая технология; нефтехимия и нефтепереработка; биотехнология)».

Научная значимость. Совокупность результатов научных исследований по системному анализу ХЭТС и разработке многомасштабных математических моделей ХЭТП, а также многоуровневых алгоритмов принятия решений по оптимизации энергоресурсоэффективности сложных ХЭТС вносит существенный вклад в развитие теоретических основ системного анализа, математического моделирования и оптимизации сложных химико-энерготехнологических систем производств химической, металлургической и нефтегазохимической промышленности.

На защиту выносятся следующие результаты теоретических исследований, имеющих научную и практическую значимость:

1. Результаты анализа особенностей инженерно-технологической структуры, специальных свойств и технологических режимов сложной ХЭТС производства окатышей, позволившие выявлять потенциал энергоресурсосбережения в ХЭТП сушки, прокали и спекания окатышей в движущейся плотной многослойной массе и повышать энергоресурсоэффективность ХЭТС.

2. Математическая модель распространения локализованного фронта испарения в фосфоритовом окатыше и многомасштабная математическая модель ХЭТП сушки движущейся плотной многослойной массы фосфоритовых окатышей.

3. Методика обработки информации и результаты при проведении неизотермических натуральных и вычислительных экспериментов ХЭТП прокали и спекания окатышей как объектов исследования и управления. Многомасштабная математическая модель ХЭТП прокали и спекания в движущейся массе окатышей.

4. Алгоритмы оптимального управления энергоресурсоэффективностью ХЭТП сушки, а также высокотемпературных ХЭТП прокали и спекания окатышей в ХЭТС.

5. Алгоритм принятия решений по оптимальному управлению энергоресурсоэффективностью ХЭТС производства окатышей.

6. Архитектура и режимы функционирования автоматизированной системы поддержки принятия решений по оптимальному управлению энергоресурсоэффективностью ХЭТС обжиговой конвейерной машины производства окатышей.

7. Научно-обоснованные инженерно-технологические и аппаратно-технические решения по повышению энергоресурсоэффективности функционирования ХЭТС производства окатышей.

8. Научно-обоснованные инженерно-технологические рекомендации по оптимизации режимов функционирования и модернизации аппаратно-технического оформления ХЭТС обжиговой машины ОК-520/536Ф.

Обоснованность научных результатов диссертационной работы базируется на использовании общепринятых апробированных научных положений, методологии системного подхода, научных методов экспериментальных исследований; применении методов системного анализа, методов динамического программирования, методов теории оптимального управления сложными системами с распределёнными параметрами; подтверждается согласованностью полученных новых научных результатов с известными теоретическими положениями.

Достоверность теоретических научно-исследовательских разработок, научных положений, выводов и научно-технологических рекомендаций подтверждается совпадением полученных результатов многочисленных вычислительных экспериментов с экспериментальными данными.

Результаты диссертационной работы не противоречат полученным ранее известным научно-техническим результатам других авторов в области методологии системного анализа и повышения энергоресурсоэффективности сложных ХЭТС.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались **на следующих международных научно-технических конференциях и совещаниях:** «Математические методы в технике и технологиях» (Саратов 2008, Санкт-Петербург 2017, 2018); «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов)» (Москва 2008, 2011); «Энергетика, информатика, инновации» (Смоленск 2011, 2016, 2017); «Современные вопросы науки и образования – XXI век» (Тамбов, 2012); «Теоретические и прикладные вопросы науки и образования» (Тамбов, 2016); «Технические науки – от теории к практике» (Новосибирск, 2016); «Научная дискуссия: вопросы технических наук» (Москва, 2016); «International Scientific Review of the Problems and Prospects of Modern Science and Education» (USA, Boston, 2016); «Тенденции развития науки и образования» (Смоленск, 2016); «Логистика и экономика ресурсоэнергосбережения в промышленности (Дивноморское 2016, Тула 2017); XX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии (Екатеринбург, 2016); Russian-Italian scientific business symposium «Energy and environment» (Moscow, 2018).

Соответствие паспорту специальности. В диссертационной работе решены научные задачи, соответствующие следующим пунктам области исследований специальности 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации (химическая технология)»:

П.2. «Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации управления принятия решений и обработки информации»;

П.3. «Разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработка информации»;

П.4 «Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации управления принятия решений и обработка информации»;

П.5 «Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработка информации»

Публикации. По теме диссертации опубликовано **69 печатных работ**, в том числе **12** публикаций в журналах, индексируемых в международных системах **WoS** и **Scopus**; **43** публикаций в журналах, рекомендованных **ВАК**; 1 монография.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы из 315 наименований и 3 приложений. Диссертация содержит 293 страницы, 91 рисунок и 34 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

ВВЕДЕНИЕ

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО СИСТЕМНОМУ АНАЛИЗУ И ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ СПОСОБАМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТИ ХИМИКО-ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

1.1 Аналитический обзор современных научных исследований по системному анализу и оптимизации сложных энерготехнологических объектов

1.2 Обжиговая конвейерная машина для производства фосфоритовых окатышей как сложная ХЭТС

1.3 Системный анализ потенциала повышения энергоресурсоэффективности ХЭТС производства окатышей

1.4 Энергоёмкие физико-химические процессы термической подготовки фосфатного сырья как объекты системного анализа

1.5 Выводы

ГЛАВА 2. МНОГОМАСШТАБНОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХИМИКО-ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СУШКИ ФОСФОРИТОВЫХ ОКАТЫШЕЙ

2.1 ХЭТП сушки окатышей как объект системного анализа и математического моделирования

2.2 Математическая модель распространения локализованного фронта испарения в окатыше

2.3 Математическая модель процесса сушки движущейся многослойной массы окатышей

2.4 Методика вычислительных экспериментов по проверке адекватности многомасштабной модели ХЭТП сушки движущейся многослойной массы окатышей

2.5 Выводы

ГЛАВА 3. МНОГОМАСШТАБНЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ХИМИКО-ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОКАЛКИ И СПЕКАНИЯ ФОСФОРИТОВЫХ ОКАТЫШЕЙ

3.1 Системный анализ химико-энерготехнологических процессов прокатки и спекания окатышей как объектов исследования и управления

3.2 Разработка методики системного подхода к обработке информации при экспериментальных исследованиях ХЭТП спекания и прокатки в одном окатыше

3.3 Многомасштабная математическая модель ХЭТП процессов прокатки и спекания в одном окатыше

3.4 Многомасштабная математическая модель ХЭТП спекания и прокатки в движущейся плотной многослойной массе окатышей

3.5 Разработка методики организации вычислительных экспериментов по проверке адекватности многомасштабных математических моделей ХЭТП спекания и прокатки

3.6 Выводы

ГЛАВА 4. АЛГОРИТМИЗАЦИЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ОПТИМАЛЬНОМУ УПРАВЛЕНИЮ ЭНЕРГОРЕСУРСООБЪЕКТИВНОСТЬЮ ХИМИКО-ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СУШКИ ФОСФОРИТОВЫХ ОКАТЫШЕЙ

4.1 Содержательная и математическая постановки задачи оптимального управления ХЭТП сушки

4.2 Разработка алгоритма принятия решений по оптимальному управлению энергоресурсоэффективностью ХЭТП сушки с использованием дискретного динамического программирования

4.3 Методика проведения вычислительных экспериментов по оптимальному управлению энергоресурсоэффективностью ХЭТП сушки

4.4 Выводы

ГЛАВА 5. МНОГОУРОВНЕВЫЕ АЛГОРИТМЫ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСООБЪЕКТИВНОСТЬЮ ХИМИКО-ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОКАЛКИ И СПЕКАНИЯ ФОСФОРИТОВЫХ ОКАТЫШЕЙ

5.1 Содержательная и математическая постановки задачи многоуровневого оптимального управления ХЭТП прокатки и спекания

5.2 Разработка многоуровневого алгоритма оптимального управления энергоресурсоэффективностью ХЭТП прокатки и спекания с использованием дискретного динамического программирования

5.3 Методика проведения вычислительных экспериментов по оптимальному управлению энергоресурсоэффективностью ХЭТП прокатки и спекания

5.4 Выводы

ГЛАВА 6. АЛГОРИТМЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ОПТИМАЛЬНОМУ УПРАВЛЕНИЮ ЭНЕРГОРЕСУРСООБЪЕКТИВНОСТЬЮ ХИМИКО-ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА ФОСФОРИТОВЫХ ОКАТЫШЕЙ

6.1 Содержательная и математическая постановки задачи оптимального управления ХЭТС производства окатышей

6.2 Разработка алгоритма принятия решений по оптимальному управлению ХЭТС

6.3 Разработка научно-обоснованных инженерно-технологических решений по оптимизации энергоресурсоэффективности ХЭТС

6.4 Разработка научно-обоснованных аппаратурно-технических решений по оптимальному управлению энергоресурсоэффективностью ХЭТС

6.5 Выводы

ГЛАВА 7. ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРАБОТАННЫХ АЛГОРИТМОВ И КОМПЛЕКСОВ ПРОГРАММ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГОРЕСУРСООБЪЕКТИВНОСТИ ХИМИКО-ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОБЖИГОВОЙ КОНВЕЙЕРНОЙ МАШИНЫ ОК-520/536Ф

7.1 Архитектура, программно-информационное обеспечение и режимы функционирования автоматизированной системы поддержки принятия решений по оптимальному управлению энергоресурсоэффективностью ХЭТС

7.2 Анализ структуры и свойств обжиговой машины ОК-520/536Ф как сложной ХЭТС

7.3 Расчёт требуемых оптимальных значений физико-химических параметров готовых окатышей при работе обжиговой машины ОК-520/536Ф

7.4 Разработка научно-обоснованных рекомендаций по оптимизации режима функционирования обжиговой машины ОК-520/536Ф

7.5 Разработка научно-обоснованных рекомендаций по модернизации аппаратно-технического оформления обжиговой машины ОК-520/536Ф

7.6 Выводы

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

СПИСОК ОСНОВНЫХ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

СПИСОК АББРЕВИАТУР

ГЛОССАРИЙ ОСНОВНЫХ ТЕРМИНОВ И ПОНЯТИЙ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Копии полученных свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Копии полученных патентов РФ

ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Справки о практическом использовании результатов диссертационной работы

3.1. Справка ТОО «Казфосфат» «Новоджамбульский фосфорный завод» (Республика Казахстан)

3.2. Справка ОАО «Уральский институт металлов» г. Екатеринбург

БЛАГОДАРНОСТИ

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована научная актуальность и практическая значимость многомасштабного моделирования и оптимизации как основных ХЭТП, так и в целом ХЭТС производства окатышей; изложена оценка потенциала энергоресурсосбережения в рассмотренной ХЭТС.

Сформулированы цель и научные задачи по повышению энергоресурсоэффективности ХЭТП обжига окатышей и ХЭТС производства фосфоритовых окатышей высокого качества.

В главе 1 «Современное состояние научных исследований по системному анализу и инженерно-технологическим способам обеспечения энергоресурсоэффективности ХЭТС» представлен аналитический обзор современных научных исследований по системному анализу и оптимизации сложных химико-энерготехнологических объектов. Исследованы основные химические и теплофизические свойства исходного сырья ХЭТС - фосфоритов в диапазонах температур обжига.

На основе использования методологии системного подхода рассмотрены структура и режимы функционирования сложной динамической многостадийной ХЭТС - конвейерной обжиговой машины для производства фосфоритовых окатышей, которая состоит из трёх основных ХЭТП: сушка; прокалка, или диссоциация карбонатов; спекание, обеспечивающее конечную прочность движущейся плотной много-

слоистой массы окатышей на конвейере. ХЭТП сушилки с учетом тепло-технологических особенностей обжиговой машины обеспечивает интенсивность процесса внутреннего влагопереноса в окатыше и снижает негативное влияние процессов переувлажнения отдельных слоев окатышей и газа-теплоносителя, что позволяет повышать энергоэффективность ХЭТС за счет интенсификации тепло-массообменных процессов многослойной сушилки. Взаимосвязанные и взаимозависимые ХЭТП прокали (диссоциации карбонатов), а также твердо- и жидкофазного спекания зёрен в окатыше определяют его конечную прочность. Удельный расход условного топлива на термическую подготовку фосфатного сырья составляет 0,31 т.у.т./т и 1,93 т.у.т./т. Системный анализ показывает, что энергоэффективность ХЭТП определяется возможностью управления физико-химическими превращениями, протекающими в окатышах при их термической подготовке и обработке с учетом интенсификации процессов тепло- и массообмена. В свою очередь, управление и оптимизация ХЭТП и тепло- и массообменных процессов (ТМП) зависит от степени изученности происходящих при этом физико-химических явлений.

Актуальность системного анализа этих сложных ТМП обусловлена недостаточно высокой энергоресурсоэффективностью ХЭТП для действующих ХЭТС производства окатышей. Обосновано, что проблема математического и компьютерного моделирования, а также поиска оптимальных энергоресурсоэффективных управляющих переменных ХЭТП и ТМП является сложной научно-технологической проблемой.

На рисунке 1 показано, что упрощенная процедура (алгоритм) многомасштабного моделирования и оптимизации ХЭТС производства фосфоритовых окатышей по критерию энергоресурсоэффективности с учетом сложной структурной схемы управления ХЭТС иерархически включает несколько уровней. Наличие различных уровней определяет следующие обстоятельства. Во-первых, формирование критерия энергоресурсоэффективности ХЭТС обжига фосфоритовых окатышей, предполагает учет таких показателей как: завершенность ХЭТП сушилки (среднее по высоте многослойной укладки влагосодержание окатышей на выходе зоны сушилки); завершенность ХЭТП прокали (средняя по высоте многослойной укладки степень реагирования при покидании высокотемпературной зоны обжига); завершенность ХЭТП спекания (требуемая прочность окатышей, средняя по высоте слоя прочность окатышей на выходе из высокотемпературной зоны обжига); минимум стоимости энергозатрат на проведение и завершение этих ХЭТП.

Такой системный подход позволит разработать методическое и программно-информационное обеспечение поддержки принятия решений по многоуровневой оптимизации энергоресурсоэффективности ХЭТС производства фосфоритовых окатышей.

В главе 2 «Многомасштабное математическое моделирование химико-энерготехнологического процесса сушилки фосфоритовых окатышей» представлены многомасштабные математические и компьютерные модели ХЭТП сушилки окатышей в движущейся плотной многослойной массе, отличающиеся учетом интенсивности процесса внутреннего влагопереноса в окатыше и процессов переувлажнения отдельных горизонтов в нагреваемом слое окатышей.

Проверена адекватность разработанной математической модели ХЭТП сушилки на основе сравнительного анализа результатов промышленных испытаний для ХЭТС с рассчитанными в многочисленных вычислительных экспериментах значениями влагосодержания и температуры окатышей, характеристик газа-теплоносителя, а также значений интенсивности влагопереноса в окатышах при сушке в движущемся плотном слое.

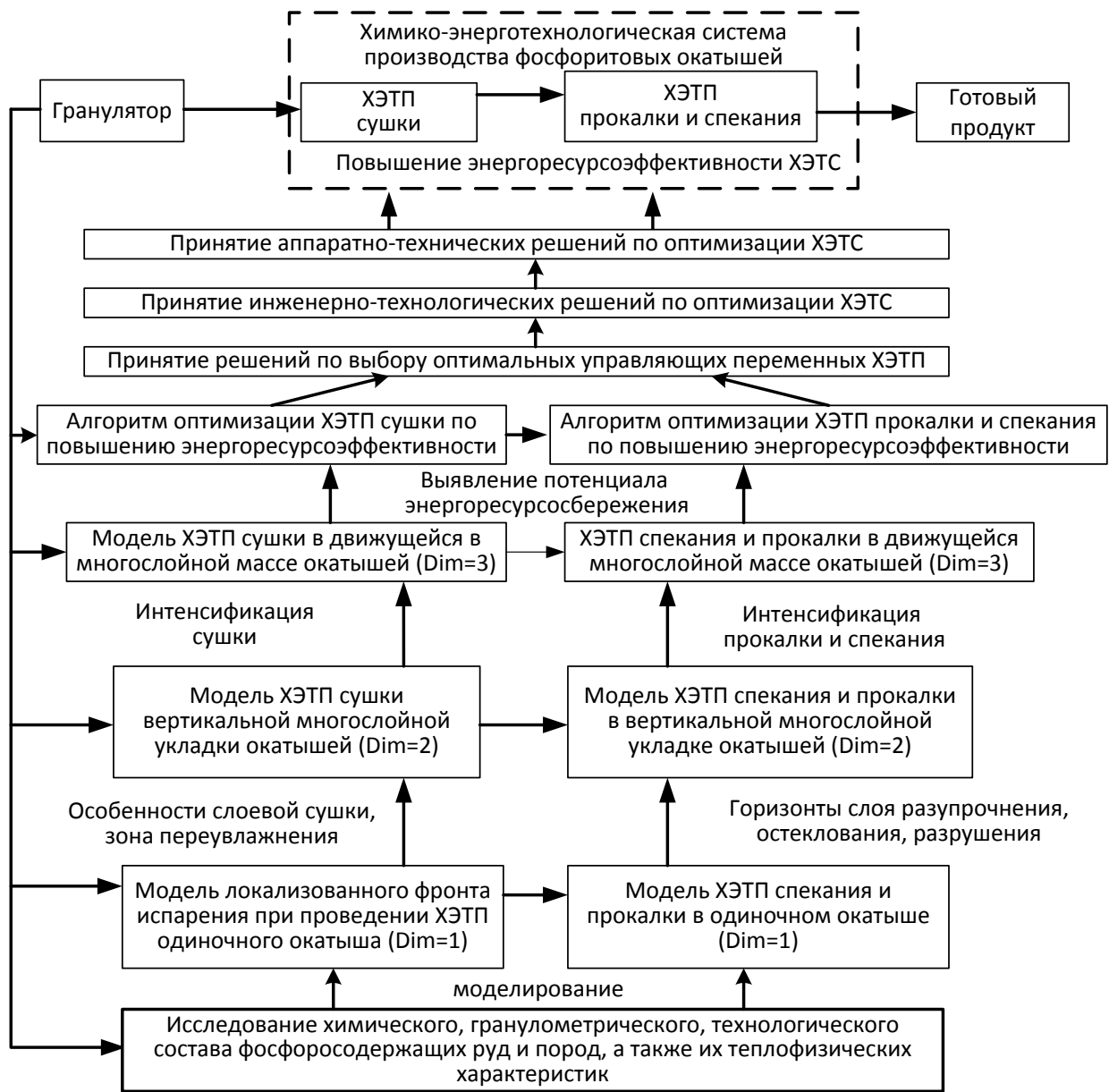


Рис. 1. Упрощённая блок-схема алгоритма многомасштабного моделирования и многоуровневой оптимизации ХЭТС производства фосфоритовых окатышей

Сложный ХЭТП сушки состоит из трёх взаимосвязанных стадий: сушка каждого отдельного окатыша, сушка вертикальной многослойной укладки окатышей и сушка движущейся плотной многослойной массы окатышей (см. рис. 2).

Процесс теплопереноса, осуществляемый теплопроводностью при наличии эндотермического эффекта поглощения тепла на фазовый переход при испарении влаги, описывается дифференциальным уравнением в частных производных (ДУЧП):

$$\rho_m c_m \frac{\partial T_m}{\partial \tau} = \frac{1}{x^2} \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda x^2 \frac{\partial T_m}{\partial x} \right) - q(\omega), \quad (1)$$

где: T_m – температура; ρ_m – плотность; c_m – удельная теплоемкость; x – координата радиуса окатыша; λ – коэффициент теплопроводности материала; τ – время; q – тепловой эффект процесса сушки (теплота фазового перехода при испарении влаги).

Конвективный теплоперенос в потоке газа-теплоносителя, при сушке вертикальной многослойной укладки окатышей, описывается уравнением:

$$\rho_g c_g W_g \frac{\partial T_g}{\partial y} = \alpha_v (T_g - T_m)_{x=x_s}, \quad (2)$$

где: T_g – температура; ρ_g – плотность; c_g – удельная теплоемкость; W_g – скорость газа-теплоносителя; y – координата по высоте слоя окатышей; $\alpha_v = \alpha_F f_{уд}$ – объемный коэффициент теплоотдачи в слое.

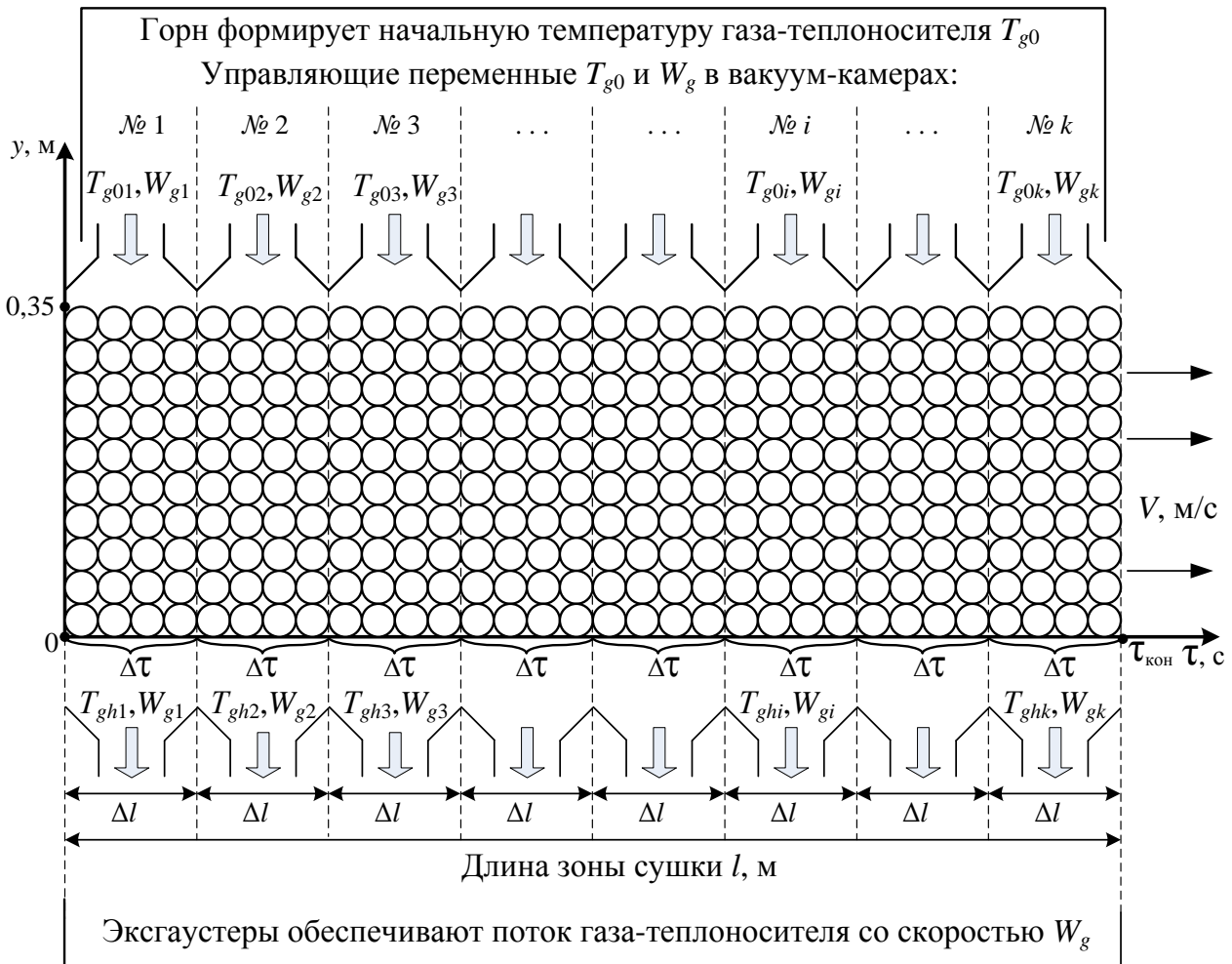


Рис. 2. Упрощённая схема многостадийного ХЭТП последовательного пребывания окатышей в локальных зонах сушки в вакуум-камерах конвейерной обжиговой машины

Давление в потоке газа меняется по глубине слоя и равно:

$$\frac{\partial P}{\partial y} = 1500 \frac{(1 - \epsilon_c)^2}{\epsilon_c^3} \cdot \frac{W_g \mu_g}{(2r)^2} + 17.5 \frac{(1 - \epsilon_c)}{\epsilon_c^3} \cdot \frac{\rho_g W_g^2}{2r}, \quad (3)$$

где: P – давление; ϵ_c – порозность слоя; r – радиус окатыша; μ_g – динамическая вязкость газа-теплоносителя.

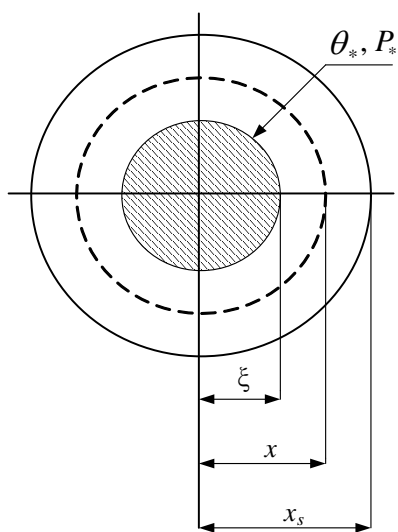
Математическая модель процесса массообмена влаги между окатышем и потоком газа-теплоносителя имеет вид:

$$\rho_g W_g \frac{\partial x_w}{\partial y} = \frac{\beta_w f_{уд} (P_{VR} - P_V)}{R_V T_g}, \quad (4)$$

$$\rho_m \frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{\beta_w f_{уд} (P_{VR} - P_V)}{R_V T_g}, \quad (5)$$

где: u – влагосодержание в окатыше; x_w – влагосодержание газа; P_{VR} – давление паров влаги на поверхности окатыша; P_V – давление паров влаги в газе; β_w – коэффициент массоотдачи; $f_{уд}$ – удельная поверхность окатышей в слое.

В состоянии насыщения парами влаги газа-теплоносителя осуществляется процесс конденсации влаги на поверхности окатыша, поэтому физическая модель локализованного фронта испарения наиболее целесообразна для крупнопористых влажных материалов - сырого окатыша при температурах газа в зоне сушки (см. рис. 3). По мере сушки углубляется локализованный фронт испарения влаги. К фронту испарения в окатыше теплота подводится за счет теплопроводности сухого материала, где



она расходуется на превращение жидкости в пар. В результате испарения внутри окатыша создается избыточное давление, под действием которого образовавшиеся пары фильтруются от фронта испарения к наружной поверхности. Скорость удаления влаги зависит от термического и фильтрационного сопротивления окатыша. Давление паров и температура на фронте испарения устанавливаются в процессе сушки и связаны между собой как параметры насыщенного пара.

Относительная степень высушивания сферического окатыша равна:

$$\omega = \frac{\partial \psi}{\partial \tau} = \frac{3\lambda(t_0 - \theta_*)\sqrt[3]{\psi}}{\rho_m u Q_s r^2 (\sqrt[3]{\psi} - 1)}, \quad (6)$$

Рис. 3. Физическая модель распространения локализованного фронта испарения в окатыше: ξ - радиус фронта испарения, x - координата радиуса окатыша

где: $\psi = (\xi/x_s)^3$, ξ - радиус фронта испарения описывается уравнением; Q_s - удельная теплота испарения; θ_* - температура мокрого термометра; t_0 - температура на границе окатыша $x = x_s$.

Для численного решения системы ДУЧП (1) ÷ (6) использован метод конечных разностей с числом разбиений по радиусу окатыша $N=20$, по высоте слоя $M=100$, по времени $K=100$. В результате применения метода конечных разностей получена информационно-разреженная система конечно-разностных уравнений, которая может быть приведена к упорядоченной ленточно-диагональной структуре и включает $2 \cdot 10^5$ уравнений, решение которой осуществлялось с помощью разработанной автором программы, реализованной в программной среде Borland C++.

Результаты автоматизированного расчета параметров ХЭТП сушки для ХЭТС машины ОК-3-520/536Ф по компьютерной модели на основе системы ДУЧП (1) ÷ (6) хорошо согласуются с регламентными показателями, машины с использованием метода наименьших квадратов (МНК), и качественно совпадают с многочисленными эмпирическими зависимостями. В результате вычислительных экспериментов определены основные параметры сушки: относительная степень высушивания, влагосодержание, интенсивность влагопереноса в окатыше и влагосодержание в движущейся многослойной массе окатышей представлены в виде различных параметрических семейств изолиний. Параметрическое семейство изолиний изменения относительной степени высушивания окатышей приведены на рис. 4.

Установлено, что в процессе многослойной сушки переувлажнение окатышей более 13-14% влечет к их размягчению, изменению формы, разрушению и, как следствие, ухудшению газопроницаемости слоя. На рис. 5 изображены изолинии влагосодержания окатышей в слое, из анализа которых следует, что в некоторых горизонтах слоя наблюдается и более сильное переувлажнение: на высоте 0,25 – 0,3м и на расстоянии 5 – 5,5м влажность окатышей составляет 20 – 25%.

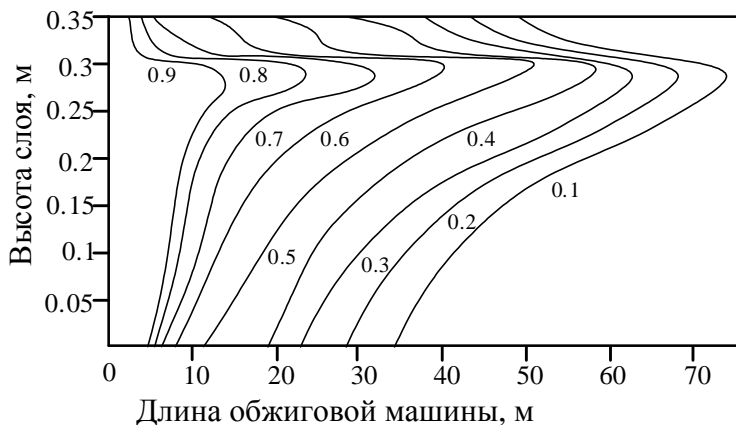


Рис. 4. Параметрическое семейство изолиний по относительной степени высушивания окатышей в слое $0 \leq \psi \leq 1$

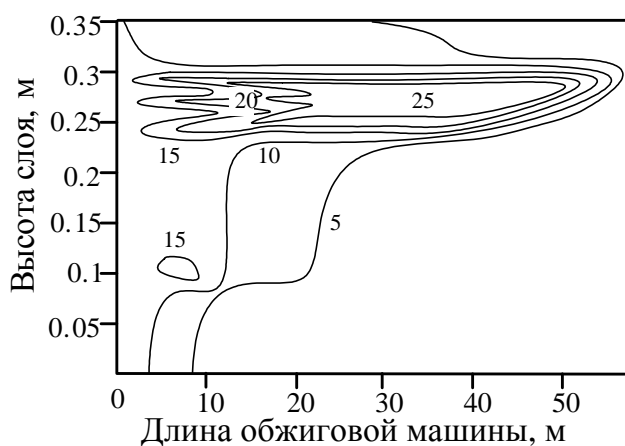


Рис. 5. Параметрическое семейство изолиний по влагосодержанию окатышей в слое u от 5 до 25, %

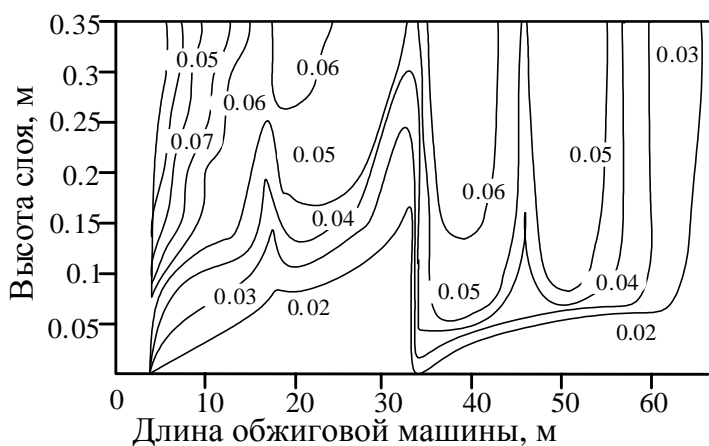


Рис. 6. Параметрическое семейство изолиний по влагосодержанию газа-теплоносителя в слое, от 0,013 до 0,07 кг/кг

температуры в окатыше и интенсивность влагопереноса.

В главе 3 «Многомасштабные математические модели химико-энерготехнологических процессов прокалки и спекания фосфоритовых окатышей» разработаны многомасштабные математические модели ХЭТП прокалки и спекания. Математическая и компьютерная модели многостадийного ХЭТП обжига окатышей, включающего процесс прокалки (реакцию диссоциации карбонатов) и про-

Выявлено, что наиболее интенсивно процесс увлажнения газа проходит при реверсе подачи газа-теплоносителя в слой, вследствие чего “сухой” газ-теплоноситель (0,013 кг/кг) входит сначала в менее высушенные и холодные горизонты слоя и, поглощая определенное количество влаги, проходит через уже нагретые участки слоя, где конденсация незначительна (см. рис. 6). Изолинии на рис. 6 показывают, что в отдельных областях слоя газ имеет влагосодержание – 0,04 – 0,07 кг/кг, что больше начального значения.

Таким образом, в результате многочисленных вычислительных экспериментов установлено, что при ХЭТП сушки движущейся многослойной массы окатышей (см. рис. 2) происходит перераспределение влаги по высоте слоя, в результате чего на отдельных участках слоя наблюдается их переувлажнение.

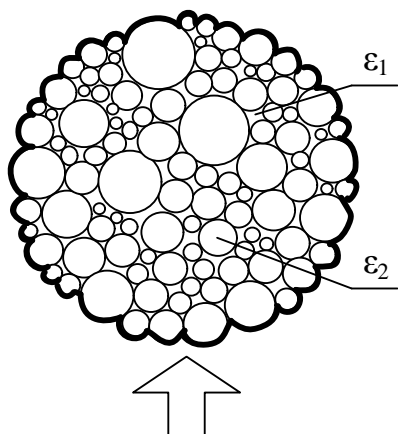
При сушке окатышей возможны два вида разрушений: трещинообразование и взрывообразное разрушение, или “шок”. Начало ХЭТП сушки, характеризующееся удалением капиллярной воды, особенно неблагоприятно и приводит к образованию трещин в окатыше, так как монолитность материала обеспечивается главным образом капиллярными силами. Так как «шок» в сфере окатыша наблюдается в конечный период сушки верхних слоев окатышей, то при выборе режима сушки необходимо учитывать скорость нагрева, градиент тем-

цесс спекания движущейся плотной многослойной массы окатышей в сложной ХЭТС (см. рис. 2). Проверена адекватность разработанных математических моделей; проведены вычислительные эксперименты по определению переменных технологического режима ХЭТП обжига при различных физико-химических характеристиках исходного сырья и газа-теплоносителя.

ХЭТП обжига движущейся массы окатышей – это сложный многостадийный ХЭТП, представляющий собой совокупность процессов диссоциации карбонатов, или прокалки, и спекания зерен в окатыше, которое обеспечивает конечную прочность образующихся окатышей. С позиций системного анализа ХЭТП обжига на микроуровне представляет собой совокупность процессов диссоциации карбонатов и спекания отдельных зерен в окатыше, а на макроуровне – совокупность процессов обжига окатышей в слоях и в движущейся многослойной массе окатышей.

Переменные технологического режима и завершенность сложного ХЭТП обжига определяет качество термической обработки окатышей. Изменение физико-химических свойств или гранулометрического состава поступающего в ХЭТС минерального сырья требует проведения дорогостоящих экспериментальных исследований для перенастройки параметров технологических режимов обжиговой машины.

На макроуровне ХЭТП обжига включает три взаимосвязанные стадии: обжиг



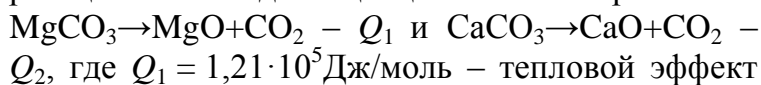
Поток газа-теплоносителя

Рис. 7. Обжигаемый фосфоритовый окатыш как совокупность зерен измельченной фосфоритовой руды

каждого отдельного окатыша, обжиг вертикальной многослойной укладки окатышей и обжиг движущейся плотной массы окатышей.

Окатыш состоит из совокупности отдельных зёрен измельченного сырья (см. рис. 7) и представляет собой тело с общей пористостью $\varepsilon = 1 - (1 - \varepsilon_1) \cdot (1 - \varepsilon_2)$, где ε_1 – внешняя пористость окатыша в целом, ε_2 – внутренняя пористость отдельных зерен. Эндотермическая реакция диссоциации карбонатов, протекающая на микроуровне внутри зёрен, увеличивает величину ε_2 , а процесс спекания на макроуровне уменьшает значения ε_1 и ε_2 .

Установлено, что теплоперенос в отдельном сферическом окатыше осуществляется теплопроводностью при наличии эндотермической реакции диссоциации карбонатов:



где $Q_1 = 1,21 \cdot 10^5$ Дж/моль – тепловой эффект реакции разложения MgCO_3 , $Q_2 = 1,78 \cdot 10^5$ Дж/моль – тепловой эффект реакции разложения CaCO_3 , который описывается неоднородным ДУЧП:

$$\rho_m c_m \frac{\partial T_m}{\partial \tau} = \frac{1}{x^2} \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda x^2 \frac{\partial T_m}{\partial x} \right) - \sum_i Q_i \omega_i, \quad (7)$$

где: T_m – температура, ρ_m – плотность, c_m – удельная теплоемкость материала, λ – коэффициент теплопроводности, x – координата радиуса окатыша, τ – время, Q_i – тепловой эффект, ω_i – скорость i -й реакции диссоциации.

Процесс теплопереноса в окатыше под воздействием потока газа-теплоносителя при обжиге вертикальной многослойной укладки окатышей осуществляется конвекцией по направлению движения потока и описывается уравнением (2). Скорость эндотермической реакции диссоциации карбонатов описывается уравнением:

$$\omega_i = \frac{\partial \eta_i}{\partial \tau} = k_{0i} (1 - \eta_i)^{n_i} \exp\left(\frac{-E_i}{RT_m}\right), \quad (8)$$

где: η_i – степень превращения в i – й реакции ($i = 1, 2$ – диссоциация CaCO_3 и MgCO_3), k_{0i} – коэффициент проницаемости i -й реакции, E_i – энергия активации i -й реакции, R – универсальная газовая постоянная.

Увеличение прочности окатыша за счет уменьшения его общей пористости ε в результате процесса спекания описывается эмпирическим уравнением:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} = -b\sigma, \quad (9)$$

где: σ – прочность окатыша, b – эмпирический коэффициент.

Уменьшение пористости ε_1 окатыша на макроуровне и пористости отдельных зерен, его составляющих, ε_2 на микроуровне обусловлено высокотемпературными процессами твердо- и жидкофазного спекания, т. е. физико-химическими процессами плотного соединения, склеивания твёрдых зёрен и заполнения пор внутри зёрен расплавом при нагревании. Скорость изменения значений пористостей $\varepsilon_{1,2}$ равна:

$$\omega_2 = \frac{\partial \varepsilon_{1,2}}{\partial \tau} = \frac{3\sigma_T \varepsilon_{1,2}}{2\mu_m (1 - \varepsilon_{1,2})^2 r_m}, \quad (10)$$

где: σ_T – коэффициент поверхностного натяжения, μ_m – вязкость материала окатыша, r_m – радиус спекаемых частиц в окатыше.

Увеличение пористости зерен ε_2 в окатыше, которое влечёт уменьшение их конечной прочности из-за образования трещин при релаксации напряжений в результате диссоциации карбонатов, равно:

$$\varepsilon_{2n} = \varepsilon_{2n-1} + \frac{D\sigma_0^2}{16E^* \gamma} \sum_{m=1}^n \left(1 - \sum_{i=1}^m v_i\right) - \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{4}, \quad (11)$$

где: $\sum_{i=1}^n v_i = \eta$ – степень превращения; D – диаметр кристаллических зерен, образованных в результате декарбонизации; γ – удельная поверхностная энергия; E^* – эффективный модуль Юнга.

При высоких температурах наблюдается негативный процесс оплавления (остеклования) окатыша с образованием стеклофазы, снижающий конечную прочность окатышей, скорость которого описывается уравнением:

$$\omega_3 = \frac{\partial g}{\partial \tau} = \frac{\alpha_F S (T_m - t)}{Q_L}, \quad (12)$$

где t – температура плавления (остеклования), S – площадь поверхности окатыша, Q_L – удельная теплота плавления, g – масса расплавившейся части окатыша.

Для численного решения системы нелинейных ДУЧП (7)÷(12) использован конечно-разностный метод. Получаемая из ДУЧП информационно-разреженная рекуррентная конечно-разностная система уравнений имеет упорядоченную ленточную трёх-диагональную информационную структуру и состоит из $3 \cdot 10^5$ уравнений, решение которой осуществлено с помощью компьютерной программы, разработанной в программной среде Borland C++.

Результаты компьютерного расчета режимных переменных ХЭТП обжига окатышей в машине ОК-3-520/536Ф хорошо согласуются по МНК с ее промышленными режимными параметрами.

Полученные в результате многочисленных вычислительных экспериментов параметрические семейства кривых изменений значений режимных переменных ХЭТП обжига изображены на рис.8–10. На рис.8 представлено параметрическое семейство кривых изменений важнейшей переменной ХЭТП обжига – средней температуры по радиусу окатышей T_m , соответствующей определенной высоте у движущейся массы окатышей и координате l нахождения вертикальной многослойной укладки окатышей по длине конвейера ХЭТС.

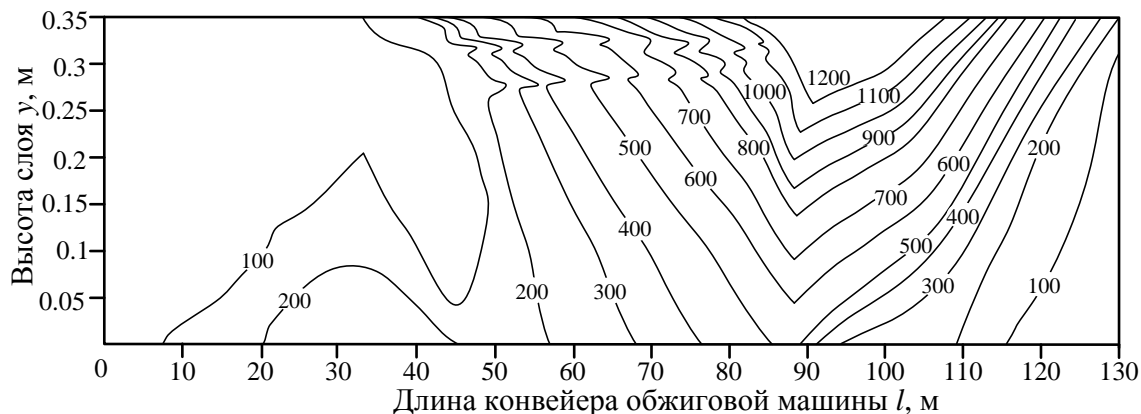


Рис. 8. Параметрическое семейство изолиний по температуре окатышей в слое $T_m, ^\circ\text{C}$

На рис. 9 изображено параметрическое семейство кривых для режимной переменной ХЭТП обжига – степени превращения диссоциации карбонатов η .

На рис. 10 представлено параметрическое семейство кривых для режимной переменной ХЭТП обжига – прочности окатышей σ .

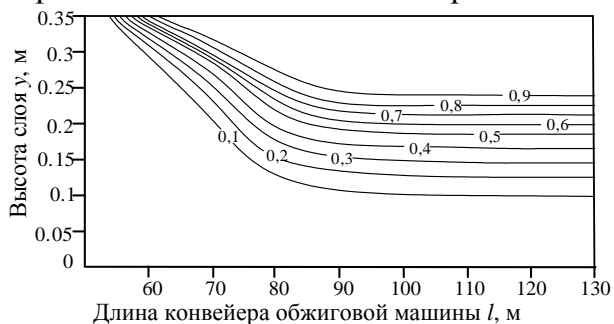


Рис. 9. Параметрическое семейство изолиний по степени реагирования в слое, $0 \leq \eta \leq 1$.

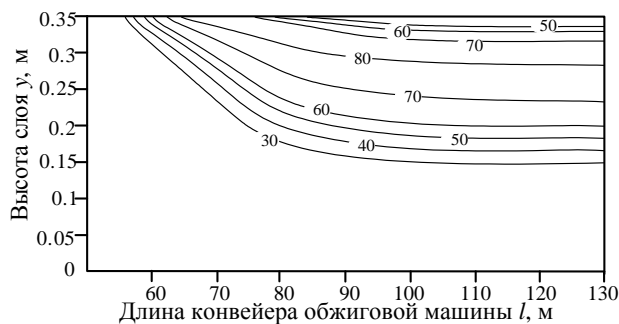


Рис. 10. Параметрическое семейство изолиний по прочности окатышей в слое σ , кг/ок

В главе 4 «Алгоритмизация принятия решений по оптимальному управлению энергоресурсоэффективностью химико-энерготехнологического процесса сушки фосфоритовых окатышей» разработан алгоритм оптимального управления энергоресурсоэффективностью ХЭТП сушки окатышей. Сформулированы содержательная и математическая постановки задачи оптимизации ХЭТП сушки движущейся плотной многослойной массы окатышей как задачи дискретного динамического программирования (ДДП). Критерием эффективности ХЭТП сушки является минимум затрат на электрическую и тепловую энергии. Рассчитаны оптимальные характеристики энергоэффективности ХЭТП сушки. Установлено, что в оптимальном режиме ХЭТП многослойной сушки окатышей отсутствует зона переувлажнения, интенсифицируются процессы тепло-влагопереноса при снижении расхода энергии и повышении качества готовых окатышей.

Различные свойства исходных сырых окатышей (влажность, прочность и гранулометрический состав) изменяют параметры технологического режима ХЭТП суш-

ки. В связи с этим определение оптимальных значений переменных ХЭТП сушки по минимуму энергозатрат имеет важное практическое значение.

При решении задачи оптимального управления ХЭТП сушки используется разработанная многомасштабная математическая модель ХЭТП сушки в виде системы ДУЧП (1) ÷ (6).

Энергоэффективность ХЭТП сушки определяется расходом электрической $Q_{эл}$ и тепловой $Q_{теп}$ энергий. Оптимальный технологический режим ХЭТП сушки - это режим, при котором для завершения ХЭТП сушки требуемое качество готового продукта (среднее по слою влагосодержание $\bar{u} = 0$) достигается при минимуме энергозатрат.

Математическая постановка задачи оптимизации технологического режима ХЭТП многостадийной сушки формулируется следующим образом. Необходимо найти такие значения координат вектора управляющих переменных – температуры T_{g0} газа-теплоносителя на входе в движущийся плотный слой окатышей и скорость W_g его подачи $X(T_{g0}; W_g)$, при которых энергозатраты электрической и тепловой энергии $Q_{эл}$ и $Q_{теп}$ имеют минимальное значение.

Технические особенности ХЭТС накладывают на значения вектора X управляющих переменных следующие ограничения: скорость $W_g \leq W_{gMAX}$ и температура $T_{g0}(\tau) \leq T_{gMAX}$ газа-теплоносителя на входе в слой; для значения вектора переменных состояния ХЭТП сушки $S(T_m, \partial T_m / \partial x, \partial T_m / \partial \tau, T_{gh}, u, I, \psi)$: температура газа-теплоносителя на выходе $T_{gh} \leq T_{ghMAX}$, скорость нагрева $\partial T_m / \partial \tau \leq \Delta_1 T_m^{MAX}$ и градиент $\partial T_m / \partial x \leq \Delta_2 T_m^{MAX}$ температуры в окатыше, влагосодержание $u \leq u_{MAX}$ и интенсивность влагопереноса $I \leq I_{MAX}$.

Изложена формализация задачи динамической оптимизации ХЭТП как задачи ДДП при дискретизации времени пребывания окатышей в зоне сушки ХЭТС - $\Delta\tau$ на k равных этапов, каждый из которых соответствует длине локальной вакуум-камеры Δl , для временных промежутков $\Delta\tau$.

Каждый вектор S_i последующего состояния переменных ХЭТП сушки определяется его предыдущим состоянием S_{i-1} и вектором управляющих переменных $X_i(T_{g0i}; W_{gi})$ в соответствии с системой ДУЧП (1) ÷ (6) – $S_i = \varphi_i(S_{i-1}; X_i)$, (см. рис. 11).

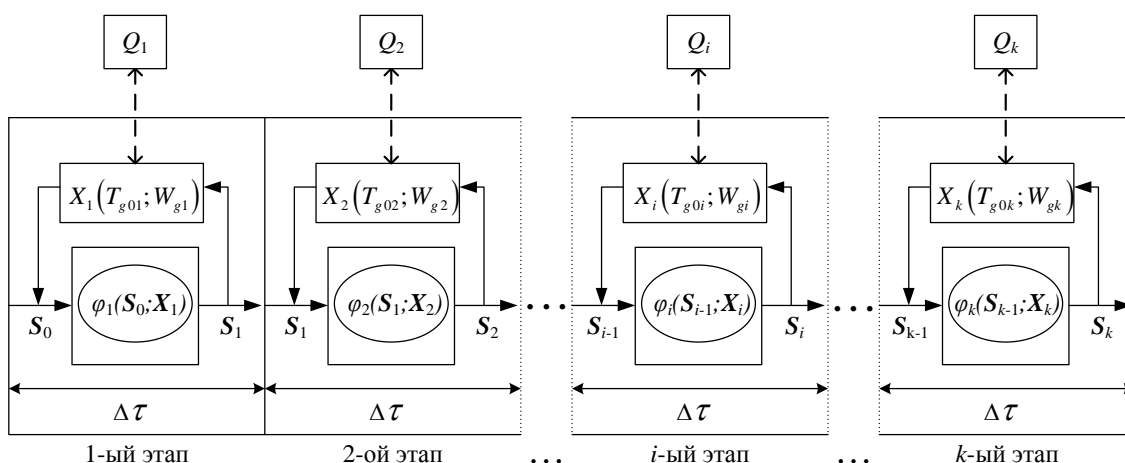


Рис. 11. Блок-схема постановки задачи динамической оптимизации многостадийного ХЭТП сушки как задачи дискретного динамического программирования

Частный критерий эффективности (КЭ) на каждом локальном этапе многостадийной сушки i – это F_i - функция переменных состояния ХЭТП сушки на предыдущем шаге $i-1$ и решения X_i , принятого на данном этапе

$F_i = F(X_i; S_{i-1}) = c_{\text{тэ}} \cdot Q_{\text{теп}}(T_{g0i}) + c_{\text{эз}} \cdot Q_{\text{эл}}(W_{gi})$, где $Q_{\text{теп}}$ - расход тепловой энергии, затраченной на нагрев потока газа-теплоносителя до температуры T_{g0i} , $Q_{\text{эл}}$ - расход электрической энергии, на движение потока газа-теплоносителя со скоростью W_{gi} в i -й вакуум-камере, $c_{\text{тэ}}$ и $c_{\text{эз}}$ - тарифы на тепловую и электрическую энергии.

Общий вид КЭ для всего многостадийного ХЭТП сушки F имеет вид:

$$\min_{X_i} F = \min_{X_i} \sum_{i=1}^k F_i(X_i; S_{i-1}), \quad (13)$$

где F_i частные критерии по всей зоне сушки ($i=1 \dots k$).

В соответствии с принципом Беллмана выражение для КЭ (13) можно записать через КЭ для k -го элемента декомпозиции:

$$\min_{X_i} F = \min \left\{ F_k(X_k; S_{k-1}) + \sum_{i=1}^{k-1} F_i(X_i; S_{i-1}) \right\}. \quad (14)$$

В выражении (14) величина первого слагаемого $F_k(X_k; S_{k-1})$ изменяется только за счёт одного дискретного оптимизирующего вектора на последнем k -м этапе $X_k(T_{g0k}, W_{gk})$, а величина второго слагаемого $\sum_{i=1}^{k-1} F_i(X_i; S_{i-1})$ - минимизируется при изменении управляющих переменных, или оптимизирующих векторов переменных $X_i(T_{g0i}, W_{gi})$, где $i=1, 2, \dots, k-1$.

Алгоритм поиска оптимального решения задачи ДДП состоит из процедур обратной и прямой прогонки. Обратная прогонка начинается с последнего k -го этапа многостадийного ХЭТП (см. рис. 11). На каждом i -м этапе значение частного КЭ – F_i представляет собой функцию двух переменных $F_i(T_{g0i}, W_{gi})$, для которой определяется оптимальное значение вектора управляющих переменных – $X_i^*(T_{g0i}^*, W_{gi}^*)$ методом деформируемого многогранника Нелдера-Мида.

Выполнение ограничений на управляющие, или оптимизирующие переменные – скорость $0 \leq W_{gi} \leq W_{gMAX}$ и температуру $0 \leq T_{g0i} \leq T_{gMAX}$ газа-теплоносителя на входе в слой окатышей достигается введением в функцию $F_i(T_{g0i}, W_{gi})$ специальных «барьерных» функций. Эти ограничения являются наиболее жесткими, так как они обеспечивают математически корректное и физически-реализуемое решение системы ДУЧП (1) ÷ (6).

Поиск минимума частных КЭ $F_i(T_{g0i}, W_{gi})$ при выполнении условий-ограничений на переменные состояния: $T_{ghi} \leq T_{ghMAX}$, $u \leq u_{MAX}$, $I \leq I_{MAX}$, $\partial T_m / \partial \tau \leq \Delta_1 T_m^{MAX}$, $\partial T_m / \partial x \leq \Delta_2 T_m^{MAX}$ осуществляют методом скользящего допуска, или методом штрафных функций, типа “квадрата срезки”.

Разработанный автором алгоритм оптимизации многостадийного ХЭТП сушки как задачи ДДП программно реализован в среде программирования Borland C++. Проведены многочисленные вычислительные эксперименты по определению оптимального режима ХЭТП сушки в ХЭТС конвейерной машине ОК-520/536Ф с 11 вакуум-камерами в локальных зонах сушки (см. рис. 2).

Для рассчитанного оптимального режима ХЭТП сушки значение скорости потока газа-теплоносителя W_{gi} на протяжении всего ХЭТП остается постоянной максимально возможной величиной $W_{gi}=1,3$ м/с. Оптимальные значения температуры газа-теплоносителя на входе в слой T_{g0} медленно возрастают при выполнении ограничений на скорость нагрева $\partial T_m / \partial \tau$, градиент температур $\partial T_m / \partial x$, u_{MAX} переувлажнение и I интенсивность влагопереноса в окатыше.

Анализ результатов вычислительных экспериментов показал, что в зоне сушки из движущейся многослойной массы окатышей основная часть влаги удаляется раньше, чем материал поступает в зону подогрева и обжига, а остаточная влага в окатышах не в состоянии разрушать окатыши даже при интенсивном, но допустимом нагреве. Реализация оптимального режима ХЭТП сушки в ХЭТС обеспечивает сокращение удельного расхода энергии на 8%.

В главе 5 «Многоуровневые алгоритмы оптимального управления энергоресурсоэффективностью химико-энерготехнологических процессов прокалки и спекания фосфоритовых окатышей» изложены многоуровневые алгоритмы оптимального управления энергоресурсоэффективностью ХЭТП прокалки и спекания. Предложены содержательная и математическая постановки задачи оптимального управления ХЭТП прокалки и спекания как задачи ДДП. Разработана методика проведения вычислительных экспериментов по оптимальному управлению энергоэффективностью этих ХЭТП.

В зоне подогрева ХЭТС начинается процесс диссоциации карбонатов, или прокалки, влияющий на прочность готовых окатышей. В высокотемпературной зоне обжига ХЭТС диссоциация протекает наиболее интенсивно и осуществляется процесс спекания, определяющий прочность готовых окатышей (см. рис. 2). Таким образом, сущность задачи оптимального управления ХЭТП прокалки и спекания состоит в определении технологического режима, при котором обеспечивается необходимая степень реагирования диссоциации карбонатов $\eta \rightarrow 1$ и спекание материала, обеспечивающее конечную прочность окатышей $\sigma \rightarrow \sigma_K$ при ограничениях на скорость нагрева и градиент температуры в окатышах.

Технологический режим термической обработки окатышей в зоне обжига определяется температурой теплоносителя на входе в слой T_{g0} и скоростью его подачи W_g . При решении рассматриваемой задачи оптимизации использована математическая модель тепломассообменных слоевых процессов – это система ДУЧП (7) ÷ (12) (см. гл. 3).

Для решения задачи оптимального управления использован метод ДДП, отличительной особенностью которого является хорошая алгоритмизируемость и возможность широкого использования универсальных комплексов программ.

Для изучения сущности ХЭТП прокалки и спекания в движущейся плотной многослойной массе окатышей рассмотрена подача газа-теплоносителя только с одной стороны (сверху). На конвейере ХЭТС проводится термическая обработка материала до тех пор, пока средняя по слою степень реагирования и требуемая прочность не будут достигнуты, т.е. $\bar{\eta} \leq 0.95$, $\bar{\sigma} \geq 125 \text{ кг/ок.}$

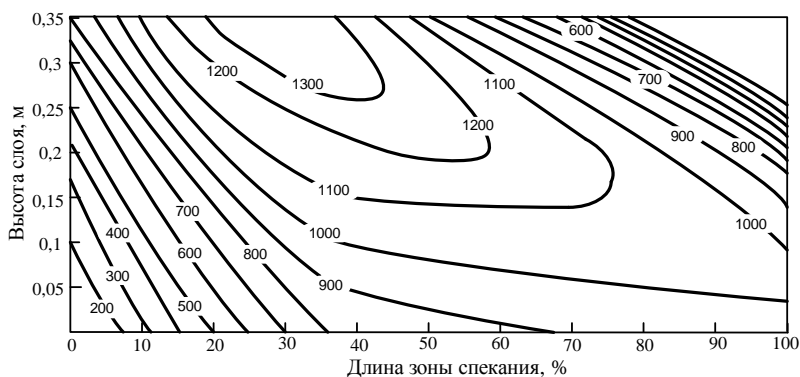


Рис. 12. Параметрическое семейство изолиний по температуре окатышей в слое T_m , °C

В результате решения задачи оптимизации определены параметры режима функционирования ХЭТС, который формирует затухающую (из-за теплопоглощения на эндотермические физико-химические превращения) тепловую волну (см. рис. 12), которая движется вглубь слоя, интенсифицируя процессы декарбонизации (см. рис. 13), спекания (см. рис. 14.), что

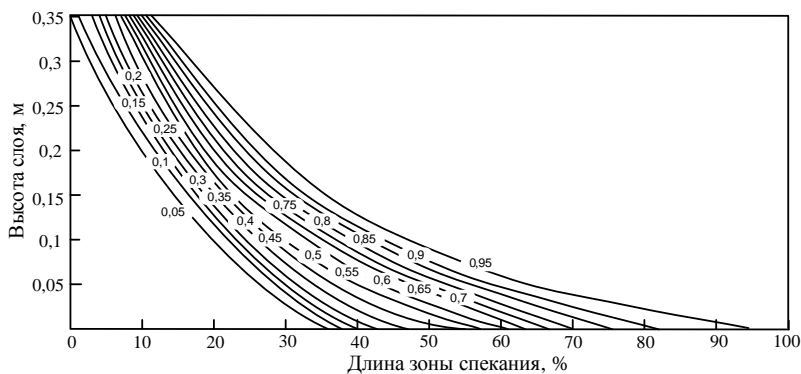


Рис. 13. Параметрическое семейство изолиний по степени реагирования в слое, $0 \leq \eta \leq 1$

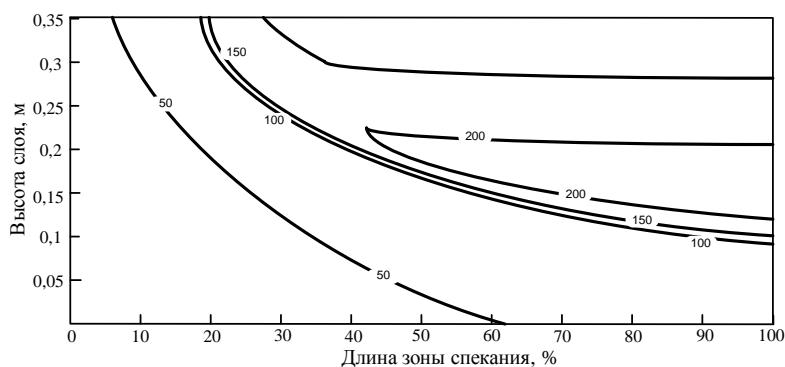


Рис. 14. Параметрическое семейство изолиний по прочности окатышей в слое σ , кг/ок

ерных машинах в условиях изменения химического и гранулометрического состава сырья.

В главе 6 «Алгоритмы принятия решений по оптимальному управлению энергоресурсоэффективностью химико-энерготехнологической системы производства фосфоритовых окатышей» описаны алгоритмы принятия решений по оптимальному управлению энергоресурсоэффективностью ХЭТС производства окатышей.

Используя предложенные автором многомасштабные математические модели ХЭТП сушки, прокатки и спекания (см. гл. 2 и гл. 3) с учётом результатов по оптимизации этих процессов (см. гл. 4 и гл. 5), разработан алгоритм принятия решений по оптимальному управлению энергоресурсоэффективностью ХЭТС в целом. Научно-обоснованные инженерно-технологические решения по оптимизации энергоресурсоэффективности ХЭТС позволили определить оптимальные режимы обжига окатышей, при которых температура газа-теплоносителя умеренно растёт, не допуская переувлажнения и разрушения окатышей, а скорость потока остается постоянной максимально-возможной. Лишь на тех участках конвейера ХЭТС, где происходит реверс подачи газа-теплоносителя в слой, скорость резко снижается. Это обусловлено тем, что поток газа-теплоносителя начинает поступать в более холодные слои окатышей, нагревая их и охлаждаясь. Будучи охлажденным, поток газа поступает в более горячие горизонты слоя, тем самым охлаждая их и, следовательно, замедляя проходящие в материале целевые ХЭТП. Снижение скорости теплоносителя позволяет уменьшить теплообмен между газом-теплоносителем и материалом окатышей, тем самым профиль температуры материала по высоте многослойной засыпки выравнивается более равномерно, существенно не снижая интенсивность термически активируемых ХЭТП происходящих в материале окатышей.

обеспечивает минимум энергозатрат и высокое качество готовых окатышей.

Реакция декарбонизации в целом по высоте слоя на выходе из зоны спекания закончена (см. рис. 13). Получение однородного прочного материала по высоте слоя окатышей на выходе из зоны спекания достичь не удаётся

(см. рис. 14). Это связано с тем, что наиболее интенсивно упрочнение слоёв происходит в достаточно узком промежутке температур.

Полученные научно-обоснованные результаты использованы при оптимизации технологических режимов ХЭТС обжига сырьевых материалов в плотном слое на обжиговых конвей-

Установлено формирование затухающей тепловой волны, которая интенсифицирует ХЭТП сушки (рис. 15 а) и прокалки (рис. 15 б). В результате этого явления уменьшаются расход энергии и доля возврата, увеличивается качество готового продукта – степень реагирования в среднем по слою на выходе составляет 0.775, а прочность окатышей увеличивается до 60.334кг/ок.

Проанализировав полученные экспериментально-расчетные результаты, можно сделать вывод, что в зоне ХЭТП сушки основная часть влаги удаляется раньше, чем материал приходит в зону подогрева и обжига, при этом остаточная влага не в состоянии разрушить окатыш даже при интенсивном, но допустимом нагреве.

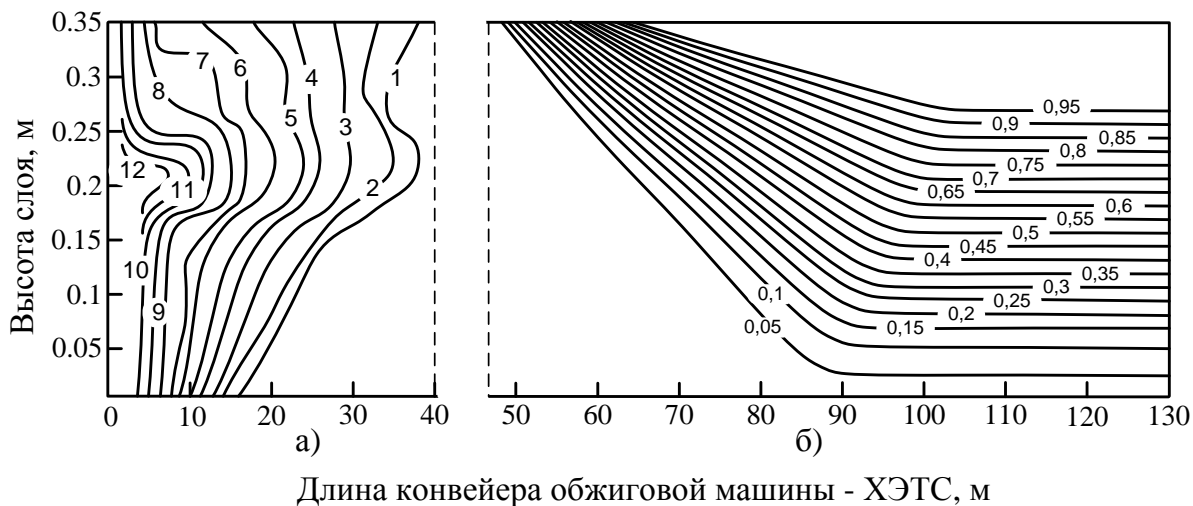


Рис. 15. Параметрическое семейство изолиний: а) - по влагосодержанию окатышей в слое u , %; б) - по степени реагирования реакции диссоциации карбонатов в материале окатышей в слое, $0 \leq \eta \leq 1$

Поэтому в целях энергосбережения процесс рекуперации тепла от верхних нагретых горизонтов слоя внутрь можно организовать раньше. По результатам вычислительных экспериментов установлено, что оптимальным энергоресурсоэффективным режимом, при увеличении качества готового продукта, является режим, при котором сужается зона интенсивного высокотемпературного нагрева и увеличивается зона рекуперации с умеренной температурой подачи газа-теплоносителя.

В главе 7 «Применение разработанных алгоритмов и комплексов программ принятия решений для оптимизации энергоресурсоэффективности химико-энерготехнологической системы обжиговой конвейерной машины ОК-520/536Ф» на основе полученных ранее научно-обоснованных выводов (см. гл. 6) и модернизации аппаратно-технического оформления ХЭТС обжиговой конвейерной машины ОК-520/536Ф, определены переменные технологического режима функционирования, при котором зона сушки и зона высокотемпературного обжига сужаются на 8 – 9%, что увеличивает зону рекуперации на 16 – 18% по сравнению с регламентным распределением зон в ХЭТС.

Расчитанные показатели технологического режима функционирования ХЭТС позволяют обеспечить формирование ярко выраженной тепловой волны, более мощной по сравнению с предложенным ранее (см. гл. 6) режимом. Сформированная тепловая волна глубже проникает вглубь слоя, обеспечивая эффективное проведение ХЭТП сушки, прокалки и спекания.

Несмотря на то, что указанный режим не приводит к снижению энергозатрат по сравнению с предыдущим, а качество готового продукта на выходе ХЭТС значительно повышается. Средняя по слою степень реагирования ХЭТП прокалки достигает 0.948, а прочность 72.032 кг/ок.

На рис. 16 представлено параметрическое семейство изолиний температуры T_m окатышей в многослойной массе на конвейере модернизированной ХЭТС обжиговой конвейерной машины в оптимальном технологическом режиме, по которым можно судить о формировании более мощной ярко выраженной тепловой волны, по сравнению с предложенным ранее режимом. Эта волна глубже проникает вглубь движущейся многослойной массы окатышей, обеспечивая интенсивное протекание и завершённость ХЭТП сушки (см. рис. 17, а), прокалки (см. рис. 17, б) и спекания, обеспечивающего конечную прочность.

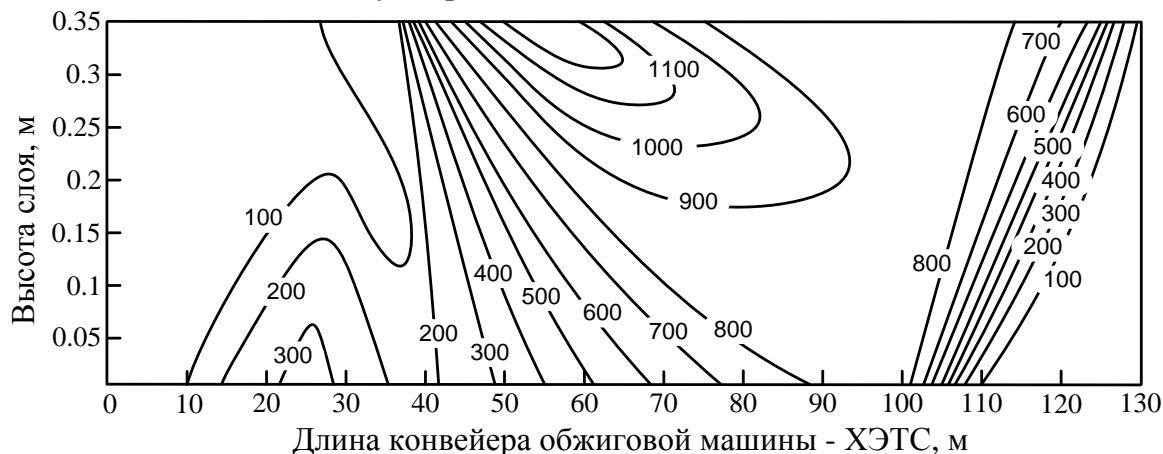


Рис. 16. Параметрическое семейство изолиний по температуре окатышей в

слое $T_m, ^\circ\text{C}$

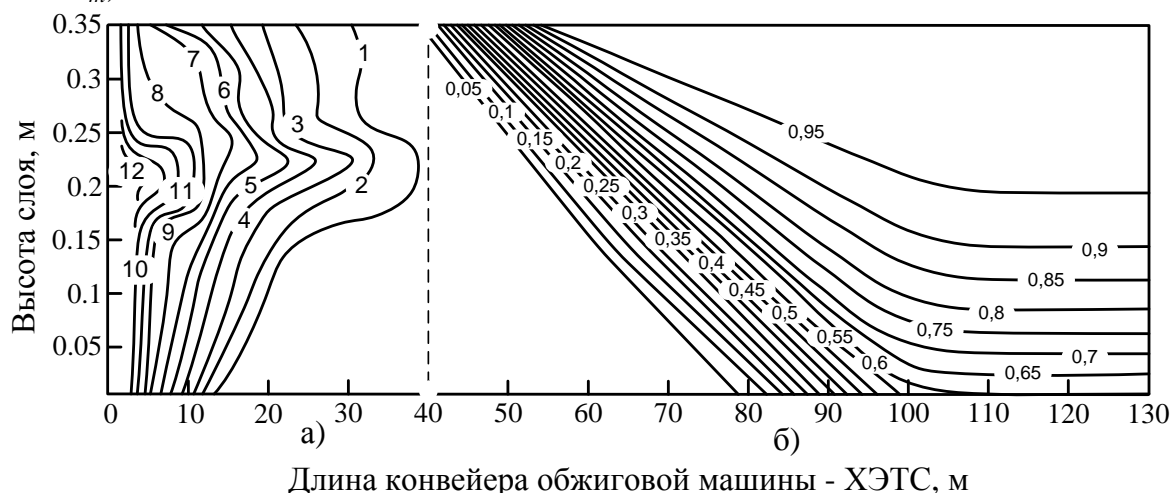


Рис. 17. Параметрическое семейство изолиний: а) - по влажосодержанию окатышей в слое $u, \%$; б) - по степени реагирования диссоциации карбонатов в материале окатышей в слое, $0 \leq \eta \leq 1$

Разработанные в диссертационной работе совокупность методов и алгоритмов повышения энергоресурсоэффективности в химико-энерготехнологических системах, а также реализующая их информационная система практически использовалась в 2011 – 2017 гг. в ТОО «Казфосфат» «Новоджамбульский фосфорный завод» (республика Казахстан) при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по повышению качества производимой продукции на основе желтого фосфора и услуг технологического инжиниринга. Применение предложенной в диссертационной работе комплексной многомасштабной математической модели ХЭТС термической подготовки фосфатного сырья позволило выявить потенциал ресурсоэнергосбережения указанного ХЭТП и выработать научно-обоснованные решения по его оптимизации. Практическая реализация данных решений для ХЭТС на основе обжиговой машины ОК-520/536Ф позволила снизить удельные затраты на теп-

ловую и электрическую энергию при производстве фосфоритовых окатышей на 9% по сравнению с используемым на предприятии способом управления ХЭТП.

Основные положения диссертации также практически используются в ОАО «Уральский институт металлов» для определения теплофизических и химико-физических свойств рудного сырья, а также оптимальных параметров функционирования проектируемых обжиговых машин.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ:

1. Системный анализ особенностей структуры и свойств сложной многостадийной ХЭТС производства фосфоритовых окатышей, позволил выявить потенциал энергоресурсосбережения в ХЭТП сушки, прокали и спекания окатышей в движущейся плотной многослойной массе и обеспечить повышение энергоресурсоэффективности ХЭТС.

2. Исследована сущность эндотермических физико-химических превращений в исходном фосфатном сырье, а также энергоёмких ХЭТП при высокотемпературном обжиге; разработана математическая модель распространения локализованного фронта испарения в окатыше, а также разработана многомасштабная математическая и компьютерная модели ХЭТП сушки движущейся плотной многослойной массы окатышей.

Предложена методика проведения вычислительных экспериментов по проверке адекватности многомасштабной модели ХЭТП сушки.

3. Разработаны методика проведения неизотермических натуральных и вычислительных экспериментов ХЭТП прокали и спекания окатышей как объектов анализа и управления, а также многомасштабная математическая и компьютерная модели ХЭТП прокали и спекания как в отдельном окатыше в диапазоне температур обжига, так и в движущейся массе окатышей на конвейере ХЭТС.

4. Разработаны алгоритм оптимального управления энергоресурсоэффективностью ХЭТП сушки окатышей, а также многоуровневый алгоритм оптимального управления высокотемпературными ХЭТП прокали и спекания окатышей.

Предложен алгоритм принятия решений по оптимальному энергоресурсоэффективному управлению функционированием ХЭТС производства окатышей

5. Разработана архитектура, специальное программно-информационное обеспечение и режимы функционирования автоматизированной системы поддержки принятия решений по оптимальному управлению энергоресурсоэффективностью ХЭТС производства окатышей.

6. Разработаны научно-обоснованные инженерно-технологические рекомендации по оптимизации режима функционирования ХЭТС и модернизации аппаратно-технического оформления машины ОК-520/536Ф, что позволило сократить удельный расход энергии на 1,1 т. у. т. при существенном повышении качества готовых окатышей и снижении доли возврата.

7. Результаты научно-технических разработок и реализация предложенных на их основе научно-обоснованных рекомендаций по обеспечению оптимальной энергоресурсоэффективности ХЭТС производства фосфоритовых окатышей практически использованы в ТОО «Казфосфат» «Новоджамбульский фосфорный завод» (Республика Казахстан), позволив повысить качество выпускаемой продукции при существенном снижении удельной энергоёмкости.

8. Практическое применение разработанных методик, алгоритмов, и комплексов программ в ОАО «Уральский институт металлов» позволили определять теплофизические и физико-химические свойства сырья, а также оптимальные параметры режимов работы ХЭТС обжиговых конвейерных машин.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Полученные результаты теоретических и научно-прикладных исследований взаимозависимых ХЭТП сушки, спекания и прокалки, а также функционирования ХЭТС в целом обеспечивают повышение энергоресурсоэффективности и оптимальное управление эксплуатацией сложных ХЭТС на основе использования современных методов системного анализа и обработки информации, теории принятия решений, методов математического моделирования, оптимизации и управления эксплуатацией сложными техническими системами.

2. На основе выполненных автором теоретических и прикладных исследований с корректным применением методологии системного анализа, методов теории оптимального управления, концепции интегрированной информационной среды для решения задач оптимизации и управления сложными ХЭТС разработаны новые методы, инструменты, вычислительно-эвристические алгоритмы оптимизации с использованием метода дискретного динамического программирования и проблемно-ориентированных процедур принятия решений, позволили развить, усовершенствовать и обобщить методы системного анализа и обработки информации при решении актуальных задач повышения энергоресурсоэффективности сложных ХЭТС производства окатышей.

3. На основании выше изложенных научно-практических результатов можно обоснованно утверждать, что поставленная цель, решённые задачи и содержание диссертационной работы полностью соответствуют паспорту научной специальности 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации», так как в диссертации развиты, разработаны, обоснованы и применены оригинальные методики и алгоритмы системного анализа и математического моделирования сложных ХЭТС; методы и алгоритмы оптимального управления, обработки информации и алгоритмы принятия решений по повышению энергоресурсоэффективности сложных ХЭТС обжига окатышей.

Основное содержание работы отражено в следующих публикациях:

Монографии

1. Мешалкин В.П., **Бобков В.И.**, Борисов В.В., Дли М.И. Модели управления энергоэффективностью сложных химико-теплотехнологических систем. – Смоленск: Универсум 2017. – 204с. ISBN 978-5-91412-363-2.

Статьи в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования WoS и SCOPUS

1. **Bobkov V.I.**, Borisov V.V., Dli M.I., Meshalkin V.P. Modeling the calcination of phosphorite pellets in a dense bed // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2015. V. 49. №2. P.176-182.

2. **Bobkov V.I.**, Borisov V.V., Dli M.I., Meshalkin V.P. Multicriterial optimization of the energy efficiency of the thermal preparation of raw materials // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2015. V. 49. №6. P.842-846.

3. **Bobkov V.I.**, Borisov V.V., Dli M.I., Meshalkin V.P. Intensive technologies for drying a lump material in a dense bed // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2017. T. 51. № 1. С. 70-75.

4. **Bobkov V.I.**, Borisov V.V., Dli M.I., Meshalkin V.P. Study of the Thermal Characteristics of Phosphate Raw Materials in the Annealing Temperature Range // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2017. V. 51. № 3. pp. 307-312.

5. Meshalkin V.P., **Bobkov V.I.**, Dli M.I., Khodchenko S.M. Computer-aided modeling of the chemical process of drying of a moving dense multilayer mass of phosphorite pellets // Doklady Chemistry. 2017. 475(2), pp. 188-191.

6. Panchenko S.V., Dli M.I., **Bobkov V.I.**, Panchenko D.S. Problems of analysis of thermalphysic processes in a reaction zone of electrothermal reactor // Non-ferrous Metals. 42(1), 2017, pp.36-42.

7. Panchenko S.V., Dli M.I., **Bobkov V.I.**, Panchenko D.S. Certain of the thermal physics problems of reducing processes in chemical electrothermal reactors // Non-ferrous Metals. 42(1), 2017, pp.43-48.

8. **Bobkov V.I.**, Dli M.I., Fedulov A.S. Chemical and technological thermally activated process research of roasting pellets in dense bed of conveyor indurating machine // 2017, Solid State Phenomena, 265 SSP, pp. 925-930.

9. Meshalkin V.P., **Bobkov V.I.**, Dli M.I., Khodchenko S.M. Computer modeling of the chemical-power engineering process of roasting of a moving multilayer mass of phosphorite pellets // Doklady Chemistry. 2017. Vol. 477(2), pp. 282-285.

10. Meshalkin V.P., **Bobkov V.I.**, Dli M.I., Khodchenko S.M. Optimizing the energy efficiency of the chemical and energy engineering process of drying of a moving dense multilayer mass of phosphorite pellets // Doklady Chemistry. 2017. Vol. 477(2), pp. 286-289.

11. **Bobkov V.I.**, Borisov V.V., Dli M.I., Meshalkin V.P. Thermally activated chemical technology processes of agglomeration of phosphorites // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2018. V. 52. № 1. pp. 35-41.

12. **Bobkov V.I.**, Fedulov A.S., Dli M.I., Meshalkin V.P. Studying the chemical and energy engineering process of the strengthening calcination of phosphorite pellets containing free carbon // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2018. Vol. 52. № 4. pp. 525-532.

Статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК

1. **Бобков В.И.** Исследование технологических и тепло-массообменных процессов в плотном слое дисперсного материала // Тепловые процессы в технике. 2014. № 3. С. 139-144.

2. **Бобков В.И.** Интенсификация процесса слоевой сушки дисперсного материала // Тепловые процессы в технике. 2014. № 9. С. 425-430.

3. **Бобков В.И.** Исследование технологических процессов в обжиговых машинах конвейерного типа // Электрометаллургия. 2015. №12. С.2-9.

4. **Бобков В.И.** Ресурсосбережение в электротермии при подготовке сырья на обжиговых машинах конвейерного типа // Электрометаллургия. 2015. №7. С. 26-34.

5. **Бобков В.И.**, Борисов В.В., Дли М.И., Мешалкин В.П. Моделирование процессов обжига фосфоритовых окатышей в плотном слое // Теоретические основы химической технологии. 2015, Т.49, №2, с. 182-188.

6. **Бобков В.И.**, Борисов В.В., Дли М.И., Мешалкин В.П. Многокритериальная оптимизация энергоэффективности технологических процессов термической подготовки сырья. Теоретические основы химической технологии. 2015, Т.49, №6, с. 665-670.

7. **Бобков В.И.**, Борисов В.В., Дли М.И., Федулов А.С. Особенности энергосбережения при термической подготовке сырья на основе оптимизации технологических процессов // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2015. № 22. С. 115-123.

8. **Бобков В.И.**, Кулага Н.Ф. Оптимальное управление термически активируемыми процессами подготовки дисперсного сырья в плотном слое // Научное обозрение. 2015. №17. С.113-120.

9. **Бобков В.И.** Оптимальное управление внутренним тепловым состоянием окомкованного материала // Научное обозрение. 2015. №22. С.213-216.

10. **Бобков В.И.** Проблема наискорейшего нагрева плотного слоя дисперсного материала // Научное обозрение. 2015. №24. С.143-147.
11. **Бобков В.И.** Энергосбережение в технологии сушки материала в плотном слое на основе интенсификации тепломассообмена // Современные наукоемкие технологии. 2015. № 12-4. С. 585-589.
12. **Бобков В.И.** Моделирование термически активируемых процессов обжига окомкованного сырья // Тепловые процессы в технике. 2016. №1. С. 42-47.
13. **Бобков В.И.** Энергосбережение при термической подготовке дисперсного сырья в плотном слое // Энергобезопасность и энергосбережение. 2016. №2. С. 16-20.
14. **Бобков В.И.** О проблеме переувлажнения сырых окатышей в зоне сушки обжиговой машины конвейерного типа // Электromеталлургия. 2016. №4. С. 20-27.
15. **Бобков В.И.** Энергосбережение при сушке окомкованного рудного материала в обжиговой машине конвейерного типа // Энергосбережение и водоподготовка. 2016. №3. С.58-64.
16. **Бобков В.И.** Моделирование технологических процессов при термической подготовке дисперсного фосфатного сырья // Химическая технология. 2016. №6. С. 263-271.
17. **Бобков В.И.** Моделирование кинетики сушки окомкованного сырья // Тепловые процессы в технике. 2016. №6. С. 272-277.
18. **Бобков В.И.**, Мищенко М.Н. Исследование теплофизических характеристик окомкованного фосфатного материала // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 7-1. С. 26-29.
19. **Бобков В.И.** Химико-технологические особенности фосфоросодержащих руд и пород // Успехи современной науки. 2016. №6. Том 1. С. 157 – 159.
20. **Бобков В.И.** Исследование процессов спекания фосфоритовых окатышей // Химическая промышленность сегодня. 2016. №8. С. 20 - 28.
21. **Бобков В.И.** Оптимальное управление нагревом фосфоритовых окатышей в плотном слое по критерию быстродействия // Успехи современной науки и образования. 2016. №8. Том 3. С. 9 – 12.
22. **Бобков В.И.** Энергосбережение в процессах спекания и прокалки при термической подготовке окатышей в плотном слое // Энергосбережение и водоподготовка. 2016. №5. С.56-62.
23. **Бобков В.И.** Исследование кинетических особенностей сушки окатышей // Электromеталлургия. 2016. №11. С. 23-30.
24. **Бобков В.И.** Оптимизация процесса сушки окатышей при их термической подготовке по критерию энергосбережения // Наукоемкие технологии. 2016. Т. 17. № 11. С. 33-37.
25. **Бобков В.И.** Особенности тепловых процессов при агломерации фосфатного сырья // Тепловые процессы в технике. 2017. № 1. С. 40-46.
26. **Бобков В.И.**, Кулага Н.Ф. Модели для описания свойств фосфатного сырья // Успехи современной науки и образования. 2017. Т.4. № 4. С. 73-77.
27. **Бобков В.И.** Оптимизация химико-технологической системы обжига окомкованного сырья в плотном слое // Автоматизация. Современные технологии. 2017. Т. 71. № 4. С. 157-162.
28. **Бобков В.И.**, Борисов В.В., Дли М.И., Мешалкин В.П. Интенсивные технологии сушки кускового материала в плотном слое // Теоретические основы химической технологии. 2017. Т. 51. № 1. С. 72-77.
29. **Бобков В.И.**, Борисов В.В., Дли М.И., Мешалкин В.П. Исследование тепловых характеристик фосфатного сырья в диапазоне температур обжига // Теоретические основы химической технологии. 2017. Т. 51. № 3. С. 295-300.

30. Мешалкин В.П., **Бобков В.И.**, Дли М.И., Ходченко С.М. Компьютерное моделирование химико-технологического процесса сушки движущейся плотной многослойной массы фосфоритовых окатышей // Доклады Академии наук. 2017. Т. 475. № 4. С. 410-414.
31. **Бобков В.И.**, Мищенко М.Н. Электропроводность и dilatометрические характеристики фосфоритов // Успехи современной радиоэлектроники. 2017. № 7. С. 61-65.
32. **Бобков В.И.** Моделирование химико-технологических термически активируемых процессов обжига фосфоритовых окатышей в плотном слое конвейерной обжиговой машины // Химическая промышленность сегодня. 2017. № 2. С. 50-56.
33. **Бобков В.И.** Определение параметров кинетического уравнения гетерогенной реакции при наличии градиентов температур в исследуемых образцах // Химическая промышленность. 2017. Т. 64. №3. С.136-142.
34. **Бобков В.И.** Исследование процессов упрочнения и разрушения фосфоритовых окатышей при высокотемпературном обжиге // Химическая технология. 2017. № 9. С. 418-425.
35. Мешалкин В.П., **Бобков В.И.**, Дли М.И., Ходченко С.М. Компьютерное моделирование химико-энерготехнологического процесса обжига движущейся многослойной массы фосфоритовых окатышей // Доклады Академии наук. 2017. Т. 477. № 5. С. 559-562.
36. Мешалкин В.П., **Бобков В.И.**, Дли М.И., Ходченко С.М. Оптимизация энергоэффективности химико-энерготехнологического процесса сушки движущейся плотной многослойной массы фосфоритовых окатышей // Доклады Академии наук. 2017. Т. 477. № 6. С. 667-671.
37. **Бобков В. И.**, Борисов В. В., Дли М. И. Подход к исследованию теплопроводности нечеткими численными методами в условиях неопределенности теплофизических характеристик // Системы управления, связи и безопасности. 2017. №3. С. 73-83.
38. **Бобков В.И.**, Борисов В.В., Дли М.И., Мешалкин В.П. Исследование термически активируемых химико-технологических процессов агломерации фосфоритов // Теоретические основы химической технологии. 2018. Т. 52. №1. С. 38-44.
39. **Бобков В. И.** Оптимизация тепло-технологического процесса сушки движущейся плотной многослойной массы фосфоритовых окатышей по критерию энергоресурсоэффективности // Системы управления, связи и безопасности. 2018. №2. С. 56-68.
40. **Бобков В.И.** Оптимизация химико-технологического процесса сушки в стационарном режиме многослойной массы фосфоритовых окатышей по критерию энергоресурсоэффективности // Современные наукоёмкие технологии. 2018. №5. с. 25-29.
41. **Бобков В.И.**, Дли М.И. Математические модели тепловых процессов при агломерации и их численная реализация // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2018. № 44 (70). С. 106-112.
42. **Бобков В.И.**, Федулов А.С., Дли М.И., Мешалкин В.П. Исследование химико-энерготехнологического процесса упрочняющего обжига фосфоритовых окатышей, содержащих свободный углерод // Теоретические основы химической технологии. 2018. Т. 52. № 4. с. 423-430.
43. **Бобков В.И.**, Борисов В.В., Дли М.И., Мешалкин В.П. Многокомпонентная нечеткая модель оценки энергоэффективности химико-энерготехнологических

процессов сушки многослойной массы фосфоритовых окатышей // Теоретические основы химической технологии. 2018. Т. 52. № 5. с. 504–518.

Статьи в рецензируемых научных журналах, сборниках научных трудов, материалы международных, всероссийских, межрегиональных конференций и симпозиумов

1. **Бобков В.И.** Математическое моделирование спекания фосфоритовых окатышей при термической обработке // Математические методы в технике и технологиях: Сб. тр. XXI Межд. науч.-тех. конф. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2008, Т5, С.332-335.

2. **Бобков В.И.** Энергосбережение и интенсификация процесса сушки кускового материала в плотном слое // Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) СЭТТ-2008: Сб. тр. III Межд. науч.-тех. конф. М.: МГУПБ, 2008, Т1, С.180-185.

3. **Бобков В.И.** Энерго- и ресурсосберегающая сушка окомкованного сырья на обжиговых машинах конвейерного типа // Современные энергосберегающие технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) СЭТТ-2011: IV Межд. науч.-тех. конф. М.: ФГОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет им .В.П. Горячкина», 2011, Т2, С.299 – 304.

4. **Бобков В.И.** Энерго- и ресурсосберегающие технологии на основе интенсификации тепломассообмена в реагирующем плотном слое // Энергетика, информатика, инновации: Сб. тр. Межд. науч.-тех. конф. Смоленск: Универсум, 2011, с.191-195.

5. **Бобков В.И.** Моделирование процессов в реагирующем плотном слое окомкованного сырья при термической обработке // Новый университет. Серия: Технические науки. 2012. №1(7). С.13-18.

6. **Бобков В.И.** Интенсификация процесса сушки в обжиговых машинах конвейерного типа // Современные вопросы науки и образования – XXI век: Сб. тр. Межд. науч.-тех. конф. Тамбов: ТРОО «Бизнес-Наука-Общество», 2012. С. 29-30.

7. **Бобков В.И.** Оптимальное управление технологическими процессами в плотном слое окомкованного сырья при термической обработке // Новый университет. Серия: Технические науки. 2013. №1(11). С.20-27.

8. **Бобков В. И.** Моделирование процесса сушки окомкованного сырья в плотном слое // Энергетика, информатика, инновации: Сб. тр. Межд. науч.-тех. конф. Смоленск: Универсум, 2012, Т.1. с.91-95.

9. **Бобков В. И.** Особенности кинетических закономерностей термических превращений в фосфоритах // Технические науки - от теории к практике: Сб. тр. LXI Межд. науч.-тех. конф. Новосибирск: АНС «СибАК», 2016, № 8(56), С. 140-143.

10. **Бобков В. И.** Физико-химические процессы, протекающие в фосфоритах при нагреве // Научная дискуссия: вопросы технических наук: Сб. тр. XLVIII-XLIX Межд. науч.-тех. конф. М.: Интернаука, 2016, № 7-8 (37). С. 67 - 71.

11. **Бобков В.И.** Специальные методы кинетического анализа топохимических реакций // Международное научное обозрение проблем и перспектив современной науки и образования: Сб. тр. XX Межд. науч.-тех. конф. Boston: Проблемы науки, № 12 (22), С. 19-21.

12. **Бобков В.И.** Использование топлива и факторы, влияющие на его эффективность, при термической подготовке фосфоритовых окатышей // Тенденции развития науки и образования: Сб. тр. Межд. науч.-тех. конф. Смоленск: Универсум, 2016. С. 9 – 11.

13. **Бобков В.И.** Кинетический анализ топохимических реакций при нагреве фосфорита // Научный альманах. 2016. № 7-1 (21). С. 359-363.

14. **Бобков В.И.** Результаты исследований кинетики термической декарбонизации кускового и окомкованного фосфатного сырья // Логистика и экономика ресурсоэнергосбережения в промышленности: Сб. тр. X Межд. науч.-тех. конф. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2016, С.220-224.

15. Мешалкин В.П., **Бобков В.И.** Ресурсосберегающие энергоэффективные технологии обработки фосфатного сырья // XX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии: Екатеринбург: УРОРАН, 2016, С. 299.

16. Бобков В.И. Равномерный нагрев плотного слоя окатышей посредством формирования тепловых волн // Энергетика, информатика, инновации: Сб. тр. VI Межд. науч.-тех. конф. Смоленск: Универсум, 2016, Т3, С.220-224.

17. **Бобков В.И.** Исследование кинетики термической диссоциации карбонатов в фосфатном сырье при обжиге // Математические методы в технике и технологиях: Сб. тр. XXX Межд. науч.-тех. конф. Санкт-Петербург: Политехн. ун-т, 2017, Т 7. С. 68-71.

18. Дли М.И., **Бобков В.И.** Математические модели для оценки коэффициента теплопроводности фосфоритов в диапазоне температур обжига // Математические методы в технике и технологиях: Сб. тр. XXX Межд. науч.-тех. конф. Санкт-Петербург: Политехн. ун-т, 2017, Т10, С. 56-60.

19. **Бобков В.И.** Особенности теплотехнологической схемы производства фосфоритовых окатышей // Энергетика, информатика, инновации: Сб. тр. VII Межд. науч.-тех. конф. Смоленск: Универсум, 2017, Т1, С.42-46.

20. Мешалкин В.П., **Бобков В.И.** Свойства веществ, используемых в теплотехнологических аппаратах производства фосфора // Логистика и экономика ресурсоэнергосбережения в промышленности: Сб. тр. XI Межд. науч.-тех. конф. Тула: Сарат. гос. техн. ун-т, 2017, С. 205-208.

21. Дли М.И., **Бобков В.И.** Моделирование теплофизических свойств газообразных теплоносителей в химико-энерготехнологической системе производства фосфора // Логистика и экономика ресурсоэнергосбережения в промышленности: Сб. тр. XI Межд. науч.-тех. конф. Тула: Сарат. гос. техн. ун-т, 2017, С. 209-212.

22. **Бобков В.И.** Особенности энергоэффективности технологической схемы термической подготовки фосфатного сырья // Логистика и экономика ресурсоэнергосбережения в промышленности: Сб. тр. XI Межд. науч.-тех. конф. Тула: Сарат. гос. техн. ун-т, 2017. С. 213-216.

23. **Бобков В.И.**, Дли М.И. Анализ режимов зажигания агломерационного слоя фосфатного сырья // Математические методы в технике и технологиях: Сб. тр. XXXI Межд. науч. конф. Санкт-Петербург: Политехн. ун-т, 2018. Т1. С. 85-88.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

1. **Бобков В.И.**, Мешалкин В.П., Филиппов Д.Л. Программа для расчёта неоднородного дифференциального уравнения теплопроводности для фосфоритового окатыша. №2017616974 от 21 июня 2017г.

2. **Бобков В.И.**, Мешалкин В.П., Филиппов Д.Л. Программа для расчёта теплоотдачи турбулентного потока газа-теплоносителя на границе сферического фосфоритового окатыша. №2017618204 от 25 июля 2017г.

Патенты

1. Жбанова В.Л., Мешалкин В.П., Дли М.И., **Бобков В.И.** Матричный фотоприемник. Патент на полезную модель №175334 от 30 ноября 2017г.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает глубокую благодарность своему научному наставнику и учителю, научному консультанту по диссертационной работе – академику РАН, заслуженному деятелю науки РФ, директору Международного Института Логистики

Ресурсосбережения и Технологической Инноватики (НОЦ) РХТУ имени Д.И. Менделеева **Валерию Павловичу Мешалкину** за неустанное внимание, всестороннюю помощь, ценные научно-методические советы и рекомендации.

Автор благодарит сотрудников кафедры Логистики и экономической информатики и Международного Института Логистики Ресурсосбережения и Технологической Инноватики (НОЦ) РХТУ имени Д.И. Менделеева за организационную поддержку и методические рекомендации.

Автор выражает признательность сотрудникам филиала ФГБОУ ВО «Национального исследовательского университета «МЭИ»: профессору, д.т.н. **Панченко Сергею Васильевичу** за привитую со студенческих лет любовь к научно-техническим исследованиям; профессору, д.т.н., заместителю директора по НИР **Дли Максиму Иосифовичу** за научно-методическую поддержку и организационную помощь.

Автор благодарит сотрудников ТОО «Казфосфат», «Новоджамбульский фосфорный завод» (республика Казахстан) и ОАО «Уральский институт металлов», а также и лично академика РАН, лауреата Государственных премий СССР и РФ, премии правительства РФ в области науки и техники, премии РАН им. И.П. Бардина, Заслуженного изобретателя РСФСР **Леонида Андреевича Смирнова** за внимание и проявленный интерес к научным исследованиям автора, за подробное обсуждение практических результатов работы и ценные научно-методические советы.