

Отзыв официального оппонента

Лаптевой Татьяны Владимировны на диссертацию Бобкова Владимира Ивановича «Методическое и программно-информационное обеспечение принятия решений по оптимизации энергоресурсоэффективности химико-энерготехнологических систем производства фосфоритовых окатышей»,
представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (химическая технология)

Актуальность диссертационного исследования.

При реализации перспективных научно-технологических направлений развития России особо важное значение приобретают научно-практические исследования, направленные на повышение эффективности и интенсификация технологий наиболее энерго- и ресурсоемких отраслей промышленности. К таким отраслям можно отнести: горно-обогатительную, цветную и черную металлургию, химическую, в том числе фосфорную индустрию.

Основные процессы подготовки и переработки исходного минерального сырья – сушка, диссоциация карбонатов, спекание, обеспечивающее конечную прочность продукта, являются чрезвычайно энергоёмкими процессами. Условия протекания и завершение этих химико-энерготехнологических процессов (далее – ХЭТП) определяют качество конечного сырья – фосфоритовых окатышей.

Интенсификация ХЭТП в обжиговых конвейерных машинах зависит от множества организационно-технических факторов. Поэтому разработка энергоресурсоэффективных обжиговых конвейерных машины, выбор рациональных технологических схем и их адаптация к периодически меняющимся свойствам исходного минерального сырья на практике связаны со значительными трудностями, обусловленными физико-химическими, технологическими и организационно-управленческими причинами.

Большинство существующих методик расчета параметров процессов термической подготовки исходного сырья, учитывающих его специфические особенности и свойства с достаточной полнотой, предполагают проведение большого количества натуральных экспериментов. Эти исследования являются весьма затратными, а в ряде случаев трудно реализуемыми из-за конструктивных особенностей обжиговых конвейерных машинах и высоких температур в химически активных средах. Следует также учитывать существующие изменения химического и/или гранулометрического состава сырья от партии к партии, которые обуславливают необходимость проведения новых натуральных экспериментальных исследований и адаптацию к полученным результатам конструктивных и управляющих параметров агрегатов ХЭТС.

С учетом вышеизложенного, исследование режимов функционирования химико-энерготехнологических систем (далее – ХЭТС), термической обработки минерального сырья с применением аппарата математического и компьютерного моделирования является одним из наиболее перспективных направлений системного анализа таких ХЭТС с целью управления и обеспечения высокой энергоресурсоэффективности протекающих химико-энерготехнологических процессов.

Известны работы российских ученых по определению оптимальных температур обработки дисперсного сырья, обеспечивающих дегидратацию и декарбонизацию; температур размягчения и плавления сырьевых материалов и их влияние на газодинамику плотного слоя; влияния термической обработки на структуру и механическую прочность кускового и окомкованного сырья. Однако должного внимания не уделено вопросам оптимизации физико-химических и технологических режимов функционирования сложной ХЭТС производства окатышей; формализации процедуры многомасштабного математического моделирования ХЭТП, происходящих в ХЭТС, с учетом иерархической структуры и взаимосвязи протекающих процессов. Это позволит обеспечить выработку научно-обоснованных технологических и инженерно-технических рекомендаций по повышению энергоресурсоэффективности действующих и проектируемых энергоёмких ХЭТС производства фосфоритовых окатышей.

В связи с этим, несомненно актуальна и имеет важное теоретическое и экономическое значение сформулированная и решаемая научная проблема исследования – создания методического и программно-информационного обеспечения принятия решений по оптимизации энергоресурсоэффективности сложных многостадийных химико-энерготехнологических систем производства фосфоритовых окатышей, для обеспечения выпуска высококачественных окатышей при минимальных затратах на топливно-энергетические ресурсы.

Краткий анализ основного содержания диссертационной работы

Представленная автором диссертационная работа изложена на 293 страницах, и состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы, включающего 315 наименований, 3 приложений. Работа содержит 91 рисунок и 34 таблицы.

Во **введении** (стр. 10-23) автор обосновал актуальность темы исследования, четко сформулировал цель и вытекающие из нее основные задачи исследования; формулирует положения, выносимые на защиту. Во введении показаны научная новизна и практическая значимость результатов диссертационной работы; приведены сведения об апробации работы.

В **первой главе** (стр. 24-61) выполнен анализ современного состояния научных исследований по системному анализу и инженерно-технологическим способам обеспечения энергоресурсоэффективности химико-энерготехнологических систем. Приведён аналитический обзор современных научных исследований по системному анализу и оптимизации сложных энерготехнологических объектов, обоснован выбор объекта исследования – обжиговой конвейерной машины для производства фосфоритовых окатышей. Методами системного анализа подтвержден потенциал повышения энергоресурсоэффективности рассматриваемой ХЭТС производства окатышей. Рассмотрены энергоёмкие термически активируемые ХЭТП обжига фосфатного сырья как объекты системного анализа.

В выводах первой главы автором намечены направления теоретических и практических исследований диссертационной работы.

Во **второй главе** (стр. 62-79) разработана оригинальная многомасштабная математическая модель ХЭТП сушки фосфоритовых окатышей как объекта системного анализа. Математическая модель имеет иерархическую структуру и

представляет совокупность математических моделей распространения локализованного фронта испарения в одиночном окатыше, процесса сушки вертикальной многослойной укладки окатышей, процесса сушки движущейся плотной многослойной массы окатышей. В заключительном пункте главы автор на основе вычислительных экспериментов проводит анализ режимов сушки движущейся многослойной массы окатышей, определяет наиболее значимые для ведения процесса параметры.

В третьей главе (стр. 80-151) автор проводит анализ используемого минерального сырья для получения фосфоритовых окатышей и влияние его состава на протекающие процессы и качество продукта. Проведён системный анализ взаимосвязанных ХЭТП прокали и спекания фосфоритовых окатышей как объектов исследования и управления. Для экспериментальных исследований ХЭТП прокали и спекания разработана методика системного подхода к обработке больших массивов информации.

Далее автором разработана оригинальная многомасштабная математическая модель высокотемпературных ХЭТП прокали и спекания фосфоритовых окатышей. Математическая модель представляет собой иерархическую совокупность математических моделей для отдельного окатыша, для многослойной вертикальной укладки окатышей и для движущейся плотной многослойной массы окатышей. Для представленных математических моделей подтверждена их адекватность результатам промышленных экспериментов в высокотемпературной зоне ХЭТС.

В четвертой главе (стр. 152-177) автор формализует задачу оптимального управления режимом ХЭТП сушки фосфоритовых окатышей и проводит обоснованную декомпозицию задачи согласно декомпозиции ХЭТС обжиговой машины на зоны, соответствующие ее отдельным вакуум камерам. Для решения поставленной задачи автор разрабатывает вычислительно-эвристический алгоритм принятия решений на основе дискретного метода динамического программирования. В предложенном вычислительно-эвристическом алгоритме используются предложенные авторами эвристические процедуры и правила для итерационного формирования векторного критерия энергоэффективности ХЭТП сушки с учетом как детерминированных ограничений, так и эвристически уточняемых при компьютерном моделировании специальных штрафных функций, а также логическая схема применения и интерпретации указанных специальных функций для корректного выполнения динамически изменяющихся требуемых условий ХЭТП сушки.

Далее в главе автором представлена оригинальная методика проведения вычислительных экспериментов по оптимальному управлению энергоресурсоэффективностью ХЭТП сушки фосфоритовых окатышей в движущейся плотной многослойной массе. На основе предложенной методики автор решил задачу определения оптимального режима сушки окомкованного сырья на обжиговой машине конвейерного типа, что позволило снизить удельный расход топлива, уменьшить количество возврата, повысить качество готовых просушенных окатышей.

В пятой главе (стр. 178-189) автор формализует задачу оптимального управления энергоресурсоэффективностью ХЭТП прокали и спекания фосфоритовых окатышей и предлагает алгоритм ее решения. Используя предложенный ранее принцип декомпозиции ХЭТС обжиговой машины на отдельные зоны, автор дает

вербальную и формализованную постановки задачи многоуровневого оптимального управления ХЭТП прокали и спекания, которую затем сводит к виду однокритериальной задаче нелинейного программирования.

Автор предлагает многоуровневый алгоритм оптимального управления энергоресурсоэффективностью ХЭТП прокали и спекания с использованием дискретного динамического программирования. В главе разработана методика проведения вычислительных экспериментов по оптимальному управлению энергоресурсоэффективностью ХЭТП прокали и спекания. В результате решения задачи автором выявлено, что оптимальным по критерию энергоресурсоэффективности режимом функционирования ХЭТП служит режим, в котором технологическая зона высокотемпературного обжига уменьшается, а технологическая зона рекуперации теплоты увеличивается.

В шестой главе (стр. 190-207) автором дается вербальная и формализованная постановки задачи оптимального управления ХЭТС производства окатышей, разработан алгоритм принятия решений по оптимальному управлению энергоресурсоэффективностью ХЭТС производства фосфоритовых окатышей;

Решение поставленной задачи на основе предложенного алгоритма позволило автору получить научно-обоснованные инженерно-технологические решения по оптимизации энергоресурсоэффективности ХЭТС; научно-обоснованы аппаратно-технические решения по оптимальному управлению энергоресурсоэффективностью ХЭТС. Найденный режим функционирования ХЭТС обеспечивает оптимальное потребление энергии и существенное увеличение качества готовых обожжённых фосфоритовых окатышей на выходе из ХЭТС (степень реагирования декарбонизации достигает 0,95, а прочность окатышей 72,03 кг/ок).

В седьмой главе (стр. 208-236) в качестве результата применения разработанных автором алгоритмов и комплексов программ изложены научно обоснованные методы принятия решений по оптимизации энергоресурсоэффективности ХЭТС обжиговой конвейерной машины ОК-520/536Ф.

Подробно описаны архитектура, программно-информационное обеспечение и режимы функционирования автоматизированной системы поддержки принятия решений по оптимальному управлению энергоресурсоэффективностью ХЭТС.

Приведены результаты системного анализа структуры и свойств обжиговой машины ОК-520/536Ф как сложной ХЭТС; выполнен расчёт требуемых оптимальных значений физико-химических параметров готовых окатышей при работе машины ОК-520/536Ф. Изложены научно-обоснованные рекомендации по оптимизации режима функционирования и по модернизации аппаратно-технического оформления действующей обжиговой машины ОК-520/536Ф.

Научная новизна исследования и полученных результатов

В диссертационной работе получены следующие основные оригинальные научные результаты:

1. Проведен системный анализ сложной многостадийной ХЭТС производства фосфоритовых окатышей, в которой протекает совокупность энергоёмких ХЭТП сушки, прокали и спекания фосфоритовых окатышей, обеспечивающих конечную прочность окатышей. Это позволило при многомасштабном моделировании

различных ХЭТП движущейся многослойной массы окатышей обосновать необходимость учета трех взаимосвязанных уровней явлений и процессов: ХЭТП в отдельном окатыше; ХЭТП вертикальной многослойной укладки окатышей; ХЭТП движущейся вертикальной многослойной укладки окатышей.

Системный анализ ХЭТС и ХЭТП производства фосфоритовых окатышей 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 фосфоритовых окатышей разработана математическая модель распространения локализованного фронта испарения в отдельном окатыше.

Модель отличается учетом зависимости кинетики влагосодержания в окатыше как крупнопористом влажном теле, а также особенностей распространения локализованного фронта испарения от поверхности окатыша к центру. Использование модели позволяет интенсифицировать процесс нагревания для ускорения сушки окатышей при термической подготовке фосфатного сырья и контролировать фильтрующий через высушенный слой окатыша поток паров воды, чтобы предотвратить разрушение окатышей.

3. Разработана многомасштабная математическая модель многостадийного ХЭТП сушки движущейся плотной многослойной массы фосфоритовых окатышей в ХЭТС обжиговой конвейерной машины.

Модель отличается учетом перераспределения влаги по высоте движущейся многослойной массы окатышей, определяющего избыточную влажность окатышей в отдельных горизонтах-слоях массы окатышей. Использование модели позволяет определять технологические режимы эксплуатации ХЭТС, предотвращающие образование горизонтов переувлажнения, которое отрицательно влияет на газопроницаемость слоя и приводит к росту энергопотребления при снижении производительности ХЭТС обжиговой машины в целом.

4. Разработаны математические модели многостадийных взаимозависимых ХЭТП прокали и спекания отдельных фосфоритовых окатышей в зоне высокотемпературного обжига ХЭТС обжиговой конвейерной машины.

Модели отличаются учетом негативного процесса остеклования и последующего разрушения окатышей при нарушении температурного режима ХЭТП. Использование предложенных моделей позволяет выявить и использовать потенциал повышения энергоресурсосбережения в производственных системах термической подготовки сырья горно-обогачительных предприятий фосфорной и металлургической промышленности.

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

6. Предложены алгоритм оптимального управления и методика проведения вычислительных экспериментов по оптимизации энергоресурсоэффективности

ХЭТП сушки движущейся плотной многослойной массы фосфоритовых окатышей, отличающиеся использованием метода дискретного динамического программирования и процедур контроля эффекта перераспределения влаги по высоте многослойной засыпки окатышей. Использование предложенных алгоритма и методики позволяет предотвращать появление горизонтов переувлажнения, приводящего к росту энергопотребления и снижению производительности ХЭТС обжиговой машины в целом.

7. Предложена формализация задачи оптимального управления энергоресурсоэффективностью многостадийных взаимозависимых ХЭТП прокали и спекания фосфоритовых окатышей, учитывающая разработанную многомасштабную математическую модель взаимозависимых ХЭТП прокали и спекания.

8. Предложен многоуровневый алгоритм оптимального управления энергоресурсоэффективностью многостадийных взаимозависимых ХЭТП прокали и спекания фосфоритовых окатышей. Алгоритм использует метод динамического программирования и позволяет предотвращать негативный процесс остеклования окатышей и переход ХЭТП в эндотермический режим при затухании тепловой волны, движущейся вглубь многослойной массы. Предложенный алгоритм позволяет интенсифицировать ХЭТП прокали и спекания фосфоритовых окатышей.

9. Предложены формализация критерия оптимальности и многоуровневый алгоритм оптимального управления энергоресурсоэффективностью ХЭТС производства окатышей. Алгоритм отличается учётом зависимости показателей качества готовых окатышей от характеристик фосфатного сырья и температуры и скорости подачи газа-теплоносителя в движущуюся массу окатышей и взаимосвязан с разработанными многоуровневыми алгоритмами оптимального управления ХЭТП сушки движущейся плотной многослойной массы фосфоритовых окатышей и ХЭТП их прокали и спекания.

10. Разработана методика обработки информации и принятия научно-обоснованных инженерно-технологических и аппаратно-технических решений по оптимизации технологических режимов и оптимальному управлению энергоресурсоэффективностью ХЭТС производства фосфоритовых окатышей. Методика на основе методологии системного подхода интегрирует и взаимосвязывает предложенные процедуры проведения вычислительных экспериментов, базирующиеся на предложенных многоуровневых алгоритмах оптимального управления энергоресурсоэффективностью ХЭТС производства фосфоритовых окатышей и многомасштабной математической модели многостадийной ХЭТС производства окатышей. Предложенная методика позволяет определять энергоресурсоэффективные режимы функционирования и осуществлять мероприятия по повышению энергоресурсоэффективности ХЭТС.

Соответствие полученных соискателем научных и практических результатов паспорту специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации подтверждается следующим.

В соответствии с **формулой специальности** в диссертации проведены прикладные исследования системных связей и закономерностей функционирования обжиговой конвейерной машины ОК-520/536Ф как сложной многостадийной

ХЭТС и прикладные исследования процессов производства фосфоритовых окатышей с учетом отраслевых особенностей, ориентированные на повышение эффективности ХЭТС производства фосфоритовых окатышей с использованием современных методов обработки информации.

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 математическом моделировании взаимосвязанных ХЭТП движущейся многослойной массы окатышей следует рассматривать три уровня явлений и процессов: ХЭТП в отдельном окатыше; ХЭТП вертикальной многослойной укладки окатышей; ХЭТП движущейся вертикальной многослойной укладки окатышей.

Отличительной особенностью данной научно-квалификационной работы является учет пространственно-временных взаимосвязей при построении многомасштабных математических моделей ХЭТП, составляющих основу ХЭТС обжиговой машины, определение зависимостей качества готовых фосфоритовых окатышей от типа исходного сырья и управляющих переменных (температура и скорость подачи теплоносителя в динамическую многослойную массу окатышей).

В диссертационном исследовании автор развивает **следующие области исследования** согласно паспорту специальности:

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

На основе проведенного системного анализа энергоёмкой многостадийной ХЭТС термической обработки фосфоритовых окатышей на конвейерной обжиговой машине выполнены формализация и постановка задач оптимального управления энергоресурсоэффективностью ХЭТП сушки движущейся плотной многослойной массы фосфоритовых окатышей, взаимосвязанных ХЭТП прокалки и спекания фосфоритовых окатышей, ХЭТС производства фосфоритовых окатышей в целом.

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

С целью управления энергоресурсоэффективностью ХЭТС производства фосфоритовых окатышей разработаны критерии оценки энергоресурсоэффективности как ХЭТП прокалки и спекания фосфоритовых окатышей, так и ХЭТС производства фосфоритовых окатышей в целом. Предложенные критерии учитывают многоуровневость процессов ХЭТП движущейся многослойной массы окатышей.

Разработана методика решения задач оптимизации энергоресурсоэффективности ХЭТП сушки движущейся плотной многослойной массы фосфоритовых окатышей, ХЭТП прокалки и спекания фосфоритовых окатышей, ХЭТС производства окатышей в целом. Основу методики составляют многомасштабные математические модели взаимосвязанных ХЭТП, протекающих при производстве фосфоритовых окатышей:

– модель распространения локализованного фронта испарения в отдельном окатыше, которая отличается учетом зависимости кинетики влагосодержания в

окатыше как крупнопористом влажном теле, а также особенностей распространения локализованного фронта испарения;

– модель сушки движущейся плотной многослойной массы окатышей, отличающаяся учетом перераспределения влаги по высоте движущейся многослойной массы окатышей, определяющего избыточную влажность окатышей в отдельных горизонтах-слоях массы окатышей;

– модель ХЭТП прокали и спекания отдельных фосфоритовых окатышей, учитывающая негативные процессы остеклования и последующего разрушения окатышей при нарушении температурного режима ХЭТП;

– модель ХЭТП прокали и спекания движущейся плотной многослойной массы фосфоритовых окатышей, учитывающая физико-химические и гранулометрические свойства фосфатного сырья.

Полученная интегрированная модель ХЭТС обжига окатышей согласно основным принципам системного анализа позволяет учесть пространственно-временные масштабы протекающих при производстве фосфоритовых окатышей процессов и их взаимосвязь. Разработанная математическая модель позволяет принимать решения по оптимальному управлению ХЭТС термической подготовки окатышей в условиях изменения химического, гранулометрического, литологического состава добываемого фосфатного сырья.

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

Разработан алгоритм оптимального управления энергоресурсоэффективностью ХЭТП сушки движущейся плотной многослойной массы фосфоритовых окатышей, отличающийся использованием метода дискретного динамического программирования и процедур контроля эффекта перераспределения влаги по высоте многослойной засыпки окатышей.

Разработан алгоритм определения оптимальных в смысле энерго- и ресурсоэффективности значений параметров управления ХЭТП прокали и спекания фосфоритовых окатышей, учитывающий многоуровневость и взаимозависимость многостадийных ХЭТП прокали и спекания. Алгоритм позволяет реализовать потенциал энергоресурсосбережения, благодаря учету негативных процессов остеклования окатышей и их дальнейшего разрушения, а также позволяет определять режимы проведения обжига окатышей, интенсифицирующие процессы прокали и спекания.

Разработан многоуровневый алгоритм принятия решений по оптимальному управлению энергоресурсоэффективностью ХЭТС производства фосфоритовых окатышей в целом. Алгоритм отличается учётом зависимости показателей качества готовых окатышей от характеристик фосфатного сырья и температуры и скорости подачи газа-теплоносителя в движущуюся массу окатышей.

Разработана процедура системной обработки больших массивов информации о переменных состояния сложного ХЭТП сушки фосфоритовых окатышей, которая необходима для решения задач оптимизации процесса сушки движущейся плотной многослойной массы фосфоритовых окатышей.

Разработана методика обработки информации и принятия научно-обоснованных инженерно-технологических и аппаратно-технических решений по

оптимизации технологических режимов и оптимальному управлению энергоресурсоэффективностью ХЭТС производства фосфоритовых окатышей. Методика на основе методологии системного подхода интегрирует и взаимосвязывает предложенные процедуры проведения вычислительных экспериментов, базирующиеся на предложенных многоуровневых алгоритмах оптимального управления энергоресурсоэффективностью ХЭТС производства фосфоритовых окатышей. Предложенная методика позволяет определять энергоресурсоэффективные режимы функционирования и осуществлять мероприятия по повышению энергоресурсоэффективности ХЭТС.

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

Разработано математическое и алгоритмическое обеспечение решения задачи многокритериальной оптимизации энергоресурсоэффективности сложной многостадийной ХЭТС обжиговой конвейерной машины, основанное на использовании принципов динамического программирования и введения барьерных и штрафных функций при преобразовании задачи условной оптимизации большой размерности.

Разработаны архитектура и программно-информационное обеспечение поддержки принятия решений по оптимальному управлению энергоресурсоэффективностью ХЭТС обжиговой конвейерной машины. Применение программно-информационного обеспечения 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 полученных в диссертации результатов.

1. Разработана методика обработки информации и принятия решений по оптимизации технологических режимов и оптимальному управлению энергоресурсоэффективностью ХЭТС производства окатышей, а также ее алгоритмическое обеспечение. Их применение позволяет обеспечивать требуемое качество готовых окатышей, снижать долю возврата продукта, снижать затраты тепловой и электрической энергии на проведение энергоёмких ХЭТП сушки, прокали и спекания в сложной ХЭТС производства окатышей.

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

3. На основе использования предлагаемой методики, ее алгоритмического обеспечения и разработанной автоматизированной системы оптимизации режимов функционирования ХЭТС обжиговых конвейерных машин разработаны научно-обоснованные инженерно-технологические рекомендации по оптимизации режимов функционирования и аппаратно-техническому оформлению ХЭТС обжиговой машины ОК-520/536Ф с учётом её технических и конструктивных особен-

ностей, реализация которых позволяет оптимизировать энергоресурсоэффективность ХЭТС и повысить качество готовых окатышей;

4. Применение предлагаемой методики, ее алгоритмического обеспечения и разработанной автоматизированной системы оптимизации режимов функционирования ХЭТС обжиговых конвейерных машин, реализация предложенных на их основе рекомендаций по обеспечению оптимальной энергоресурсоэффективности ХЭТС позволило:

– повысить качество выпускаемой продукции при существенном снижении удельной энергоемкости производства жёлтого фосфора использованы в ТОО «Казфосфат» «Новоджамбульский фосфорный завод» (Республика Казахстан) (справка за подписью директора ЖФ ТОО «Казфосфат» «Новоджамбульский фосфорный завод» Л.Х. Франгулиди в приложении диссертации).

– определять теплофизические и физико-химические свойства сырья, а также рассчитывать оптимальные параметры режимов работы ХЭТС обжиговых машин в ОАО «Уральский институт металлов» (справка за подписью научного руководителя ОАО «Уральский институт металлов» академика РАН Л.А. Смирнова в приложении диссертации). Оптимальный технологический режим функционирования обжиговой машины позволяет сформировать в движущейся многослойной массе окатышей устойчивую тепловую волну, более мощную и глубже проникающую вглубь слоя по сравнению с традиционным режимом. Это обеспечивает оптимальную энергоресурсоэффективность и производительность ХЭТС обжиговой машины при значительном улучшении качества готовых окатышей.

5. 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.

6. Полученные основные научные и практические результаты могут быть использованы в учебном процессе на кафедре Логистики и экономической информатики при обучении магистров по направлению 18.04.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии» программа «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)».

Достоверность и степень обоснованности научных положений и выводов определяется корректным использованием известных научных положений и методов исследований и обеспечена корректностью использования методов математического моделирования, системного анализа сложных технологических систем для декомпозиции ХЭТС обжиговой машины, методов нелинейного программирования. Новые научные результаты полностью согласуются с существующими общепризнанными теориями тепло- и массообмена, кинетики топохимических ре-

акций и подтверждаются проведенными вычислительными экспериментами. Совпадение численных результатов с экспериментальными данными доказывают адекватность разработанных многомасштабных математических моделей и применимость созданных многоуровневых алгоритмов.

Предложенные автором основные научные положения и выводы опубликованы в 43 статьях в рецензируемых научных журналах, рекомендуемых для публикации Высшей Аттестационной Комиссией и 1 монографии; в 12 работах в изданиях, индексируемых в наукометрических базах WoS и SCOPUS, апробированы на 23 международных и российских научных конференциях. Сформулированные автором выводы полностью основаны на полученных в диссертации результатах.

Рекомендации по практическому использованию результатов диссертационной работы.

В диссертационной работе соискателем предложены методологические основы системного подхода к принятию решений по обеспечению повышения энергоэффективности в многостадийной ХЭТС производства фосфоритовых окатышей и оптимальному управлению технологическими режимами конвейерных обжиговых машин. Практическое применение разработанных соискателем методик и алгоритмов позволяет определять теплофизические и физико-химические свойства сырья, а также параметры режимов работы обжиговых машин, позволяющие оптимизировать энергоресурсосбережения в ХЭТС.

Полученные в диссертационной работе научно обоснованные выводы, теоретические и инженерно-технологические результаты целесообразно использовать для определения оптимальных технологических режимов действующих обжиговых машин для производства фосфоритовых и металлургических окатышей.

Автором получен ряд важных практических результатов, которые позволяют проводить энергоаудит промышленных металлургических, химических, горно-обогатительных предприятий с процессами обогащения минерального сырья и процессами восстановительного обжига.

Основные замечания по содержанию диссертационной работы:

В целом диссертационное исследование выполнено на высоком научно-техническом уровне. Тем не менее, по тексту работы следует сделать замечания:

1. В первой главе диссертации отсутствует критический анализ методов решения задач оптимального управления и методов нелинейного программирования, хотя три главы диссертационного исследования (главы 4, 5, 6) посвящены разработке алгоритмов оптимального управления и принятия решений на основе решения задач оптимизации.

2. Автор при решении задач оптимизации строит алгоритмы на основе метода дискретного динамического программирования. Также, на стр. 158 диссертации автор указывает, что проводит решение задачи нелинейной условной оптимизации локального ХЭТП отдельной вакуум-камеры обжиговой машины на основе безусловного метода нулевого порядка Нелдера-Мида.

Известно, что методы нулевого порядка значительно проигрывают в скорости получения решения в сравнении с методами первого и второго порядка. Более

того, решение рассматриваемой задачи условной оптимизации можно проводить методами условной нелинейной оптимизации, например методом последовательного квадратичного программирования, без сведения задачи к безусловной оптимизации.

Автор не показывает преимущества предложенной им процедуры в сравнении с известными методами условной нелинейной оптимизации.

3. Для построения программной реализации предлагаемых алгоритмов автор разработал программный комплекс с использованием среды программирования Borland C++ и пакета MathCad, указав, что архитектура комплекса построена по модульному принципу. Автор не показывает, как организовано взаимодействие компонентов разработанного программного комплекса с пакетом MathCad.

Также возникает вопрос, почему автор не воспользовался свободно распространяемым пакетом OCTAVE, который включает в себя готовые модули методов нелинейного программирования и предоставляет встроенный объектно-ориентированный язык программирования для построения собственных модулей пользователя. Это позволило бы автору использовать готовые высокоэффективные методы нелинейной условной оптимизации, а не программировать собственные процедуры.

4. Проводя поиск оптимального режима работы обжиговой машины, автор не освещает проблему устойчивости получаемого решения к внешним и внутренним воздействиям на процессы, протекающие в обжиговой машине. Из текста диссертационной работы не ясно, автор не привел соответствующие исследования в данной диссертационной работе либо не уделил внимания этому вопросу вообще.

5. На странице 185 диссертации описывается тепловой эффект, возникающий в подвижном плотном слое фосфоритовых окатышей с перекрёстной подачей теплоносителя, который выражается в формировании затухающей «тепловой волны». Иллюстрация эффекта приведена на рисунке 5.3.3. Применительно к движущейся на конвейере ХЭТС многослойной массе окатышей эффект «тепловой волны» кратко описывается на странице 229 и иллюстрируется на рисунке 7.5.1.

В тоже время, обоснование безусловно интересного явления не содержит описания таких важных с практической точки зрения характеристик как скорость затухания «тепловой волны».

Сделанные замечания не снижают новизны и значимости представленной работы.

Основные результаты диссертации достаточно полно изложены в 69 научных трудах, из них: 1 монография, 12 публикаций в журналах, индексируемых в наукометрических базах WoS и SCOPUS; 43 статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендуемых Высшей Аттестационной Комиссией. По результатам исследования получен 1 патент и 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Автореферат полностью соответствует основному содержанию диссертационной работы.

На основании анализа текста диссертации, автореферата и опубликованных автором работ можно сделать следующее заключение: диссертационная работа Бобкова Владимира Ивановича на тему «Методическое и программно-информационное обеспечение принятия решений по оптимизации энергоресурсоэффективности химико-энерготехнологических систем производства фосфоритовых окатышей» является завершенной научно-квалификационной работой, в которой решена крупная научная проблема в области системного анализа энергоресурсоэффективности химико-энерготехнологических систем, состоящая в совокупности научно-обоснованных технологических, технических и программно-информационных разработок по методологии системного подхода к анализу и принятию решений по оптимизации энергоресурсоэффективности химико-энерготехнологических систем производства фосфоритовых окатышей. Диссертация имеет важное хозяйственное значение для развития и повышения эффективности предприятий химической, металлургической и горно-обогатительной промышленности.

Диссертационная работа Бобкова Владимира Ивановича соответствует требованиям п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней» (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842), а автор диссертационной работы, Бобков Владимир Иванович, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (химическая технология).

Официальный оппонент
профессор кафедры «Системотехника»
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский
технологический университет»,
доктор технических наук, доцент

Татьяна Владимировна Лаптева

Лаптева Татьяна Владимировна
Адрес: 420015, Российская Федерация, Казань, ул.К.Маркса, 68
Телефон/факс: 8 (843) 231-42-16
E-mail: tanlapteva@yandex.ru

Подпись Лаптева Т.В.
удостоверяется.
Начальник УИД ФГБОУ
«23» 11