

## ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук, профессора Лабутина Александра Николаевича на диссертацию Бобкова Владимира Ивановича на тему: «Методическое и программно-информационное обеспечение принятия решений по оптимизации энергоресурсоэффективности химико-энерготехнологических систем производства фосфоритовых окатышей», представленную к защите на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации (химическая технология)»

### **Общая характеристика оппонируемой диссертации**

Диссертационная работа состоит из списка основных условных обозначений, аббревиатур, введения, семи глав, заключения, глоссария, трёх приложений и библиографического списка, который включает 315 наименований использованной литературы. Общий объем работы составляет 293 страницы. Диссертация и автореферат представлены оппоненту в сроки, установленные Положением о присуждении ученых степеней.

**Актуальность темы** диссертации определяется устойчивым трендом возрастания спроса на обогащённое рудное сырьё в фосфорной промышленности, цветной и черной металлургии, что обуславливает необходимость повышения его качества и уменьшение затрат на его производство. Для промышленной переработки сложного рудного неоднородного минерального сырья требуется предварительная термическая обработка. Исходное обогащённое сырьё должно качественно и количественно отвечать техническим требованиям, гранулометрическому составу, не иметь влаги, содержать минимум карбонатных включений, летучих газов, ненужных примесей. Кроме этого, около половины сырья на горно-обогащительных предприятиях теряется при добыче, транспортировке и предварительной обработке руды.

Сохраняющаяся тенденция снижения качества рудного сырья при отсутствии энергоресурсоэффективных методов его термической подготовки приводит к ухудшению технико-экономических характеристик электротермического метода возгонки жёлтого фосфора.

В связи с этим развитие методических и разработка технических и технологических решений по повышению энергоресурсоэффективности химико-энерготехнологических систем (ХЭТС) и химико-энерготехнологических процессов (ХЭТП) обжига, является актуальной научной задачей.

Обогащение рудного сырья весьма сложный энергоёмкий процесс. При этом, при производстве окатышей затраты на электроэнергию в среднем в два раза превышают затраты на тепловую энергию. Причем, электрическая энергия расходуется эксгаустерами для формирования потока газа-теплоносителя с требуемыми параметрами, а тепловая энергия сжигания топлива обеспечивает начальную температуру газа-теплоносителя в ХЭТС – обжиговой конвейерной машине.

Основными процессами данной ХЭТС производства окатышей являются: сушка; подогрев; высокотемпературный обжиг; рекуперация; охлаждение.

Эти химико-технологические процессы выполняются в обжиговой конвейерной машине в указанной последовательности и различаются значениями следующих управляющих параметров для каждой стадии (в каждой из вакуум-камер) этих процессов: температурой газа-теплоносителя на входе в слой окатышей; температурой газа-теплоносителя после прохождения различных слоёв окатышей; скоростью движения газа-теплоносителя.

С учетом данного обстоятельства автор диссертации обосновано предложил применять методологию системного подхода к анализу сложной многостадийной ХЭТС про-

изводства фосфоритовых окатышей, а также методы многомасштабного моделирования химико-энерготехнологического процессов сушки, прокали и спекания движущейся в плотном слое многослойной массы окатышей на конвейере ХЭТС – обжиговой машины.

Резюмируя сказанное, можно сделать вывод об актуальности и обоснованности темы диссертации Бобкова В.И., а также перспективности практического применения результатов исследований для системного анализа сложных многостадийных ХЭТС.

**Диссертация характеризуется высокой степенью обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, а также достоверность исследований, что подтверждается:**

- использованием апробированных научных положений и методов научных исследований, применяемых при системном анализе сложных многостадийных ХЭТС;
- корректным применением методов системного анализа, многомасштабного математического и компьютерного моделирования, оптимизации теории оптимального управления;
- согласованностью полученных новых результатов с известными теоретическими положениями в области системного анализа, математического моделирования и практическими результатами расчёта основных переменных состояния ХЭТП обжига: влагосодержание окатышей и газа-теплоносителя, завершённость реакции диссоциации карбонатов и прочность готовых окатышей;
- результатами практического использования методов, моделей и программно-информационного обеспечения принятия решений по оптимизации энергоресурсоэффективности химико-энерготехнологических систем производства фосфоритовых окатышей в ТОО «Казфосфат» «Новоджамбульский фосфорный завод» (Республика Казахстан), позволившими повысить качество выпускаемой продукции при существенном снижении удельной энергоемкости.

**Новизна научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации,** состоит в том, что при выполнении исследований получены следующие основные научные результаты, обеспечивающие определенное приращение знаний в предметной области специальности 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации (химическая технология)»

1. На основе результатов системного анализа технологии дегидратации фосфоритовых окатышей разработан декомпозиционный метод построения математической модели сложного многостадийного ХЭТП сушки, которая с помощью системы дифференциальных уравнений в частных производных (ДУЧП) описывает зависимость кинетики влагосодержания в окатыше и отличается рассмотрением окатышей данного типа, как крупнопористых влажных тел, и учетом особенностей продвижения локализованного фронта испарения от поверхности к их центру, что позволяет повысить эффективность принятия решений по интенсификации нагрева для ускорения сушки окатышей при термической подготовке и даёт возможность контролировать поток паров воды, фильтрующихся через высушенный слой окатыша, для предотвращения его разрушения.

2. Предложен структурно-аналитический метод разработки математической модели многостадийного ХЭТП сушки многослойной движущейся массы фосфоритовых окатышей в зоне сушки обжиговой конвейерной машины, отличающаяся учетом эффекта перераспределения влаги по высоте движущейся многослойной массы фосфоритовых окатышей, в результате которого в отдельных его горизонтах наблюдается избыточная влажность окатышей. Наличие указанной модели позволяет автоматизировать процедуру принятия решений по выбору технологических режимов функционирования указанного оборудования с целью недопущения образования горизонтов переувлажнения, которое негативно сказывается на газопроницаемости слоя, и как следствие, ведёт к необоснованному росту энергопотребления и снижению производительности ХЭТС в целом.

3. Разработан специальный алгоритм проведения неизотермического эксперимента для исследования характеристик взаимосвязанных химико-энерготехнологических терми-

чески-активируемых процессов в фосфатном сырье, реализуемых в сложных ХЭТС обжиговых машинах конвейерного типа, отличающийся возможностью комплексного учета при моделировании данных процессов: полиморфных превращений, химических реакций в твердых фазах, реакций с участием жидкой фазы, образования в результате реакций новых фаз и твердых растворов, что позволяет уменьшить погрешность оценки показателей прочности одиночного окатыша при спекании и степени прокалики в результате диссоциации карбонатов.

4. Предложена многомасштабная модель сложных многостадийных взаимозависимых ХЭТП прокалики и спекания фосфоритовых окатышей в зоне высокотемпературного обжига сложной ХЭТС конвейерной обжиговой машины, отличающаяся включением подмоделей остеклования и последующего разрушения окатышей при нарушении температурного режима производства, что дает возможность выявить и реализовать потенциал ресурсоэнергосбережения в производственных системах термической подготовки сырья горно-обогатительных предприятий фосфорной и металлургической промышленности.

5. Разработана комплексная многомасштабная модель сложных многостадийных взаимозависимых ХЭТП спекания и прокалики движущейся многослойной массы фосфоритовых окатышей, отличающаяся учетом химико-технологических и гранулометрических свойств исходного фосфатного сырья, что позволяет повысить энергоэффективность технологии термической обработки.

6. Предложен специальный метод дискретного динамического программирования, для решения задачи условной оптимизации с применением критерия энергоэффективности и обеспечения требуемых показателей качества процесса многослойной динамической сушки окомкованного фосфатного сырья на основе интенсификации тепло- и массообмена в зоне сушки обжиговой конвейерной машины, отличающиеся использованием процедуры сведения задачи оптимального управления сложной химико-технологической системой, удовлетворяющей принципу Беллмана, к задаче дискретного динамического программирования и условной оптимизации, что обеспечивает возможность решения данной задачи в условиях большой ее размерности.

7. На основе использования предложенной математической модели химико-энерготехнологических процессов обжига фосфоритовых окатышей в плотном слое и методов динамического программирования по таким критериям эффективности как: по быстродействию процессов, качество продукции, необходимая степень завершенности реакции диссоциации карбонатов и достижение требуемой прочности в результате спекания - определены параметры режимов управления высокотемпературным обжигом в конвейерной машине, которые в отличие от известных направлены на формирование затухающей, движущейся вглубь слоя, тепловой волны, что позволяет интенсифицировать термически активируемые процессы, прокалики и спекания фосфоритов и не допускать остеклования окатышей, ведущего к снижению их прочности.

8. Разработан метод дискретного динамического программирования оптимизации энергоэффективности ХЭТС, учитывающий исследованные критерии эффективности решения задач системного анализа и управления термической подготовкой фосфатного сырья для выявления и использования потенциала энергоэкономии, позволяющий, в отличие от известных, основанных на обработке экспериментальной информации алгоритмах, определять энергоэффективные режимы работы существующих обжиговых машин без долговременного вывода их из эксплуатации и выработать рекомендации по модернизации и последующего повышения производительности указанного агрегата.

9. Разработана комплексная многомасштабная математическая модель и представлены алгоритмы системного анализа и оптимизации ХЭТС обжига движущейся многослойной массы фосфоритовых окатышей в плотном слое дисперсного «термически толстого» фосфатного материала с перекрестной подачей теплоносителя при наличии таких эндотермических превращений как: сушка; диссоциация карбонатов, учитывающая снижение

прочности в связи с образованием новой мало прочной фазы; спекание, обеспечивающее упрочнение катышей; образование стеклофазы, снижающее прочность.

В отличие от известных подходов к моделированию ХЭТП управления ХЭТС обжига фосфоритов, рассматривающих указанные превращения отдельно, без учета их взаимного влияния, разработанная модель на базе ДУЧП используется при обработке информации и принятии решений по управлению химико-энерготехнологической системой термической подготовки окатышей при изменении химического, гранулометрического, литологического состава поступающего на термическую обработку фосфатного сырья.

**Возможности по реализации сформулированных теоретических положений и практических разработок в горно-обогатительной промышленности определяются** достаточно высокой степенью их универсальности и реализуемости. В частности, предложенные методы определения оптимальных энергоресурсоэффективных режимов термической обработки окомкованного фосфатного сырья, позволяют улучшить качество готового продукта, снизить долю возврата, сэкономить тепловую и электрическую энергию в рассматриваемой технологии.

В рамках выполнения диссертационной работы разработаны алгоритмы и программное обеспечение для определения оптимальных режимов функционирования ХЭТС обжиговых машин конвейерного типа, обеспечивающих высокую энергоресурсоэффективность.

Предлагаемая работа восполняет сведения, необходимые для описания тепло- и массообменных процессов в теплотехнологических аппаратах фосфорного производства на базе детерминированных многомасштабных математических и компьютерных моделей. Рассматриваемые математические модели тепловых и газодинамических процессов используются для оптимизации по критерию энергоресурсосбережения режимов работы технологического оборудования, а также для расчёта параметров технологических агрегатов – обжиговых конвейерных машин при проектировании.

#### **Основные замечания из текста диссертации:**

1. В п. 3.2. диссертации диссертант описывает разработанную методику проведения неизотермического эксперимента, представлена убедительная процедура верификации полученных результатов. Вместе с тем, в главе 3 отсутствует систематическая верификация представленных результатов вычислительных экспериментов по проверке адекватности математических моделей ХЭТП спекания и прокалики. Только в отдельных случаях делается неявная ссылка на метод наименьших квадратов, используемый для сопоставления результатов вычислительных экспериментов с известными экспериментальными данными (как например, на странице 75 пункта 2.3 или на странице 137 п. 3.4).

2. На рисунке 1.3.1 (страница 36) диссертант приводит упрощённую блок-схему алгоритма многомасштабного моделирования и многоуровневой оптимизации ХЭТС производства фосфоритовых окатышей, в которой имеется блок «Гранулятор», описывающей подачу сырых окатышей в рассматриваемую ХЭТС на термическую обработку. Сказанное относится и к рисунку 1.3.2 (страница 37). В тоже время в диссертации не приводятся модели, описывающие данный объект. Гранулятор - это отдельный агрегат, не входящий в рассматриваемую диссертантом ХЭТС, который не целесообразно включать в блок-схему предложенного алгоритма.

3. На странице 62 для описания интенсивности испарения влаги с поверхности неподвижной многослойной массы сферических окатышей в фильтрующийся через неё газ-теплоноситель предлагается установить зависимость между критериями подобия Нуссельта, Ренольдса и Прандаля в виде критериального уравнения:  $Nu=2,2Re^{0,5}Pr^{0,33}$ , где основополагающим размером является диаметр сферы окатыша. Диссертанту следовало привести расчёт используемых значений критериев подобия с указанием источников информации для расчета числовых параметров этого уравнения.

4. Согласно известным моделям теплопереноса, теплообмен в плотном слое дисперсного материала при перекрестном токе газа-теплоносителя и слоя описывается систе-

мой уравнений теплопереноса для газового теплоносителя и материала. Диссертант, в главе 2, задачу теплообмена в слое окатышей представляет в виде внутренней (описывает теплообмен в окатыше) и внешней (для температурного поля газового теплоносителя). Из текста диссертации не понятно, использовал ли диссертант критерий подобия Био, позволяющий принимать решение о необходимости учета внутреннего переноса теплоты в окатыше как в «термически толстом теле» или возможности пренебречь им, когда теплоперенос в слое определяется внешней стадией, то есть конвекцией, а теплопроводность материала как в «термически тонком теле» достаточно велика.

Указанные замечания, несколько снижая качество выполненной научной квалификационной работы, не влияют на основные теоретические, а также прикладные результаты и не могут снижать общую положительную оценку диссертационной работы.

#### **Общее заключение по содержанию диссертации**

Полученные автором научные и практические результаты достоверны, сформулированные выводы и заключения аргументированы. Диссертационная работа оформлена согласно требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук. По каждому разделу и работе сделаны исчерпывающие и обоснованные выводы.

Содержание диссертационной работы соответствует формуле и пунктам области исследования Паспорта специальности 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации (химическая технология)» – в первую очередь, пунктам п.2 «Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации управления принятия решений и обработки информации» и п.4 «Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации управления принятия решений и обработка информации»;

Полученные результаты связаны с решением научных и технических проблем данной специальности, а именно «разработкой новых и совершенствованием существующих методов и средств анализа обработки информации и управления сложными системами, повышения эффективности, надежности и качества технических систем».

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

Оппонируемая диссертация является законченной научно-квалификационной работой, выполненной автором на хорошем научном уровне. Представленные в работе оригинальные результаты исследований дают основание квалифицировать их как совокупность новых научно-обоснованных технологических, программно-информационных и технических решений, составляющих научно-методическое обеспечение системного подхода к принятию решений по оптимизации энергоресурсоэффективности сложных химико-энерготехнологических систем производства фосфоритовых окатышей, что имеет существенное значение для экономики страны.

Реализация данных решений может внести значительный вклад в развитие страны с точки зрения повышения энергоресурсоэффективности энергоёмких химико-энерготехнологических систем обогащения рудного сырья, что позволяет считать диссертацию соответствующей требованиям «Положения о присуждении учёных степеней» (далее – *Положение*), утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09. 2013 г., № 842 в части раздела II, п. 9.

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


В соответствии с требованиями раздела II Положения диссертация обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и выводы, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствует о личном вкладе Бобкова В.И. в науку. Предложенные автором диссертации методы, модели и алгоритмы аргументированы и оценены по сравнению с другими известными решениями.

Считаю, что диссертационная работа Бобкова Владимира Ивановича на тему: «Методическое и программно-информационное обеспечение принятия решений по оптимизации энергоресурсоэффективности химико-энерготехнологических систем производства фосфоритовых окатышей» отвечает всем критериям и требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям и сформулированным в Положении и нормативных правовых документах Минобрнауки России.

Сказанное позволяет сделать общее заключение о том, что Бобков Владимир Иванович заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации (химическая технология)».

**Официальный оппонент:**

заведующий кафедрой Технической кибернетики и автоматики ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет», доктор технических наук, профессор

 Лабутин Александр Николаевич

*23.11.2018.*

Почтовый адрес: 153000, Россия, г. Иваново, Шереметевский пр., д. 7, ИГХТУ

Телефон: (4932) 327226

Адрес электронной почты: lan@isuct.ru

Подпись *А.Н. Лабутина*  
Ученый секретарь ИГХТУ

