

Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева

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)

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант-  
Мешалкин Валерий Павлович  
академик РАН,  
заслуженный деятель науки РФ,  
доктор технических наук, профессор

**Москва – 2018**

<b>ОГЛАВЛЕНИЕ</b>	
<b>СПИСОК ОСНОВНЫХ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....</b>	<b>6</b>
<b>СПИСОК АББРЕВИАТУР.....</b>	<b>9</b>
<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>10</b>
<b>ГЛАВА 1.        СОВРЕМЕННОЕ        СОСТОЯНИЕ        НАУЧНЫХ</b> <b>ИССЛЕДОВАНИЙ ПО СИСТЕМНОМУ АНАЛИЗУ И ИНЖЕНЕРНО-</b> <b>ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ        СПОСОБАМ        ОБЕСПЕЧЕНИЯ</b> <b>ЭНЕРГОРЕСУРСООФФЕКТИВНОСТИ                                ХИМИКО-</b> <b>ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....</b>	<b>24</b>
1.1 Аналитический обзор современных научных исследований по системному анализу и оптимизации сложных энерготехнологических объектов.....	24
1.2 Обжиговая конвейерная машина для производства фосфоритовых окатышей как сложная ХЭТС.....	27
1.3 Системный анализ потенциала повышения энергоресурсоэффективности ХЭТС производства окатышей.....	32
1.4 Энергоёмкие физико-химические процессы термической подготовки фосфатного сырья как объекты системного анализа.....	37
1.5 Выводы.....	59
<b>ГЛАВА 2.        МНОГОМАСШТАБНОЕ        МАТЕМАТИЧЕСКОЕ</b> <b>МОДЕЛИРОВАНИЕ        ХИМИКО-ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО</b> <b>ПРОЦЕССА СУШКИ ФОСФОРИТОВЫХ ОКАТЫШЕЙ.....</b>	<b>62</b>
2.1 ХЭТП сушки окатышей как объект системного анализа и математического моделирования.....	62
2.2 Математическая модель распространения локализованного фронта испарения в окатыше.....	63
2.3 Математическая модель процесса сушки движущейся многослойной массы окатышей.....	71

2.4 Методика вычислительных экспериментов по проверке адекватности многомасштабной модели ХЭТП сушки движущейся многослойной массы окатышей.....	75
2.5 Выводы.....	79
<b>ГЛАВА 3. МНОГОМАСШТАБНЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ХИМИКО-ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОКАЛКИ И СПЕКАНИЯ ФОСФОРИТОВЫХ ОКАТЫШЕЙ.....</b>	<b>80</b>
3.1 Системный анализ химико-энерготехнологических процессов прокали и спекания окатышей как объектов исследования и управления.....	80
3.2 Разработка методики системного подхода к обработке информации при экспериментальных исследованиях ХЭТП спекания и прокали в одном окатыше.....	86
3.3 Многомасштабная математическая модель ХЭТП процессов прокали и спекания в одном окатыше.....	122
3.4 Многомасштабная математическая ХЭТП спекания и прокали в движущейся плотной многослойной массе окатышей.....	131
3.5 Разработка методики организации вычислительных экспериментов по проверке адекватности многомасштабных математических моделей ХЭТП спекания и прокали.....	141
3.6 Выводы.....	150
<b>ГЛАВА 4. АЛГОРИТМИЗАЦИЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ОПТИМАЛЬНОМУ УПРАВЛЕНИЮ ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ХИМИКО- ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СУШКИ ФОСФОРИТОВЫХ ОКАТЫШЕЙ.....</b>	<b>152</b>
4.1 Содержательная и математическая постановки задачи оптимального управления ХЭТП сушки.....	152
4.2 Разработка алгоритма принятия решений по оптимальному управлению энергоресурсоэффективностью ХЭТП сушки с использованием дискретного динамического программирования.....	160

4.3 Методика проведения вычислительных экспериментов по оптимальному управлению энергоресурсоэффективностью ХЭТП сушки.....	169
4.4 Выводы.....	177
<b>ГЛАВА 5. МНОГОУРОВНЕВЫЕ АЛГОРИТМЫ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ХИМИКО-ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОКАЛКИ И СПЕКАНИЯ ФОСФОРИТОВЫХ ОКАТЫШЕЙ.....</b>	<b>178</b>
5.1 Содержательная и математическая постановки задачи многоуровневого оптимального управления ХЭТП прокалки и спекания.....	178
5.2 Разработка многоуровневого алгоритма оптимального управления энергоресурсоэффективностью ХЭТП прокалки и спекания с использованием дискретного динамического программирования.....	180
5.3 Методика проведения вычислительных экспериментов по оптимальному управлению энергоресурсоэффективностью ХЭТП прокалки и спекания..	182
5.4 Выводы.....	189
<b>ГЛАВА 6. АЛГОРИТМЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ОПТИМАЛЬНОМУ УПРАВЛЕНИЮ ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ХИМИКО-ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА ФОСФОРИТОВЫХ ОКАТЫШЕЙ.....</b>	<b>190</b>
6.1 Содержательная и математическая постановки задачи оптимального управления ХЭТС производства окатышей.....	190
6.2 Разработка алгоритма принятия решений по оптимальному управлению ХЭТС.....	193
6.3 Разработка научно обоснованных инженерно-технологических решений по оптимизации энергоресурсоэффективности ХЭТС.....	198
6.4 Разработка научно обоснованных аппаратурно-технических решений по оптимальному управлению энергоресурсоэффективностью ХЭТС.....	203
6.5 Выводы.....	206

<b>ГЛАВА 7. ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРАБОТАННЫХ АЛГОРИТМОВ И КОМПЛЕКСОВ ПРОГРАММ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТИ ХИМИКО-ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОБЖИГОВОЙ КОНВЕЙЕРНОЙ МАШИНЫ ОК-520/536Ф.....</b>	<b>208</b>
7.1 Архитектура, программно-информационное обеспечение и режимы функционирования автоматизированной системы поддержки принятия решений по оптимальному управлению энергоресурсоэффективностью ХЭТС.....	208
7.2 Анализ структуры и свойств обжиговой машины ОК-520/536Ф как сложной ХЭТС.....	212
7.3 Расчёт требуемых оптимальных значений физико-химических параметров готовых окатышей при работе обжиговой машины ОК-520/536Ф.....	217
7.4 Разработка научно обоснованных рекомендаций по оптимизации режима функционирования обжиговой машины ОК-520/536Ф.....	228
7.5 Разработка научно обоснованных рекомендаций по модернизации аппаратурно-технического оформления обжиговой машины ОК-520/536Ф.....	231
7.6 Выводы.....	236
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>237</b>
<b>ГЛОССАРИЙ ОСНОВНЫХ ТЕРМИНОВ И ПОНЯТИЙ.....</b>	<b>240</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>248</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Копии полученных свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.....</b>	<b>285</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Копии полученных патентов РФ.....</b>	<b>287</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Справки о практическом использовании результатов диссертационной работы.....</b>	<b>288</b>
<b>БЛАГОДАРНОСТИ.....</b>	<b>293</b>

## СПИСОК ОСНОВНЫХ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- $b$  – эмпирический коэффициент в формуле прочности;
- $c_g$  – удельная теплоемкость газа Дж/(кг·К);
- $c_m$  – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·К);
- $d$  – диаметр кристаллических зерен, образованных в процессе декарбонизации, м;
- $E^*$  – эффективный модуль Юнга композита из карбонатных составляющих, стеклофазы и остального вещества, Н/м<sup>2</sup>;
- $E_\mu$  – энергия активации вязкого течения, Дж;
- $E_j$  – энергия активации  $j$  – той реакции, Дж/моль;
- $F$  – площадь поверхности окатыша, м<sup>2</sup>;
- $f_{y\partial} = 6(1-\varepsilon_c)/(2r)$  – удельная поверхность окатышей в слое;
- $g$  – масса расплавившейся части окатыша, кг;
- $u$  – влагосодержание в окатыше, кг/кг;
- $T_g$  – температура газа (теплоносителя), К;
- $T_{g0}$  – температура газа на входе в слой, К;
- $T_m$  – температура материала (окатышей), К;
- $T_{m0}$  – начальная температура окатышей, К;
- $P$  – давление газов в слое, Па;
- $P_0$  – барометрическое давление, Па;
- $r_M$  – радиус зёрен (спекаемых частиц) составляющих окатыш, м;
- $R$  – радиус окатыша, м;
- $I$  – интенсивность влагопереноса в окатыше, кг/(м<sup>2</sup>×с)
- $P_{VR} = 617.7 \exp[17.25 \theta_* / (238 + \theta_*)]$  – давление паров влаги на поверхности окатыша, Па;
- $P_V = P \cdot x_w / (0.622 + x_w)$  – давление паров влаги в газе, Па;
- $H$  – длина плотного слоя, обжиговой машины, м;
- $h$  – высота плотного слоя, м;
- $x_w$  – влагосодержание газа кг/кг;

$x$  - координата радиуса окатыша;  
 $y$  - координата по высоте слоя окатышей;  
 $Q_L$  – удельная теплота плавления, Дж/кг;  
 $Q_S$  – удельная теплота испарения, Дж/кг;  
 $t$  – температура плавления (остеклования), К;  
 $k_{0j}$  - коэффициент проницаемости  $j$  – й реакции, с<sup>-1</sup>;  
 $R^*$  – идеальная газовая постоянная;  
 $q_i$  - тепловой эффект  $i$  – й реакции (превращения), Дж/кг;  
 $\alpha_F$  – коэффициент теплоотдачи с поверхности, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  
 $\alpha_V = \alpha_F f_{уд}$  – объемный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>3</sup>·К);  
 $\lambda$  - коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·К);  
 $\gamma$  - величина удельной поверхностной энергии, Дж/м<sup>2</sup>;  
 $\omega_i$  - скорость  $i$  – й реакции (превращения), кг/с;  
 $\rho_g$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\rho_m$  - плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\mu_g$  - динамическая вязкость газа Па·с;  
 $\mu_m$  - вязкость материала окатыша, Па·с;  
 $\beta_w$  – коэффициент массоотдачи, кг/(м<sup>2</sup>·с);  
 $\nu_g$  – кинематическая вязкость газа, м<sup>2</sup>/с;  
 $\psi = (\xi/R)^3$  - относительная степень высушивания сферической частицы (окатыша), где  $\xi$  - радиус фронта испарения, м;  
 $\theta_*$  - температура мокрого термометра, К;  
 $\eta_j$  - степень реагирования в  $j$  – й реакции декарбонизации (  $j = 1$  диссоциация CaCO<sub>3</sub>,  $j = 2$  диссоциация MgCO<sub>3</sub>);  
 $\sigma_T$  - коэффициент поверхностного натяжения, Н/м;  
 $\sigma$  - прочность Н/м<sup>2</sup> (кг/ок);  
 $\sigma_k$  – конечная прочность Н/м<sup>2</sup> (кг/ок);

$\varepsilon$  – общая пористость окатыша,

$\varepsilon_1$  – пористость самого окатыша (внешняя),

$\varepsilon_2$  – пористость зерен, составляющих окатыш (внутренняя);

$\varepsilon_c$  – порозность слоя;

$\sum_{i=1}^n v_i = \eta$  - степень реагирования к  $n$ -й релаксации;

$\tau$  - время, с.



## **СПИСОК АББРЕВИАТУР**

ГВК – газовоздушная камера (вакуум-камера)

ДУЧП – дифференциальное уравнение в частных производных

ДП – динамическое программирование

ДДП – дискретное динамическое программирование

КЭ – критерий энергоресурсоэффективности

КПД – коэффициент полезного действия

МНК – метод наименьших квадратов

ТДУ – тягодутьевое устройство

ТМП – тепломассообменный процесс

ТУТ – тон условного топлива

ТЭР – топливно-энергетические ресурсы

ХТП – химико-технологический процесс

ХТС – химико-технологическая система

ХЭТП – химико-энерготехнологический процесс

ХЭТС. – химико-энерготехнологическая система

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **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 (ХЭТС). Режимы функционирования ХЭТС 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 ХЭТС, требуют проведения дорогостоящих экспериментальных исследований по определению теплофизических и физико-химических свойств сырья, в соответствии с которыми необходимо осуществлять перенастройку параметров технологических режимов сложной ХЭТС обжиговой конвейерной машины.

Определение рациональных энергосберегающих химико-технологических схем и адаптация эффективных технических решений и технологических режимов функционирования ХЭТС к периодически меняющимся свойствам фосфоритного рудного сырья представляют собой сложную научно-практическую проблему, в решении которой ведущая роль отводится дорогим экспериментальным исследованиям. Эксперименты иногда технически неосуществимы из-за особенностей проведения динамичных ХЭТП при высоких температурах в химико-активной среде. 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 ХЭТС позволит повысить энергоресурсоэффективность ХЭТС в результате интенсификации и оптимизации тепломассообменных 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 ХЭТС производства фосфоритовых окатышей является актуальной научной проблемой, успешное решение которой обеспечит повышение энергоресурсоэффективности ХЭТС и высокое качество готовых окатышей.

#### **Степень научной разработанности темы исследования.**

Различные проблемы повышения энергоэффективности сложных ХЭТС и обеспечения энергоресурсосбережения в ХЭТП успешно решены в трудах как зарубежных ученых: Бергмана И., Фезера М., Хасби Д., Энрайта М., Чоджой М.Х., 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., Завадникова 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 передовые исследования по разработке методологии автоматизированного инжиниринга энергоресурсосберегающих 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 российские учёные: академик РАН Мешалкин В.П, профессора Юсфин Ю.С, Пашков Н.Ф, Майзель Г.М., Сулименко Е.И., Талхаев М.П., Борисова Л.И., Гальперина С.Я., Карабасов Ю.С., Лифсон М.И., Базилевич Т.Н., Бабошин В.М., Абзалов В.М., Буткарёв А.П., Ершов В.А.; и зарубежные учёные: Miyashita T., Sakamoto N., Fukuyo H., Krischer O., Kast W., Tigerschiold M.J., Joseph T.L. и другие.

Существенный вклад в изучение теплофизических процессов агломерации и обжига окатышей внесли профессора: Н. М. Бабушкин, Б. А. Боковников, Г. М. Майзель, Ф. Р. Шкляр, А. П. Буткарев, С. Г. Братчиков, Б. И. Китаев, Ю. Г. Ярошенко, В. И. Лобанов, Ю. С. Юсфин, В. С. Валавин, Ю. С. Карабасов 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 других 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 интеллекта, 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; 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.

**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 и проведении ХЭТП и увеличить энергоресурсоэффективность ХЭТС в целом.

2. На основе результатов системного анализа физико-химического процесса дегидрации 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 сказывающееся на газопроницаемости слоя и вызывающее необоснованный рост энергопотребления при снижении производительности ХЭТС в целом.

4. Разработаны математические модели сложных многостадийных взаимозависимых ХЭТП прокали 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 горно-обогатительных предприятий фосфорной и металлургической промышленности.



5. Разработаны многомасштабные математические модели сложных ХЭТП прокали 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 использованием 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 прокали 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 прокали 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 натурных и вычислительных экспериментов ХЭТП прокали и спекания окатышей как объектов исследования и управления. Мномасштабная 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); «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 (Дивногорское 2016, Тула 2017); XX МЕНДЕЛЕЕВСКИЙ СЪЕЗД ПО ОБЩЕЙ И ПРИКЛАДНОЙ ХИМИИ (Екатеринбург, 2016); Russian-Italian scientific business symposium «ENERGY AND ENVIRONMENT» (Moscow, 2018).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано **67 печатных работ**, в том числе **11** публикаций в журналах, индексируемых в международных системах **WoS** и **Scopus**; **42 публикации в журналах**, рекомендованных **ВАК**; 1 монография.

**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; методики, 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.

# **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**

Теплоэнергетическая, химическая, металлургическая и горно-обогатительная промышленности с непрерывными химико-энерготехнологическими процессами, а также целый ряд других отраслей промышленного производства являются крупнейшими потребителями различных видов топливно-энергетических ресурсов. Наряду с этим отличительной особенностью целого ряда установок и производств указанных отраслей промышленности является наличие в их структуре технологических процессов, функционирование которых сопровождается поглощением значительного количества теплоты [1].

В современной России на теплопотребление в промышленности расходуется около 75% используемых в народном хозяйстве топливно-энергетических ресурсов. Особое значение приобретают вопросы рациональной рекуперации тепловой энергии в ХЭТП, а также утилизации вторичных энергетических ресурсов производства для осуществления энергоёмких технологических процессов [2].

Рациональная рекуперация теплоты и рациональное использование вторичных энергоресурсов обеспечивают большой экономический эффект за счет как увеличения масштабов производства при постоянных мощностях сырьевой базы, так и для удешевления эксплуатационных затрат на топливо



и энергию и, следовательно, снижения себестоимости основной продукции [3]. Рекуперация остаточной энергии ХЭТП и использование вторичных энергоресурсов приводит также к снижению капитальных затрат в добывающей, обогатительной, энергетической промышленности, обеспечивает экономию производственных фондов в масштабе всей страны, позволяя значительно снизить тепловое загрязнение окружающей среды [4].

Важная роль в организации рациональной рекуперации теплоты в ХЭТП и утилизации вторичных энергетических ресурсов целого ряда производств и установок принадлежит тепломассообменным агрегатам и теплотехнологическим системам [5]. Высокоэффективные тепломассообменные агрегаты и теплотехнологические системы имеют оптимально эффективные значения термодинамических, эксергетических и технико-экономических параметрах функционирования, которым соответствуют оптимальные удельные расходы ТЭР и конструкционных материалов [6].

В данной научной работе обобщены и развиты результаты научных исследований по системному анализу, многомасштабному математическому моделированию, оптимальному управлению и оптимизации сложной ХЭТС с использованием синтеза высокоэффективных теплотехнологических систем [7].

Высокая энергетическая эффективность высокотемпературных химических, металлургических, обогатительных отраслей промышленного производства отождествляется с рациональным использованием топливно-энергетических ресурсов [8]. Огромная доля ТЭР, влияющая на энергетическую эффективность ХЭТП, приходится на теплотехнологические энергоёмкие ХЭТС [9].

Внедрение научно обоснованных эффективных решений по оптимизации термодинамических, химико-технологических и конструкционных параметров тепломассообменных аппаратов и теплотехнологических систем основывается на системном подходе и

широком использовании ЭВМ. Идеология системного подхода к комплексной научно-технической проблеме повышения энергетической эффективности тепломассообменных процессов и теплотехнологических систем состоит: в построении общей методологии исследования термодинамических, эксергетических и технико-экономических показателей качества функционирования ХЭТП, теплодинамических и химико-технологических принципов создания ТМП и ХЭТС с оптимальной материалоемкостью, в создании формализованных или вычислительных методов математического моделирования и оптимизации действующих тепломассообменных аппаратов и систем, в создании неформализованных, или эвристических методов автоматизированного синтеза высокоэффективных тепломассообменных систем [10].

Экономия расходов ТЭР достигается за счет интенсификации процессов теплообмена в теплообменных агрегатах и рационального использования вторичных энергоресурсов [11].

Методы оптимизации ТМП и теплотехнологических систем позволяют определять оптимальные поверхности теплообмена, конечные температуры потоков и скорости теплоносителей при заданной структуре технологических связей между агрегатами [12].

Методы автоматизированного синтеза высокоэффективных тепломассообменных систем позволяют за счет организации термодинамически рационального взаимодействия между потоками, выбора оптимальных поверхностей теплообмена аппаратов разрабатывать технологические схемы с большой степенью рекуперации теплоты при минимальных расходах материальных ресурсов [13]. Эти методы созданы на основе использования методов термодинамического анализа, принципов синтеза ХЭТС.

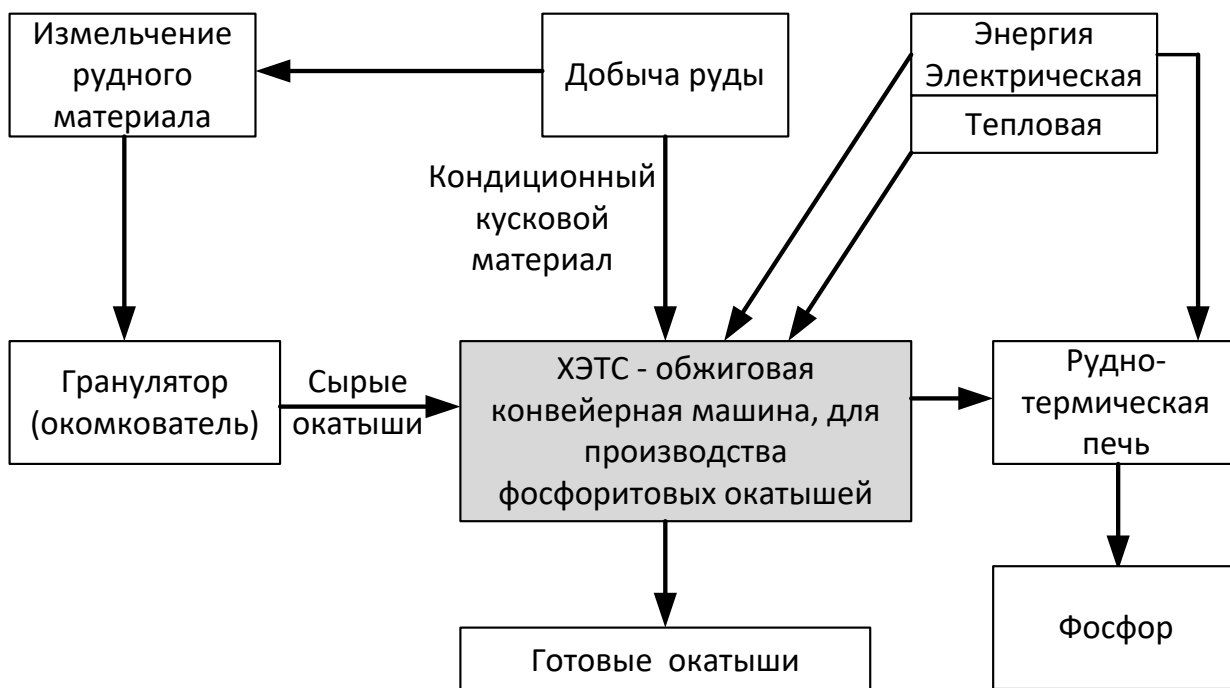


Рис. 1.1.1. Упрощённая схема цепи поставок для производства фосфора из фосфоритовых окатышей

## 1.2 Обжиговая конвейерная машина для производства фосфоритовых окатышей как сложная ХЭТС

В целом технология производства фосфоритовых окатышей состоит из последовательно производимых операций, являющихся необходимыми при использовании разнообразных типов сырьевых материалов [14]. Упрощённая схема производства окатышей представлена на рис. 1.2.1. Регулирование качества и технологический контроль выпуска сырых окатышей осуществляется режимом функционирования окомкователя, гранулометрическим составом и композиционным соотношением компонентов в исходной шихте. Начальными параметрами окомкования фосфоритного сырья являются: дисперсность, расход, массовая доля влаги подаваемой шихты, частота вращения и угол наклона гранулятора тарельчатого типа [15]. Выходными параметрами являются: влажность, химический и гранулометрический состав, прочность сырых окатышей. Управление и принятие решений при выпуске сырых фосфоритовых

окатышей основывается на работе обогатительных металлургических производств по выпуску железорудных окатышей [16]. Окатывание сырых фосфоритовых окатышей является весьма важным этапом всей технологической цепи, но наиболее значимым и энергоемким будет этап высокотемпературного обжига, осуществляемый в обжиговых конвейерных машинах (рис.1.2.2). Они служат для проведения технологических процессов сушки, подогрева, упрочняющего обжига и охлаждения окатышей [17]. На сегодняшний день промышленностью России освоено производство обжиговых конвейерных машин с площадью 108, 306 и 520 м<sup>2</sup>. Высокотемпературный химико-технологический процесс обжига происходит таким образом. На движущуюся колосниковую решетку (тележку) с целью предохранения колосников от действия большой температуры укладывается горизонтальный слой готовых окатышей) [18]. На эту “постель” подаются и укладываются сырые фосфоритовые окатыши. Высота вертикальной укладки сырых окатышей достигает 0,25-0,35м, в зависимости от типа конвейерной обжиговой машины.

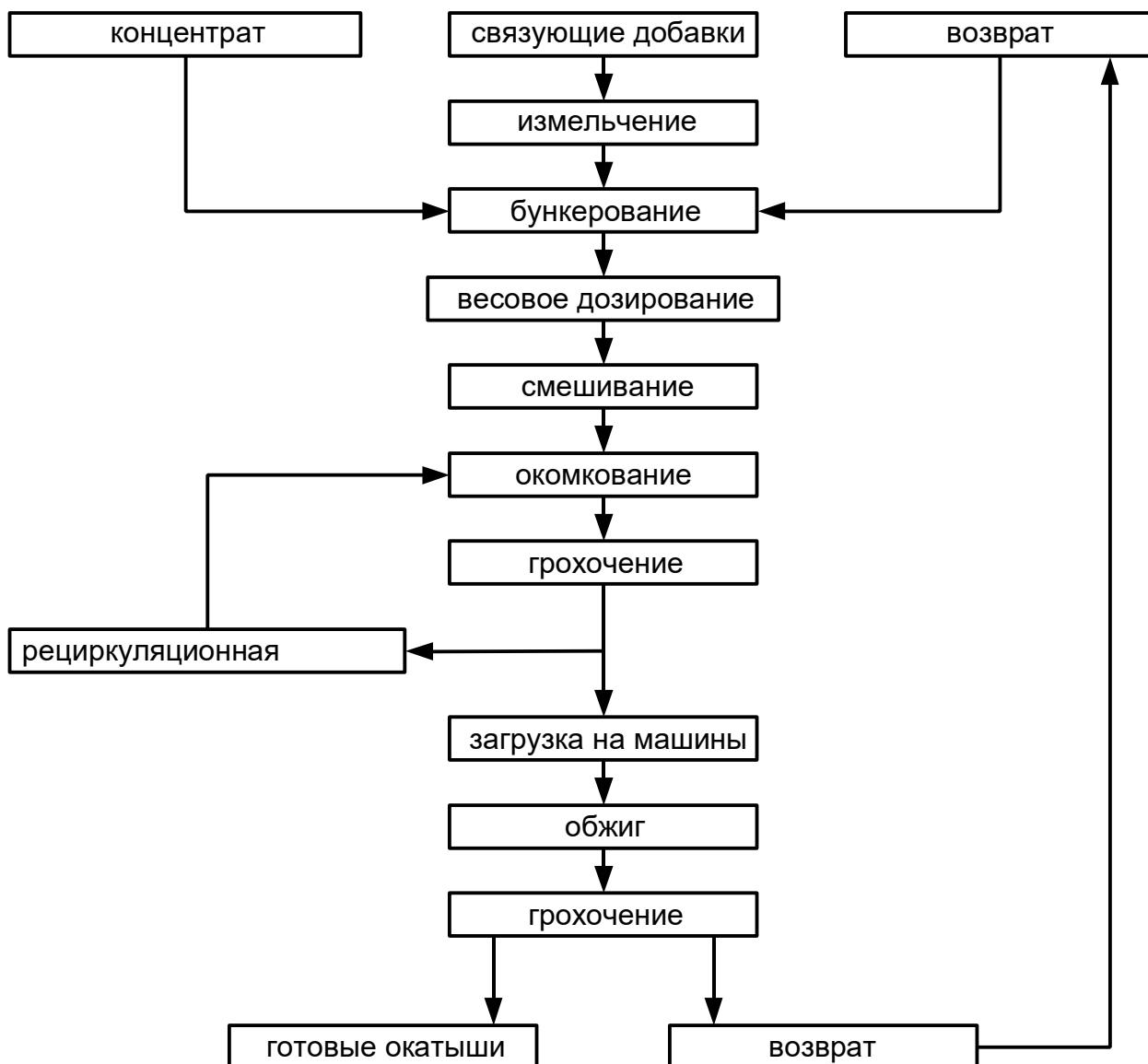


Рис.1.2.1. Примерная блок-схема получения фосфоритовых окатышей

Уложенная таким образом многослойная масса фосфоритовых окатышей проходит под горном обжиговой машины. Горн обжиговой машины – проходной печной агрегат. Он разделяется на различные теплотехнологические зоны [19]. Эти теплотехнологические зоны связаны общей системой газопроводов, оснащенной тягодутьевыми аппаратами – дымососами, патрубками, вентиляторами и т.п. Система газопроводов сконструирована таким образом, чтобы обеспечивать многократную подачу газа-теплоносителя через движущуюся многослойную массу окатышей либо вниз сверху, либо вверх снизу. Для подачи потока газа-теплоносителя под

подвижными колосниковыми тележками расположены специально сконструированные камеры. В них создаётся: или избыточное давление (тягодутьевые камеры), или разрежение (вакуум-камеры) [20]. При движении многослойная масса окатышей последовательно проходит теплотехнологические зоны.

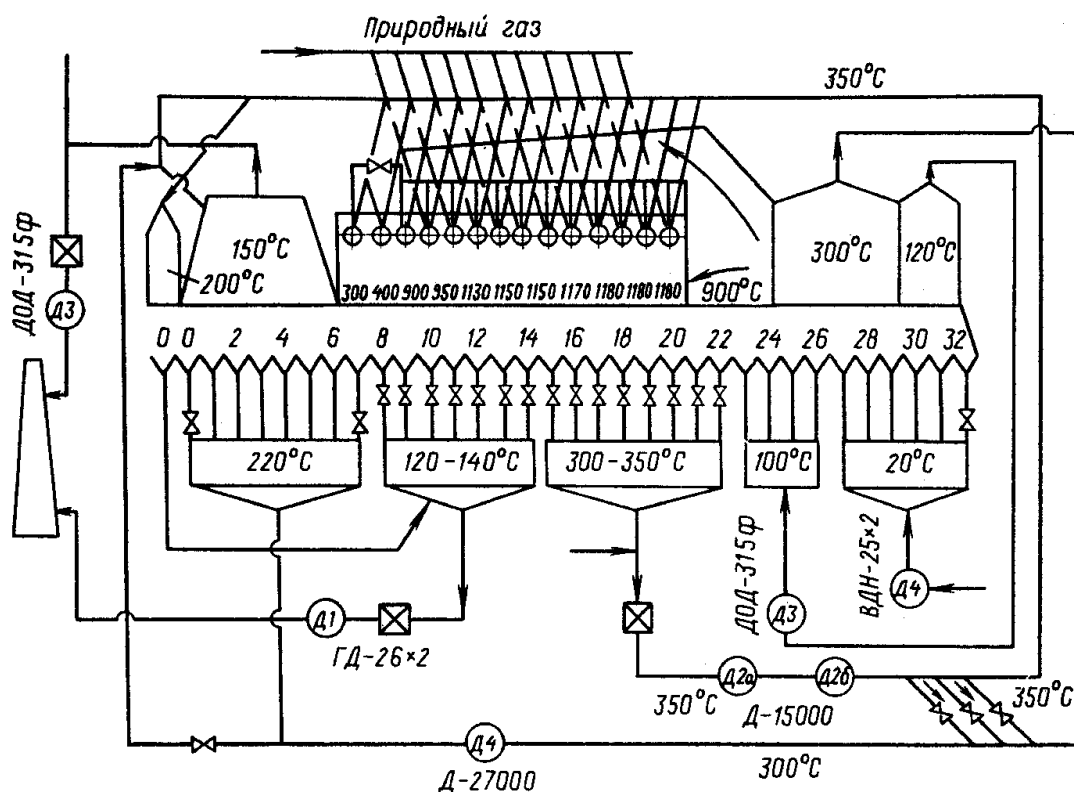


Рис. 1.2.2. Схема потоков и температур газа-теплоносителя в обжиговой конвейерной машине типа ОК-520/536Ф

Зона сушки состоит из трёх подзон (I, II, III), которые различаются газодинамическими и температурными характеристиками газа-теплоносителя. Сушка окатышей обеспечивается газом-теплоносителем, отходящим от зоны подогрева и высокотемпературного обжига. Газ-теплоноситель поступает в подзону II из коллектора, там смешивается с воздухом до достижения необходимой температуры 900°C. Отработанный газ-теплоноситель из подзоны I после очистки дымососом подаётся в

дымовую трубу. Газ-теплоноситель из подзоны II поступает в сборный коллектор.

В технологической зоне подогрева завершается процесс сушки окатышей, расположенных в нижних горизонтах многослойной массы. Воздух для сжигания газа с температурой 350°C тягодутьевыми механизмами подается из технологической зоны рекуперации и зоны высокотемпературного обжига [21]. От коллектора подаётся высокотемпературный газ-теплоноситель (с расходом около 260 тыс.  $\text{м}^3/\text{ч}$ .) для смешивания продуктов сгорания топлива до необходимых температур. Для обеспечения прогрева нижних горизонтов многослойной массы окатышей до температуры 1150°C температура в горне поддерживается в диапазоне 1100-1200°C.

Зона рекуперации – это неотапливаемая технологическая зона, в которой осуществляется перенос тепла из верхних, более нагретых, в нижние горизонты многослойной массы окатышей. Газ-теплоноситель – это воздух из технологической зоны охлаждения [22].

Для зоны охлаждения применяется нереверсивная схема подачи воздуха на охлаждение массы окатышей по всей зоне, которая состоит из двух подзон. Охлаждение в подзоне I выполняется высокотемпературным газом-теплоносителем из технологических зон обжига, подогрева и рекуперации посредством коллектора прямого тока. После температура газа-теплоносителя снижается. Окончательное охлаждение многослойной массы окатышей до температуры 80 - 100°C производится с помощью подачи атмосферного воздуха. Газ-теплоноситель очищается от пыли в электрофилт্রে и выбрасывается в атмосферу. Известно, что примеси, которые содержатся в переточном газе-теплоносителе, частично адсорбируются «постелью» и сырыми окатышами. Это позволяет снизить их содержание в выбрасываемом в атмосферу из-под колпака технологической зоны сушки газе-теплоносителе [23].

Режимы функционирования сложной ХЭТС - конвейерной обжиговой машины характеризуются следующими показателями: качеством кондиционных обожженных окатышей, постоянной массой загрузки сырых окатышей, стабильным тепловым функционированием горна, неизменной высотой вертикальной укладки многослойной массы сырых окатышей при минимальных изменениях скорости движения конвейера, постоянством температур в горнах и газовоздушных камерах, незначительным содержанием мелочи при выгрузке обожженных окатышей [24]. При несоблюдении этих условий необходима корректировка режима термообработки путем изменения регулируемых параметров – тепловой и аэродинамический функциональный режим ХЭТС [25].

В зависимости от стабильного качества термической обработки фосфоритовых окатышей затраты энергии в руднотермической печи могут сильно различаться [26]. Использование качественного и обработанного фосфатного сырья позволяет снизить расход электрической энергии и кокса на восстановление фосфора в руднотермических печах на 12% и 40% соответственно [27].

### **1.3 Системный анализ потенциала повышения энергоресурсоэффективности ХЭТС производства окатышей**

Электротермический метод производства жёлтого фосфора конкурентоспособен с химическими способами и удовлетворяет необходимым главным требованиям: высокая температура, восстановительная среда, высокая чистота конечного продукта. ХЭТП химической электротермии очень энергоемки (около 81-84% в общих затратах производства - это электрическая энергия для руднотермических печей и электрооборудования) [28].

Способы термической обработки фосфатного сырья определяют затраты тепловой и электрической энергии и могут существенно их различать. Для



дисперсного кускового фосфорита и окатышей удельный расход электроэнергии в руднотермической печи 14,8 МВт·ч/т и 14,2 МВт·ч/т соответственно, затраты на привод электросиловых агрегатов 1,4 и 2,4 МВт·ч/т, удельный расход условного топлива для термической обработки фосфатного сырья 0,3 и 1,9 ТУТ/т, удельные затраты восстановителя в руднотермических печах 2,3 и 1,6 ТУТ/т [29].

Расход энергии увеличивается при утилизации фосфоритовой мелочи в фосфорную муку для получения сырых окатышей. На сегодняшний день применяются три основные химико-энерготехнологические схемы термообработки фосфатного сырья: обжиг дисперсного кускового сырья, фосфоритовых окатышей и агломерирование мелкой фракции (фосмуки) [30].

Энергоресурсоэффективность ХЭТП зависит от возможности оптимального управления физико-химическими превращениями, протекающими в фосфоритовом сырье при термоподготовке и переработке на основе интенсификации ТМП [31]. Оптимизация ХЭТП и интенсификация ТМП зависит от глубины исследований и широты восприятия всей картины превращений в данной теплотехнологии [32].

Основанием для глубокого исследования ХЭТП обжига является низкая эффективность использования энергии и ресурсов в агрегатах фосфорной промышленности [33]. Так, значения коэффициента использования мощности руднотермических фосфорных печей при их долговременной эксплуатации приведены в таблице 1.3.1.

Таблица 1.3.1. Значения коэффициента использования мощности руднотермических фосфорных печей

$K_M$	Тип руднотермической печи
0,68	РКЗ - 48Ф
0,52	РКЗ - 72Ф
0,46	РКЗ - 80Ф

Низким является и коэффициент использования календарного времени  $K_M \approx 0,85$ . Усугубляет положение то, что при уменьшении относительно номинальной мощности стремительно повышается удельный расход электрической энергии с 14,6 до 20,1 МВт·ч/т [34].

В ХЭТП термической подготовки фосфоритовых окатышей допускается значительная доля возврата и низкая прочность готовых окатышей. С учётом обеднения руд научно-прикладная проблема создания высокоэнергоресурсоэффективных ХЭТП для повышения производительности теплотехнологического оборудования и ХЭТС в целом или для поддержания в современном уровне становится актуальной в химической и металлургической обогатительной промышленности [35, 36].

Определение оптимальных требований проведения ХЭТП на существующем оборудовании в ХЭТС - проблема довольно сложная, дорогая по стоимости из-за большого количества факторов, оказывающих влияние на окончательный результат – готовый продукт [37]. Поэтому предпочтительно использование экспериментальных лабораторных установок и многомасштабного математического и компьютерного моделирования ХЭТП и аппаратов, целиком химико-технологических схем и нахождение на основе разработанных моделей оптимальных режимов функционирования оборудования и воздействий на ХЭТП для увеличения их эффективности [38 - 44]. Использование детерминированных математических моделей предпочтительнее стохастических. Они позволяют более обосновано использовать все взаимозависимые параметры, влияющие на ХЭТП и на конечный продукт. Детерминированный подход подразумевает серьёзное и глубокое исследование всех химических реакций теплофизических превращений, характеристик фосфатного сырья, промежуточных соединений и изменений, которые происходят на всех этапах многостадийных ХЭТП [45 - 49].

Для промышленной переработки сложного рудного неоднородного сырья в жёлтый фосфор 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 [50-54].

Сохраняющийся тренд снижения качества фосфоритного сырья при отсутствии энергоресурсоэффективных методов его термической подготовки приводит к снижению технико-экономических характеристик электротермического способа производства жёлтого фосфора [55]. Кроме этого, половина сырья теряется при добыче руды, транспортировке и предварительной обработке в виде некондиционной мелочи [56 - 58].

Значения удельных расходов тепловой и электрической энергии, затрачиваемых на производство окатышей и агломерацию, приведены в таблице 1.3.2.

Таблица 1.3.2. Значения удельных расходов энергии на производство окатышей и агломерацию

	Удельный расход энергии на одну тонну продукта	
	агломерат	окатыши
Электроэнергии, кВт·ч	32,7	58,6
Условного топлива, кг	67	32,85

По расходу тепловой энергии ХЭТП обжига фосфоритовых окатышей более экономичен по сравнению с агломерацией [59].

Разрабатываемые многомасштабная математическая и компьютерная модели и алгоритмы оптимального управления ХЭТС производства фосфоритовых окатышей и многостадийной оптимизации по критерию энергоресурсоэффективности (см. рис. 1.3.1) с учетом сложной структурной схемы управления ХЭТС (см. рис. 1.3.2) иерархически включают в себя различные уровни.

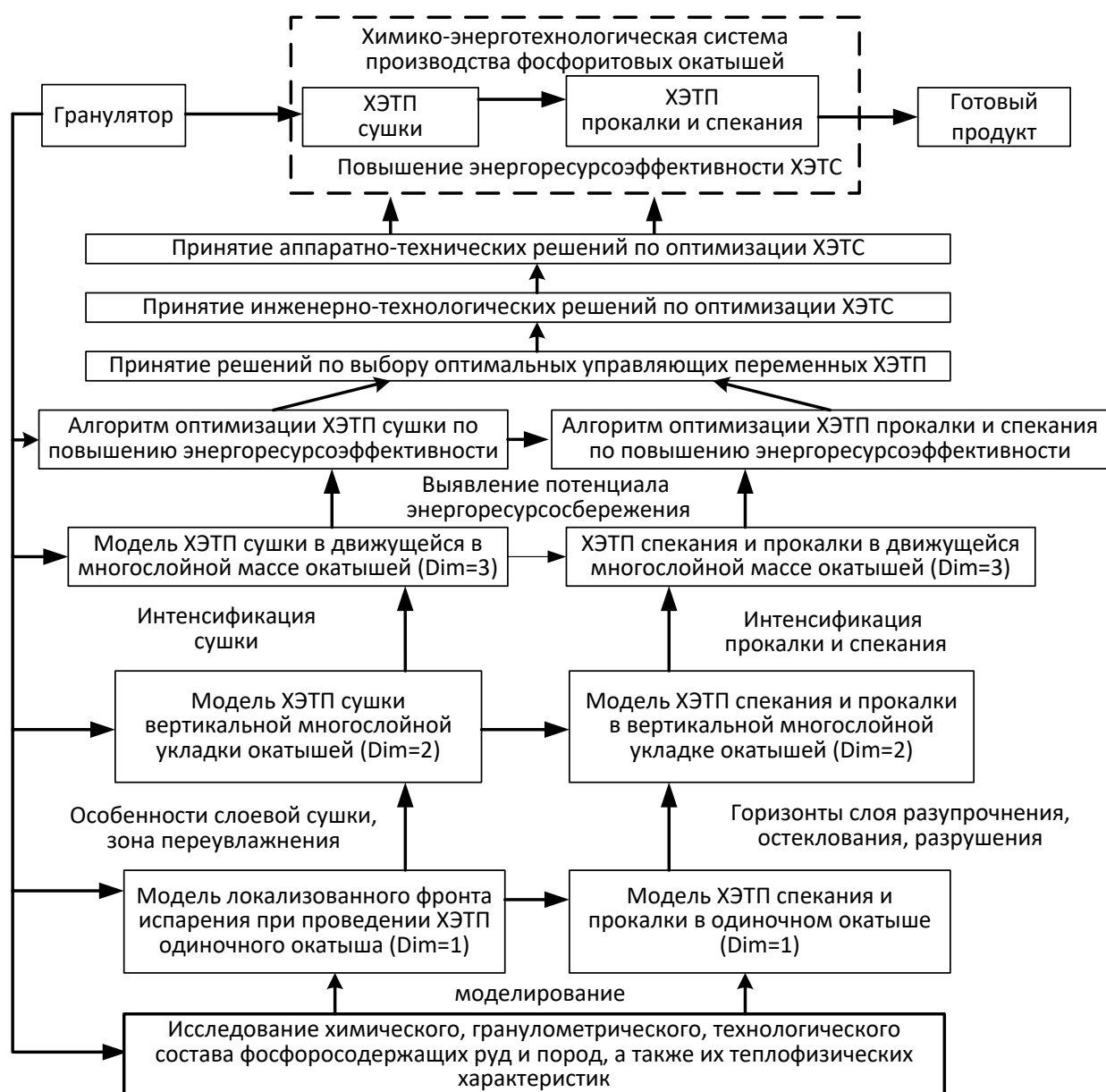


Рис. 1.3.1. Упрощённая блок-схема алгоритма многомасштабного моделирования и многоуровневой оптимизации ХЭТС производства фосфоритовых окатышей

Наличие различных уровней определяет следующие обстоятельства. Во-первых, формирование критерия энергоресурсоэффективности ХЭТС обжига фосфоритовых окатышей, предполагает учет таких показателей как: завершенность ХЭТП сушки (среднее по высоте многослойной укладки влагосодержание окатышей на выходе зоны сушки); завершенность ХЭТП прокаливания (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.

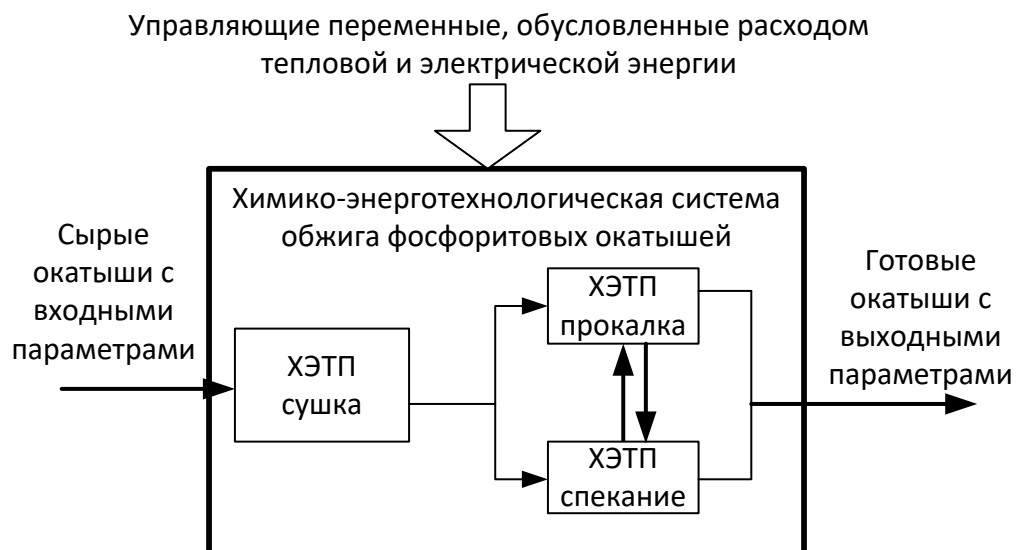


Рис. 1.3.2. Структурная схема ХЭТС производства фосфоритовых окатышей

Во-вторых, необходимо провести дискретизацию ХЭТС по времени пребывания движущейся многослойной массы в различных локальных вакуум-камерах с использованием выбранного критерия повышения энергоресурсоэффективности и реализации процедуры дискретного динамического программирования.

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

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

Изучение электропроводности и термических деформаций фосфоритов и фосфатно-кремнистых разностей – часть общей проблемы изучения технологических свойств сырьевых материалов фосфорной промышленности с целью их рационального использования [60 - 65].

Имеющиеся данные для электропроводности фосфоритов и флюсующих добавок по моделированию и расчётам электротермических агрегатов используются при разработке современных теплотехнических схем термической обработки фосфатного сырья [66 - 70].

Известно, что электропроводность добываемого рудного сырья существенно зависит от состава, структурных особенностей, состава вредных примесей, химико-технологических и теплофизических превращений, происходящих при нагреве [71, 72]. Таким образом, сравнительно простой и точный метод определения электропроводности может быть использован в исследованиях структуры и состава руд и пород, а также при изучении физико-химических превращений, происходящих в них при нагреве [73-75].

Существенный фактор, влияющий на выбор наиболее рационального метода переработки сырья и определения пределов интенсификации теплообмена в промышленных установках обжига, - растрескивание сырьевого материала при нагревании [76]. Это явление, в совокупности с особенностями расширения рудных минералов при нагревании, существенно зависит от теплового расширения сырьевых материалов [78].

Термические расширения в области высоких температур, сопутствующие размягчению и плавлению фосфатного сырья, влияют на газодинамические характеристики верхней зоны фосфорной печи и, соответственно, на ход печного процесса электровозгонки фосфора [79 - 85].

Кроме того, термические расширения отражают физико-химические, модификационные и структурные превращения в сырье при его нагреве и могут использоваться при изучении этих процессов [86 - 90].

Исследования температурных зависимостей электропроводности и термических расширений проводились по разработанной автором методике [90 - 95].

На рисунке 1.4.1 приведены типичные кривые зависимости электропроводности фосфоритов от температуры (проба 1) при скоростях нагрева 0,11К/с и 0,33К/с.

Исследования электропроводности широкого класса фосфоросодержащих руд и пород, характеризующихся широким диапазоном изменения состава, свидетельствует о значительном влиянии количественного содержания основных породообразующих минералов [96-99]. На рис. 1.4.2а представлены зависимости электропроводности от суммы концентраций CaO, MgO и SiO<sub>2</sub> для двух температурных сечений 1000 и 1500К, на рис. 1.4.2б – от суммы концентраций примесей Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Наблюдается также существенное влияние примесей на электропроводность [100 - 105].

Дилатометрические исследования показывают, что фосфориты с содержанием P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>>10% имеют подобный характер зависимости относительных удлинений от температуры [106 – 110].

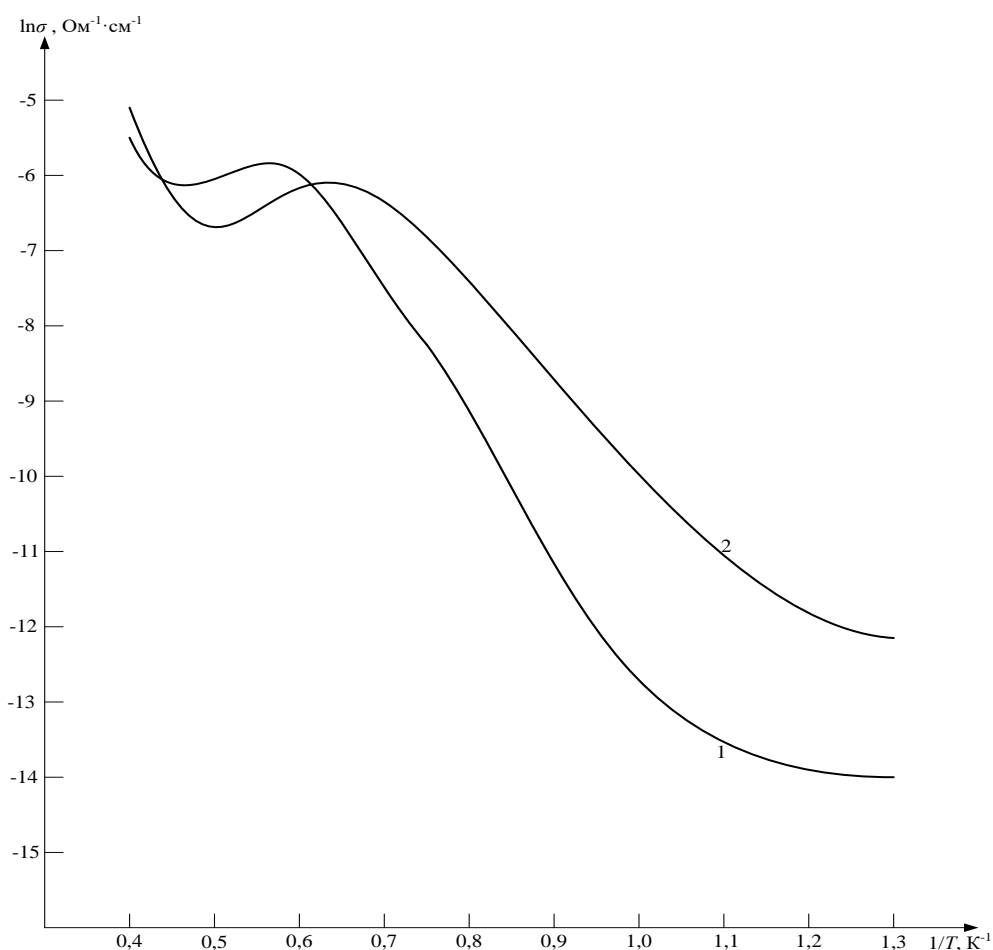


Рис.1.4.1. Зависимость электропроводности фосфоритов от температуры: (1) при скорости нагрева 0,11К/с, (2) при скорости нагрева 0,33К/с

Типичный характер зависимостей относительных удлинений фосфоритов и фосфатизированных доломитов ( $P_2O_5=3\%$ ) приведен на рис. 1.4.3.

На температурной зависимости термических расширений фосфоритов можно выделить четыре участка.

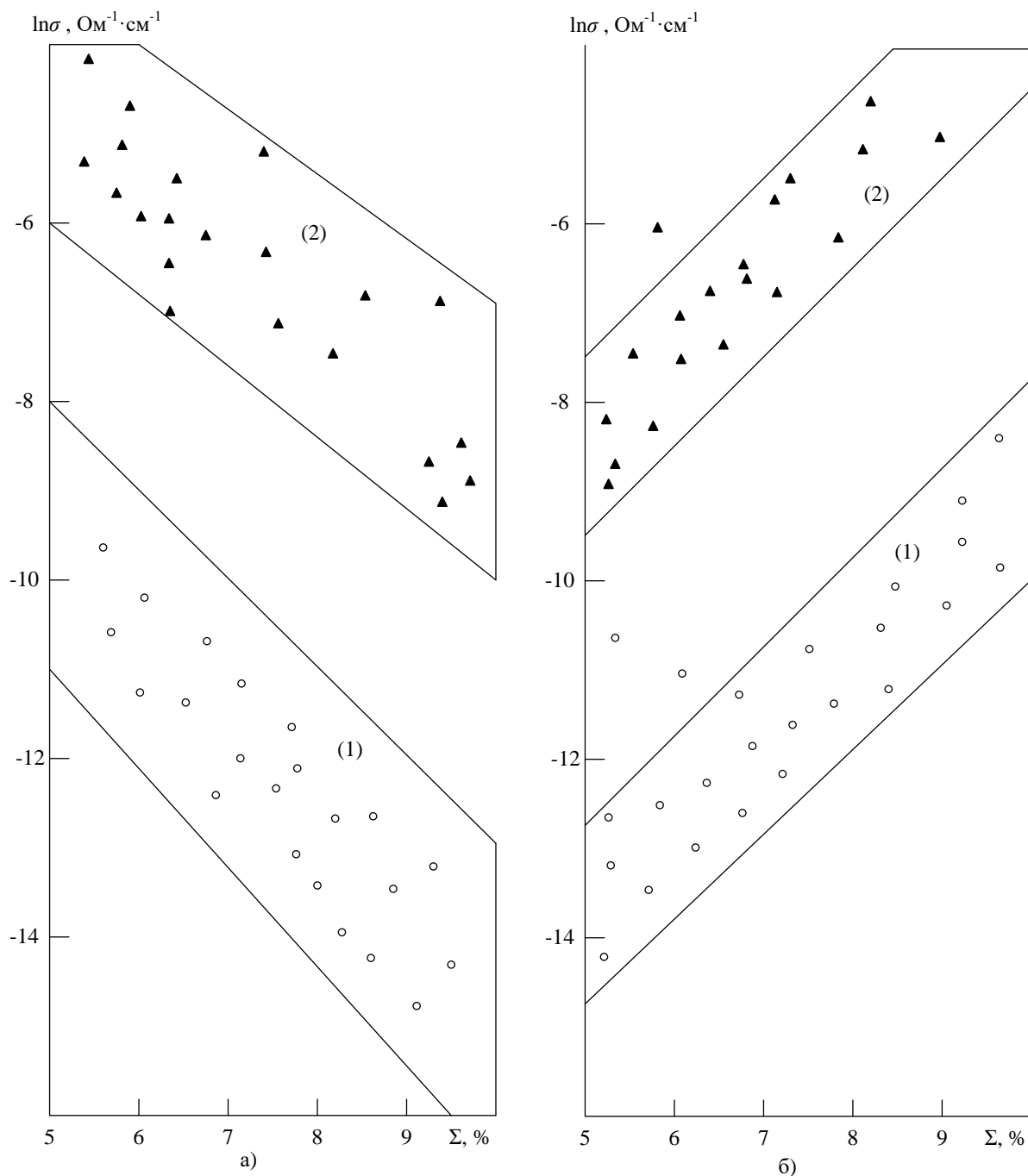


Рис. 1.4.2. Зависимость электропроводности фосфоритов от концентрации породообразующих минералов (а) и примесей (б). Области (1) и (2) соответствуют 1000К и 1500К. (а):  $\Sigma$  – сумма концентраций



породообразующих минералов CaO, MgO, SiO<sub>2</sub>; (б):  $\Sigma$  – сумма концентраций примесей Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

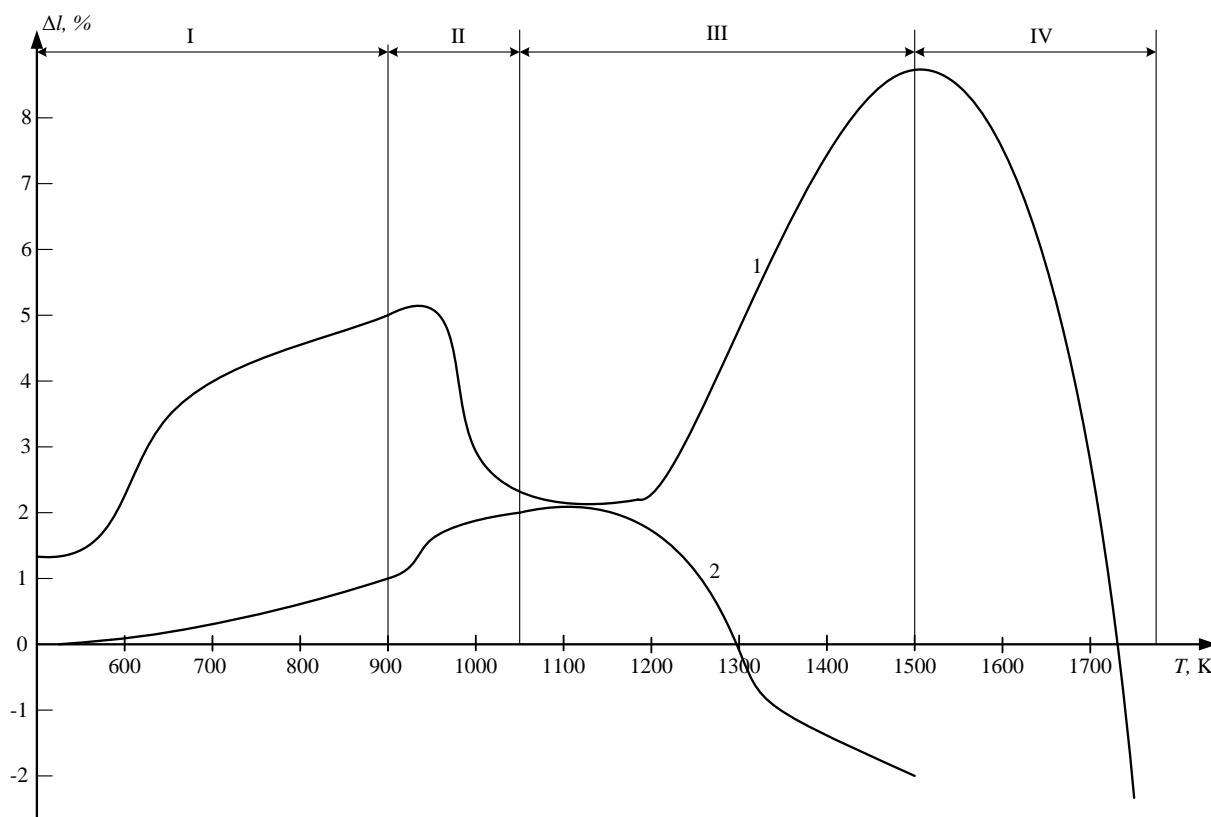


Рис. 1.4.3. Зависимость относительных удлинений от температуры:  
1 - фосфорит, 2 – фосфатизированный доломит

- Первый (от 300 до 800K) – наблюдается относительно небольшие удлинения до 0,5-1%. Температурная зависимость близка к экспоненциальной.
- Второй (800-900K) – имеется излом кривой с последующим возрастанием удлинений по аналогичному закону.
- Третий (1050-1100K) – форма кривой повторяется при достаточно больших градиентах.
- Четвёртый (1400-1700K) – переход к отрицательным деформациям, связанным с размягчением материала и его сдавливанием приложенным усилием (давление на образец в экспериментах составляло  $10^5$  Па).

При отмеченных температурах наблюдается абсолютный максимум температурной зависимости относительных удлинений [111 – 114]. Величина максимума с повышением содержания  $P_2O_5$  возрастает [115 – 119]. Зависимости максимальных относительных удлинений от концентрации представлены на рис. 1.4.4. Фосфориты с одинаковым содержанием  $P_2O_5$  обладают большим расширением при более высоком содержании карбонатов, хотя у карбонатов в чистом виде в этой области температур расширения малы или имеют отрицательный знак [120 – 125].

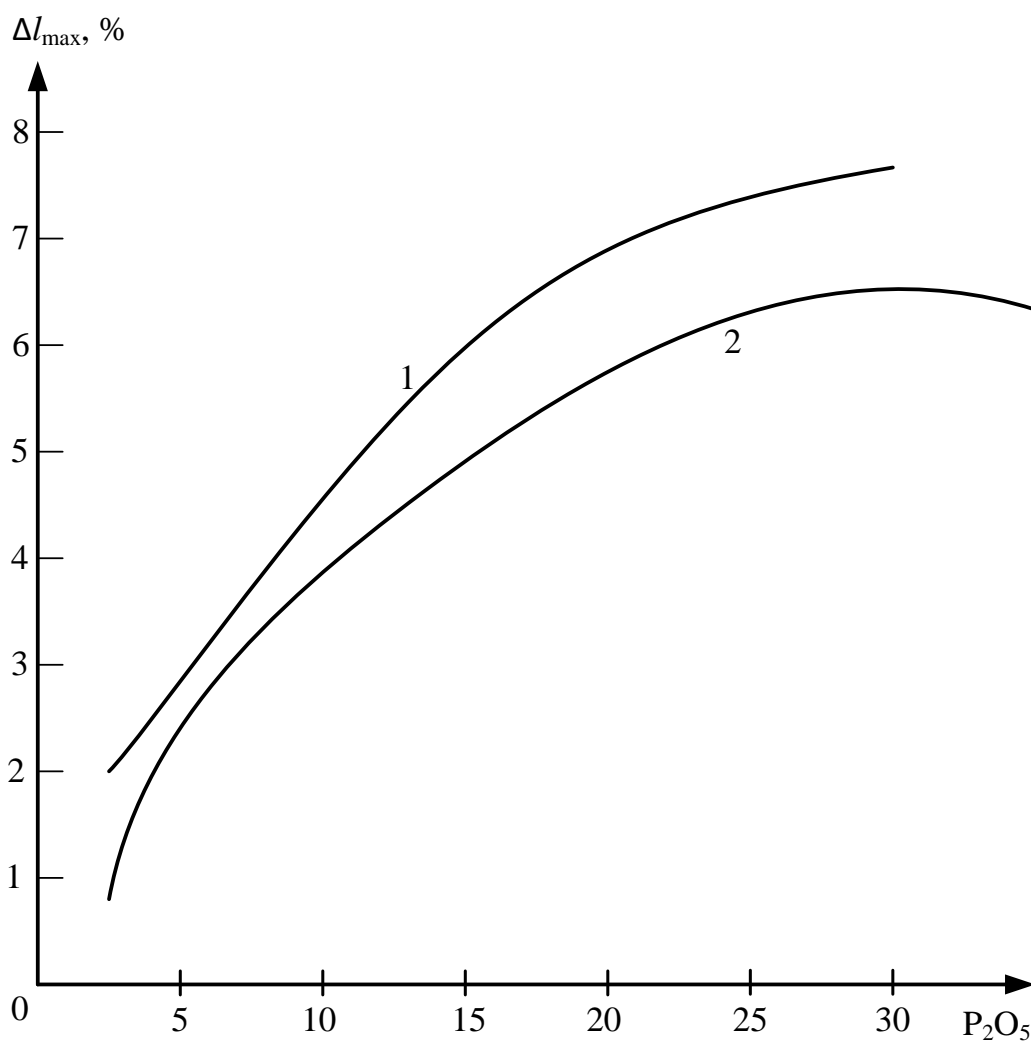


Рис. 1.4.4. Зависимость максимальных относительных удлинений фосфоритов от концентрации  $P_2O_5$ : 1, 2 – содержание  $CO_2$  от 10% до 13% и от 2% до 4% соответственно

Исследования термических расширений при значительных нагрузках на исследуемый образец дают достаточно объективную картину на низкотемпературных участках и достоверные значения температуры начала размягчения материала, но не отражают объёмные расширения образцов при высоких температурах, так как измерительный орган при размягчении материала вдавливаясь в исследуемый образец [126, 127]. Для оценки коэффициентов объёмного расширения при разгруженном состоянии образца, то есть способности зерен фосфорита расширяться и заполнять межзеренное пространство шихты в верхней зоне фосфорной печи, проведены исследования при давлении на образец со стороны измерительного органа до 500Па. Исследования проводились в нейтральной газовой среде [128 – 130].

Результаты химических анализов образцов, их исходная (кажущаяся) плотность и значения естественного модуля кислотности  $M_K$ , рассчитанного по формуле:

$$M_K = \frac{g_{\text{SiO}_2} + g_{\text{Al}_2\text{O}_3}}{g_{\text{CaO}} + g_{\text{MgO}}},$$

приведены в таблице 1.4.1.

Таблица 1.4.1. Значения исходной плотности и естественного модуля кислотности для различных проб

	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CaO	MgO	CO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	НО	ρ, кг/м <sup>3</sup>	M <sub>K</sub>
П1	21,7	44,2	8,0	19,1	2,9	0,3	0,2	0,5	0,7	-	2850	0,066
П2	1,1	1,8	-	0,4	93,4	-	11,0	11,0	2,0	11,0	2630	-
П3	32,66	47,89	2,06	4,39	8,21	11,0	11,0	11,0	0,65	11,0	3000	0,17
П4	21,05	34,44	4,0	9,76	23,51	1,06	0,3	0,53	0,86	24,7	2850	0,68
П5	23,22	42,42	7,1	15,73	5,61	0,3	0,08	0,39	0,38	5,87	2900	0,13
П6	25,61	39,48	2,7	6,81	16,77	1,49	0,5	0,59	1,29	18,01	2900	0,425
П7	32,2	46,2	0,7	3,63	8,18	0,88	0,3	0,6	1,45	8,87	3050	0,177

Результаты исследований в виде кривых относительного удлинения образцов от температуры приведены на рис. 1.4.5. Зависимости термического расширения разгруженных образцов до 1200К практически не отличаются от аналогичных для образцов под нагрузкой.

Качественные различия термического расширения образцов при изменяемых нагрузках наблюдаются начиная с 1250К.

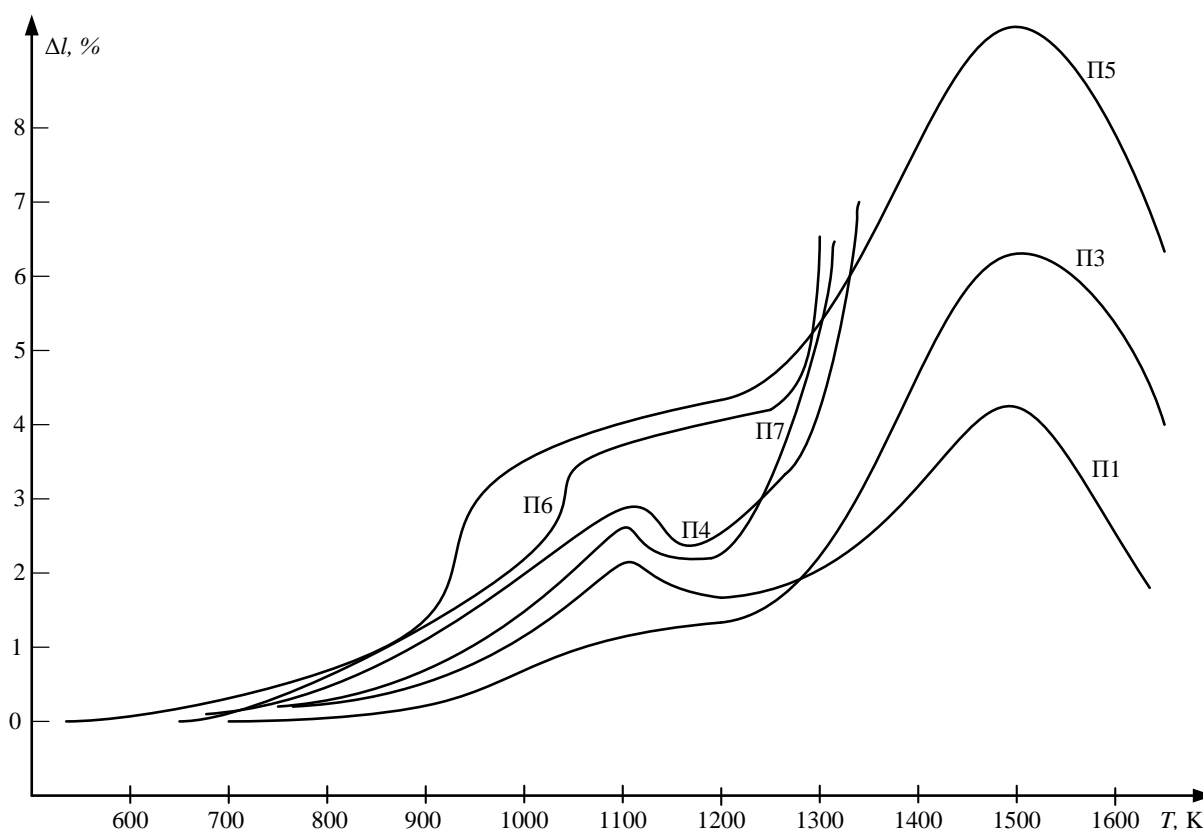


Рис. 1.4.5. Относительное термическое расширение кусковых фосфоритов и фосфатно-кремнистых разностей. Нагрев образцов со скоростью 15 (°С/мин)

При дальнейшем повышении температуры некоторые образцы сохраняют качественный характер зависимости (пробы: П1, П3, П5). Температурные деформации в этих образцах достигают максимума в интервале 1450-1550К и затем дают «усадку», сохраняя свою первоначальную форму с последующим размягчением и плавлением без вспучивания. Образцы с высоким естественным модулем кислотности

(пробы: П4, П6, П7) при 1300-1400К начинают терять исходную форму и переходят в расплавленное состояние во вспененном виде [131 – 138].

На основании приведенных исследований можно сделать следующие выводы и предположения.

- Характер температурной зависимости термического расширения в значительной степени определяется составом фосфоросодержащих руд и пород. Наименьшие деформации претерпевает сырьё, в котором карбонаты выполняют роль вещества, цементирующего оолиты фосфатов. С повышением содержания карбонатов деформации в высокотемпературной области увеличиваются [139].
- Фосфориты с высоким естественным модулем кислотности переходят в расплав, непрерывно увеличивая свои размеры, что обусловлено совмещением температурных диапазонов термической декарбонизации основного фосфатного вещества и образованием существенных в количественном отношении жидких фаз. Появление жидких фаз и сопутствующих этому качественных изменений структуры материала (от структуры с непрерывной газообразной фазой к ячеистой структуре с непрерывной твёрдой фазой) приводят к тому, что выделяющиеся в материале газы не могут удаляться, но способствуют росту пор и, соответственно, увеличению объёма материала [140].
- Переработка в фосфорной печи кусковых фосфоритов с высоким естественным модулем кислотности может вызывать явления, отрицательно влияющие на устойчивость работы печи. Вспучивание зёрен перед переходом в расплав снижает порозность слоя, ухудшает условия выхода газообразных продуктов из зоны реакции и может способствовать образованию газопроницаемого «свода», нарушающего теплообмен в электропечи и затрудняющего сход шихты в зону реакции [141].
- Не исключено, что при переработке фосфоритов с высоким естественным модулем кислотности резкие значительные термические расширения зерен фосфоритов и уплотнение слоя шихты при наличии жидкой фазы в

области сравнительно низких температур может сопровождаться появлением электропроводного слоя в верхней зоне фосфорной печи и, как следствие, образованием паразитной цепи тока, прогоранием оболочки электродов под зоной расплава и их обрывом, прогреванием оболочки печи [142].

Одним из путей повышения эффективности процесса обжига фосфоритовых окатышей принято считать совместную грануляцию с углеродосодержащими веществами. На влияние углерода в процессе обжига окатышей указывалось в работах [143, 144]. Имеется положительный опыт совместной грануляции и обжига фосфоритовой мелочи и топлива в промышленных установках. Однако отсутствие данных о специфике спекания, параметрах тепломассопереноса в отдельных гранулах такого типа и обжигаемом слое препятствует широкому внедрению этого прогрессивного энергосберегающего метода в практику [145].

Цель настоящих исследований – установление основных закономерностей процесса спекания фосфоритовой мелочи при совместной грануляции с коксом [146].

Для исследований использовался фосфорит с химическим составом, приведенным в таблице 1.4.2.

Таблица 1.4.2. Химический состав фосфорита

Компоненты	$P_2O_3$	CaO	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	CaO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>
Количественное содержание	31,25	41,94	1,12	3,97	1,99	14,68

По существующей классификации изучаемый материал может быть отнесён к субмономинеральной руде с зернистой структурой. Большая часть состоит из слабораскристаллизованного фосфорита и апатита [147]. Примеси составляют: гидроокислы железа, слюды, включения глины и т.п. [148].

Сырьё размалывалось в шарообразной барабанной мельнице. Результаты ситового анализа приведены в таблице 1.4.3.

Размолотое сырьё было разделено на три части. Из первой части изготавливалась контрольная партия окатышей без добавления связующего и кокса [149]. Вторая и третья части смешивались перед грануляцией с размолотым коксом в количестве 5% и 10% соответственно. Использовался металлургический кокс с выходом летучих 1,2%, содержанием серы 0,8%, зольностью – 13,5%. В состав золы входят:  $\text{SiO}_2$  – 49,45%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 32,04%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 9,45%,  $\text{CaO}$  – 2,69%,  $\text{MgO}$  – 0,86%.

Таблица 1.4.3. Результаты ситового анализа

Размер частиц, мм	Содержание, %
(0,157; 0,225)	6,92
(0,1; 0,157)	27
(0,071; 0,1)	27,2
(0,056; 0,071)	8,57
(0,045; 0,056)	18,05
менее 0,045	12,4

Окатыши производились на тарельчатом грануляторе диаметром 1м. Влажность готовых окатышей составила  $10 \pm 1\%$ .

Перед обжигом окатыши просушивались. Обжиг проводился в трубчатой печи, вентилируемой атмосферным воздухом. Температура обжига контролировалась по показаниям термопар, рабочие спай которых помещались на поверхности окатышей [150].

Обжиг осуществлялся по трём режимам.

Нагрев со скоростью 15 ( $^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ ) до 1000-1350( $^{\circ}\text{C}$ ) с последующей закалкой на воздухе (режим А).

Нагрев со скоростью 24 ( $^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ ) до 700-1350( $^{\circ}\text{C}$ ) с последующей закалкой на воздухе (режим В).

Обжиг при условиях, приближенных к условиям в обжиговой машине, – нагрев со скоростью 24 ( $^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ ) с последующей выдержкой при различных

температурах в течение 17 мин и охлаждение со скоростью 35 (°C/мин) (режим С).

Из необожжённых окатышей с различным содержанием кокса изготавливались образцы для термомеханического анализа (дилатометрии) в виде цилиндров диаметром 4мм и длиной 10-12мм.

Результаты исследования прочности на раздавливание окатышей, обожженных до различных температур с последующей закалкой, приведены на рисунке 1.4.6.

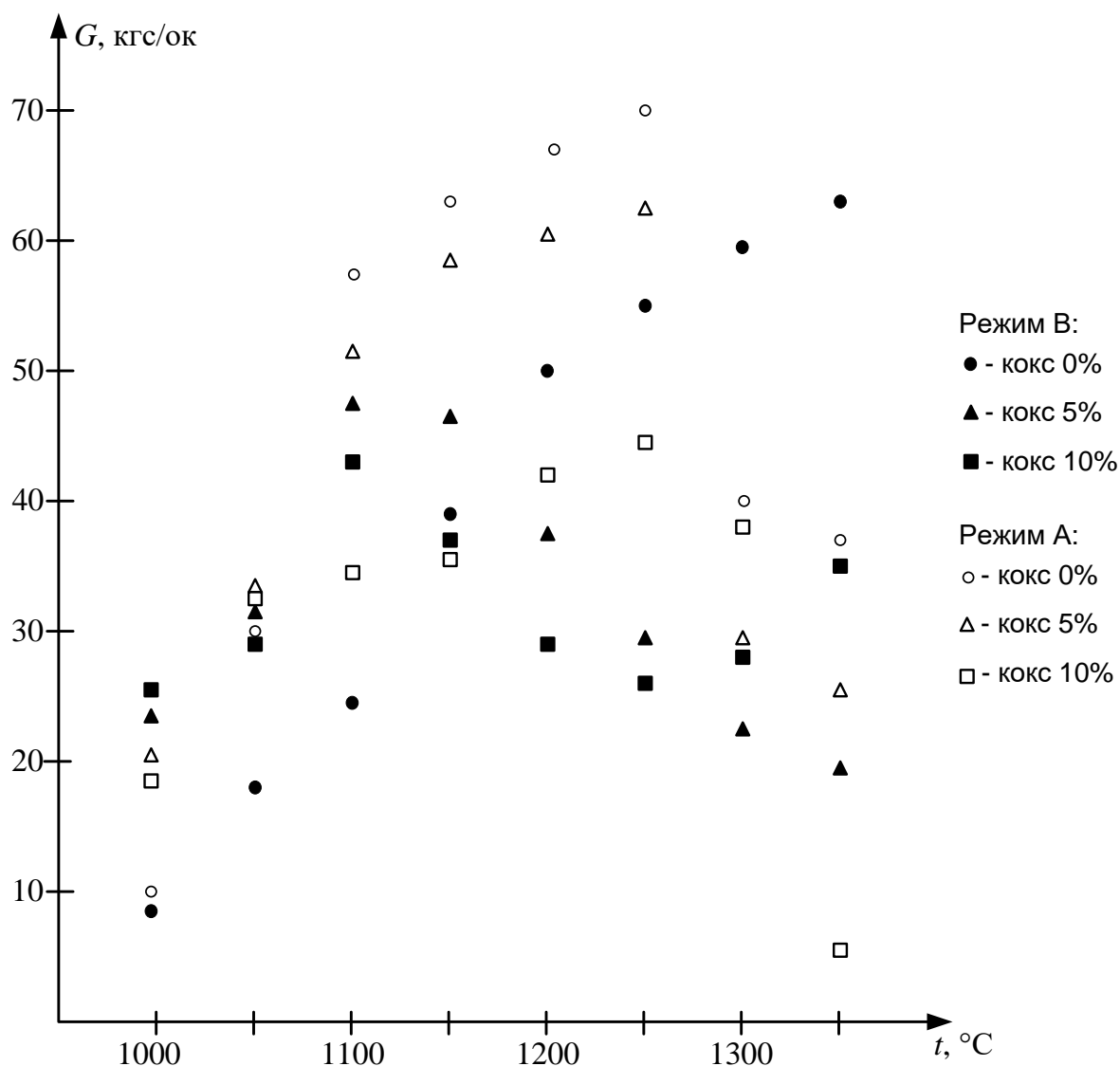


Рис. 1.4.6. Зависимость прочности окатышей на раздавливание от температуры обжига и содержания кокса



Зависимость прочности от конечной температуры обжига носит немонотонный характер. Резкое повышение прочности в интервале 1000-1100°C сменяется на сравнительно медленное (режим А) или снижение прочности (режим В) в интервале 1100-1250°C.

Характерно, что если при обжиге до 1000°C наибольшую прочность приобретают окатыши с 10% добавкой кокса, то начиная с 1050°C и выше наблюдается обратная зависимость прочности от содержания кокса [151]. Обжигу с меньшей скоростью соответствуют большие прочности окатышей [152].

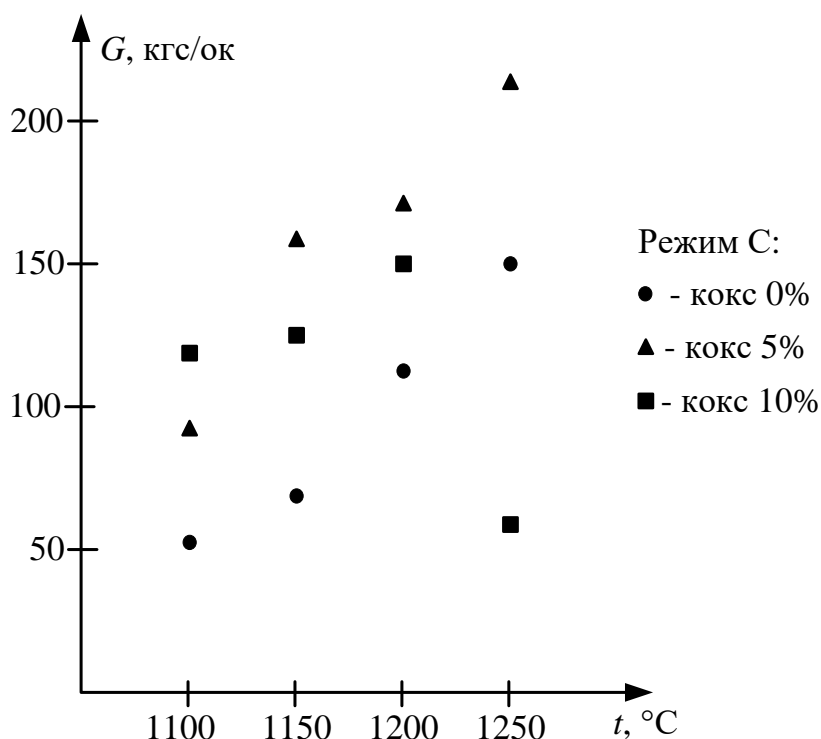


Рис. 1.4.7. Зависимость прочности окатышей на раздавливание от температуры обжига и содержания кокса. Режим С, обжиг с выдержкой и регламентированным охлаждением

Температурные зависимости прочности от температуры выдержки образцов при обжиге в режиме С приведены на рисунке 1.4.7. При обжиге с выдержкой и регламентированным охлаждением окатыши приобретают более высокую прочность. Изменяется и характер зависимостей прочности от температуры и содержания кокса. Прочность окатышей, обожженных при

сравнительно низких температурах (до 1030°C), практически линейно возрастает с повышением содержания кокса [153]. При более высоких температурах (1050-1250°C) наибольшую прочность имеют окатыши с 5% добавкой кокса. Характерным является резкое снижение прочности окатышей с добавкой 10% кокса в интервале 1210-1250°C.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что добавка кокса в целом неоднозначно сказывается на прочности окатышей [154].

Влияние выгорающего в теле окатыша кокса не ограничивается только дополнительным теплоподводом в спекающийся материал (положительный фактор) и повышением пористости в результате выгорания частиц кокса (отрицательный фактор), а имеет более сложный характер. Анализ этих закономерностей представляет практическую ценность. Так, добавление 5% коксовой мелочи в фосфатное сырьё позволит, помимо экономии природного газа, почти вдвое повысить прочность окатышей, обожженных до 1150-1180°C, без добавления дополнительных связующих добавок. Для получения окатышей того же качества можно снизить температуру обжига на 80-100°C соответственно.

Результаты измерений степени выгорания кокса  $\eta$  в зависимости от температуры обжига  $t$  приведены на рисунке 1.4.8. Степень выгорания определялась по размеру сферической зоны в теле окатыша, содержащей невыгоревшие частицы кокса. При повышенной скорости нагрева (режим В) наблюдается явление фиксации кокса – часть кокса прекращает выгорать, то есть при дальнейшем возрастании температуры или выдержке при постоянной температуре размер ядра окатыша, содержащего невыгоревший кокс, практически не изменяется.

Количество фиксированного кокса в экспериментах достигало 20-25% от исходного. Кажущееся снижение степени выгорания кокса при повышении температуры в отдельных образцах (см. рис. 1.4.8) обусловлено увеличением размера невыгоревшего ядра в результате вспучивания

материала окатыша с образованием крупных пор и пустот в центральной части.

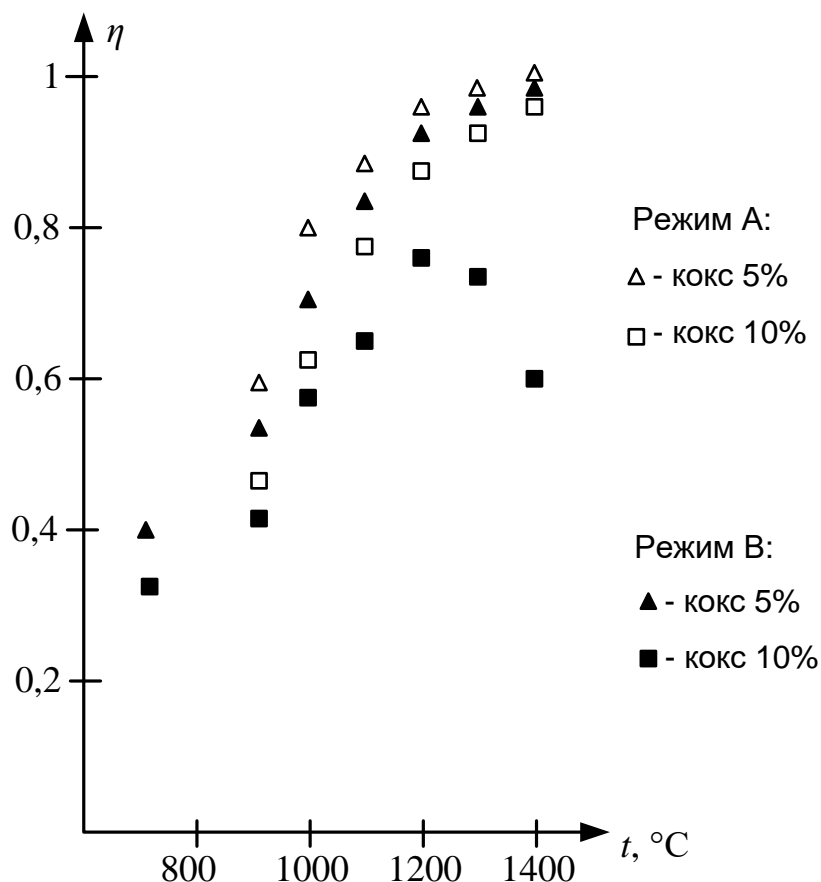


Рис. 1.4.8. Зависимость степени выгорания кокса от температуры и скорости нагрева при обжиге окатышей

Для выяснения механизма воздействия кокса на процесс спекания проведен термический анализ материала окатышей, в том числе термомеханический, дифференциально термический, термогравиметрический. Анализы проводились как в атмосфере воздуха, что соответствует условиям спекания в поверхностных слоях окатышей, доступных для окислительной атмосферы, так и в нейтральной среде азота — моделирование условий во внутренней части окатышей, недоступной для окисления.

Результаты термической гравиметрии приведены на рисунке 1.4.9. На термической гравиметрии можно выделить два основных участка:

первый от 100°C до 1350°C – процессы дегидратации и разложения карбонатов, потеря веса  $\Delta m$  составляет 2,5%;

второй от 850°C до 1350°C – потеря веса  $\Delta m$  связана с удалением  $\text{CO}_2$  из кристаллической решетки основного фосфатного вещества.

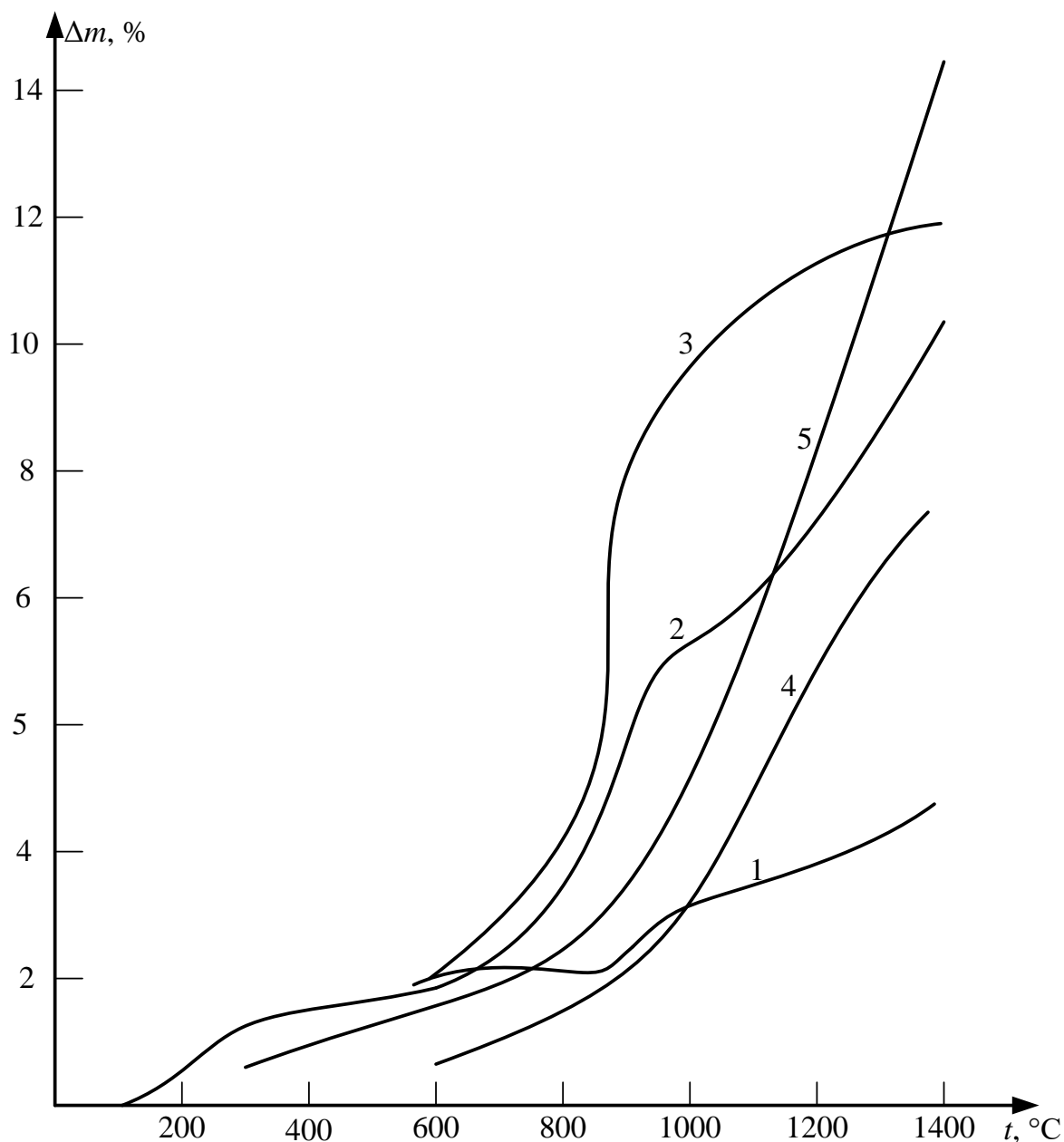


Рис.1.4.9. Кривые потери веса  $\Delta m$  материала окатышей в окислительной (1 – 0% кокса, 2 – 5% кокса, 3 – 10% кокса) и нейтральной (4 – 5% кокса, 5 – 10% кокса) средах. Скорость нагрева образцов 15 (°C/мин)

Кривые потери веса фосфоритов с добавлением кокса при прокатке на воздухе отличаются от нейтральной среды лишь тем, что в интервале 600-800°C наблюдается убыль веса на величину, соответствующую содержанию летучих и углерода в коксе. Присутствие кокса практически не изменяет характер декарбонизации фосфатного вещества, так как к моменту развития процесса декарбонизации кокс успевает выгореть. Качественно иной характер имеют кривые потери веса в случае, когда выгорания кокса не происходит. В нейтральной среде в присутствии углерода процесс декарбонизации основного фосфатного вещества протекает значительно интенсивней. При 1140°C (10% кокса) и 1200°C (5% кокса) наблюдается излом кривой термической гравиметрии, соответствующий началу процесса восстановления фосфора.

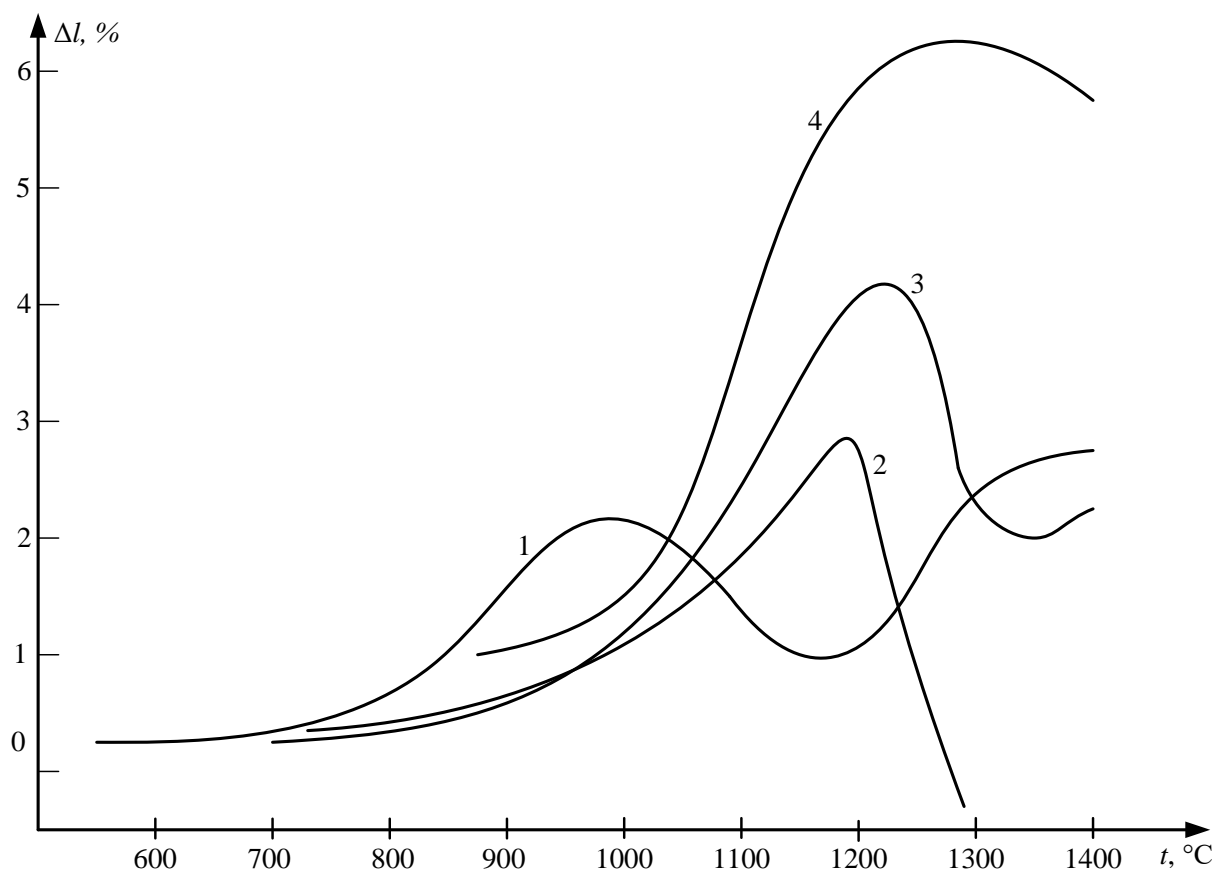


Рис. 1.4.10. Относительное термическое расширение материала окатышей по результатам термического анализа в окислительной (1 — 0% кокса, 2 — 5% кокса, 3 — 10% кокса) и нейтральной (4 — 10% кокса) средах

Анализ кривых термического расширения  $\Delta l$  (см. рис. 1.4.10) показывает, что материал окатыша из чистого фосфорита не претерпевает существенной усадки ни в процессе нагрева, ни при изотермической выдержке. Материал с добавкой 5% кокса при обжиге в окислительной атмосфере имеет существенно большее термическое расширение, но также даёт малую усадку. Около 3% усадки наблюдается в образце с 10% кокса при обжиге на воздухе в окислительной атмосфере. В нейтральной среде материал с коксом претерпевает значительную усадку начиная с 1170°C.

Проводился микролучевой анализ состава сырого фосфорита и материала окатышей, обожжённых до различных температур, представленный в виде отношения атомных количеств Са/Р. Анализ проводился на участках, различно удалённых от поверхности окатышей.

Анализы минералов, входящих в состав сырого фосфорита, показывают, что они весьма неоднородны по содержанию фосфора. Это свидетельствует о содержании в исследуемом фосфорите непрерывного ряда фторкарбонатапатитов, в которых отношение Са/Р изменяется от 2,17 (фторапатит) до 3,4 (фторкарбонатапатит). С повышением температуры обжига отношение увеличивается. При температуре выше 1100°C отчетливо прослеживается повышение отношения Са/Р в центральной части окатыша и снижение в поверхностных слоях.

При нагреве до 700°C существенных изменений в структуре обожжённых образцов не происходит. Признаки появления расплава наблюдаются только в местах, где присутствовали соединения железа. В окатышах, содержащих кокс, произошло выгорание кокса на небольшую глубину (1,2мм и 0,9мм в окатышах, содержащих кокс в количествах 5% и 10%, соответственно).

При обжиге до 900°C обломочная структура окатыша сохраняется. Заметны признаки декарбонизации фосфатных зёрен. В зёрнах фторкарбонатапатитов появляются мелкие продолговатые поры. Кокс выгорел на глубину 1,8мм при 5% начальном содержании, и 1,25мм при 10%

начальном содержании. Зерна кокса во внутренних слоях окатышей остались без изменений.

При обжиге до 1000-1050°C возрастает количество и размер пор в зернах фосфатного вещества. Эти зёрна разбухают, теряют свою начальную форму. Изменений в зернах апатита не наблюдается. В местах, где преобладают мелкие фракции, происходит слияние частиц с образованием расплава.

Контуры мелких зерен становятся неразличимы. Вместе с тем микролучевой анализ показывает значительные градиенты концентраций основных компонентов в зонах расплава. Структуры окатышей из чистого фосфорита и поверхностных слоев окатышей с коксом практически не отличаются, последние имеют большую пористость за счёт выгоревшего кокса. Вместе с тем в центральной части окатышей, где кокс ещё сохраняется без видимых изменений, разбухание зерен фторкарбонатапатита заметно сильнее. В центре этих образцов исходную обломочную форму сохраняют только зерна кварца и апатита.

Обжиг до 1100-1150°C способствует увеличению количества расплава. Выгорание кокса замедляется, границы выгорания, в зависимости от исходного содержания кокса и условий нагрева, находятся в пределах 2,5-4,5мм от поверхности. В центральной части окатышей с коксом интенсивно идёт коалесценция пор (округляются и уплотняются). Между зёрнами кокса и спёком образуется газовая прослойка.

Дальнейшее повышение температуры обжига сопровождается увеличением сплавления зерен. Размер пор возрастает. При этом структура поверхностных и внутренних слоев окатышей из чистого фосфорита отличается незначительно. Примерно такую же структуру имеют поверхностные слои окатышей с коксом. В центральной части окатышей с коксом оплавление значительно выше.

Начиная с 1200°C в центральной части присутствует практически однородный по составу расплав, в котором с помощью микролучевого

анализатора выделяются только отдельные зерна кварца, не успевшие перейти в расплав, и зерна невыгоревшего кокса.

Характерно, что процесс спекания в центральной части, содержащей коксовые частицы, как бы опережает на 100-150°C спекание окатышей без кокса и поверхностных слоёв окатышей с коксом, где последний успел выгореть при сравнительно низких температурах. Анализ микроструктуры образцов указывает на качественное отличие процессов спекания окатышей, содержащих невыгоревший кокс.

К числу наиболее существенных различий следует отнести формирование зон в теле окатышей, содержащих углерод. При обжиге в интервале 1000-1150°C в теле окатыша выделяются три зоны, имеющие качественные различия в структуре.

Поверхностная – процесс спекания протекает практически так же, как в контрольном образце, не содержащем кокс. Количество вещества, перешедшего в расплав, степень разложения зёрен основного фосфатного вещества, распределение пор по размерам близки для окатышей, содержащих кокс, и чистых образцов при одинаковых условиях нагрева: скорости, предельной температуре обжига и времени выдержки. Материал в основном сохраняет зернистую структуру.

Пограничная – степень спекания значительно выше, поры более однородные по размерам, значительно мельче и имеют округлую замкнутую форму. Поры, образовавшиеся в межзеренных пространствах, меньше, чем в первой зоне, а поры в зёрнах разлагающегося фосфатного вещества крупнее, чем в первой зоне.

Центральная – характеризуется значительно большей степенью спекания, чем предыдущие. При 1000°C и выше заметна коалесценция пор. При 1150°C и выше практически все вещество центральной части переходит в расплав однородного состава, за исключением крупных зёрен кварца, апатита и невыгоревшего кокса.

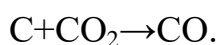


Сопоставление результатов термогравиметрического, термомеханического, структурного и микроручевого анализов позволили сделать следующее предположение о механизме влияния углерода на процесс спекания. При обжиге окатышей, содержащих свободный углерод, в окислительной атмосфере часть его, расположенная в поверхностных слоях (первая зона), выгорает. Это способствует ускорению нагрева зерен, но не видоизменяет температурную зависимость процесса спекания. По мере продвижения фронта горения его скорость уменьшается.

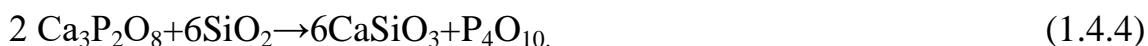
Это может быть объяснено снижением доступа кислорода в верхней части слоя и получением  $\text{CO}_2$  в реакции диссоциации карбонатов, образующих встречный поток от центра к периферии окатыша.

В последующем процессы в обжигаемых окатышах могут развиваться в двух различных направлениях, что подтверждается экспериментально.

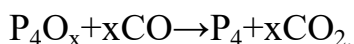
Выгоревший кокс вступает во взаимодействие с продуктами разложения карбонатов и основного фосфатного вещества по реакции:



Реакция сопровождается снижением парциального давления двуокиси углерода при реакции декарбонизации и, следовательно, интенсифицирует разложение карбонатов и основного фосфорита. Продукты диссоциации карбонатов в виде оксида кальция, главного фосфатного вещества в виде  $\text{Ca}_3\text{P}_2\text{O}_8$  или  $\text{PO}_4^{3-}$ , присутствующего в фосфорите кремнезема и невыгоревших частиц кокса в восстановительной атмосфере, могут вступать во взаимодействие при сравнительно низких температурах,  $800^\circ\text{C}$  и выше, по следующим реакциям:



Образующиеся в результате разложения (1.4.3), (1.4.2) или взаимодействия (1.4.1), (1.4.4) окислы фосфора вступают в реакцию с окисью углерода в соответствии с уравнением:



Фосфор и его окислы, а так же окись углерода сформировывают в теле окатыша поток горючего газа, направленный от периферии к поверхности. На определённом участке внутри окатыша развивается процесс окисления горючего газа диффундирующим кислородом из окружающей среды. Процесс сопровождается выделением тепла в локальном участке и его интенсивным разогревом. При этом возможно протекание частичного перехода продуктов разложения фторкарбонатапатита в другие соединения, в том числе легкоплавкие. Наличие указанных соединений подтверждается микролучевыми анализами.

Тетрофосфат кальция

$4CaO \cdot P_2O_5$  температура плавления около  $1700^\circ C$ .

Ортофосфат кальция

$3CaO \cdot P_2O_5$  температура плавления около  $1800^\circ C$ .

Метафосфат кальция

$CaO \cdot P_2O_5$  температура плавления около  $1360^\circ C$ .

Ортофосфат и пирофосфат кремния

$2P_2O_5 \cdot 3SiO_2$  [ $Si_3(PO_4)_4$ ],  $SiO_2 \cdot P_2O_5$  температура плавления около  $900-950^\circ C$ .

Внутреннее давление образующихся газов в центральной части окатыша оказывается достаточным для уплотнения локальной области внутри окатыша, имеющей сферическую форму. Формируется пограничная зона. В результате такого уплотнения возникает препятствие поступлению кислорода к внутренним слоям окатыша и удалению продуктов восстановительного процесса из центральной части. Выгорание кокса в центральной части прекращается. Если продолжить нагрев окатыша или выдержку при высокой температуре, происходит разрыв окатыша. Газы,

накопившиеся в центральной части, разрывают пограничную зону и выходят наружу, что можно наблюдать в ходе эксперимента.

Возможно протекание процесса по другому пути, при котором пограничная зона не формируется или, образуясь близко к центру окатыша, остаётся газопроницаемой, и процесс обжига приводит к полному выгоранию кокса.

Развитие процесса по первому или второму пути зависит от взаимодействия различных факторов. К их числу можно отнести: скорость нагрева, теплофизические свойства материала окатыша, уровни температур размягчения и плавления фосфорита, дисперсный состав фосфоритной муки.

Изучение процесса обжига окатышей, совместно гранулированных с углеродосодержащими веществами, представляется весьма перспективным. Определение оптимальных условий и режимов обжига таких окатышей, изучение способов управления процессами в обжигаемом слое позволит получать готовые окатыши более качественные и однородные по прочностным свойствам, существенно снизить долю возврата в обжиговой машине [155].

Кроме этого, повышается восстановительная способность окатышей, что в конечном итоге, будет способствовать снижению энергозатрат и повышению качества продукта при электровозгонке фосфора [156].

## **1.5 Выводы**

1. Системный анализ современных научных исследований сложных энерготехнологических объектов выявил, что в металлургической и горно-обогатительной промышленности предприятия с непрерывными химико-энерготехнологическими процессами являются крупнейшими потребителями различных видов топливно-энергетических ресурсов. Отличительной особенностью установок и производств указанных отраслей промышленности является наличие в их структуре ХЭТП,

функционирование которых сопровождается поглощением значительного количества теплоты.

2. Обоснован выбор научной проблемы для исследования сложной многостадийной ХЭТС – обжиговой конвейерной машины с оптимальными удельными расходами сырья, топливно-энергетических ресурсов, минимальным воздействием на окружающую среду на основе оптимального управления ХЭТП, интенсификации ТМП и режима функционирования ХЭТС и подсистемами, целесообразности в этой связи развития информационного и системного подхода, оперирующего критериями энергоресурсоэффективности.

3. Системный анализ сложной многостадийной ХЭТС для производства фосфоритовых окатышей позволил научно обосновать, что энергоресурсоэффективность ХЭТС определяется возможностью оптимального управления физико-химическими превращениями, протекающими в фосфатном сырье при термической подготовке и переработке на базе интенсификации тепломассообмена. В свою очередь управление и оптимизация ХЭТП и интенсификация ТМП зависит от степени их изученности, глубины понимания всей картины явлений в рассматриваемой технологии. Основание для более углубленного и системного исследования ХЭТП – низкая на сегодняшний день эффективность использования материальных, энергетических и вторичных ресурсов в процессах и аппаратах фосфорной промышленности.

4. С применением системного подхода исследована сложная ХЭТС обжига фосфоритовых окатышей как совокупность взаимосвязанных и взаимозависимых термически активируемых ХЭТП сушки, прокалки и спекания, обеспечивающих конечную прочность обожжённых окатышей. Все перечисленные процессы протекают с поглощением теплоты и являются весьма энергоёмкими. Выявлены кинетические параметры и определены эвристические константы для уравнений, описывающих эти ХЭТП.

5. Системный анализ современных методов принятия решений по оптимизации энергоресурсоэффективности ХЭТС и факторов, существенно влияющих на энергоэффективность тепловых аппаратов производства фосфоритовых окатышей, показал, что методы принятия решений по оптимизации можно условно разделить на три основные группы: сырьевые, технологические и конструктивно-теплообменные (или конструктивно-тепловые).

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

### **2.1 ХЭТП сушки окатышей как объект системного анализа и математического моделирования**

Удаление влаги при термически активируемом ХЭТП сушки окомкованного фосфатного сырья сопряжено с изменением ее связи с основой материала окатышей и поэтому затрачивается тепловая энергия [157 - 159].

Кинетика внутреннего влагообмена при ХЭТП сушки обеспечивается изменением концентрации паров воды в пограничном слое и температуры сушильного агента на поверхности влажного и сухого материала. Разность между этими концентрациями обеспечивает наличие потока водяного пара с поверхности окатыша [160, 161].

Использование экспериментальных данных для системного анализа внешнего энергообмена заменяет теоретические методы исследования. Экспериментальные исследования интенсивности тепломассообмена между поверхностью влажного окатыша и потоком газа-теплоносителя описываются как взаимосвязь критериев подобия [162 - 165].

Вид взаимосвязи критериев подобия определяется условиями взаимодействия газа-теплоносителя и поверхности влажного окатыша. Существуют различные выражения для аппроксимации этого взаимодействия, например, предложенные в [161]. Для описания интенсивности испарения влаги с поверхности неподвижной многослойной массы сферических окатышей в фильтрующийся через неё газ-теплоноситель предлагается зависимость в виде уравнения -  $Nu_m = 2,2 Re^{0,5} Pr_m^{0,33}$ , где

основополагающим размером является диаметр сферы окатыша, а скорость сушильного агента отнесена к полному сечению агрегата [162 - 166].

## 2.2 Математическая модель распространения локализованного фронта испарения в окатыше

Скорость испарения на внешней поверхности будет определяться мощностью тепловой энергии, подводимой к внешней границе окатыша [167 - 170]. Температура влажного ядра окатыша является постоянной внутри по радиусу и равной температуре мокрого термометра  $t_M$ , которая определяется свойствами окружающей среды. Скорость ХЭТП сушки зависит от отношения количества подводимой тепловой энергии к удельной теплоте фазового перехода при испарении  $Q_s$ :

$$-V\rho_m \frac{du}{d\tau} = \alpha F \frac{t - t_M}{Q_s}, \quad (2.2.1)$$

где  $V$  - объем,  $F$  - площадь поверхности испарения,  $\rho_m$  - плотность окатыша.

Традиционно предполагается, что время нагревания сырого окатыша достаточно невелико в сравнении с временем протекания процесса сушки, то есть, начальным условием в соотношении (2.2.1) будет:  $u|_{\tau=0} = u_0$  ( $u_0$  - влагосодержание материала окатыша в начальный момент времени) [171].

Для более общего случая необходимо учитывать при интегрировании уравнения (2.2.1), что влагосодержание и температура сушильного агента могут изменяться с течением времени, поэтому получается соотношение:

$$u = u_0 - \frac{\alpha F}{\rho_m V} \int_0^{\tau} \frac{t - t_M}{Q_s} d\tau. \quad (2.2.2)$$

Если же можно пренебречь изменением переменных  $t$ ,  $t_M$  и  $Q_s$ , то интегрирование соотношения (2.2.2) даст уравнение:

$$u = u_0 - \frac{\alpha F}{\rho_m V} \frac{t - t_M}{Q_s} \tau. \quad (2.2.3)$$

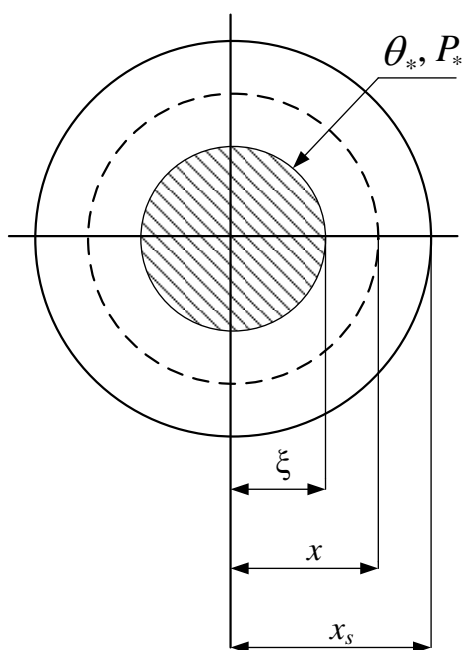


Рис. 2.2.1. Физическая модель распространения локализованного фронта испарения. Здесь:  $x$  - координата по радиусу окатыша,  $\xi$  - радиус локализованного фронта испарения

Полагается, что углубление локализованного фронта испарения жидкости по мере сушки окатыша происходит от его поверхности к центру. К фронту испарения тепловая энергия подводится теплопроводностью высушенной части материала окатыша (рис. 2.2.1.), и тепловая энергия используется для перевода жидкости в пар. Образовавшийся пар фильтруется от локализованного фронта испарения к внешней поверхности окатыша, так как в порах окатыша формируется давление с избытком [172]. Скорость сушки окатыша зависит от термического сопротивления и фильтрационного. Давление водяного пара и температура в окатыше в локализованном фронте испарения соотносятся друг с другом как параметры насыщенного водяного пара и устанавливаются в процессе сушки. Температура и давление паров влаги в сухой части окатыша описываются дифференциальными уравнениями:

$$\frac{d^2\theta}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{d\theta}{dr} = 0; \quad \frac{d^2P}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dP}{dr} = 0 \quad (2.2.4)$$



Для внешней поверхности сферы окатыша выполняется граничное условие первого рода:  $\theta|_{r=R} = t_0$ , а давление равно внешнему давлению окружающей среды:  $P|_{r=R} = P_0$ .

Для локализованного фронта испарения, в соответствии со сделанными предположениями, выполняются соотношения  $\theta|_{r=\xi} = \theta_*$  и  $P|_{r=\xi} = P_*$ , где взаимосвязь между давлением пара  $P_*$  и температурой  $\theta_*$  определяется уравнением насыщенного водяного пара.

Учет полученных граничных условий позволяет записать решение системы уравнений (2.2.4) в виде соотношений:

$$\theta = t_0 - (t_0 - \theta_*) \frac{\xi}{r} \frac{R - r}{R - \xi}, \quad (2.2.5)$$

$$P = P_0 - (P_0 - P_*) \frac{\xi}{r} \frac{R - r}{R - \xi}. \quad (2.2.6)$$

Подводящая теплопроводностью к локализованному фронту испарения тепловая энергия расходуется на фазовый переход жидкости в пар и соответствует уравнению баланса:

$$4\pi\xi^2\lambda\left.\frac{d\theta}{dr}\right|_{\xi} = 4\pi\xi^2\rho_m u_0 Q_s \frac{d\xi}{dr}. \quad (2.2.7)$$

Генерируемый на поверхности испарения пар удаляется фильтрацией через уже высушенную часть окатыша в соответствии с уравнением ламинарной фильтрации:

$$4\pi\xi^2\rho_p \frac{K}{\mu} \left.\frac{dP}{dr}\right|_{\xi} = 4\pi\xi^2\rho_m u_0 \frac{d\xi}{d\tau}. \quad (2.2.8)$$

В уравнениях (2.2.5), (2.2.8)  $\rho_p$  - плотность пара;  $\mu$  - динамический коэффициент вязкости пара;  $\rho_m$  - плотность материала;  $K$  - коэффициент проницаемости пара через часть высушенного материала окатыша.

Из уравнений (2.2.5) - (2.2.8) вытекает линейная зависимость между избыточным давлением и температурой на поверхности фронта испарения:

$$t_0 - \theta_* = \frac{KQ_s}{\mu\lambda} \rho_p (P_* - P_0) . \quad (2.2.9)$$

Если подставить уравнение (2.2.5) в соотношение (2.2.7) получится уравнение, которое описывает скорость распространения поверхности испарения в глубину к центру окатыша:

$$\rho_m u_0 Q_s \xi \frac{d\xi}{d\tau} = \frac{\lambda R (t_0 - \theta_*)}{R - \xi} . \quad (2.2.10)$$

Интегрируя с начальным условием  $\xi|_{\tau=0} = R$  уравнение (2.2.10), можно получить кинетическое уравнение, описывающее процесс сушки окатыша:

$$\frac{\gamma^{\frac{2}{3}}}{2} - \frac{\gamma}{3} = \frac{1}{6} - \frac{\lambda(t_0 - \theta_*)}{\rho_m u_0 r_c R^2} \tau , \quad (2.2.11)$$

где  $\gamma = (\xi / R)^3$  - относительная степень высушивания окатыша.

Время для завершения процесса сушки окатыша определяется из равенства  $\gamma = 0$ , то есть:

$$\tau_m = \frac{\rho_m u_0 Q_s R^2}{6\lambda(t_0 - \theta_*)} .$$

Дифференцируя уравнение (2.2.11), можно получить описание скорости протекания процесса:

$$\frac{d\gamma}{d\tau} = \frac{3\lambda(t_0 - \theta_*)\gamma^{\frac{1}{3}}}{\rho_m u_0 Q_s R^2 \left( \gamma^{\frac{1}{3}} - 1 \right)} . \quad (2.2.12)$$

Температура мокрого термометра  $t_M = \theta_*$  определяется соответствующим равенством:

$$t_M = T_g - 1916.6667 \cdot \{0.622 / [163.80016 \cdot \exp(-17.3 \cdot t_M / [t_M + 235]) - 1] - x_w\} \quad (2.2.13)$$

при известных температуре газа-теплоносителя в данной точке  $T_g$  и влагосодержании  $x_w$ .

Производились вычислительные эксперименты при соответствующем влажности сырых окатышей начальном влагосодержании  $u_0 = 10 \div 10,5\%$ . Радиус окатышей считался равным одному сантиметру, скорость подачи газа-теплоносителя полагалась 1,2 м/с.

Теплопроводность сферического окатыша определяется нелинейным уравнением:

$$\rho_m c_m \frac{\partial T_m}{\partial \tau} = \frac{1}{x^2} \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_m x^2 \frac{\partial T_m}{\partial x} \right) - Q_s \frac{\partial \gamma}{\partial \tau} \quad (2.2.14)$$

с начальными и граничными условиями:

$$\begin{aligned} \tau = 0, \quad T_m = T_{m0}, \quad u = u_0, \quad \gamma = 1; \quad x = 0, \quad \frac{\partial T_m}{\partial x} = 0 \\ x = x_s, \quad -\lambda \left( \frac{\partial T_m}{\partial x} \right) = \alpha_F (T_g - T_m)_{x=x_s}. \end{aligned}$$

Полученные результаты хорошо совпадают с описанными в литературе экспериментальными данными и известными качественными зависимостями (см. рис. 2.2.2 – 2.2.6). Таким образом, подтверждается адекватность предлагаемой модели распространения локализованного фронта испарения [173].

При температуре 100°C на рисунках 2.2.2 - 2.2.3 ярко выражено, что сушка не начинается, пока температура материала окатыша не достигает значений температур влажного термометра. Чем больше температура газового теплоносителя, тем интенсивнее протекает ХЭТП сушки. Из рисунка 2.2.3 особенно заметно ускоренное протекание процесса сушки в первые моменты времени, а затем его замедление. Это обусловлено тем, что сначала жидкость испаряется с поверхностных участков окатыша, а потом фронт испарения продвигается от поверхности внутрь к центру, и подвод тепловой энергии происходит через сухой участок окатыша.

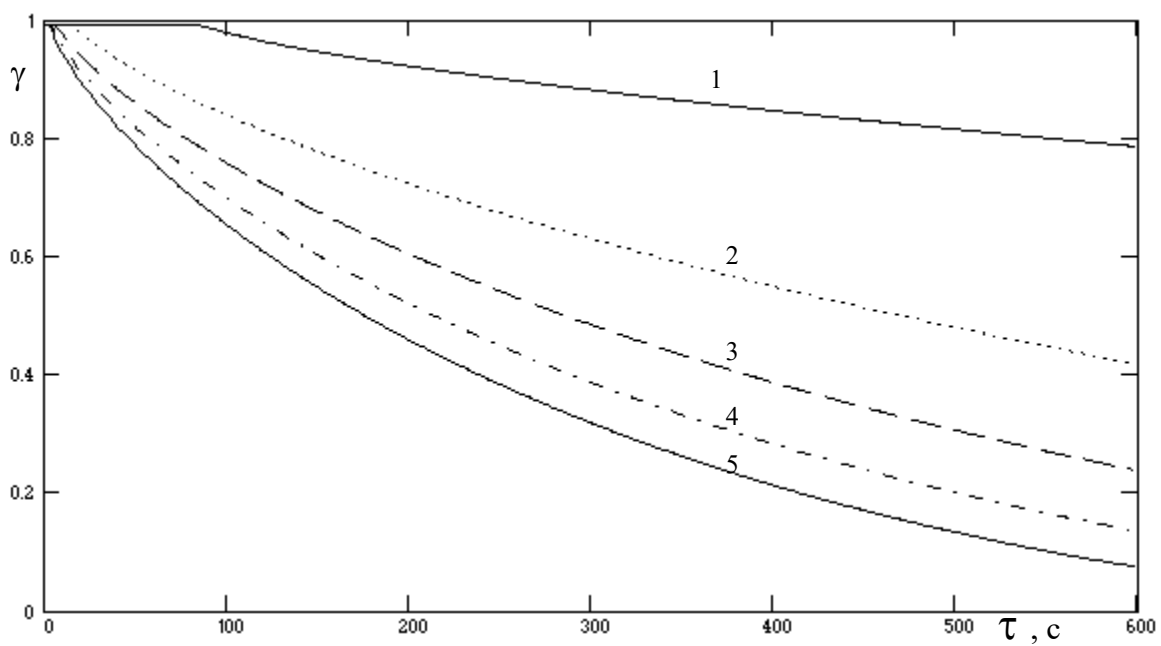


Рис.2.2.2. Изменение локализованного фронта испарения в окатыше по времени при различных температурах газа-теплоносителя: 1- 100°, 2 - 200°, 3 - 300°, 4 - 400°, 5 - 500°

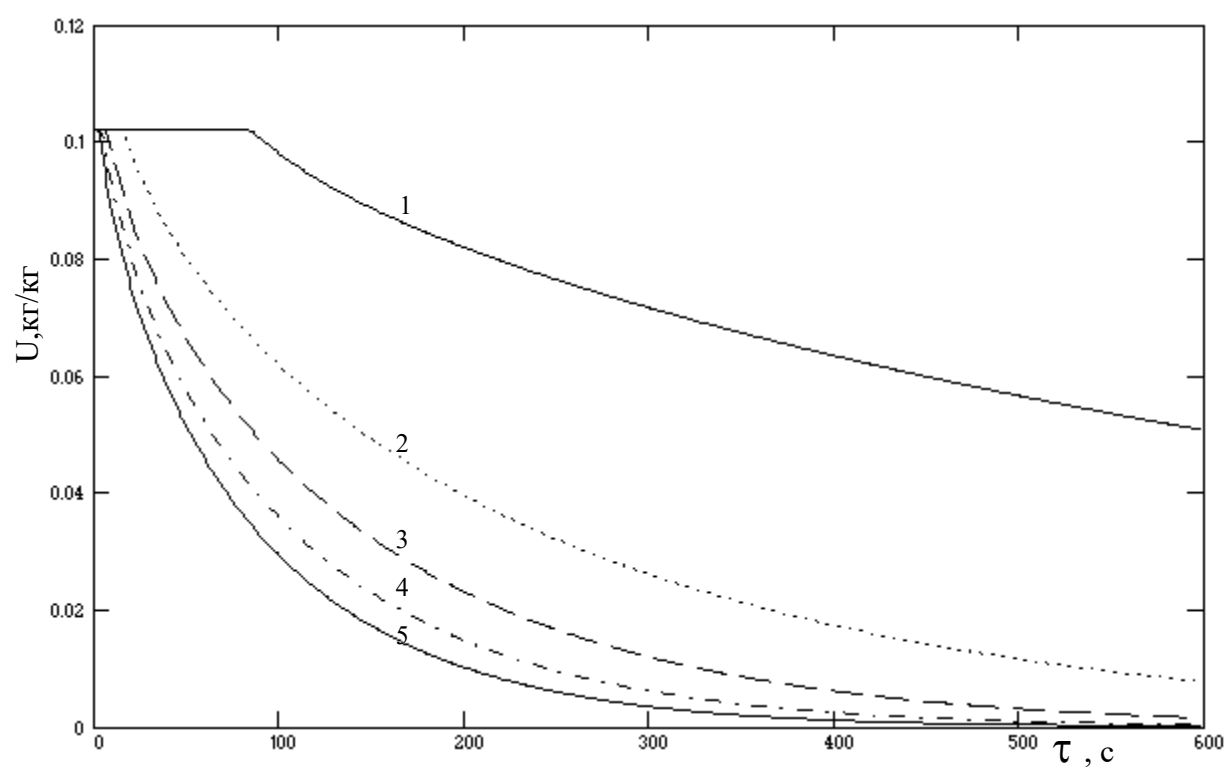


Рис.2.2.3. Влажность окатыша в зависимости от времени сушки при различных температурах газа-теплоносителя: 1- 100°, 2 - 200°, 3 - 300°, 4 - 400°, 5 - 500°

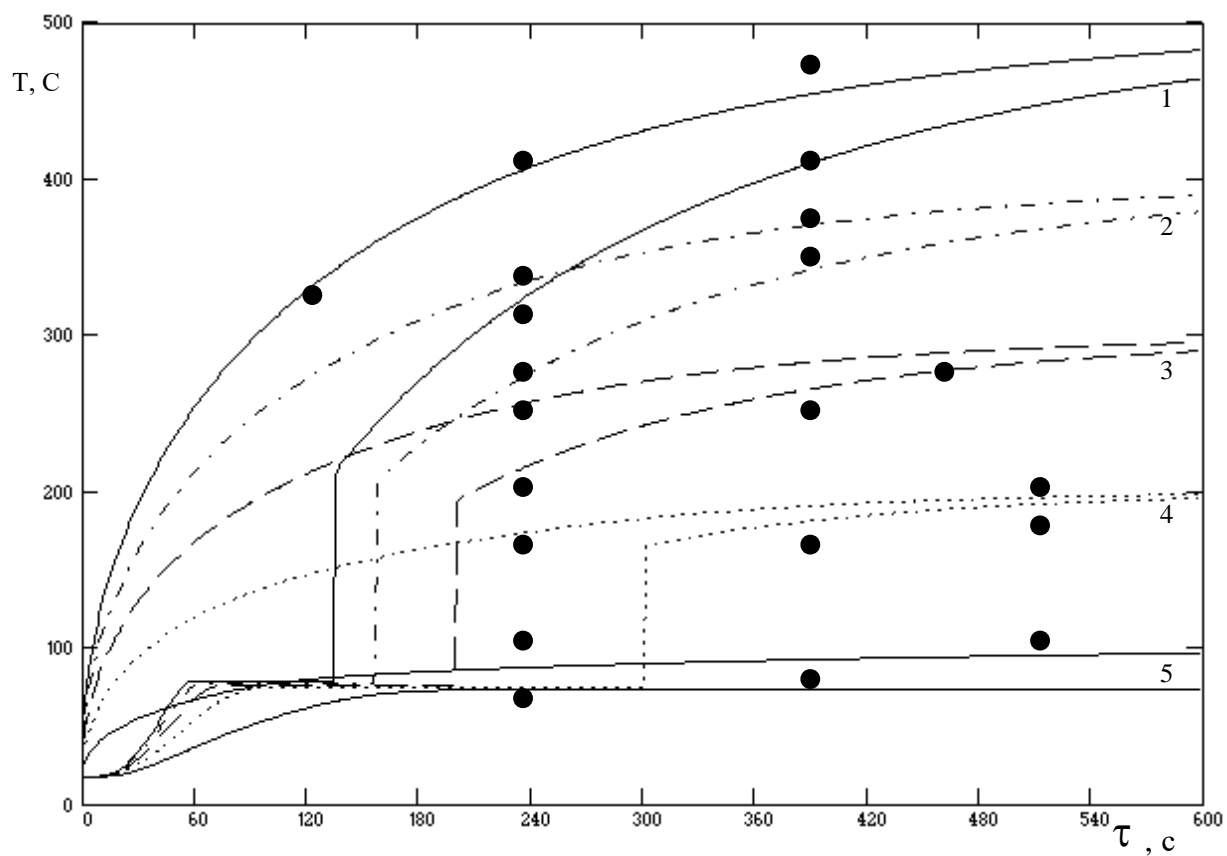


Рис.2.2.4. Температура материала окатыша на поверхности и в центре в зависимости от времени сушки при различных температурах газа-теплоносителя: 1- 100°, 2 - 200°, 3 - 300°, 4 - 400°, 5 - 500°

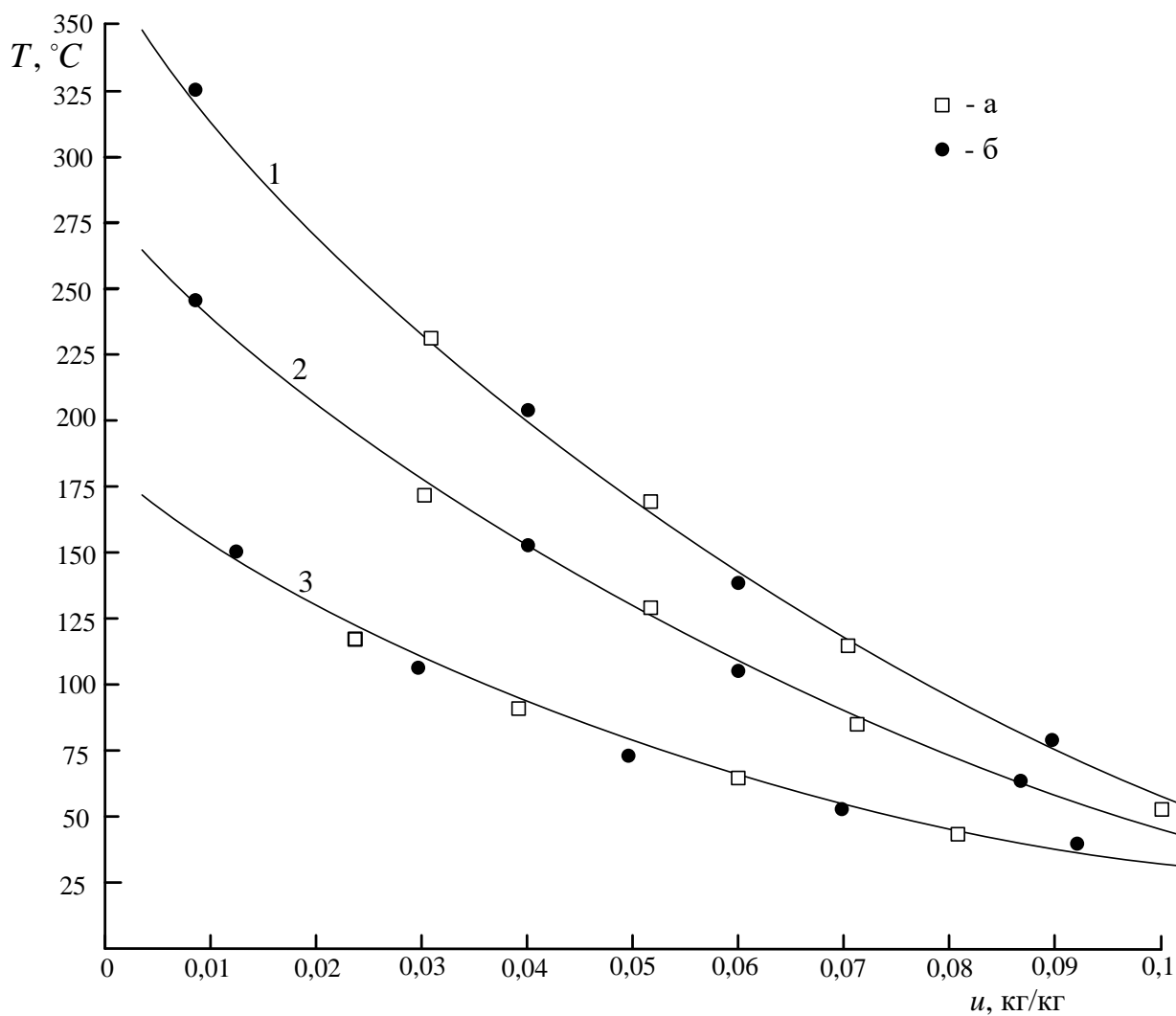


Рис. 2.2.5. Зависимость средней по радиусу окатыша температуры от влагосодержания при температуре газа-теплоносителя: 200°С – (3); 300°С – (2); 400°С – (1). Данные полученные в экспериментах: а) – центр окатыша, б) – его поверхность

Интенсивность потока влаги  $I$  через поверхность локализованного фронта испарения варьируется от  $4 \div 16 \cdot 10^{-3} \text{ кг(м}^2 \cdot \text{с)}$ .

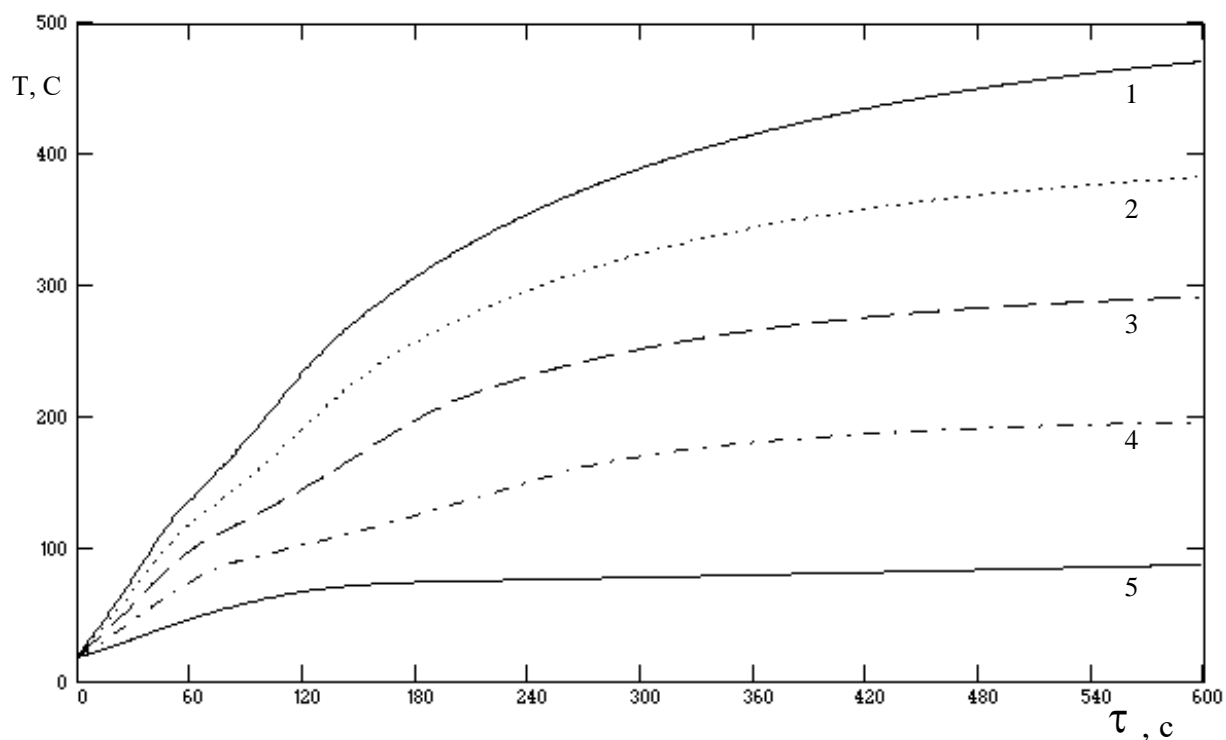


Рис.2.2.6. Зависимость температуры окатыша от времени при различных температурах газа-теплоносителя: 5- 100°, 4 - 200°, 3 - 300°, 2 - 400°, 1 - 500°

Из-за наружного большего по объему участку окатыша в первые минуты процесса сушки средняя по радиусу температура окатыша возрастает достаточно равномерно (рис. 2.2.6).

## 2.3 Математическая модель процесса сушки движущейся многослойной массы окатышей

Сложный химико-технологический процесс сушки включает три взаимосвязанных стадии: сушка каждого отдельного окатыша, сушка вертикальной многослойной укладки окатышей и сушка движущейся плотной многослойной массы окатышей в целом.

Обобщая ранее выполненные автором исследования процесса сушки отдельного сферического окатыша [174], можно установить, что теплоперенос осуществляется теплопроводностью при наличии эндотермического эффекта поглощения тепла на фазовый переход при

испарении:

$$\rho_m c_m \frac{\partial T_m}{\partial \tau} = \frac{1}{x^2} \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda x^2 \frac{\partial T_m}{\partial x} \right) - q(\omega), \quad (2.3.1)$$

где:  $T_m$  – температура;  $\rho_m$  – плотность;  $c_m$  – удельная теплоемкость;  $x$  – координата по радиусу сферы окатыша;  $\lambda$  – теплопроводность фосфоритовых окатышей;  $q$  – тепловой эффект процесса сушки (теплота фазового перехода при испарении влаги);  $\tau$  – время.

Для процесса сушки вертикальной многослойной укладки окатышей теплоперенос в потоке газа-теплоносителя осуществляется конвекцией по направлению подачи потока и описывается уравнением:

$$\rho_g c_g W_g \frac{\partial T_g}{\partial y} = \alpha_v (T_g - T_m)_{x=x_s}, \quad (2.3.2)$$

где:  $T_g$  – температура;  $\rho_g$  – 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.

Давление в потоке газа меняется по глубине слоя и равно:

$$\frac{\partial P}{\partial y} = 1500 \frac{(1 - \varepsilon_c)^2}{\varepsilon_c^3} \cdot \frac{W_g \mu_g}{(2r)^2} + 17.5 \frac{(1 - \varepsilon_c)}{\varepsilon_c^3} \cdot \frac{\rho_g W_g^2}{2r}, \quad (2.3.3)$$

где:  $P$  – давление;  $\varepsilon_c$  – порозность слоя;  $r$  – радиус окатыша;  $\mu_g$  – динамическая вязкость газа-теплоносителя.

Процесс массообмена влаги между окатышем и потоком газа:

$$\rho_g W_g \frac{\partial x_w}{\partial y} = \frac{\beta_w f_{уд} (P_{VR} - P_v)}{R_v T_g}, \quad (2.3.4)$$

$$\rho_m \frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{\beta_w f_{уд} (P_{VR} - P_v)}{R_v T_g}, \quad (2.3.5)$$

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



Процесс конденсации влаги на поверхности сферы окатыша осуществляется в состоянии насыщения влагосодержания газа-теплоносителя. Физическая модель распространения локализованного фронта испарения от поверхности к центру наиболее приемлема для влажных пористых окатышей в диапазоне температур газа-теплоносителя в зоне сушки (см. Рис. 2.3.1).

Давление на внешней сфере окатыша равняется атмосферному давлению:  $P|_{x=x_s} = P_0$ . На поверхности фронта сушки выполняются условия  $\theta|_{x=\xi} = \theta_*$  и  $P|_{x=\xi} = P_*$ , в которых взаимосвязь между давлением пара  $P_*$  с температурой  $\theta_*$  определяется из соотношения насыщенного водяного пара. Относительная степень высушивания окатыша равна:

$$\omega = \frac{\partial \psi}{\partial \tau} = \frac{3\lambda(t_0 - \theta_*)\sqrt[3]{\psi}}{\rho_m u Q_s r^2 (\sqrt[3]{\psi} - 1)}, \quad (2.3.6)$$

где:  $\psi = (\xi/x_s)^3$ ,  $Q_s$  – удельная теплота фазового перехода при испарении;  $\theta_*$  – температура влажного термометра;  $t_0$  – температура материала окатыша на границе  $x = x_s$ .

Начальные и граничные условия для описывающих процесс сушки всей движущейся многослойной массы окатышей дифференциальных уравнений (2.3.1-2.3.6) имеют вид:

$$\begin{aligned} \tau = 0, \quad T_m &= T_{m0}, \quad u = u_0, \quad \psi = 1; \\ x = 0, \quad \frac{\partial T_m}{\partial x} &= 0; \\ x = x_s, \quad -\lambda \left( \frac{\partial T_m}{\partial x} \right) &= \alpha_F (T_g - T_m)_{x=x_s}; \\ y = 0, \quad T_g &= T_{g0}(\tau), \quad P = P_0, \quad x_w = x_{w0}; \end{aligned}$$

где:  $x_{w0}$  – влагосодержание;  $T_{g0}$  – температура газа-теплоносителя на входе в слой;  $T_{m0}$  – начальная температура окатышей;  $P_0$  – барометрическое давление;  $\alpha_F$  – коэффициент теплоотдачи с поверхности.

Для численного решения системы уравнений (2.3.1 – 2.3.6) использован метод конечных разностей с числом разбиений радиуса окатыша  $N=30$ , высоты многослойной укладки  $M=110$  и времени  $K=110$ . Уравнение (2.3.1) в неявной конечно-разностной схеме имеет вид:

$$\rho_{mi,j}^k c_{mi,j}^k \frac{T_{mi,j}^k - T_{mi,j}^{k-1}}{\Delta \tau} = \frac{1}{x_i^2} \frac{1}{\Delta x^2} \left[ x_{i+1/2}^2 \lambda_{i+1/2,j}^k (T_{mi+1,j}^k - T_{mi,j}^k) - x_{i-1/2}^2 \lambda_{i-1/2,j}^k (T_{mi,j}^k - T_{mi-1,j}^k) \right] + q_{i,j}^k, \quad (2.3.7)$$

где  $\lambda_{i+1/2} = \frac{\lambda_{i+1} + \lambda_i}{2}$ ;  $\lambda_{i-1/2} = \frac{\lambda_i + \lambda_{i-1}}{2}$ .

Конечно-разностный вид уравнения (2.3.2) конвективного теплопереноса в газе-теплоносителе:

$$\rho_{gj} c_{gj} W_g \frac{T_{gj} - T_{gj-1}}{\Delta y} = \alpha_{vj} (T_{gj} - T_{mN+1,j}). \quad (2.3.8)$$

Конечно-разностный вид уравнения изменения давления газа-теплоносителя по высоте слоя (2.3.3):

$$\frac{P_j - P_{j-1}}{\Delta y} = 1500 \frac{(1 - \varepsilon_c)^2}{\varepsilon_c^3} \times \frac{W_g \mu_{gj}}{(2r)^2} + 17.5 \frac{(1 - \varepsilon_c)}{\varepsilon_c^3} \times \frac{\rho_{gj} W_g^2}{2r}. \quad (2.3.9)$$

Конечно-разностный вид для уравнений (2.3.4, 2.3.5):

$$\rho_{gj} W_g \frac{x_{wj} - x_{wj-1}}{\Delta y} = \frac{\beta_{wj} f_{y\partial} (P_{VRj} - P_{Vj})}{R_v T_{gj}}, \quad (2.3.10)$$

$$\omega = \frac{\psi_k - \psi_{k-1}}{\Delta \tau} = \frac{3 \lambda_{i,j} (T_{mN+1,j} - \theta_{*j}) \sqrt[3]{\psi_k}}{\rho_m u Q_s r^2 (\sqrt[3]{\psi_k} - 1)}, \quad (2.3.11)$$

а для уравнения (2.3.6), описывающего относительную степень высушивания окатыша, разностное уравнение можно представить так:

$$\rho_m \frac{u_k - u_{k-1}}{\Delta \tau} = \frac{\beta_{wj} f_{y\partial} (P_{VRj} - P_{Vj})}{R_v T_{gj}}. \quad (2.3.12)$$

В результате система уравнений (2.3.7-2.3.12) будет иметь упорядоченную ленточно-диагональную структуру и включать  $2 \cdot 10^5$  уравнений. Решение данной системы осуществлялось с использованием компьютерной программы, реализованной в среде Borland C++.

Полученные соотношения (2.3.7) позволяют решить задачу внутреннего теплообмена в сферическом окатыше, а в совокупности с уравнениями (2.3.8 – 2.3.12) полностью описать распределение температуры и влагосодержания окатышей и газа-теплоносителя в движущейся многослойной массе фосфоритовых окатышей.

Результаты расчета параметров сушки для обжиговой машины ОК-3-520/536Ф по разработанной авторами компьютерной модели на базе уравнений (2.3.7-2.3.12) хорошо согласуются с ее регламентными показателями (определенными с использованием метода наименьших квадратов) и качественно совпадают с многочисленными эмпирическими зависимостями [175].

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

Полученные в результате вычислительных экспериментов параметры высушивания: относительная степень сушки, температура окатышей, влагосодержание, интенсивность переноса влаги в окатышах, влагосодержание в движущемся плотном слое представлены на рис. 2.4.1 – 2.4.5.

Средняя по радиусу окатышей температура в многослойной массе приведена на рис. 2.4.1. Интенсивность ХЭТП сушки многослойной массы окатышей представлена на рис. 2.4.2. Уменьшение относительной степени сушки окатышей приведено на рис. 2.4.3, на котором изображены её изолинии.

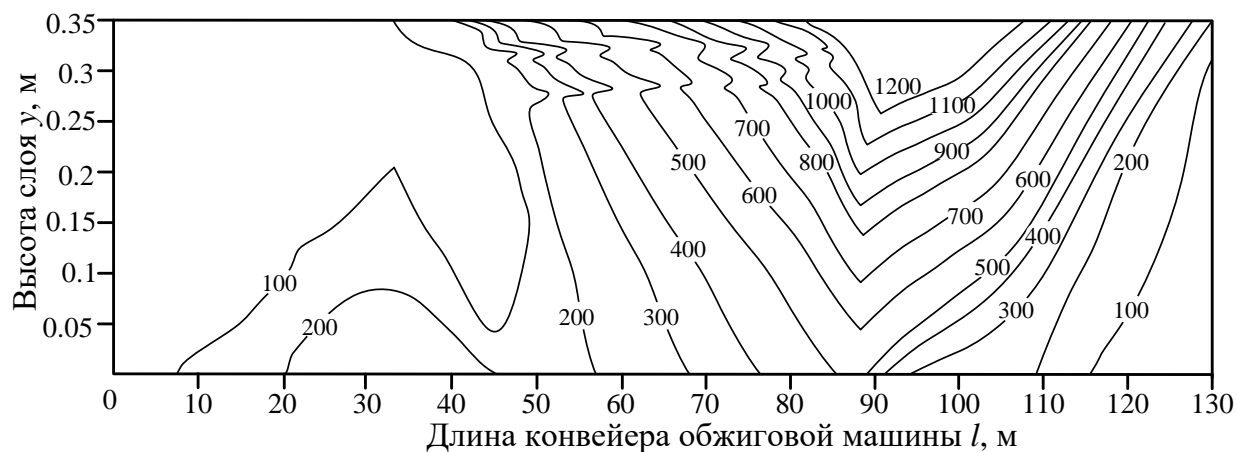


Рис. 2.4.1. Параметрическое семейство кривых, характеризующих среднюю по радиусу температуру материала окатышей в слое  $T_m$ , изменяющееся в интервале от 0 до 1



Рис. 2.4.2. Параметрическое семейство кривых, характеризующих интенсивность сушки материала окатышей в слое  $I$ ,  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}) \cdot 10^3$

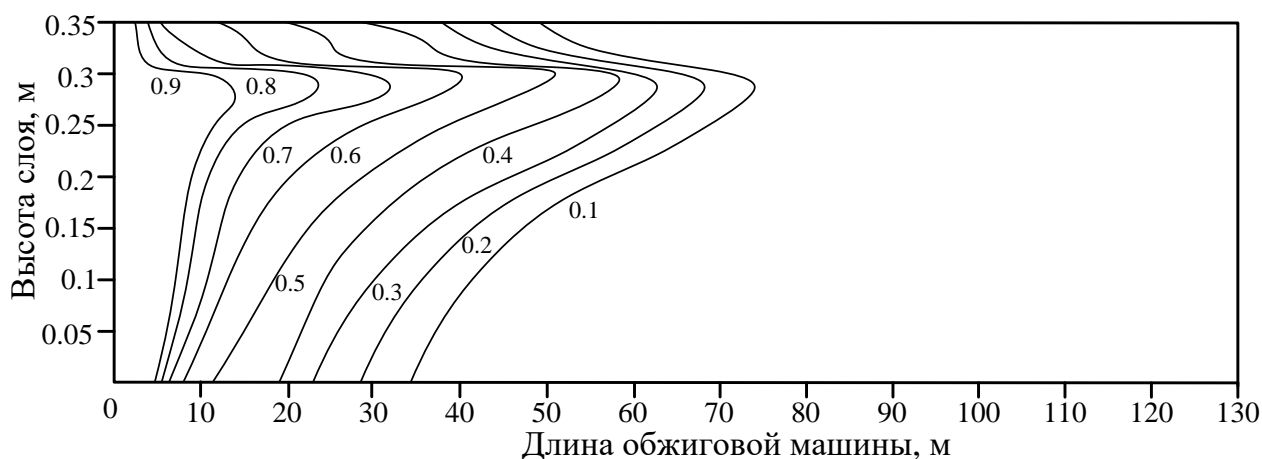


Рис. 2.4.3. Параметрическое семейство кривых, характеризующих относительную степень высушивания окатышей в слое  $\psi$ , изменяющееся в интервале от 0 до 1

Выявлена следующая тенденция - при многослойной сушке окатышей их переувлажнение более чем на 13% влечет размягчение, ухудшение формы, разрушение. Это напрямую негативно влияет на газопроницаемость многослойной массы окатышей. На рисунке 2.4.4 изображены изолинии влагосодержания окатышей в слое, из которых видно, что в некоторых горизонтах слоя наблюдается и более сильное переувлажнение: на высоте 0,25 – 0,3м и на расстоянии 5 – 55м влажность окатышей составляет 20 – 25%.

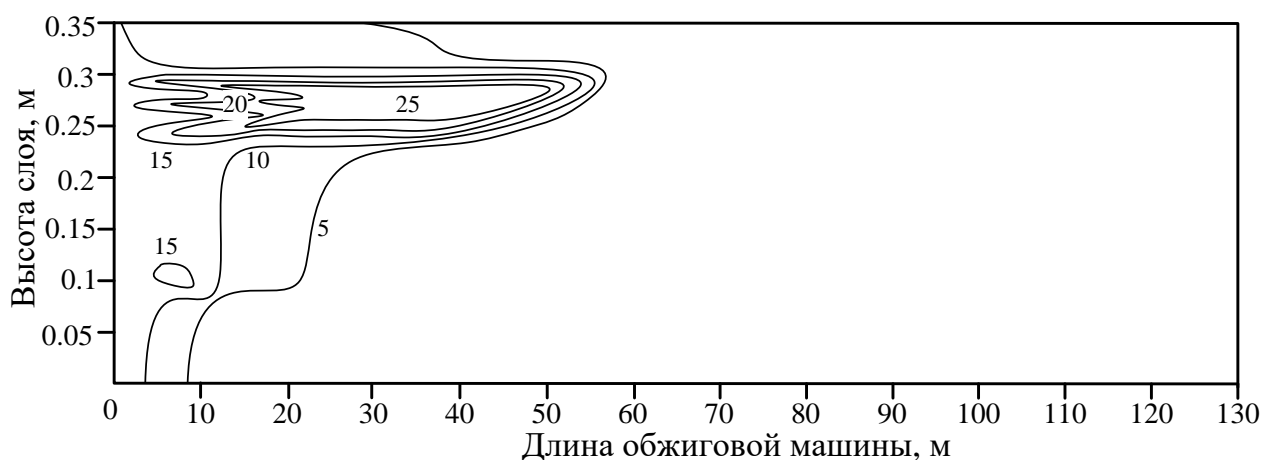


Рис. 2.4.4. Семейство параметрических кривых, характеризующих влагосодержание окатышей в слое, которое изменяется от 5% до 25 %.

Более интенсивно процесс переувлажнения газа-теплоносителя происходит с реверсом его подачи, вследствие чего “сухой” газ-теплоноситель с влагосодержанием 0,013 кг/кг поступает в невысушенные холодные горизонты многослойной массы. Затем, вбирая в себя существенное количество влаги, газ поступает в нагретые слои, где конденсация происходит незначительно. Это подтверждает рисунок 2.4.5, где представлены изолинии влагосодержания газа в слое окатышей. Указанные изолинии показывают, что в отдельных областях слоя газ имеет влагосодержание 0,04 – 0,07 кг/кг, что больше начального значения.

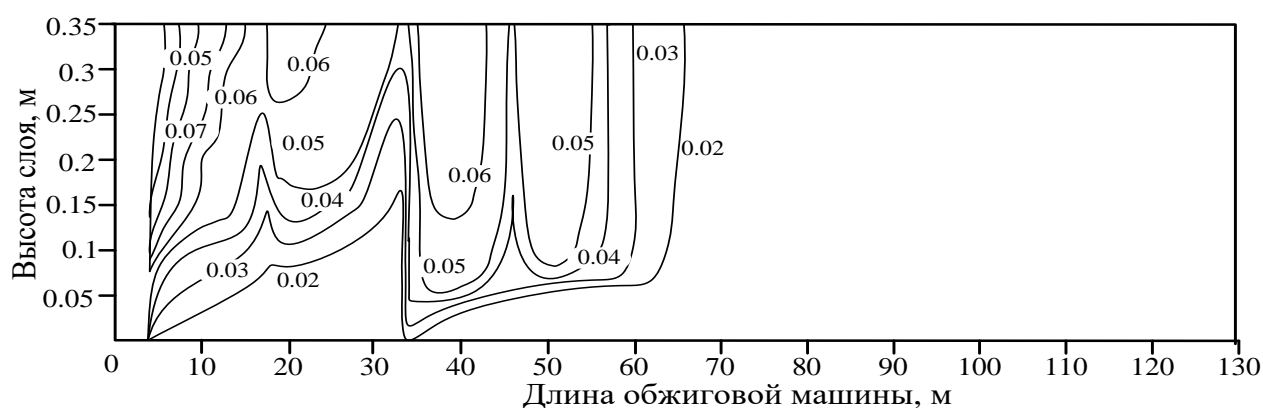


Рис. 2.4.5. Семейство параметрических кривых, характеризующих влагосодержание газа-теплоносителя в слое, которое изменяется от 0,013 до 0,07 кг/кг

Таким образом, в результате многочисленных вычислительных экспериментов на разработанной компьютерной модели показано, что при сушке движущейся многослойной массы окатышей наблюдается явление перераспределения влаги по высоте многослойной укладки окатышей, в результате чего в отдельных горизонтах многослойной массы наблюдается переувлажнение окатышей. При сушке фосфоритовых окатышей имеет место разрушения двух видов: трещинообразование и взрывообразное разрушение (шок). Начальная стадия высушивания сопряжена с испарением капиллярной

влаги и приводит к возникновению новых трещин, так как монолитность окатыша определяется в основном капиллярными силами [176]. Взрывообразное разрушение окатыша наблюдается в заключительный период сушки внешних участков материала окатышей. Выбор режима сушки нужно согласовывать с величиной скорости нагрева, градиента температуры, интенсивности переноса влаги в окатыше [177, 178].

## **2.5 Выводы**

В результате проведенных исследований разработаны математическая и компьютерная модели химико-технологического процесса сушки движущейся плотной многослойной массы фосфоритовых окатышей в конвейерной обжиговой машине, отличающиеся учетом интенсивности процесса внутреннего влагопереноса в окатыше и процессов переувлажнения отдельных горизонтов в нагреваемом слое окатышей, что позволяет определять технологические параметры режима сушки. Проведена проверка адекватности разработанной математической модели по результатам сравнительного анализа рассчитанных значений влагосодержания и температуры окатышей, характеристик газа-теплоносителя, а также значений интенсивности влагопереноса в окатышах при сушке в движущемся плотном слое с результатами промышленных испытаний. Проведены многочисленные вычислительные эксперименты по определению: относительной степени высушивания, влагосодержания, интенсивности сушки окатышей и влагосодержания газа-теплоносителя при различных характеристиках сырых окатышей и параметрах технологического режима функционирования обжиговой конвейерной машины.

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

### **3.1 Системный анализ химико-энерготехнологических процессов прокалки и спекания окатышей как объектов исследования и управления**

Практика эксплуатации предприятий фосфорной промышленности показывает, что качество шихты – одна из решающих предпосылок получения высоких технико-экономических показателей работы аппаратов технологической схемы производства чистого фосфора [179].

Использование для получения фосфора некондиционных обеднённых фосфоросодержащих руд резко повышает разнородность характеристик сырья, попадающего в обогатительную обработку. Различия концентраций  $P_2O_5$  варьируется от 0 до 30%,  $SiO_2$  – от 5 до 90%. Ни одна отрасль промышленности не обрабатывает руды с таким широким колебанием качества [180].

Учитывая такой характер химического состава, фосфоритное сырьё делят на следующие типы [181].

- Субмономинеральные – их основу составляют очень маленькие, порядка 0,1 - 0,25 мм, зёрна оолитов фосфата с пониженными тонкодисперсными соединениями. Они отличаются значительными включениями фосфорного ангидрида, свыше чем 27%, при незначительных, от 4% до 9%, включениях нерастворимых примесей, содержание карбонатов кальция и магния варьируется в пределах 6-8% [182].
- Карбонатные фосфоритные – отличаются высокой степенью карбонизации (содержание  $CO_2$  7-10%), пониженным включением оксида фосфора 24-27% и оставшихся плохо растворимых веществ около 8-14%.



- Кремнисто-карбонатные фосфаты – отличаются изменяющимся химическим составом, обладают большим содержанием включений плохо растворимого типа 22-25%, небольшой долей карбонатов 5-8% и низким содержанием оксида фосфора 21-24%. Главный фосфоросодержащий минерал представлен зёрнами оолита и кремнисто-фосфоритных включений.

Измерение состава вещества фосфоритного сырья, приходящего в термическую обработку [183], поясняет следующую тенденцию: большая их часть обладает оолитово-зернистой конфигурацией, зёрна породообразующей руды (примерно 66%) соединены разносоставными цементами (примерно 20%).

Зернистый материал в фосфоритах сцементирован карбонатом, халцедоном или фосфатом. Нередко цемент бывает смешанным: кремнисто-фосфатным, карбонатно-фосфатным или кремнисто-карбонатно-фосфатным.

Фосфатные зёрна представлены округлыми и овальными образованиями с гладкой, реже корродированной карбонатным цементом поверхностью. Зёрна состоят из слабораскристаллизованного (до почти изотропного) фосфорита. По характеру загрязнений выделяют несколько разновидностей зёрен [184].

- Субмономинеральные – с примесью нефосфатного материала (пелитоморфных включений) не более 5% от массы зерна.
- Кремнисто-фосфатные – с содержанием включений халцедона 5-10% массы зерна.
- Карбонатно-фосфатные – с содержанием карбонатных включений в количестве 2-3% и более.
- Кремнисто-карбонатно-фосфатные – здесь фосфат загрязнён одновременно микровключениями халцедона и карбоната.

Фосфатные оолиты так же подразделяются на несколько разновидностей, связанных постепенными переходами.

- Обычные фосфатные зёрна с тонкой (0,02 - 0,1 мм) каёмкой раскристаллизованного фосфата.
- Типичные оолиты, состоящие из ядра (слабораскристаллизованный фосфат и халцедон), окружённого оболочкой концентрически-слоистого фосфата.
- Сложные фосфатные оолиты из двух-трёх оолитов, имеющих одну общую схему концентрически-слоистого фосфата. Фосфатные сферолиты отличаются отсутствием концентрической слоистости.

Фосфат, слагающий сферолиты, чистый, почти не содержит пелитоморфных включений других минералов [185].

Наряду с фосфатными зёрнами в фосфоритах содержатся и обломочные зёрна кварца, кремния, полевых шпатов, листочки слюды и др.

Фосфатный цемент представлен изотропным и мелкокристаллическим фосфатом с различной степенью загрязнения пелитоморфными включениями халцедона, гидроокислов железа, карбонатов и глинистых частиц [186].

Карбонатный цемент состоит из крупнокристаллического (с размерами зерна до 0,4-0,6 мм) или средне- и мелкокристаллического карбоната, представленного в основном кальцитом, образует чистые от примесей зёрна с прямолинейными контурами. Средне- и мелкокристаллический карбонат представляет собой зёрна доломита, диаметр которых варьируется в пределах от 0,02 до 0,2 мм, загрязнённых пелитоморфными примесями, из которых главные – гидроокислы железа.

Кремнистый цемент представлен в основном халцедоном, реже кварцем (образует участки мозаичного кварца), а халцедон большей частью мелкокристаллический. Кроме того, халцедон и кварц присутствуют в виде включений неправильной формы в других видах цемента [187].

Результаты рентгеноструктурных анализов показывают, что фосфатные минералы кристаллизуются в решётке фторапатита [188], при этом атом фосфора находится не в центре тетраэдров, а ближе к одной из его граней. Такое положение атома фосфора способствует замещению группы  $\text{PO}_4^3$  на

$\text{CO}_3^2$ , благодаря чему получается целая группа минералов фторкарбонатапатитов, которые могут образовывать между собой смеси переменного состава.

Изучению процессов, происходящих в фосфоритах при нагреве, в литературе уделяется значительное внимание. Эти исследования преследуют различные цели.

- Анализ состава и природы фосфоритов или отдельных породообразующих минералов [189,190].
- Определение оптимальных температур обработки сырья, обеспечивающих дегидратацию и декарбонизацию [191, 192, 193].
- Исследование влияния термической обработки на структуру и механическую прочность кускового и окомкованного сырья [194, 195].
- Определение температур размягчения и плавления сырьевых материалов и их влияние на газодинамику слоя [196].
- Комплексные исследования, направленные на совершенствование методов термической подготовки и электровозгонки [198, 199].

Изменения физико-химических свойств и структуры исходных материалов при нагреве обусловлены, в основном, процессами в таких группах породообразующих минералов, как  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  и группе примесей, из которых наибольшее значение имеют карбонаты и слюды.

Группа  $\text{SiO}_2$  (опал, кварц, халцедон) до 1020-1070K существенных изменений не претерпевают. Однако в этом температурном интервале наблюдается повышение трещинообразования, обусловленное различными коэффициентами линейного расширения параллельно и перпендикулярно главной кристаллической оси. На процесс растрескивания влияет так же дегидратация опала и халцедона (370-470K). В интервале до 1100K наблюдается наибольшая потеря веса в этой группе (до 2%). Начиная с 1020K формируется новая силикатосодержащая фаза – кристобалит (обусловлено присутствием минерализаторов  $\text{R}_2\text{O}$ ,  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{FeO}$ ).

С ростом температуры отмечается постепенное снижение степени кристаллизации кварца. При 1320K наблюдается появление воластенитной фазы, что связано с наличием в исходном сырье значительного количества карбонатных минералов, различающихся в основном до 1250K с образованием CaO, взаимодействующего с SiO<sub>2</sub>.

Процессы дегидратации, термического расширения SiO<sub>2</sub> и кристобалитизации, происходящие при нагревании образцов в зоне 290-1470K, способствуют снижению прочности группы SiO<sub>2</sub> (микротвёрдость изменяется от 1200-1260 в сыром материале до 670-870 кг/мм<sup>2</sup> в образцах, обработанных до 1470K).

Группа P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> представлена в фосфоритах основным фосфатным веществом, включает в себя фосфатное вещество оолитов с микрокристаллической структурой и хорошо сформированный низкотемпературный апатит в виде табличек. В зависимости от содержания углерода в решетке фосфата отечественные фосфориты разделены на фторапатитовую, франколитовую и курскитную группы.

Наиболее полные исследования процессов, происходящих при нагреве в основном фосфатном веществе, проведены в работах [200 - 203].

Установлено, что в интервале 290-900K изменений в группе P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> не наблюдается. Отмечается увеличение кристалличности при температурах выше 770K. В диапазоне температур 1300-1400K наблюдается существенное разложение фосфоритного сырья, связанное с большим поглощением тепловой энергии и спеканием фосфатного вещества. В окончании кристаллохимических превращений обнаруживается уменьшение плотности фосфоритного рудного сырья [204].

При нагреве до температур, превышающих равновесные, карбонатные минералы диссоциируют с образованием газообразной двуокиси углерода и окисла соответствующего металла в виде конденсированной фазы. Процесс сопровождается поглощением тепла.

Термографические исследования образцов доломита и кальцита, полученных из фосфатов [205], обосновывают одинаковые характеристики ХЭТП прокали карбонатов с соответствующими чистыми и природными минералами. Так, разложение кальцита, выделенного из фосфорита, начинается при 1140К, максимальная скорость выделения двуокиси углерода наблюдается при 1200К. Температура диссоциации чистого синтетического кальцита 1183-1200К, а природных карбонатных минералов, например, с примесями  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , – 1170-1194К [206].

Разложение доломита, содержащегося в фосфорите, протекает в две стадии: первая зафиксирована при 1000-1040К, начало второй отмечается при 1093К, максимальная скорость наблюдается при 1220К. Термограммы разложения наиболее чистого доломита Шишимского месторождения, полученные в [207], свидетельствуют о более низких температурах второй стадии.

В ряде работ отмечается отличия в характере декарбонизации (ее интенсивности и температурных диапазонов) фосфоритов из разных месторождений. [208].

Имеют место три температурных интервала, соответствующих этапам декарбонизации [209, 210]. Эти диапазоны температур сведены в таблицу 3.1.1.

Таблица 3.1.1. Интервалы температур для соответствующих этапов декарбонизации

	Температура	Этап декарбонизации
1 этап	630-690	Разложение сидерита, магнетита, сметионита
2 этап	970-1220	Разложение доломита и кальцита
3 этап	1220-1270	Декарбонизация основного фосфатного вещества, характеризуется низкой скоростью. На этом основании сделано заключение о прочности связи углерода с молекулой фосфата.

Наблюдаемый в ряде работ различный характер диссоциации карбонатных минералов, помимо указанных причин, может быть связан с влиянием на процесс постоянно присутствующих в фосфоритах  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , а также солей щелочных металлов и каолина. При достаточно больших концентрациях  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  последние оказывают шлакующее действие на продукт диссоциации карбоната кальция [211]. Это приводит к повышению упругости диссоциации и, соответственно, снижению температур реакции. Соли щелочных металлов существенно изменяют температурный диапазон реакций декарбонизации даже при незначительных концентрациях [212, 213].

На примере известняков различных месторождений получающийся в результате диссоциации карбонатов кальция продукт в одних случаях образует монолит с мелкими замкнутыми порами, в других – легко разрушающийся конгломерат округлых зёрен [214].

Процессы дегидрации фосфоритов и присутствующие в них примеси, термические напряжения, обуславливаются отличающимися коэффициентами линейного расширения порообразующих минералов.

Аномальным в этом смысле является поведение фосфоросодержащих сланцев с невысоким содержанием карбонатов. Присутствующие в сланцах в значительных количествах легкоплавкие минералы типа мусковита и гидромусковита способствуют при 970K и выше образованию стекол, скрепляющих породу при охлаждении. Микротвердость цемента сланцев [215, 216] возрастает от 350кг/мм<sup>2</sup> (1070K) до 500-520кг/мм<sup>2</sup> (обжиг до 1270-1560K).

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

Нагрев фосфоритов при термической подготовке и переработке сопровождается рядом физико-химических и структурных превращений.

Некоторые процессы носят целевой характер. К их числу могут быть отнесены удаление физической и связанной воды, разложение свободных карбонатов, декарбонизация основного фосфатного вещества и спекание. Завершённость этих ХЭТП на стадии термической подготовки сырья оказывает существенное влияние на технико-экономические показатели процесса возгонки фосфора. Достижение высокой эффективности термической подготовки, в свою очередь, зависит от условий нагрева сырья в аппаратах обжига.

Выбор рациональных схем и оптимизация режимов термической подготовки должны базироваться на расчётах с использованием моделей, отражающих кинетику основных физико-химических превращений [217].

Надёжные данные по кинетике термически активируемых процессов необходимы также для интерпретации результатов исследований процессов внутреннего и внешнего теплообмена при нагреве сырья [218].

Наиболее значимым представляется изучение кинетических закономерностей физико-химических превращений, степень завершённости которых непосредственно влияет на качество полупродуктов, то есть декарбонизации и спекания. Кроме того, необходимы кинетические параметры реакций, обычно завершающихся в процессе термической подготовки (сушка и дегидратация). Эти процессы вызывают значительные энергозатраты и могут сопровождаться разрушением зёрен исходного материала, что следует учитывать при выборе режимов работы начальных участков аппаратов термической подготовки [219].

Основная часть процессов при нагреве фосфоритов происходит в твёрдой фазе. Их изучение – задача топохимической кинетики.

Особенностью топохимических реакций считается то, что они обычно локализованы в области поверхности раздела твёрдых фаз исходного вещества и продуктов реакции. Эта поверхность образуется и изменяется в результате химического процесса, обуславливая тем самым зависимость скорости реакции от времени.

Задача изучения химической кинетики топохимических реакций – составление математического описания химического процесса, выявление механизма химических реакций и определение кинетических параметров отдельных стадий процесса.

Исследования широкого класса топохимических реакций в твёрдых телах [220-225] показывают, что такие процессы анализируются посредством основных представлений и аппарата кинетического анализа гомогенных реакций. Так для топохимических реакций введено понятие удельной скорости реакции [226]. Наблюдаемая скорость реакции – произведение эффективной удельной скорости на величину эффективной реакционной поверхности.

При проведении кинетического анализа, как правило, вместо количества прореагировавшего вещества используется реакционная переменная  $\eta$ , определяемая следующим образом:  $\eta = 1 - G(\tau)/G_0$ , и соответствующая ей скорость превращения, где  $G(\tau)$ ,  $G_0$  – текущее и начальное количество вещества, вступающее в реакцию.

В общем случае скорость превращения при постоянных температуре и давлении может быть представлена соотношением [227]  $v_\tau = f(T, P, \eta)$ .

Если конфигурация реакционной области не зависит от температуры и парциального давления и определяется только степенью превращения, то скорость превращения можно представить как произведение функций с разделёнными переменными:

$$v_\tau = k(T, P) \cdot f(\eta) . \quad (3.2.1)$$

Последнее выражение – общая форма записи кинетического уравнения топохимической реакции, служит основой для отыскания вида зависимости скорости реакций от интенсивных параметров  $T, P$  и степени превращения  $\eta$ .

Для экспериментального исследования топохимических реакций [228, 229] необходима организация тепломассопереноса в зону протекания реакции, компенсирующих тепловой эффект реакций и выделение



газообразных продуктов с целью поддержания постоянных или изменяющихся по заданному закону значений интенсивных параметров  $T, P$ .

Изучение роли процессов переноса вещества и тепла в кинетике топохимических реакций – задача микроскопической кинетики. В реальных условиях скорость топохимических реакций изменяется во времени по сложному закону, обусловленному одновременным протеканием различных процессов. Условия транспорта газообразной фазы и тепла в зону реакции непрерывно изменяются по мере её протекания, соответственно и изменяется их влияние на кинетику реакции. В результате этого наблюдаемые в эксперименте закономерности топохимических реакций в общем случае содержат информацию о механизме собственно реакции, процессах массо теплопереноса и особенностях развития реакционной поверхности.

Количественная характеристика этих процессов чрезвычайно существенна для интерпретации результатов кинетических экспериментов, поскольку именно они определяют концентрацию и температуру в реакционной зоне. В задачу кинетического анализа входит оценка теоретических и экспериментальных приёмов, позволяющих учитывать факторы, влияющие на кинетику химического превращения [230].

Для отыскания вида функций в выражении (3.2.1) и расчёта параметров кинетического уравнения существуют два основных метода:

- Изотермические (предполагают поддержание постоянных фиксированных значений температур в пределах образца во всём диапазоне степени превращения;
- Неизотермические (температура во всех точках исследуемого образца изменяется во времени по одному закону).

В том и другом случаях парциальное давление газа-реагента или продукта реакции поддерживается постоянным. Методы кинетического анализа результатов изотермических исследований и способы их экспериментальной реализации детально рассмотрены в [231, 232].

Сущность методов анализа заключается в определении вида и параметров кинетического уравнения на основе экспериментально полученных зависимостей: степень превращения – время и скорость превращения – время при различных условиях протекания реакций. Математическая обработка может выполняться чисто формально с целью найти уравнение, наилучшим образом описывающее эксперимент. В этом случае параметры уравнения не имеют содержательного физического смысла. В основу обработки может быть заложена конкретная модель топохимического превращения, тогда параметры уравнения будут связаны с природой происходящих процессов.

Изотермические методы кинетического анализа характеризуются рядом недостатков, ограничивающих область их применения. К числу наиболее существенных следует отнести влияние степени превращения реагента за время прогрева образца до температуры опыта (с увеличением температуры время реакции становится соизмеримым с временем нагрева), возможность значительных отклонений температуры образца от заданной в результате действия внутренних стоков тепла и трудоёмкость исследований.

Неизотермические методы имеют существенные преимущества по сравнению с изотермическими: позволяют проводить исследования при высоких температурах; накладывают менее жёсткие ограничения на температурный режим образцов; менее трудоёмки [233].

Для исследования кинетики эндотермических реакций термического разложения, твердофазных реакций и окислительно-восстановительных процессов используются методы на базе интерпретации результатов термического анализа, связанного с программированным нагревом образцов. Они позволяют практически по одной экспериментальной кривой определить основные кинетические константы – предэкспоненциальный множитель, энергию активации процесса и показатель степени реакции [234].

Кинетика термического разложения твердых веществ чаще изучается неизотермическими методами, использующими результаты

термогравиметрического и дифференциально-термического анализов, сканирующей калориметрии, волюметрии и др.

Развитию указанных методов способствовало широкое внедрение установок для термических анализов, снабжённых автоматическими системами программируемого нагрева образцов, прецизионными приборами контроля и микропроцессорными устройствами сбора и обработки информации, существенно упрощающих подготовку и проведение экспериментов.

Вместе с тем использование результатов термических анализов, полученных на установках и в условиях, не предназначенных для исследований кинетических закономерностей, требует особого внимания к возможным методическим погрешностям, обусловленным сложным внутренним и внешним теплообменом образца [235].

В настоящее время существует большое количество обратно кинетических схем обработки экспериментальных данных, полученных методами термического анализа [236]. Наиболее детально задача рассмотрена для брутто-одностадийных реакций, то есть случая, когда процесс может быть описан кинетическим уравнением вида (1.1).

Предполагается, что температурная зависимость скорости реакции имеет аррениусовский характер. Тогда при постоянстве давления газа-реагента или продукта реакции кинетическое уравнение приводится к виду:

$$\frac{d\eta}{d\tau} = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) f(\eta). \quad (3.2.2)$$

В общем виде зависимость  $f(\eta)$  можно представить в виде  $f(\eta) = (1 - \eta)^4$ .

Наиболее простые схемы обработки предполагают определение одного из параметров уравнения (3.2.2). Так, в [237] предложен метод приближённого вычисления порядка реакции в уравнениях типа:

$$\frac{dc}{d\tau} = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) c^n. \quad (3.2.3)$$

Оно получается из зависимости  $n = 1,26\sqrt{S}$ , где  $S$  – «индекс формы» пика на экспериментальной кривой. Такой способ даёт лишь приближённые значения порядка реакции, причём с увеличением  $n$  ошибка его определения растёт.

Энергию активации и предэкспоненциальный множитель можно найти по результатам одного опыта, предварительно задаваясь видом функции  $f(\eta)$  на основании априорной информации о механизме реакции. Однако анализ многочисленных исследований [238] показывает, что такой способ не позволяет однозначно вычислять искомые параметры и может привести к значительным неконтролируемым погрешностям.

Предложена методика обработки экспериментальных данных [239], полученных в виде зависимостей скорости реакции  $\frac{dc}{d\tau}$  и концентрации  $c$  от температуры при монотонном нагреве образца. Кинетическое уравнение (3.2.3) приводится к виду:

$$\frac{\Delta \lg(-dc/d\tau)}{\Delta \lg(c)} = n - \frac{E}{2,3R} \frac{\Delta(1/T)}{\Delta \lg(c)}.$$

Тогда график зависимости величины  $\frac{\Delta \lg(-dc/d\tau)}{\Delta \lg(c)}$  от  $\frac{\Delta(1/T)}{\Delta \lg(c)}$  должен представлять собой прямую линию, отсекающую на оси ординат отрезок, равный  $n$ , а тангенс угла наклона этой прямой пропорционален величине  $E$ .

Анализ, проведенный в [240], показывает, что такой метод не позволяет определять точные значения искомых параметров вследствие большого разброса расчётных точек. В этой же работе предлагается метод уточнённого расчёта кинетических параметров по результатам единичного эксперимента, заключающийся в подборе параметров  $n, E, k_0$  таким образом, чтобы решения кинетического уравнения (3.2.3), представленные в виде зависимостей  $c = f_1(T)$  и  $\frac{dc}{d\tau} = f_2(T)$ , наилучшим образом совпадали с соответствующими зависимостями, определёнными в опыте. Недостаток метода – возможность проявления эффекта «компенсации», когда

одновременное завышение или занижение значений  $k_0$  и  $E$  может привести к удовлетворительному совпадению расчёта с экспериментом.

Более надёжным в смысле получения однозначных результатов являются методы нахождения кинетических закономерностей по результатам серии экспериментов, полученных при различных скоростях нагрева образцов. Известны схемы такой обработки, базирующиеся на результатах термогравиметрии [241], дифференциально-термических анализов [242], сканирующей калориметрии [243]. Так предложено опытные данные получать как минимум при двух различных скоростях нагрева [244]. Результаты представляются в виде графических зависимостей:  $\eta = f_1(T)$  или  $\eta = f_2(T)$ . Полученные кривые секутся линиями параллельно оси абсцисс, и находятся точки  $\eta$  при различных темпах нагрева.

В этих точках графическим дифференцированием определяются производные:  $\frac{d\eta}{d\tau} = \left(\frac{d\eta}{dT}\right) b$ , где  $b = \frac{dT}{d\tau}$ . Для каждой секущей записывается уравнение вида:  $\ln\left(\frac{d\eta}{d\tau}\right)_i = \ln k_0 f(\eta) - E/RT$ , где  $i$  – индекс кривой зависимости  $\eta = f_i(T)$ .

Предполагая, что функция  $f(\eta)$  для опытов с различными скоростями нагрева постоянна, получено выражение:

$$E = \frac{R(\ln\left(\frac{d\eta}{d\tau}\right)_2 - \ln\left(\frac{d\eta}{d\tau}\right)_1)}{T_1^{-1} - T_2^{-1}}.$$

Вид функции  $f(\eta)$  и предэкспоненциального множителя  $k_0$  определяется обычным методом подбора эмпирической зависимости.

Для всех перечисленных схем решения обратного-кинетических задач характерно общее допущение о равномерности распределения температуры по реакционному объёму, то есть предполагается, что реакция протекает в режиме однородного инициирования. Очевидно, что достоверность определения вида и параметров кинетического уравнения зависит от соответствия условий экспериментов принятому допущению. Анализ численных решений уравнения теплопроводности и кинетического

уравнения химической реакции, сопровождаемой тепловыми эффектами, приведенный в [245], свидетельствует о сильном искажающем влиянии неоднородности температуры в исследуемых образцах на результаты кинетических исследований.

В отдельных случаях корректные в теплофизическом смысле условия термоаналитических исследований могут быть достигнуты:

- разбавлением реагирующей фазы высокотеплопроводной инертной фазой (механическое разбавление);
- использованием тонких (в тепловом отношении) тел при гарантированном теплоотводе с поверхности;
- снижением градиентов температур путём одновременного разбавления и ухудшения условий теплообмена измерительной ячейки с окружающей средой [246].

Отметим, что указанные приёмы неприемлемы для исследований природных композиционных материалов с реагирующими включениями, так как в процессе подготовки образцов разрушается исходная структура материала.

Проведение исследований кинетики термически активируемых процессов в фосфоритах при скоростях нагрева, реализующихся в промышленных установках, и использовании достаточно крупных образцов, сохраняющих природную структуру, показывает наличие градиентов температуры в объёме материала.

Предлагается метод приближенного вычисления параметров кинетических уравнений, позволяющий в значительной степени снизить погрешности, обусловленные процессами теплообмена в измерительной ячейке [247].

Если предположить, что в любой точке исследуемого плоского образца при наличии в нём градиента температуры гетерогенная реакция подчиняется уравнению:

$$v_i = \frac{d\eta}{d\tau} = k_0 \exp(-E/RT) f(\eta_i), \quad (3.2.4)$$

где индекс  $i$  характеризует принадлежность переменных к выбранной точке, то можно ввести понятие эквивалентного эксперимента с неизотермическим образцом с условной температурой отнесения  $T_{от}$ , зависящей только от времени, для которого справедливо кинетическое уравнение вида:

$$\bar{v} = \frac{d\bar{\eta}}{d\tau} = k_0 \exp(-E/RT_{от}) F(\bar{\eta}),$$

где  $\bar{v}$  – средняя (наблюдаемая в эксперименте) скорость реакции в неизотермическом образце,

$$\bar{v} = \frac{1}{x} \int_0^x v(x) dx,$$

$\bar{\eta}$  – средняя скорость превращения,

$$\bar{\eta} = \frac{1}{x} \int_0^x \eta(x) dx,$$

$T_{от}$  – условная температура отнесения,  $F(\bar{\eta})$  – функция, характеризующая изменение эффективной поверхности реагирования (учитывает неоднородность степени превращения в неизотермическом образце).

Характер распределения локальных конверсий  $\eta(x)$ , а следовательно, и вид функции  $F(\eta)$  находятся в сложной зависимости от скорости нагрева, размеров и теплофизических свойств образца, параметров кинетического уравнения, теплоты реакции, то есть:

$$F(\bar{\eta}) = F_1\{B, E/R, Q^0, C^0, f(\eta)\}, \quad (3.2.5)$$

где  $B = bx/a$ ,  $b$  – скорость нагрева образца,  $x$  – характерный размер,  $a$  – температуропроводность материала образца,  $E$  – энергия активации,  $Q^0, C^0$  – теплота реакции и начальная концентрация реагирующего компонента.

Анализ численных решений системы уравнений теплопроводности и кинетического уравнения показывает, что, если выполняется условие:

$$B_i = b_i x_i / a_i = \text{const},$$

то механизм реакции не зависит от скорости нагрева, а тепловой эффект реакции – от температуры. При одинаковых значениях средних степеней превращения  $\bar{\eta}_i$  локальные конверсии в точках, характеризующихся равенством безразмерных координат  $x_1/\chi_1$  и  $x_2/\chi_2$ , так же будут равны. Здесь индексы 1 и 2 соответствуют двум экспериментам, проведенным при различных скоростях нагрева образцов.

Для образцов, идентичных по составу и свойствам, имеющих различные размеры, можно записать равенство:  $F_1(\bar{\eta}_1) = F_2(\bar{\eta}_2)$ .

Последнее выражение позволяет получить расчетную зависимость для определения энергии активации по результатам двух экспериментов с неизотермическими образцами, реализуемых с различными скоростями нагрева. Запишем уравнение (3.2.5) для двух экспериментов, проведенных при скоростях нагрева  $b_1$  и  $b_2$ :

$$\bar{v}_1 = k_0 \exp(-E/RT_{\text{от}1}) F_1(\bar{\eta}_1), \quad (3.2.6)$$

$$\bar{v}_2 = k_0 \exp(-E/RT_{\text{от}2}) F_2(\bar{\eta}_2).$$

Разделив почленно уравнения и прологарифмировав, получим:

$$\ln(\bar{v}_1/\bar{v}_2) = E/RT_{\text{от}2} - E/RT_{\text{от}1}.$$

Энергия активации определяется из выражения:

$$E = \ln(\bar{v}_1/\bar{v}_2) R / (T_{\text{от}2}^{-1} - T_{\text{от}1}^{-1}). \quad (3.2.7)$$

Так как температурные поля в исследуемых образцах подобны, а поля градиентов температур идентичны, в качестве температур отнесения  $T_{\text{от}}$  могут быть приняты в первом приближении результаты измерений в точках, характеризующихся равенством безразмерных координат.

Допускается систематическая погрешность, обусловленная перемещением зоны максимальной скорости реакции относительно точки замера температуры с изменением средней степени превращения образца. Кроме того, максимальная погрешность будет соответствовать наибольшему



удалению в пределах образца точки замера температуры от зоны максимальных скоростей. Так, с увеличением  $\bar{\eta}$  погрешность возрастает, если для проведения экспериментов базироваться на температуре поверхности, и снижается при использовании температуры в центре исследуемого образца. Для уточненного расчета энергии активации следует оперировать с переменной температурой отнесения.

Вычислять предэкспонентный множитель и вид функции в кинетическом уравнении (3.2.4) можно двумя путями.

Первый – в основу анализа закладывается представление о топахимическом характере процессов, происходящих в реагирующих включениях, в итоге термоаналитический эксперимент, дополненный результатами структурных анализов исследуемого материала, позволяет получить структурно-кинетическое уравнение процесса (наряду с кинетическими константами включает геометрические параметры реагирующих включений, их размер и форму).

Второй – определяются значения предэкспоненты и вида функции  $f(\eta)$  для материалов с однородными по форме и размерам реагирующими включениями или их эффективные значения, когда задание структурных параметров не представляется возможным.

Исследования структуры фосфоритов и фосфатно-кремнистых разностей показывают, что содержащиеся в них реагирующие включения, такие, как доломит, кальцит, кристаллогидраты и др., как правило, существенно неоднородны по размерам и могут иметь различную форму. Если лимитирующей стадией гетерогенного процесса является реакция на границе раздела фаз, то скорость превращения может быть выражена через изменение объёма реагирующей частицы:

$$dV(\tau)/d(\tau) = v_s(T)\rho_m^{-1}S(\tau),$$

где  $V(\tau)$  - объём непрореагировавшей части частицы реагента к моменту времени  $\tau$ ;  $v_s(T)$  - удельная скорость реакции на границе раздела фаз;  $\rho_m$  - молекулярная плотность реагента;  $S(\tau)$  - поверхность реагирования.

Если частицы реагентов представляют собой сферы одинакового размера  $r_0$  с начальным объёмом  $V_0$ , то запишем:

$$\frac{V(\tau)}{V_0} = \frac{4/3\pi r^3(\tau)}{4/3\pi r_0^3} = 1 - \eta, \quad (3.2.8)$$

где  $r(\tau)$  – радиус частиц, непрореагировавших к моменту времени  $\tau$ .

Из (3.2.8) может быть определена зависимость протяжённости поверхности реагирования от степени превращения:

$$dS(\tau)/S_0 = r^2(\tau)/r_0^2 = (1 - \eta)^{2/3}.$$

Аналогично получим зависимости для частиц других простых форм. Так, для включений, имеющих форму неограниченного цилиндра:  $dS(\tau)/S_0 = (1 - \eta)^{1/2}$ . Для плоских включений:  $dS(\tau)/S_0 = (1 - \eta)^0$ .

Если температура на поверхности раздела прореагировавшей и непрореагировавшей фаз во всех включениях одинакова, то скорость изменения степени превращения образца выразится уравнением:

$$v_\eta = d\eta/d\tau = d(V(\tau)/V_0)/d\tau = v_s(T)S(\tau)/(\rho_m V_0).$$

Для сферических частиц последнее выражение имеет вид:

$$v_\eta = v_s(T) 4\pi r^2(\tau)/(\rho_m 4/3\pi r_0^3).$$

Учитывая, что для сферы  $r(\tau) = r_0(1 - \eta)^{1/3}$ , цилиндра  $r(\tau) = r_0(1 - \eta)^{1/2}$  и пластины  $r(\tau) = r_0(1 - \eta)^0$ , получим для включений:

$$\text{сферических:} \quad v_\eta = 3 \frac{v_s(T)}{\rho_m} \frac{1}{r_0} (1 - \eta)^{2/3}, \quad (3.2.9)$$

$$\text{цилиндрических:} \quad v_\eta = 2 \frac{v_s(T)}{\rho_m} \frac{1}{r_0} (1 - \eta)^{1/2}, \quad (3.2.10)$$

$$\text{плоских:} \quad v_\eta = \frac{v_s(T)}{\rho_m} \frac{1}{r_0} (1 - \eta)^0. \quad (3.2.11)$$

Так, для включений произвольной формы можно записать:

$$k_0 \exp(-E/RT) = \Gamma \frac{v_s(T)}{\rho_m} \frac{1}{r_0},$$

где  $\Gamma$  – коэффициент формы (сфера  $\Gamma=3$ , цилиндр  $\Gamma=2$ , пластина  $\Gamma=1$ ).

Вид функции  $f(\eta)$  определяется формой реагирующих частиц  $f(\eta) = (1 - \eta)^{1-\Gamma^{-1}}$ .

Если исследуемый материал включает частицы реагента, различные по форме, но имеющие одинаковые характерные размеры с относительными массовыми долями  $m_i$ , то наблюдаемая в эксперименте с температурой образца  $T$  скорость изменения степени превращения будет определяться уравнением:

$$\frac{d\eta}{d\tau} = k_0 \exp(-E/RT) \sum_{i=1}^p \Gamma_i (1 - \eta)^{n_i}, \quad (3.2.12)$$

где  $p$  – количество форм частиц,  $k_0 \exp(-E/RT) = \frac{v_s(T)}{\rho_m}$ ,  $n_i = 1 - \Gamma_i^{-1}$ .

При различных размерах частиц в пределах каждой формы с соответствующими им относительными массами  $l_j$  кинетическое уравнение примет вид:

$$\frac{d\eta}{d\tau} = k_0 \exp(-E/RT) \sum_{i=1}^p \Gamma_i m_i \sum_{j=1}^k l_j \frac{1}{r_j} (1 - \eta)^{n_i}, \quad (3.2.13)$$

где  $k$  – количество размеров частиц в пределах каждой формы.

Очевидно, что определение предэкспоненты  $k_0$  и вида функции, входящих в структурно-кинетическое уравнение (3.2.13), по наблюдаемым в неизотермическом эксперименте функциям  $\bar{\eta}(T)$  и  $\bar{v}_\eta(T)$  с помощью общепринятых поисковых процедур невозможно.

Одним из допустимых путей решения обратнo-кинетической задачи с целью вычисления предэкспоненты  $k_0$ , которая в структурно-кинетическом уравнении характеризует удельную поверхностную скорость реакции, является задание структурных параметров  $m_i, l_j, r_j, \Gamma_i$  и последующий подбор  $k_0$ . Критерием правильности находимого значения при этом будет наилучшее совпадение экспериментальных кривых  $\bar{\eta}(T)$  или  $\bar{v}(T)$  с решением уравнения (3.2.13) при условиях, соответствующих эксперименту.

В том случае, когда нестационарные условия нагрева и тепловые эффекты вызывают значительные перепады температур в образцах, предэкспоненты должны подбираться на основе сопоставления средних по координате функций  $\bar{\eta}(T)$  и  $\bar{v}(T)$ , полученных экспериментально, с соответствующими функциями, определяемыми из совместного решения

уравнения теплопроводности с внутренними источниками тепла при соответствующих эксперименту граничных условиях, и кинетического уравнения вида (3.2.12) или (3.2.13).

Очевидно, что погрешность нахождения параметров структурно-кинетического уравнения по результатам неизотермического эксперимента, сопровождаемого градиентами температур в исследуемом образце, наряду с погрешностями температурных измерений, вычисления функций  $\bar{\eta}(T)$  и  $\bar{v}(T)$  и задания структурных параметров, будет зависеть от точности задания теплофизических характеристик и граничных условий в уравнении теплопроводности.

Для совместного определения предэкспоненты и вида функции  $f(\eta)$  по результатам неизотермического эксперимента при наличии градиентов температур в образце применительно к материалам с однородными по форме и размерам реагирующими включениями, а также для оценки соответствующих эффективных значений в случае, когда задание структурных параметров не представляется возможным, предлагается следующая методика обработки термоаналитических экспериментов.

Представим зависимость (3.2.6) в виде произведения:

$$F(\bar{\eta}) = P f(\eta), \quad (3.2.14)$$

где  $P = F_2(B, E/R, Q^0, c^0, \bar{\eta})$  - параметр, не зависящий от вида функции  $f(\eta)$ . Из уравнения (3.2.5) с учетом (3.2.14) получим:

$$\bar{v} / (P \exp(-E/RT_{от})) = k_0 f(\eta).$$

Если исключить параметр  $P$  в знаменателе, то можно получить:

$$\bar{v} / \exp(-E/RT_{от}^*) = k_0 f(\eta), \quad (3.2.15)$$

$$\text{где } T_{от}^* = F_3(B, E/R, Q^0, c^0, \bar{\eta}). \quad (3.2.16)$$

С использованием выражением (3.2.15) действительные значения  $k_0$  и вид функции  $f(\eta)$  определяются обычным путем, если вид функции (3.2.16) известен.

Вид функции (3.2.16) определялся следующим образом. Результаты численных решений системы уравнений теплопроводности и кинетического уравнения вида (3.2.3) использовались в качестве исходных данных для решения обратной задачи – нахождения вида функции  $T_{от}^*(\bar{\eta})$ , при которой выполняется равенство (3.2.15) в диапазоне изменения средней степени превращения  $0 < \bar{\eta} < 1$ .

Температура отнесения вычислялась из зависимости:

$$T_{от}^* = \frac{E}{R \lg(\bar{v}/k_0 f(\eta))}.$$

Здесь  $\bar{v}$  – средняя скорость реакции по результатам численных расчетов;  $E, k_0, f(\eta)$  – энергия активации, предэкспонента в функции степени превращения, принятые в численных расчетах.

Полученные таким образом зависимости при различных значениях  $B, E/R, Q^0, c^0$  затем обобщались эмпирической зависимостью.

Так, для области изменения параметров  $1 < B < 150, 10^4 < E/R < 10^5, 10^3 < k_0 < 10^{20}$  получена зависимость:

$$\Theta_{от}^* = c^2 \exp(-R \bar{T}^2 / 0,1 EBS) + 0,36[1 - \exp(-cR \bar{T}^2 / 0,1 EBS)],$$

где  $\Theta_{от}^* = (T_{от}^* - T_{ц}) / (T_h - T_{ц})$  – безразмерная температура отнесения;  $c = 1 - \bar{\eta}$  – средняя относительная концентрация реагирующего компонента;  $\bar{T}$  – средняя температура образца;  $S$  – относительное тепловосприятие реагирующего образца, определяемое из зависимости  $S = Q/Q_{kc}$ . Здесь  $Q$  – полное тепловосприятие реагирующего образца;  $Q_{kc}$  – тепловосприятие образца без учета тепла, расходуемого на химическую реакцию при квазистационарных условиях нагрева [248].

Для оценки точности предложенного метода решена контрольно-методическая задача по следующей схеме:

- численно решалась система уравнений теплопроводности и кинетического уравнения с заданными условиями однозначности для двух плоских образцов различной толщины  $x_1$  и  $x_2$ ;

- скорости повышения температуры поверхности образцов принимались с учетом условия  $B_1=B_2$ ;
- результаты расчетов в виде графиков зависимостей  $\bar{\eta} = f_1(T)$  и  $\bar{v} = f_2(T)$  использовались для определения параметров кинетического уравнения по предложенной схеме;
- заданные параметры сравнивались с результатами обработки.

Для решения контрольной задачи были выбраны условия с высокой неизотермичностью образцов. Так, в квазистационарном режиме нагрева (для начала реакции) перепад температур между поверхностью и центром пластин составлял 39К, а в период интенсивного протекания реакции – 160К. Численные расчёты проведены с использованием следующих исходных данных:  $x_1 = 8 \cdot 10^{-3}$  м,  $x_2 = 4 \cdot 10^{-3}$  м,  $b_1=0,278$  К/с,  $b_2=1,11$  К/с,  $\chi = 0,75$  Вт/(м·К);  $\rho c_p = 3,3 \cdot 10^6$  Дж/(м<sup>3</sup>·К);  $E=5 \cdot 10^4$  Ккал/моль;  $k_0=3,78 \cdot 10^8$  с<sup>-1</sup>;  $f(\eta)=(1 - \eta)^{2/3}$ .

Результаты численных решений для образцов приведены в таблицах 3.2.1 и 3.2.2 соответственно.

Таблица 3.2.1. Результаты вычислительного эксперимента №1

Номер образца	$\bar{c}$	$\bar{v} \cdot 10^3$	$T_h$ , К	$T_u$ , К	$\Delta T$ , К	$\bar{T}$ , К
1	0,95	0,377	945,6	892,8	50,8	920,2
2	0,9	0,673	973,3	911,8	61,5	942,6
3	0,79	1,12	1006,7	927,1	79,6	966,9
4	0,66	1,42	1034,5	937,2	97,2	985,8
5	0,49	1,37	1067,8	948,7	119,1	1008,3
6	0,383	1,28	1090	957,3	132,7	1023,7
7	0,284	1,19	1112,2	967,5	144,7	1039,9
8	0,193	1,1	1134,4	980,0	154,4	1057,2
9	0,11	0,967	1156,7	996,7	160,0	1076,7
10	0,057	0,818	1173,3	1014,1	154,2	1093,7
$x_1 = 8 \cdot 10^{-3}$ м, $b_1=0,278$ К/с						

Таблица 3.2.2. Результаты вычислительного эксперимента №2

Номер образца	$\bar{c}$	$\bar{v} \cdot 10^3$	$T_h$ , К	$T_u$ , К	$\Delta T$ , К	$\bar{T}$ , К
1	0,952	1,35	990	939,4	50,6	964,7
2	0,906	2,34	1017,8	957,7	60,1	987,7
3	0,792	4,17	1056,7	977,3	79,4	1017,0
4	0,696	5,16	1078,9	986,4	92,5	1032,6
5	0,616	5,63	1095,6	992,7	102,9	1044,1
6	0,476	5,44	1123,3	1003,2	120,1	1063,2
7	0,321	4,88	1156,7	1017,8	138,9	1087,2
8	0,205	4,39	1184,4	1033,6	150,8	1109,0
9	0,104	3,73	1212,2	1055,3	159,9	1133,7
10	0,053	3,09	1228,9	1073,9	155,0	1151,0
$x_2 = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}, b_2 = 1,11 \text{ К/с}$						

В таблице 3.2.3 указаны используемые зависимости и приведены некоторые результаты расчетов.

Вид зависимостей, относительных средней скорости реакции и средней степени превращения, отнесенные к температуре отнесения  $T_{от}^*$ , представлен на рис. 3.2.1. Обработка полученных результатов посредством зависимости (3.2.8) даёт значение энергии активации в пределах  $E = 50000 \pm 1000 \text{ кал/моль}$  при  $0,1 < \eta < 0,9$ .

Результаты обработки по определению предэкспоненты  $k_0$  и вида функции даны на рис. 3.2.2. Экспериментальные точки, соответствующие расчётам для первого и второго образцов, располагаются на прямой при заданном виде функции  $f(\eta) = (1 - \eta)^{2/3}$ . Погрешность вычисления предэкспоненты не превышает  $\pm 4\%$  (рис. 3.2.3).

Таблица 3.2.3. Результаты расчетов №1 и №2

Номер образца	$\Theta_{от}$ (3,62)	$T_{от}$ (3,59)	$S$ (3,16)	$\Theta_{от}^*$ (3,60)	$T_{от}^*$ (3,59)	$\frac{\nu \cdot 10^8}{\exp(-E/RT)}$
Расчёт №1						
1	0,381	914,1	1,55	0,391	914,7	3,68
2	0,36	933,9	2,05	0,38	935,2	3,52
3	0,316	952,3	2,87	0,382	957,5	3,18
4	0,264	962,9	3,5	0,324	968,7	2,98
5	0,196	972,0	3,63	0,238	977,0	2,3
6	0,153	977,6	3,51	0,191	982,6	1,86
7	0,114	984,0	3,42	0,147	988,6	1,48
8	0,077	991,9	3,33	0,107	996,5	1,12
9	0,044	1003,7	3,21	0,067	1007,4	0,74
10	0,03	1019,2	3,07	0,038	1020,1	0,46
Расчёт №2						
1	0,381	958,7	1,51	0,38	958,7	3,71
2	0,362	979,5	1,92	0,388	981,0	3,54
3	0,317	1002,5	2,75	0,374	1007,0	3,24
4	0,279	1012,2	3,25	0,339	1017,8	3,08
5	0,246	1018,0	3,45	0,302	1023,7	2,81
6	0,19	1026,0	3,62	0,273	1031,6	2,33
7	0,128	1035,6	3,45	0,172	1041,7	1,65
8	0,082	1046,0	3,32	0,121	1051,9	1,17
9	0,042	1062,0	3,16	0,071	1066,4	0,72
10	0,02	1077,0	3,01	0,04	1080,1	0,44



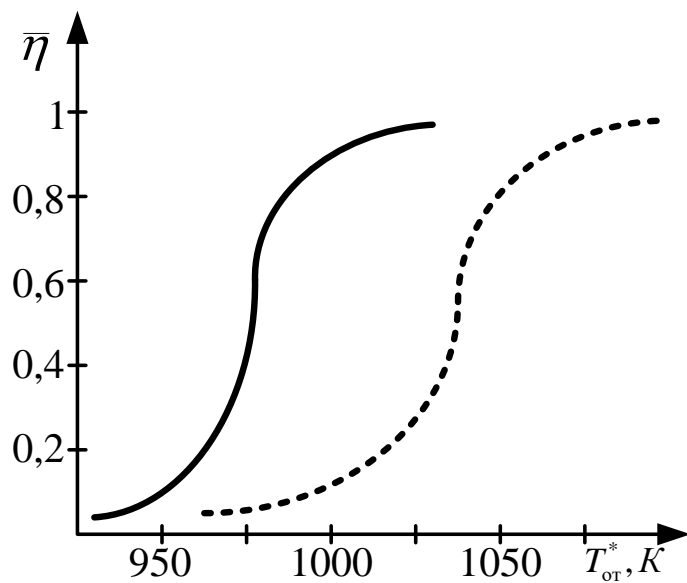


Рис. 3.2.1. Результаты численных экспериментов, приведенные к температуре отнесения. Кривые степени превращения по результатам первого — и второго ----- расчётов

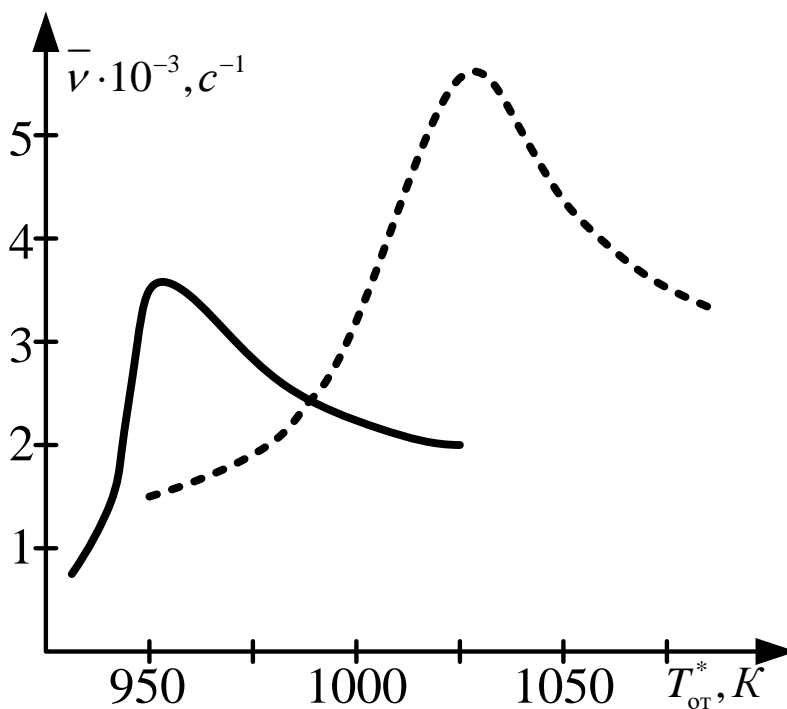


Рис. 3.2.2. Результаты численных экспериментов, приведенные к температуре отнесения. Кривые средней скорости реакции по результатам первого — и второго ----- расчётов

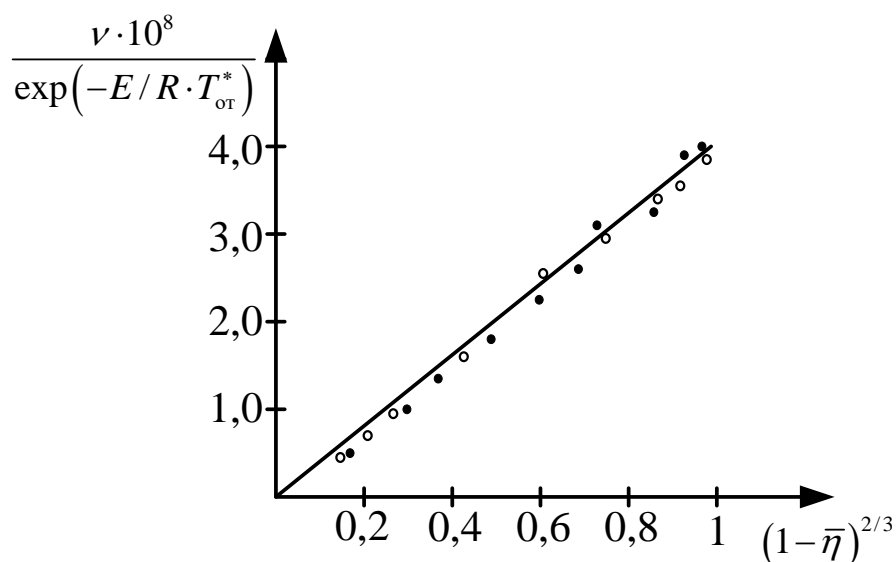


Рис. 3.2.3. Результаты обработки численных экспериментов: • - первый вариант; ° - второй вариант

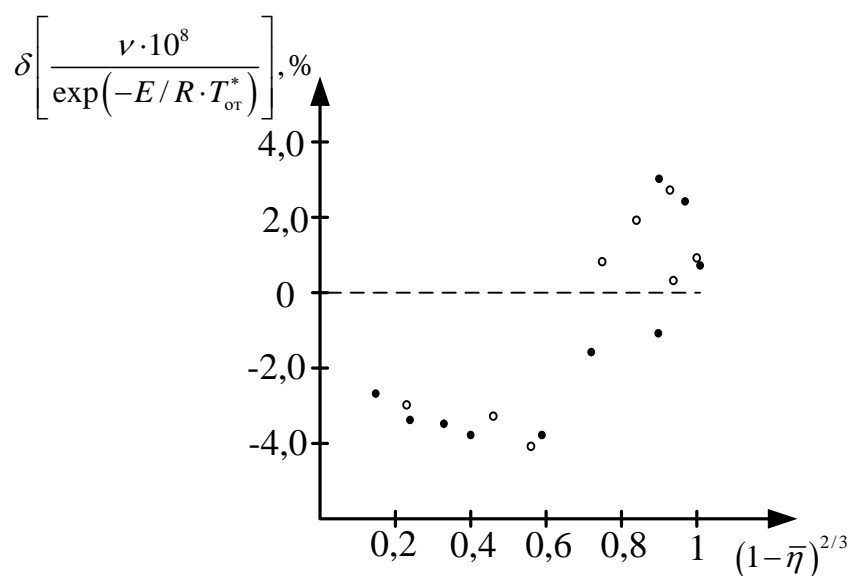


Рис. 3.2.4. Погрешности при определении параметров кинетического уравнения: • - первый вариант; ° - второй вариант

Решение контрольной задачи свидетельствует о возможности применения предложенного метода для исследования кинетики гетерогенных реакций термического разложения в случаях, когда по тем или иным причинам нельзя избежать возникновения градиентов температур в

исследуемых образцах. При этом точность определения параметров кинетических уравнений достаточна для практического использования.

Для изучения кинетики декарбонизации были выбраны три типа фосфоритов. Набор образцов предусматривал исследование кинетики прокали промысленных фосфоритов, существенно различающихся как по содержанию карбонатов, так и по структуре. Одна из проб представляла собой измельченный и гранулированный образец. Из руды вырезались плоские образцы с размерами 40×40×10 мм и 20×20×5 мм. С обеих сторон образцы придавливались брикетами аналогичных размеров, изготовленными из размолотого сырья [249].

Обработка результатов экспериментов осуществлялась по методике, изложенной выше.

Для определения параметров структурно-кинетического уравнения проведен структурный анализ прозрачных шлифов исследуемых материалов. Точечным методом вычислялись массовые доли карбонатных включений, приходящих на пять интервалов, размеров: 0-0,01мм, 0,01-0,05мм, 0,05-0,1мм, 0,1-0,15мм, 0,15-0,2мм. Карбонатные включения, имеющие неправильную форму, представлялись для последующих расчетов как сферы с тремя фиксированными размерами.

Структурные параметры  $l_i$ ,  $r_i$ , полученные на основании фракционного состава, приведены в таблице 3.2.4.

Таблица 3.2.4. Структурные параметры, полученные на основании фракционного состава

Структурные параметры	Образец								
	П-2			П-8			П-9		
$r_i \cdot 10^6$ м	2,5	25	75	2,5	25	75	2,5	25	75
$l_i$	0,02	0,76	0,21	0,13	0,5	0,37	0,09	0,55	0,36

С учетом принятого способа представления структурных параметров математическая модель процесса декарбонизации принимает вид:

$$\rho c_p(T, \eta_\Sigma) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \sum_{i=1}^3 c_{1,i} Q_{1,i}^0 \frac{\partial \eta_{1,i}}{\partial \tau} l_i - \sum_{i=1}^3 c_{2,i} Q_{2,i}^0 \frac{\partial \eta_{2,i}}{\partial \tau} l_i \quad (3.2.17)$$

$$\frac{\partial \eta_{1,i}}{\partial \tau} = k_{01} \exp(-E_1/RT) \frac{1}{r_i} (1 - \eta_{1,i})^{2/3}, \quad (3.2.18)$$

$$\frac{\partial \eta_{2,i}}{\partial \tau} = k_{02} \exp(-E_2/RT) \frac{1}{r_i} (1 - \eta_{2,i})^{2/3}, \quad (3.2.19)$$

где  $i = 1, 2, 3$ ;  $\rho c_p(T, \eta_\Sigma)$  - температурно-концентрационная зависимость теплоёмкости фосфоритов.

Для определения предэкспонент  $k_{01}$  и  $k_{02}$  система уравнений (3.2.17 – 3.2.19) решалась с краевыми условиями:

$$T(x, 0) = T_0;$$

$$\eta_{1,i} = \eta_{2,i} = 0 \quad \text{при } \tau = 0,$$

$$T_1(x, \tau) = T_2(-x, \tau) = T_0 + br \quad \text{при } \tau > 0.$$

Значения  $k_{01}$  и  $k_{02}$  определялись путём подбора.

Результаты обработки для исследованных образцов приведены в таблице 3.2.5.

Таблица 3.2.5. Значения параметра  $k_0$

Параметры	Образец		
	П-2	П-8	П-9
$k_{01}, (\text{с}^{-1})$	$0,27 \cdot 10^{12}$	$0,32 \cdot 10^{12}$	$0,45 \cdot 10^{12}$
$k_{02}, (\text{с}^{-1})$	$0,4 \cdot 10^{17}$	$0,55 \cdot 10^{17}$	$0,5 \cdot 10^{17}$

Эффективные параметры кинетических уравнений вида (3.2.3) вычислялись по полученным в термогравиметрическом эксперименте результатам в виде функций  $\bar{\eta}_1(T_n)$ ,  $\bar{\nu}(T_n)$  и  $\bar{\eta}_2(T_n)$ ,  $\bar{\nu}(T_n)$ , для первого и второго этапов декарбонизации, соответственно.

Для расчета температур отнесения использовались экспериментально полученные перепады температур между центром и поверхностью

исследуемых образцов. Результаты обработки приведены в табл. 3.2.6 в виде эффективных параметров кинетических уравнений двух этапов декарбонизации вида (3.2.3).

Таблица 3.2.6. Эффективные параметры кинетических уравнений

Параметр	Образец			
	П-2		П-8	П-9
	брикет	кусок	кусок	кусок
$E_w$ , ккал/моль	10			
$k_{0w}$ , с <sup>-1</sup>	$0,29 \cdot 10^4$			
$n_w$	1			
$E_1$ , ккал/моль	35	70	70	70
$k_{01}$ , с <sup>-1</sup>	$0,144 \cdot 10^4$	$0,59 \cdot 10^{13}$	$0,95 \cdot 10^{14}$	$0,27 \cdot 10^{14}$
$n_1$	1,5	1,5	4,5	2,0
$E_2$ , ккал/моль	79	109	109	109
$k_{02}$ , с <sup>-1</sup>	$0,53 \cdot 10^{14}$	$0,23 \cdot 10^{19}$	$0,12 \cdot 10^{20}$	$0,14 \cdot 10^{20}$
$n_2$	2	3	5	5

Для оценки описания процесса декарбонизации фосфоритов при нагреве с использованием имеющихся в литературе и полученных в настоящей работе кинетических уравнений проведено сопоставление численных расчётов с результатами экспериментов.

Расчёты проводились совместным решением уравнения теплопроводности и различных кинетических уравнений [250].

Результаты расчётов процесса прокалики плоских образцов с толщиной 10мм при скорости нагрева  $0,11(\text{K} \cdot \text{с}^{-1})$  и 5мм при скорости нагрева  $0,44(\text{K} \cdot \text{с}^{-1})$  приведены на рисунках 3.2.5 - 3.2.6. Кривые 1 и 2 соответствуют расчётам по кинетическому уравнению, предложенному в [251], 3 и 4 получены посредством кинетических уравнений, рекомендованных в [252].

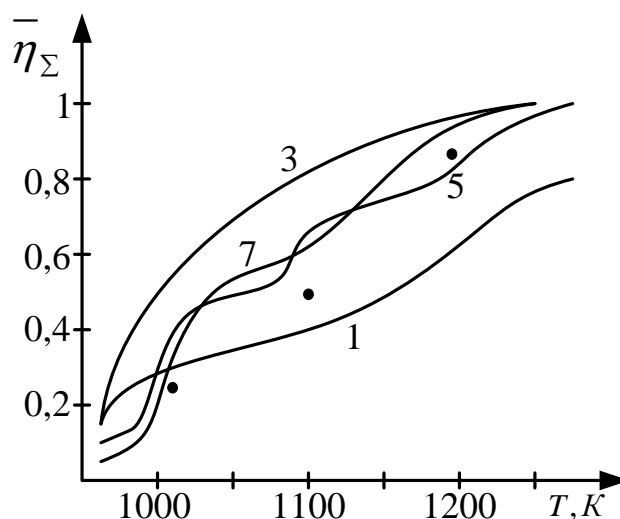


Рис. 3.2.5. Сопоставление результатов эксперимента и расчётов при скорости нагрева образцов  $0,11, \text{K} \cdot \text{с}^{-1}$

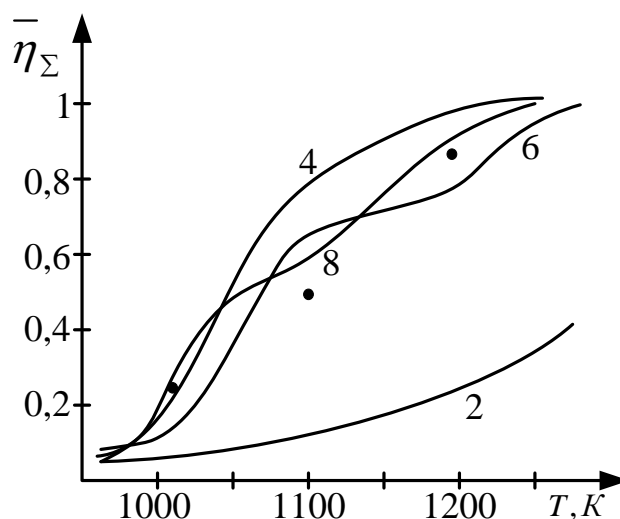


Рис. 3.2.6. Сопоставление результатов эксперимента и расчётов при скорости нагрева образцов  $0,44, \text{K} \cdot \text{с}^{-1}$

Результаты расчётов проковки с помощью структурно-кинетических уравнений (1.19) и (1.20) и уравнений с эффективными параметрами (таблица 1.6, П-2) представлены кривыми 5, 6 и 7, 8 соответственно. На рис. 3.2.5, 3.2.6 отмечены точками результаты экспериментального исследования проковки образцов с размерами и скоростями нагрева, идентичными принятым в расчетах.

Все результаты численных расчетов и экспериментов представлены в виде суммарной прокали  $\eta_{\Sigma}$  и приведены к температуре поверхности образцов.

На всех этапах подготовки и переработки фосфатного сырья по термической технологии целевые процессы (сушка, дегидратация, декарбонизация, спекание, восстановление и возгонка фосфора) осуществляются путём регламентированного теплового воздействия на исходный материал. Нагрев сырья или шихты происходит в результате высокоинтенсивного теплообмена с продуктами сгорания топлива или реакционными газами, фильтрующимися через слой холодных частиц, или расплавом, находящимся в контакте с твёрдыми частицами шихты.

Поскольку целевые процессы носят термически активируемый характер, их интенсивность находится в прямой зависимости от условий внешнего и внутреннего теплообмена зерен, которые, в свою очередь, определяются теплофизическими характеристиками (ТФХ) обрабатываемых материалов.

Существенное влияние ТФХ фосфатного сырья на ход и эффективность процесса обжига в слое, просасываемом греющим газом, отмечалось в работе [253].

Особое значение имеет выбор методов исследования температурных зависимостей ТФХ фосфоросодержащих руд и пород. Сложная меняющаяся при нагревании структура фосфоритов, серия физико-химических явлений, сопряжённая с эндотермическими реакциями, взаимозависимое влияние параметров тепломассопереноса и кинетики гетерогенных процессов сужают применение классических подходов к определению теплофизических характеристик [254].

Приводятся результаты исследований ТФХ (коэффициент теплопроводности и объёмная теплоёмкость) некоторых типов кускового и окомкованного фосфатного сырья, характеризующихся широким диапазоном

изменения концентраций породообразующих минералов и различающихся по структуре.

В таблице 3.2.7 приведены результаты химических анализов и определения плотности  $\rho$  исследуемых образцов, описание структуры которых дано ниже.

**Проба 1.** Оолитовый фосфорит. Цемент сложен, в основном, карбонатной массой от мелкозернистой до криптокристаллической структуры. Зёрна карбоната от 0,001 до 0,2 мм.

**Проба 2.** Фосфатно-глинисто-кремнистый сланец.

**Проба 3.** Фосфатизированный кремний с олеврито-пелитоморфной структурой.

**Проба 4.** Богатый оолитовый фосфорит. Размер прилегающих друг к другу оолитов в среднем составляет 0,2мм. Цемент-аморфный фосфат.

**Проба 5.** Доломит (80-85%) с примесью фосфатных оолитов. Цемент сложен карбонатной массой.

**Проба 6.** Богатый карбонатизированный фосфат. Структура обломочная, участками псевдооолитовая. Цемент почти изотропный, иногда в виде аморфного фосфата.

Экспериментальная установка, методика проведения опытов и обработка экспериментальных данных приведены в [255]. Исследования проводились методом регулярного режима третьего рода при монотонном нагреве образцов со скоростью 0,028-0,042К/с. Первый нагрев заканчивался при 1220К, затем образец выдерживался в течение часа и медленно охлаждался. Повторный нагрев и определение ТФХ осуществлялись до 1320-1370К. Погрешности нахождения ТФХ при первом нагреве в областях 380-920 и 1180-1200К и при повторном нагреве во всём исследуемом диапазоне температур не превышали 5% для коэффициента теплопроводности и 8% для объёмной теплоёмкости.



Таблица 3.2.7. Результаты химических анализов исследуемых образцов

Проба	Содержание компонентов, %								
	НО	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub>	прочие	ρ, кг/м <sup>3</sup>
П1	4,4	21,92	44,36	8,02	0,23	0,1	19,39	19,52	$\frac{2,85}{2,30}$
П2	67,98	6,81	10,43	0,77	3,19	5,6	0,48	3,52	$\frac{2,32}{2,27}$
П3	93,4	1,1	8	-	2,0	-	0,4	0,9	$\frac{2,63}{2,60}$
П4	5,64	31,77	48,40	2,26	0,77	0,92	5,75	6,42	$\frac{2,96}{2,76}$
П5	8,96	3,62	31,65	14,26	1,70	1,01	36,56	36,16	$\frac{2,83}{1,88}$
П6	8,21	32,66	47,89	2,06	0,65	0,97	4,88	4,39	$\frac{3,0}{2,1}$

Примечание. В числителе дана плотность сырья до, в знаменателе – после обжига.

В области температур термической декарбонизации при первом нагреве образцов погрешности не могут быть определены, так как применённый метод неприемлем для исследования материалов при наличии внутренних источников (стоков) тепла. Для принятых условий нагрева процессу декарбонизации соответствует температурный диапазон  $920-1180K$ . Результаты изучения теплопроводности и теплоёмкости фосфоросодержащих руд и пород приведены на рисунках 3.2.7 и 3.2.8.

Зависимости ТФХ в области температур термической декарбонизации получены с использованием численного решения инверсной задачи теплопроводности [256]. Результаты определения коэффициента теплопроводности и объёмной теплоёмкости в области фазовых

превращений показывают, что наиболее сильное влияние диссоциации карбонатов на теплопроводность наблюдается в начале ХЭТП декарбонизации. Причиной является нарушение теплового контакта кристалликов карбонатов в породе при появлении на их поверхности порошкообразного продукта.

Если все исследованные пробы расположить в порядке уменьшения коэффициента теплопроводности, то получим следующий ряд: фосфатизированные кремни; фосфатизированный доломит; богатый оолитовый и карбонатизированный фосфориты; фосфатно-глинисто-кремнистый сланец.

Существующие представления о теплопроводности композиционных структур, а также полученные данные позволяют заключить: наибольшую теплопроводность из числа основных составляющих фосфатного сырья имеет кварц и гидратированный кремнезём, о чём свидетельствует высокая исходная теплопроводность пород с высоким содержанием  $\text{SiO}_2$ . За ними следуют карбонаты. Наименьшей теплопроводностью обладает основное фосфатное вещество. Низкая теплопроводность сланцев, по-видимому, объясняется наличием в них значительного количества пор и трещин [257].

Термически активируемые процессы подготовки фосфатного сырья существенно влияют на температурную зависимость ТФХ.

Значительное снижение коэффициента теплопроводности пород в области 350-440К (рис. 3.2.7) соответствует процессу сушки. Это обусловлено освобождением пор и трещин пород от содержащейся в них физической влаги и их замещением менее теплопроводной газовой фазой.

Процессы дегидратации и декарбонизации, модификационные превращения приводят к дальнейшему снижению коэффициента теплопроводности при нагреве до 1000-1200К. Это связано с совместным действием следующих факторов:

- образованием сети микроскопических пор и трещин в зёрнах кристаллогидратов и основного фосфатного вещества;

- снижением теплопроводности отдельных зерен;
- образованием трещин в зоне контакта зерен с цементирующим веществом и в самом цементе, то есть ухудшением тепловых контактов между компонентами композиционной структуры и замещением высокотеплопроводных кристаллических включений карбонатов порошкообразным продуктом, имеющим низкую эффективную теплопроводность [258 - 260].

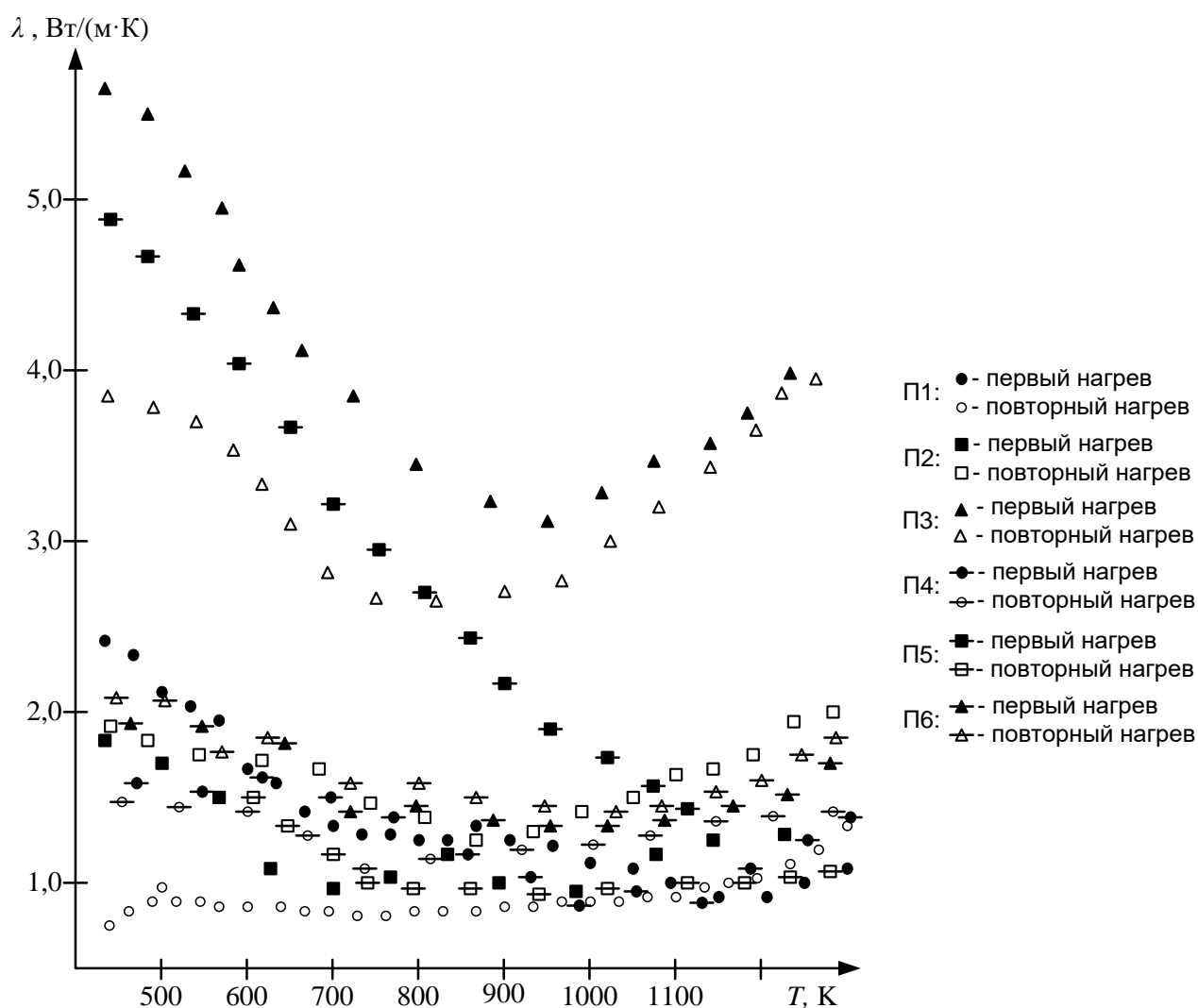


Рис. 3.2.7. Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры разнообразных фосфоритовых руд

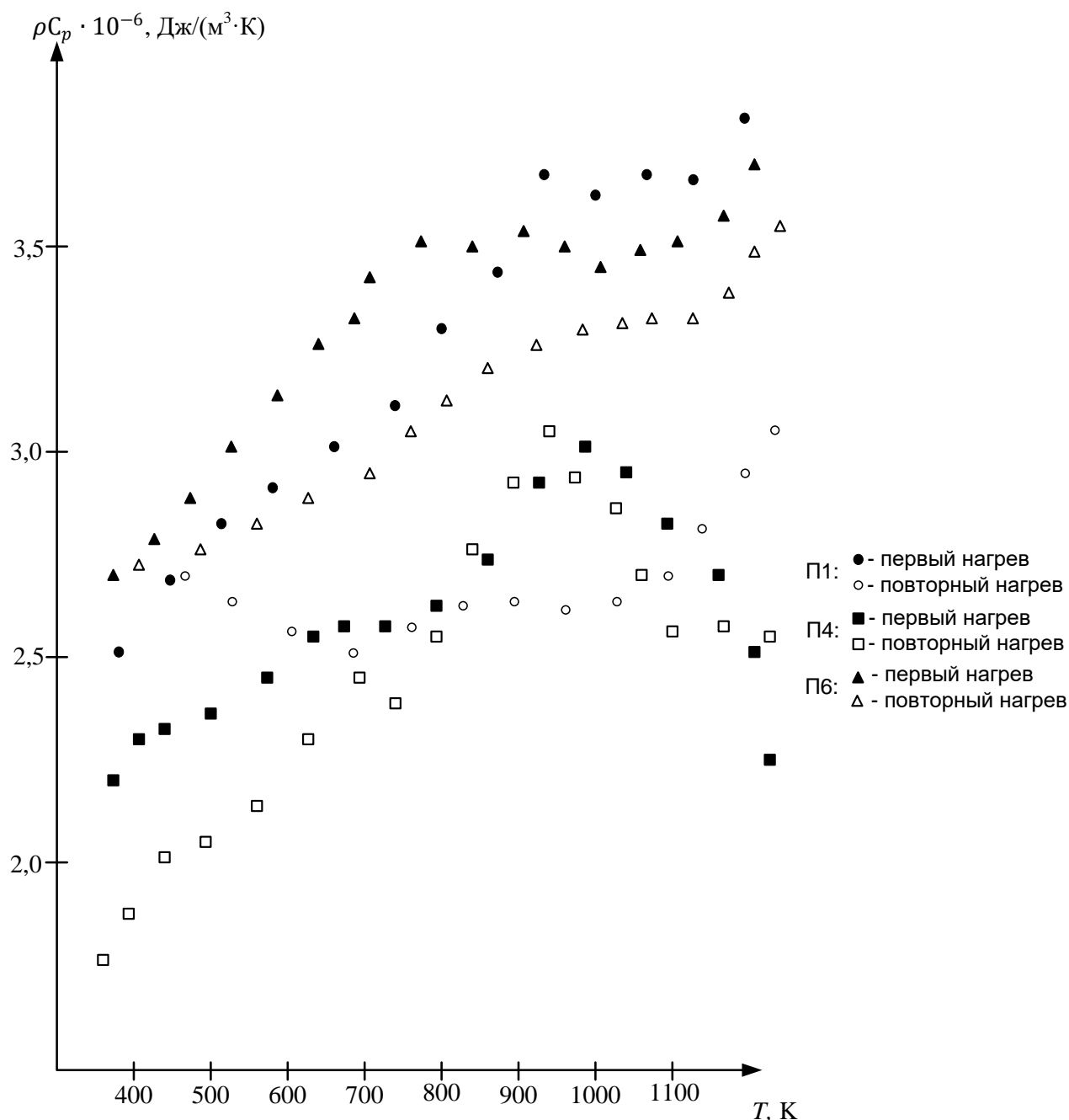


Рис. 3.2.8. Зависимость объёмной теплоёмкости от температуры материала различных фосфоросодержащих пород

Взаимодействие кварца с продуктами разложения карбонатов и основного фосфатного вещества с образованием новых силикатных фаз и сплавление отдельных зерен минералов способствует, как правило, повышению теплопроводности. При оплавлении происходит переход от

зернистой структуры к ячеистой, что является фактором, повышающим теплопроводность композиционных материалов.

В зависимости от химического и минералогического состава сырья эти процессы могут протекать в различных температурных интервалах. Так появление стекла в сланцах отмечается начиная с 970К, и, как показывают результаты исследований, приводит к возрастанию теплопроводности последних в интервале 970-1300К. В фосфоритах до 1300К количество стеклофазы незначительно. В связи с этим до указанного предела изменение теплопроводности сохраняет убывающий характер.

Различия в объёмной теплоёмкости сырых кусковых руд и пород менее значительны. В области температур 340-870К их объёмная теплоёмкость монотонно возрастает. Снижение теплоёмкости при 870-1200К, наблюдаемое у руд и пород, содержащих карбонаты, объясняется выделением газообразной двуокиси углерода и снижением кажущейся плотности материалов и их состава.

Температурные зависимости ТФХ окомкованного фосфатного сырья также определялись из решения инверсной задачи теплопроводности. Для изготовления образцов использовался размолотый фосфорит (Проба 1), в качестве связующего – жидкое стекло (около 1% от массы образца).

Исследования проводились при следующих условиях: в интервале 300-600К в реакторе поддерживалась скорость нагрева окружающего воздуха 0,56К/с; начиная от 600 и до 1720К нагрев поверхности образца осуществлялся со скоростью 0,28К/с; после его охлаждения проводились повторные эксперименты со скоростью нагрева 0,56К/с.

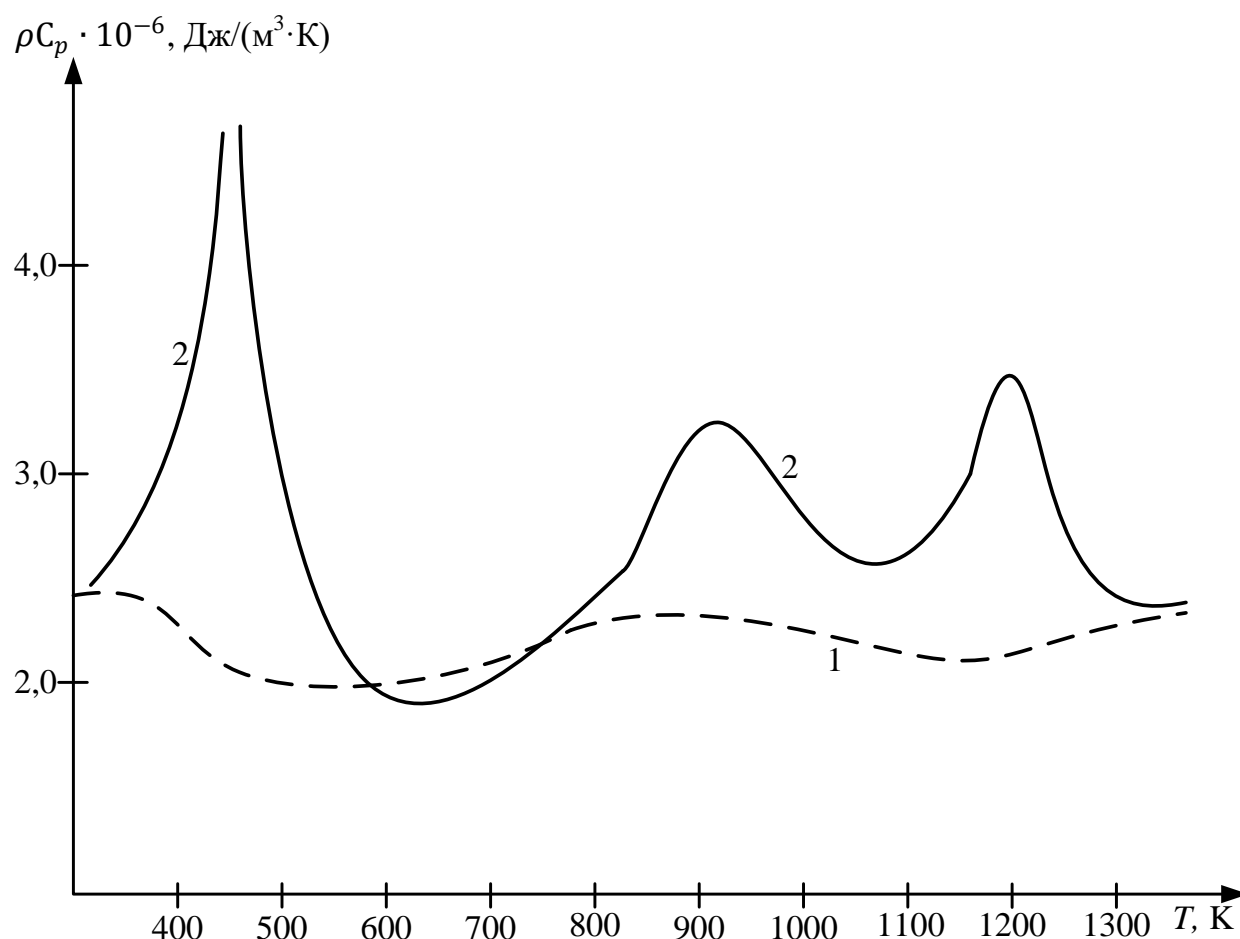


Рис.3.2.9. Изменение объёмных теплоёмкостей окомкованного фосфатного сырья при нагревании: 1 - при повторном нагреве, 2 - при первом нагреве

На рисунках 3.2.9 и 3.2.10 приведены результаты исследования ТФХ окомкованного сырья. На рисунке 3.2.11 представлены результаты определения потери массы  $\Delta m$  (%) и относительного удлинения  $\Delta l$  (%) кускового (2) и окомкованного фосфатного сырья (1, 3).

Проведенные исследования окатанного фосфатного сырья доказывают, что измельчение некондиционного сырья и затем грануляция в окатыши сильно меняют значения самого коэффициента теплопроводности и его зависимости от температуры. Например, теплопроводность сухих окатышей при температуре 400К в несколько раз меньше, чем у дисперсного кускового фосфатного сырья такого же химического состава при аналогичной температуре.

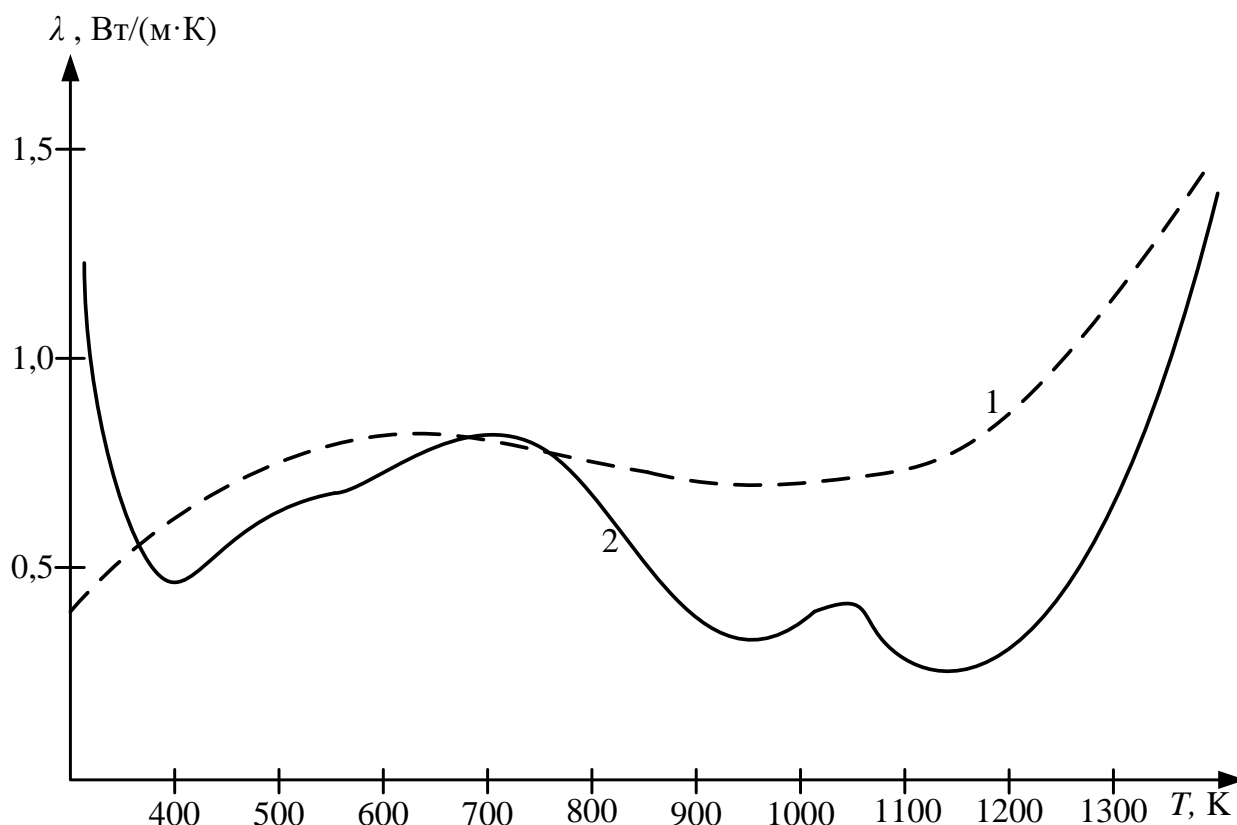


Рис. 3.2.10. Изменение коэффициента теплопроводности окомкованного фосфатного сырья при нагревании: 1 - при повторном нагреве, 2 - при первом нагреве

На температурной зависимости коэффициента теплопроводности можно выделить несколько участков:

- 1) 300-450K – падение теплопроводности при удалении влаги;
- 2) 450-800K – теплопроводность возрастает (в отличие от кускового материала аналогичного состава), характерно для дисперсных систем, имеющих зернистую структуру;
- 3) 800-1200K – теплопроводность снижается и достигает своего минимального значения;
- 4) более 1200K – повышение теплопроводности в несколько раз.

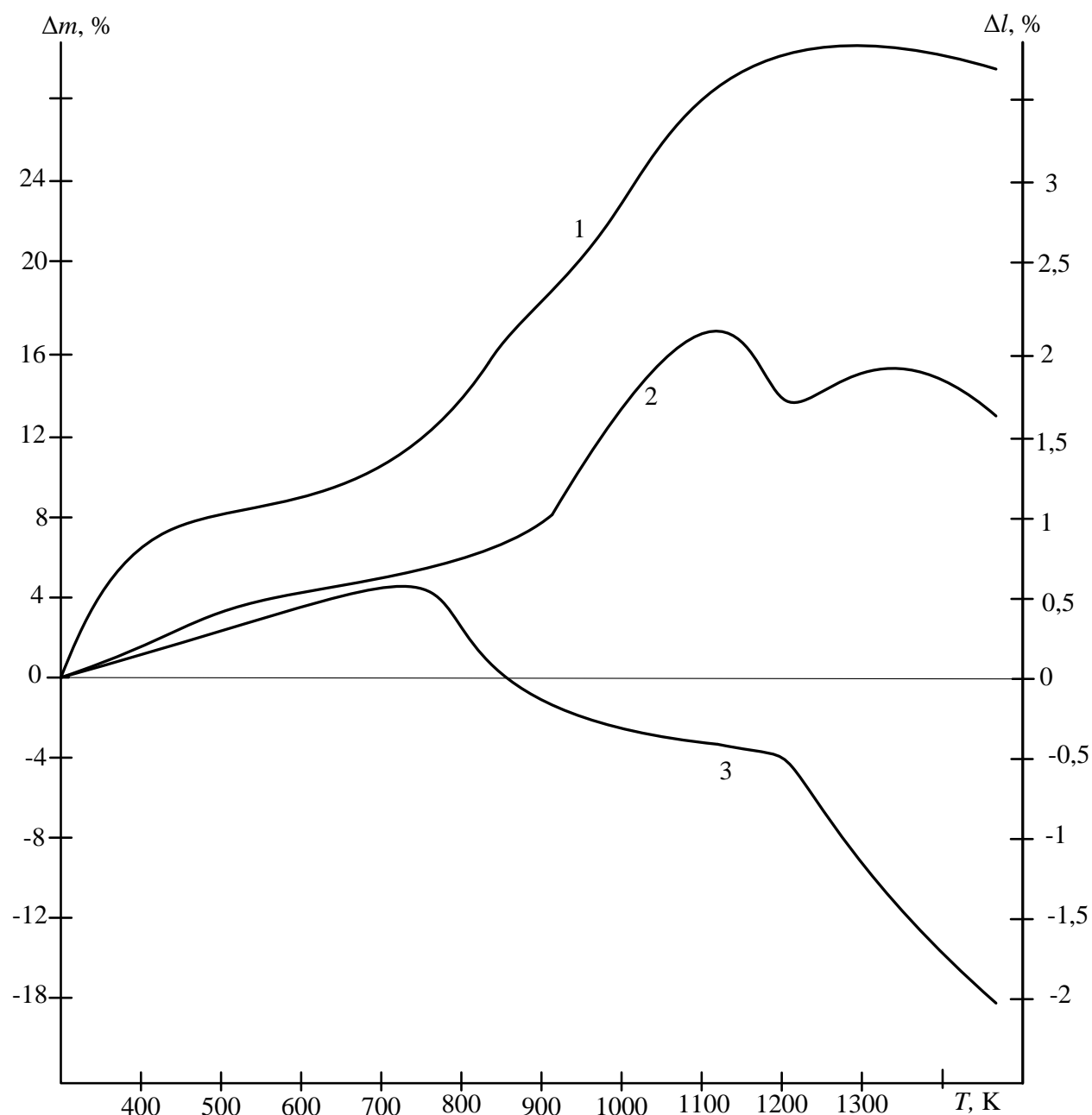


Рис.3.2.11. Зависимость изменения массы и относительного удлинения кускового (2) и окомкованного (1, 3) фосфатного сырья от температуры

Отмечается, что теплопроводность окатыша, обожжённого до 1420K, выше на 10-30%, чем у просушенного, и в четыре-пять раз выше, чем у обожжённого до 1000-1200K.

Сопоставление результатов теплофизических, термографических и дилатометрических исследований позволяют сделать следующие



предположения о фактах, определяющих температурную зависимость ТФХ окомкованного сырья [261].

- В процессе окомкования и последующей сушки в окатышах формируется «первичная» жесткая зернистая структура, характеризующаяся значительной порозностью (около 0,45).
- Нагрев до 800К к заметным изменениям структуры не приводит, о чём свидетельствует близость дилатометрических кривых окомкованного и кускового сырья.
- Теплопроводность просушенных окатышей в основном оценивается порозностью, и в значительно меньшей степени, чем теплопроводность кускового сырья, зависит от массовой концентрации минералов, образующихся в пар.
- В результате диссоциации карбонатов исходная структура частично разрушается, что приводит к значительному снижению теплопроводности и, по-видимому, к уменьшению прочности окатыша (начиная с 800К).
- Окомкованный материал в области 800-1200К претерпевает «усадку» примерно на 7%. Появление жидкой фазы при нагреве выше 1200К вызывает дальнейшее уплотнение материала до 20% в результате действия сил поверхностного натяжения и формирование «вторичной», ячеистой структуры. Этот процесс сопровождается снижением порозности, значительным повышением теплопроводности и прочности обожжённого материала.
- В результате окатыши, обожжённые до 1400-1450К, приобретают более высокую теплопроводность, чем кусковой материал.

Представленные данные позволяют научно обоснованно утвердить важные практические заключения:

- В процессе прогрева из-за влияния химико-физических явлений теплопроводность материалов претерпевает значительные изменения;

- процессы дегидратации и декарбонизации приводят к необратимому снижению теплопроводности кусковых и окомкованных материалов, обожжённых до 1200-1250К, тем более значительному, чем выше концентрация реагирующих включений;

### **3.3 Многомасштабная математическая модель ХЭТП процессов прокалики и спекания в одном окатыше**

Проведение ХЭТП высокотемпературного обжига окатышей сопровождается немалой долей возврата и пониженной конечной прочностью обожжённых окатышей. Важная научно-техническая проблема – разработка высокоэффективных ХЭТП для повышения производительности оборудования и ХЭТС становится весьма актуальной на современном этапе.

Экспериментальные исследования ХЭТП упрочняющего обжига фосфоритовых окатышей говорят о разнообразии сопутствующих химико-физических превращений. Исследования ХЭТП спекания гранул, полученных прессованием измельченного в порошок фосфорита, обладающего удельной поверхностью, варьируемой в диапазоне  $333 \div 336 \text{ м}^2/\text{кг}$ , проводились с использованием дериватографа в условиях скоростей нагревания, реализованных в действующих обжиговых конвейерных машинах в неизотермических условиях. Химсостав проб, исследуемых в эксперименте, представлен в таблице 3.3.1.

В процессе прогрева исследовались убыль веса и температура на поверхности образца. Однотипные образцы подогревались до требуемых температур и выдерживались при конечной температуре до полного нагревания. Затем после окончательного охлаждения замерялась прочность.

Полученные в экспериментах данные представлены на рис. 3.3.1.

Измерения длины и диаметра образцов до и после прогрева доказывают изменение размеров на 2-3%. Образующиеся в процессе реакций газообразные продукты раздувают образцы, при дальнейшем увеличении

температуры разрушают внешнюю оболочку, выходят наружу и образуют на поверхности окатыша “кратеры”. При температурах больше 1400К образуется стекловидная фаза по поверхности окатыша и увеличивается пористость окатышей [262].

Таблица 3.3.1. Химсостав проб в эксперименте

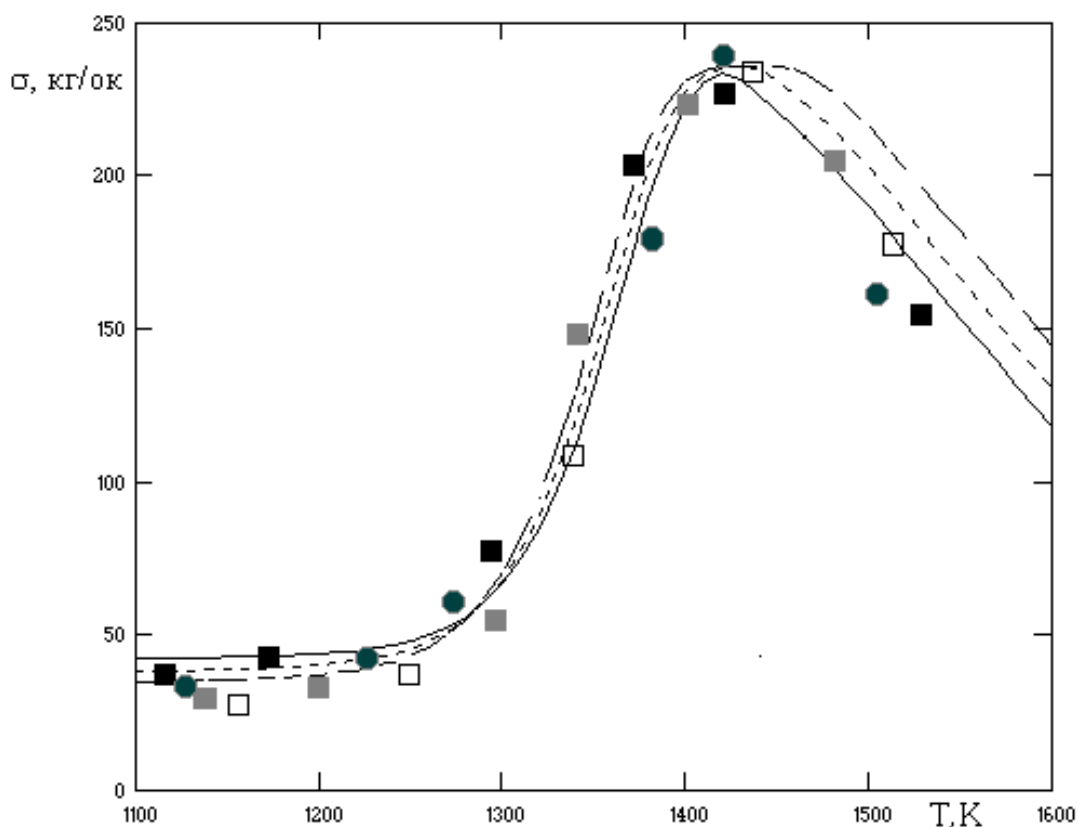
	П 1	П 2	П 3	П 4	П 5
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	19.5	22.6	21.0	23.2	24.0
SiO <sub>2</sub>	20.9	24.7	22.8	14.8	18.5
MgO	33.8	1.4	2.6	3.8	2.7
CO <sub>2</sub>	10.9	5.85	8.38	9.1	6.9
CaO	35.5	36.4	35.9	39.4	39.1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.48	1.48	1.48	0.56	1.3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.25	1.12	1.19	2.7	1.2
K <sub>2</sub> O	0.55	0.75	0.65		
Na <sub>2</sub> O	0.6	0.6	0.6		
SO <sub>3</sub>	0.65	0.76	0.75	0.15	
п.п.п.	11.5	5.9	8.7		

Удельная поверхность образцов проб: П1 – 333, П2 – 335.6, П3 - 336 м<sup>2</sup>/кг

Степень декарбонизации образцов достигает наибольших значений.

Будем считать, что образование трещин происходит при превращении энергии упругости, накопленной при преобразовании фаз, в энергию поверхностную. Площадь трещин можно выразить из уравнения:

$$\Delta U_{\text{упр}} = \Delta U_{\text{пов}} \cdot \Delta U_{\text{пов}} = 2\gamma S.$$



Экспериментальные данные: □ - проба №5-1, ■ - проба №6-2, ■ - проба №7-3.

● - Талхаев М.П., Борисова Л.И. и др. (Месторождение Аксай,  $\text{Cso}_2$  9.95%)

Численные результаты: — проба №5-1, — проба №7-3, — проба №6-2

Рис 3.3.1. Сравнительный анализ прочности спекаемых образцов при ХЭТП высокотемпературного обжига

Для оценки упругой энергии при одноосном напряженном состоянии используется соотношение  $\Delta U_{\text{уп}} = (\epsilon^2 E / 2) \eta$ , где  $\epsilon$  - кристаллохимическая константа превращения [263]. При степени реагирования  $\eta$  для образующихся в результате диссоциации карбонатов трещин общую площадь их поверхности возможно описать так:  $S = \epsilon^2 E \eta / 4 \gamma$ . Выражение описания внутренней порозности к  $n$ -й релаксации напряжений имеет вид:

$$\epsilon_n = \epsilon_{n-1} + \frac{d\sigma_0^2}{16\gamma E^*} \sum_{m=1}^n \left( 1 - \sum_{i=1}^m v_i \right) - \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{4},$$

где:  $\sum_{i=1}^n v_i = \eta$  - степень реагирования к  $n$ -й релаксации.

Полную эффективную порозность окатышей можно рассчитывать по формуле:

$$\varepsilon = 1 - \frac{N \cdot \frac{4}{3} \pi r^3 \cdot (1 - \varepsilon_2)}{\frac{4}{3} \pi R^3} = 1 - (1 - \varepsilon_1) \cdot (1 - \varepsilon_2).$$

Зависимость  $\varepsilon$  от  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  проиллюстрирована на рис. 3.3.2.

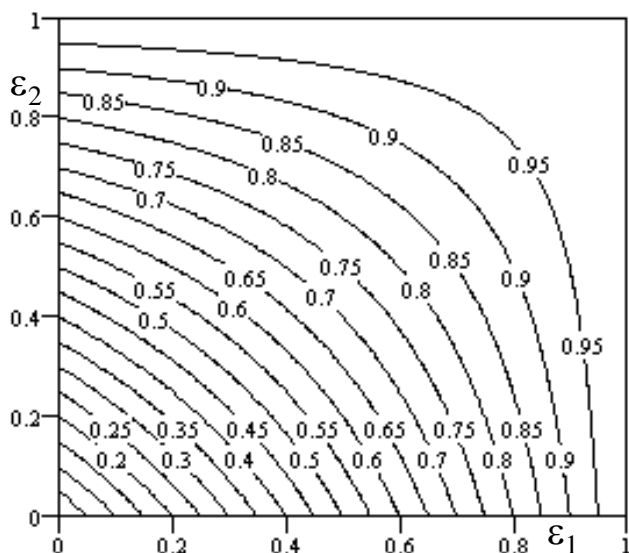


Рис. 3.3.2. Зависимость полной эффективной порозности  $\varepsilon$  от  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$

ХЭТП спекания возможно моделировать феноменологически, используя реологический подход, который позволяет описать уменьшение пористости уравнением:

$$\frac{d\varepsilon}{d\tau} = \frac{2\sigma_T \varepsilon}{(4/3)\mu_M (1 - \varepsilon)^2 r_M}.$$

При исследовании взаимозависимости между вязкостью материала и химического состава вещества выявлена возможность использования так называемого «коэффициента структуры анионов» -  $KCA$ , применение которого описано в приложении к силикатным расплавам [264]. В силикатных системах  $KCA$  определяется уравнением:  $KCA = \Sigma O / (Si + 0,75Al)$ , здесь  $\Sigma O$  – молярная суммарная доля кислорода,

входящего в различные оксиды; Si и Al – молярные доли оксидов соответственно кремния и алюминия. В предложенной Френкелем формуле зависимости вязкости (Па·с) от температуры (К):

$$\mu_M = \mu_{M0} \exp\left(\frac{E_\mu}{RT_m}\right),$$

значения  $\mu_{M0}$  и  $E_\mu$  зависят от  $KCA$ .

В итоге:

$$\lg \mu = -11.53 + 1.705 \cdot KCA + \frac{10^{2.34 - 0.22 \cdot KCA}}{4.575 \cdot 10^{-3} T_m}.$$

Здесь учтена зависимость от  $KCA$  предэкспоненты  $\mu_{M0}$  и энергии активации  $E_\mu$ .

У фосфоритов значение  $KCA$  определяется соотношением:

$$KCA = \frac{\Sigma O + 3F}{Si + 0.75Al + 1.25P}.$$

Связь пористости и прочности окатыша описывается эмпирическим уравнением:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} = -b\sigma.$$

При температурах превышающих температуру плавления материала окатыша  $t$ , наблюдается процесс снижения прочности окатышей, обусловленный возникновением стеклофазы. Будем считать, что скорость появления стеклофазы пропорциональна разности температуры перегрева материала окатыша и температуры плавления или фазового переход:

$$\frac{\partial g}{\partial \tau} = \frac{\alpha_F F(T_m - t)}{Q_L}.$$

Температура фазового перехода  $t$  определяется концентрацией включений  $K_2O$ ,  $Na_2O$ ,  $Fe_2O_3$  или «плавней»:

$$C_{II} = K_2O + Na_2O + Fe_2O_3 \text{ и } SiO_2.$$

Эта зависимость описывается соотношениями:

$$t = 1541 - 7,8\text{SiO}_2 + 0,1(\text{SiO}_2)^2, \text{ при } C_{\text{II}} < 2,6\%,$$

$$t = 1454 - 9,7\text{SiO}_2 + 0,1(\text{SiO}_2)^2, \text{ при } C_{\text{II}} > 2,6\%.$$

Характер протекания этих процессов определяет качество обожженного окатыша [265, 266]. Из-за того, что химико-физические явления являются термически активируемыми, нужно учитывать их существенный вклад в процесс теплообмена [267].

Определяющий способ теплопереноса в теле окатыша – теплопроводность с наличием эндотермических тепловых эффектов химических реакций [268].

Их математическое описание основывается на системе дифференциальных уравнений, ведущую роль в которой играет нелинейное уравнение теплопроводности со стоком теплоты эндотермические химико-физические превращения:

$$\rho_m c_m \frac{\partial T_m}{\partial \tau} = \frac{1}{x^2} \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_m x^2 \frac{\partial T_m}{\partial x} \right) - \sum_l q_l \omega_l,$$

$$\omega_{1,2} = \frac{\partial \eta_{1,2}}{\partial \tau} = k_{01} (1 - \eta_{1,2})^{1,5} \exp \left( -E_{1,2} / RT_m \right),$$

$$\omega_3 = \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} = \frac{2\sigma_T \varepsilon}{(4/3)\mu_M (1 - \varepsilon)^2 r_M},$$

$$\omega_4 = \frac{\partial g}{\partial \tau} = \frac{\alpha_F F(T_m - t)}{Q_L},$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} = -b\sigma,$$

начальные и граничные условия:

$$\tau = 0, \quad T_m = T_{m0}, \quad \eta = 0, \quad g = 0, \quad \varepsilon = \varepsilon_0;$$

$$x = 0, \quad \frac{\partial T_m}{\partial x};$$

$$x = x_s, \quad -\lambda \left( \frac{\partial T_m}{\partial x} \right) = \alpha_F (T_g - T_m)_{x=x_s}.$$

Зависимости коэффициентов теплопроводности многокомпонентной структуры вещества окатыша от температуры неплохо аппроксимируются квадратичными многочленами в диапазоне температур  $400 - 1300 K$ :

фосфатное вещество

$$\lambda = 2,82 - 0,3 \cdot 10^{-2} T + 0,14 \cdot 10^{-5} T^2, \text{ Вт/м} \cdot \text{К};$$

кремнистая составляющая

$$\lambda = 12,6 - 1,75 \cdot 10^{-2} T + 0,95 \cdot 10^{-5} T^2, \text{ Вт/м} \cdot \text{К};$$

непрореагировавшая карбонатная составляющая

$$\lambda = 7,58 - 1,08 \cdot 10^{-2} T + 0,49 \cdot 10^{-5} T^2, \text{ Вт/м} \cdot \text{К};$$

обожженный карбонат

$$\lambda = 1,52 - 0,13 \cdot 10^{-2} T + 0,48 \cdot 10^{-6} T^2, \text{ Вт/м} \cdot \text{К}.$$

Доля объёма карбонатов, не подвергшихся диссоциации,  $v_k$  вычисляется с использованием переменной состояния  $\eta$ , степени реагирования:

$$v_k = \frac{(1-\eta)/\rho_w}{(1-\eta)/\rho_w + \eta/\rho_d},$$

где  $\rho_w$  – плотность необожжённого окатыша,  $\rho_d$  – плотность обожжённого окатыша.

При вычислении  $E^*$  эффективного модуля Юнга совокупности карбонатных включений  $E_1$  и остального вещества окатышей  $E_2$  применялась формула:

$$E^* = E_2 + \frac{\eta(E_1 - E_2)}{1 + \left(2/5\right)(1-\eta)(E_1 - E_2)/E_2}.$$

Описанная в виде системы дифференциальных уравнений математическая задача решалась конечно-разностным методом с использованием неявной схемы. Полученные в вычислительных экспериментах результаты (см. рис.3.3.1) показывают согласование



эксперимента в диапазоне температуры высокотемпературного обжига образцов, в том числе в области фазовых превращений.

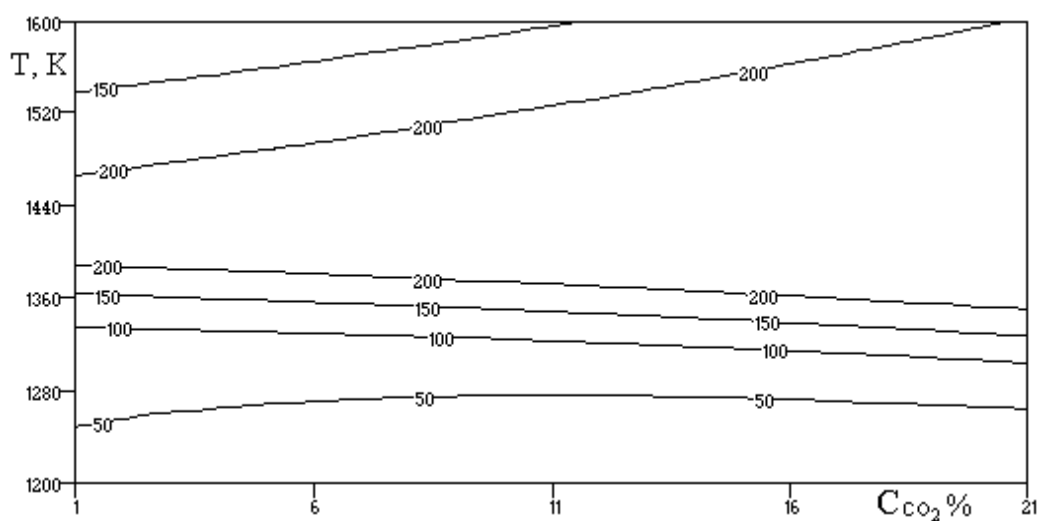


Рис 3.3.3. Изолинии прочности в высокотемпературной области интенсивного спекания изменения

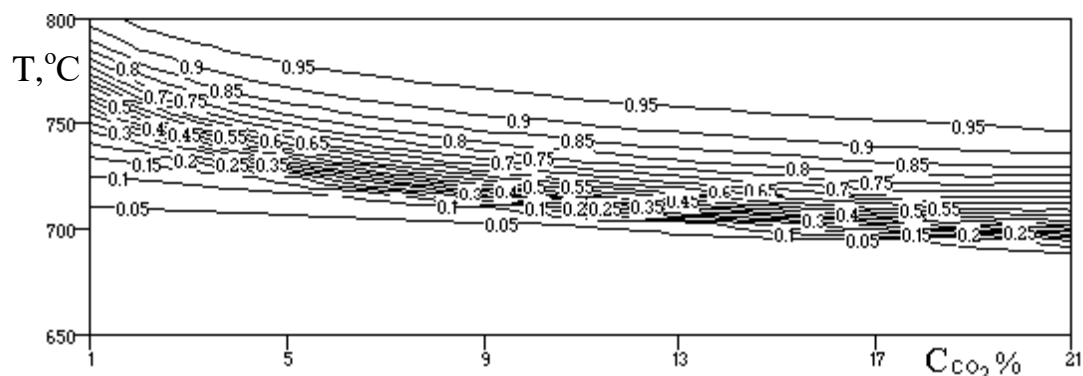


Рис 3.3.4. Изолинии степени реагирования в области интенсивной прокалки

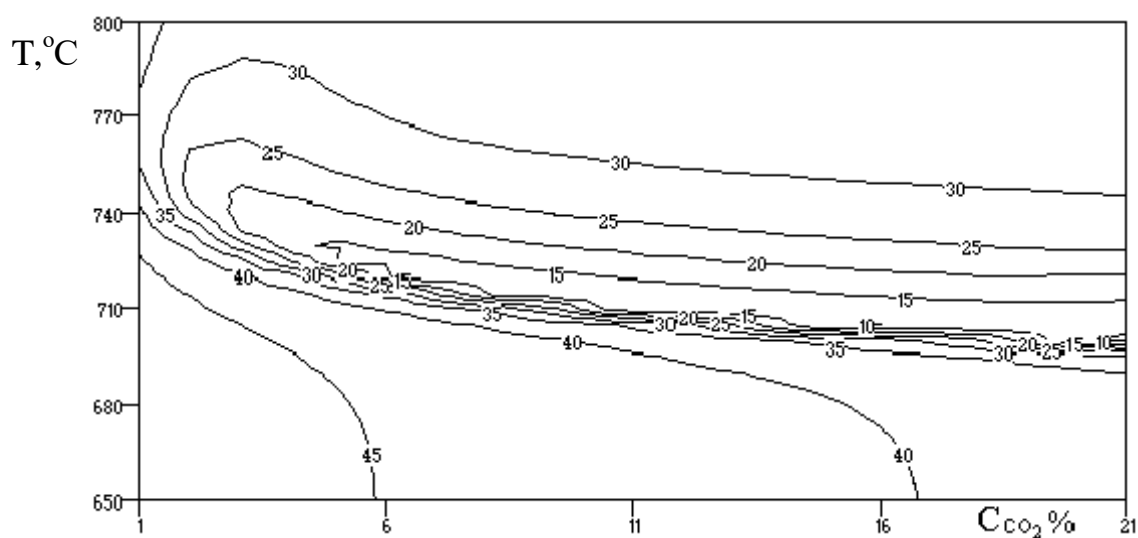


Рис 3.3.5. Изолинии прочности в области интенсивной прокалики и умеренной температуры

На рис. 3.3.3 – 3.3.5 представлены результаты вычислительных экспериментов по степени реагирования и конечной прочности окатышей из фосфоритовой руды различных химико-технологических составов при температурах термической подготовки. Построенные графики доказывают взаимосвязь начального содержания карбонатов и конечной прочности фосфоритовых окатышей.

Основной целью обжига окатышей является достижение наибольшей степени реагирования реакций декарбонизации. Обжиг протекает в диапазоне температур 650 - 800°C, более интенсивно в диапазоне 700 - 770°C при любом химическом составе. Для образцов, содержащих больше карбонатов, реагирование протекает при пониженных температурах. Такое явление обосновывается эндотермическим характером реакций декарбонизации, а степень реагирования диссоциации карбонатов сильно зависит от температуры и выдержки времени при этой температуре. Следовательно, чтобы прогреть окатыш до необходимой температуры газо-теплоносителя, требуется большее время. Поэтому оптимальный режим для достижения требуемой степени реагирования при определённом химическом

составе необходимо находить в комплексной взаимозависимости температуры и времени.

Выше было отмечено, что реакция декарбонизации оказывает существенное влияние на конечную прочность окатышей. Из-за этого в областях интенсивного протекания реакций декарбонизации отмечается сильное снижение прочности образца (рис. 3.3.5.). Причем существуют области температур и концентрации карбонатов, внутри которых снижение прочности, обусловленное реакцией диссоциации карбонатов, не уравнивается ХЭТП спекания, в итоге фосфоритовый окатыш разрушается [269]. В условиях дальнейшего повышения температуры обжига при отсутствии совпадающих условий термического разрушения окатышей ХЭТП спекания и разупрочнения компенсируют друг друга.

#### **3.4 Многомасштабная математическая модель ХЭТП спекания и прокалики в движущейся плотной многослойной массе фосфоритовых окатышей**

Технологический процесс обжига движущейся многослойной массы фосфоритовых окатышей – это сложный многостадийный ХЭТП, представляющий собой совокупность процессов диссоциации карбонатов и спекания зерен в окатыше, которые обеспечивают конечную прочность образующихся фосфоритовых окатышей [270]. 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 [271]. Режимные параметры и завершенность этого сложного ХЭТП в движущейся многослойной массе фосфоритовых окатышей в обжиговой машине как сложной химико-энерготехнологической системе определяет качество их термической обработки [272].

Изменение физико-химических свойств или гранулометрического состава поступающего в ХЭТС [2] минерального сырья требует проведения дорогостоящих экспериментальных исследований для перенастройки параметров технологических режимов обжиговой машины [273]. Актуальной новой теоретической и прикладной задачей является математическое и компьютерное моделирование сложных ХЭТП обжига фосфатного сырья в движущейся на конвейере ХЭТС плотной многослойной массе [274].

ХЭТП обжига на микроуровне включает взаимосвязанные и взаимозависимые ХТП диссоциации карбонатов в окатыше, а также процессы твёрдо- и жидкофазного спекания зёрен в окатыше, определяющие конечную прочность обожженного окатыша. На макроуровне ХЭТП обжига включает три взаимосвязанные стадии: обжиг каждого отдельного окатыша (см. рис.3.4.1), обжиг вертикальной многослойной укладки окатышей, обжиг движущейся плотной многослойной массы окатышей.

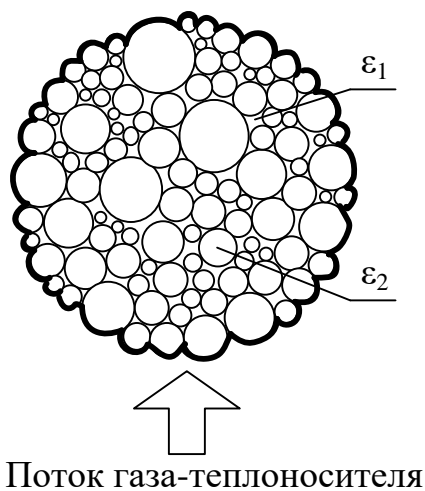


Рис. 3.4.1. Обжигаемый фосфоритовый окатыш как совокупность зерен измельчённой фосфоритовой руды:  $\varepsilon_1$  – внешняя пористость окатыша в целом,  $\varepsilon_2$  – внутренняя пористость отдельных зёрен

Окатыш состоит из совокупности отдельных зёрен измельчённого фосфатного сырья (см. рис. 3.4.1) и представляет собой тело с общей пористостью  $\varepsilon = 1 - (1 - \varepsilon_1) \cdot (1 - \varepsilon_2)$ , где  $\varepsilon_1$  – внешняя пористость окатыша в целом,  $\varepsilon_2$  – внутренняя пористость отдельных зерен. Эндотермическая реакция

диссоциации карбонатов, протекающая на микроуровне внутри зёрен, увеличивает величину  $\varepsilon_2$ , а процесс спекания на макроуровне уменьшает значения  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ .

Автором для ХЭТП обжига [275] установлено, что теплоперенос в отдельном сферическом окатыше осуществляется теплопроводностью с учётом эндотермических реакций диссоциации карбонатов:  $\text{MgCO}_3 \rightarrow \text{MgO} + \text{CO}_2 - Q_1$  и  $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2 - Q_2$ , где  $Q_1 = 1,21 \cdot 10^5$  Дж/моль – тепловой эффект реакции разложения  $\text{MgCO}_3$ ,  $Q_2 = 1,78 \cdot 10^5$  Дж/моль – тепловой эффект реакции разложения  $\text{CaCO}_3$ , который описывается неоднородным уравнением:

$$\rho_m c_m \frac{\partial T_m}{\partial \tau} = \frac{1}{x^2} \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda x^2 \frac{\partial T_m}{\partial x} \right) - \sum_i Q_i \omega_i, \quad (3.4.1)$$

где:  $T_m$  – температура,  $\rho_m$  – плотность,  $c_m$  – удельная теплоемкость,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $x$  – координата радиуса окатыша,  $\tau$  – время,  $Q_i$  – тепловой эффект,  $\omega_i$  – скорость  $i$ -й реакции диссоциации.

Процесс теплопереноса под воздействием потока внешнего газа-теплоносителя (см. рис. 1) при обжиге вертикальной многослойной укладки окатышей осуществляется конвекцией по направлению движения потока и описывается уравнением:

$$\rho_g c_g W_g \frac{\partial T_g}{\partial y} = \alpha_v (T_g - T_m)_{x=x_g}, \quad (3.4.2)$$

где:  $T_g$  – температура,  $W_g$  – скорость,  $\rho_g$  – плотность,  $c_g$  – удельная теплоемкость газа,  $y$  – координата высоты многослойной укладки окатышей,  $\alpha_v = \alpha_F f_{уд}$  – объемный коэффициент теплоотдачи,  $f_{уд}$  – удельная поверхность окатышей в слое,  $\alpha_F$  – коэффициент теплоотдачи с поверхности окатыша.

Скорость эндотермической реакции диссоциации карбонатов описывается феноменологически:

$$\omega_i = \frac{\partial \eta_i}{\partial \tau} = k_{0i} (1 - \eta_i)^{n_i} \exp \left( \frac{-E_i}{RT_m} \right), \quad (3.4.3)$$

где:  $\eta_i$  – степень превращения в  $i$  – й реакции ( $i = 1, 2$  – диссоциация  $\text{CaCO}_3$  и  $\text{MgCO}_3$ ),  $k_{0i}$  – коэффициент проницаемости  $i$ -й реакции,  $E_i$  – энергия активации  $i$ -й реакции,  $R$  – универсальная газовая постоянная.

Увеличение прочности окатыша за счет уменьшения общей пористости  $\varepsilon$  в результате процесса спекания описывается эмпирическим уравнением:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} = -b\sigma, \quad (3.4.4)$$

где:  $\sigma$  – прочность окатыша,  $b$  – эмпирический коэффициент.

Уменьшение пористости окатыша  $\varepsilon_1$  на макроуровне и пористости отдельных зерен, его составляющих,  $\varepsilon_2$  на микроуровне (см. рис. 3.4.1) 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 [275]. Скорость изменения значений пористостей  $\varepsilon_{1,2}$  равна:

$$\omega_2 = \frac{\partial \varepsilon_{1,2}}{\partial \tau} = \frac{2\sigma_T \varepsilon_{1,2}}{4/3 \mu_M (1 - \varepsilon_{1,2})^2 r_M}, \quad (3.4.5)$$

где:  $\sigma_T$  – коэффициент поверхностного натяжения,  $\mu_M$  – вязкость,  $r_M$  – радиус зёрен спекаемых в материале окатыша.

Увеличение пористости зерен  $\varepsilon_2$  в окатыше, которое влечёт уменьшение их конечной прочности из-за образования трещин при релаксации напряжений в результате диссоциации карбонатов равно:

$$\varepsilon_{2n} = \varepsilon_{2n-1} + \frac{D\sigma_0^2}{16E^*\gamma} \sum_{m=1}^n \left( 1 - \sum_{i=1}^m v_i \right) - \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{4}, \quad (3.4.6)$$

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

При высоких температурах наблюдается негативный процесс оплавления (остеклования) окатыша с образованием стеклофазы, снижающий конечную прочность окатышей [276], скорость которого описывается уравнением:

$$\omega_3 = \frac{\partial g}{\partial \tau} = \frac{\alpha_F F (T_m - t)}{Q_L}, \quad (3.4.7)$$

где  $t$  – температура «остеклования» расплавления материала,  $F$  – площадь сферы окатыша,  $Q_L$  – удельная тепловая энергия образования расплава,  $g$  – масса части расплавившегося материала окатыша.

Система дифференциальных уравнений в частных производных (ДУЧП) (3.4.1)÷(3.4.7) замыкается следующими начальными и граничными условиями:

$$\tau = 0, T_m = T_{m0}, \eta_l = 0, g = 0;$$

$$x = 0, \frac{\partial T_m}{\partial x} = 0; \quad x = x_s, -\lambda \left( \frac{\partial T_m}{\partial x} \right) = \alpha_F (T_g - T_m)_{x=x_s};$$

$$y = 0, T_g = T_{g0},$$

где:  $T_{g0}$  – температура газа на входе в слой,  $T_{m0}$  – начальная температура окатышей.

Для численного решения системы нелинейных ДУЧП (3.4.1) ÷ (3.4.7) использован конечно-разностный метод с числом разбиений радиуса окатыша  $N=20$ , высотой многослойной укладки окатышей  $M=110$ , времени  $K=110$ .

Неявный конечно-разностный вид исходного ДУЧП (3.4.1) в рекуррентной форме:

$$\rho_{mi,j}^k c_{mi,j}^k \frac{T_{mi,j}^k - T_{mi,j}^{k-1}}{\Delta \tau} = \frac{1}{x_i^2} \frac{1}{\Delta x^2} \left[ x_{i+1/2}^2 \lambda_{i+1/2,j}^k (T_{mi+1,j}^k - T_{mi,j}^k) - \right. \\ \left. - x_{i-1/2}^2 \lambda_{i-1/2,j}^k (T_{mi,j}^k - T_{mi-1,j}^k) \right] + q_{\Sigma i,j}^k, \quad (3.4.8)$$

$$\text{где } \lambda_{i+1/2} = \frac{\lambda_{i+1} + \lambda_i}{2}; \quad \lambda_{i-1/2} = \frac{\lambda_i + \lambda_{i-1}}{2}; \quad q_\Sigma = \sum_i Q_i \omega_i.$$

Конечно-разностный вид ДУЧП (2) теплопереноса между газом и окатышем:

$$\rho_{g_j} c_{g_j} W_g \frac{T_{g_j} - T_{g_{j-1}}}{\Delta y} = \alpha_{v_j} (T_{g_j} - T_{m_{N+1,j}}). \quad (3.4.9)$$

Конечно-разностный вид ДУЧП (3), описывающего упрочнение окатыша:

$$\frac{\sigma_j - \sigma_{j-1}}{\Delta \varepsilon} = -b \sigma_j. \quad (3.4.10)$$

Конечно-разностные виды ДУЧП (3.4.4), (3.4.5) и (3.4.7), описывающих скорости диссоциации карбонатов  $\omega_i$  ( $i=1, 2$ ), изменения внутренней и внешней пористости  $\omega_2$  при спекании, а также остекловании  $\omega_3$ :

$$\omega_i = \frac{\eta_{ik} - \eta_{ik-1}}{\Delta \tau} = k_{0_i} (1 - \eta_{ik-1})^{n_i} \exp\left(\frac{-E_i}{RT_{mi,j}}\right), \quad (3.4.11)$$

$$\omega_2 = \frac{\varepsilon_{1,2k} - \varepsilon_{1,2k-1}}{\Delta \tau} = \frac{2\sigma_T \varepsilon_{1,2k-1}}{4/3 \mu_{Mi,j} (1 - \varepsilon_{1,2k-1})^2 r_M}, \quad (3.4.12)$$

$$\omega_3 = \frac{g_k - g_{k-1}}{\Delta \tau} = \frac{\alpha_{Fj} F(T_{mi,j} - t)}{Q_L}. \quad (3.4.13)$$

Полученные рекуррентные соотношения (3.4.8) позволяют определить внутренний теплообмен в сферическом окатыше, а в совокупности с уравнениями (3.4.9) - (3.4.13) полностью описывают распределение температуры  $T_m$ , степени реагирования  $\eta$ , прочности  $\sigma$  движущейся плотной многослойной массы фосфоритовых окатышей на конвейере ХЭТС [277, 278].

Полученная система информационно разреженных рекуррентных конечно-разностных уравнений (3.4.8) - (3.4.13) имеет упорядоченную ленточную трёхдиагональную информационную структуру [279] и состоит из



совокупности  $3 \cdot 10^5$  уравнений, решение которой осуществлено с помощью компьютерной программы, разработанной в среде Borland C++.

Результаты компьютерного расчета режимных параметров ХЭТП обжига окатышей в ХЭТС конвейерной машины ОК-3-520/536Ф по разработанной компьютерной модели (3.4.8) - (3.4.13) хорошо согласуются с ее промышленными режимными параметрами. Для проверки адекватности компьютерной модели (3.4.8) - (3.4.13) использован метод наименьших квадратов.

Полученные в результате многочисленных вычислительных экспериментов семейства кривых изменений значений режимных параметров ХЭТП обжига (температура  $T_m$ , степень реагирования  $\eta$ , прочность окатышей в движущейся плотной многослойной массе  $\sigma$ ) изображены на рис. 3.4.2 – 3.4.4.

На рис. 3.4.2 представлено параметрическое семейство кривых изменений важнейшего параметра ХЭТП обжига – средней температуры по радиусу окатышей  $T_m$ , соответствующей определенной высоте  $y$  движущейся многослойной массы окатышей ( $0 \leq y \leq 0,35$  м) и координате  $l$  ( $0 \leq l \leq 130$  м) нахождения вертикальной многослойной укладки окатышей по длине конвейера ХЭТС обжиговой машины.

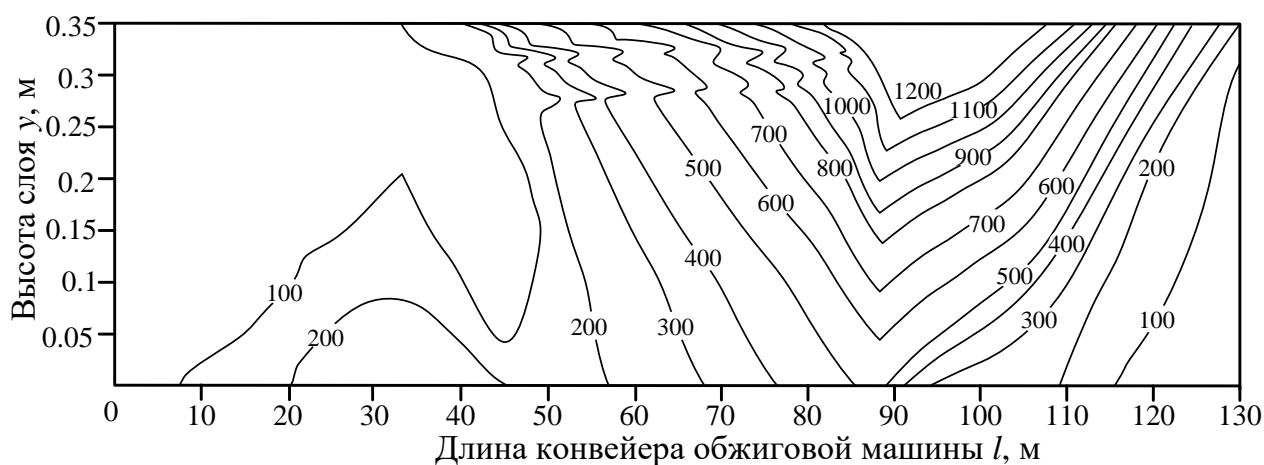


Рис. 3.4.2. Параметрическое семейство кривых изменений режимного параметра  $T_m$  в зависимости от высоты многослойной массы окатышей и

координаты нахождения вертикальной многослойной укладки окатышей на конвейере ( $100^{\circ}\text{C} \leq T_m \leq 1200^{\circ}\text{C}$ )

Из анализа рисунка 3.4.2 следует, что при длине конвейера  $30\text{ м} \leq l \leq 50\text{ м}$  наблюдается резкое изменение средней по радиусу окатышей температуры из-за реверса потока газа в зоне интенсивного нагрева в ХЭТС. Наибольшую температуру ( $900^{\circ}\text{C} \leq T_m \leq 1200^{\circ}\text{C}$ ) имеют окатыши в верхних слоях ( $0,2\text{ м} \leq y \leq 0,35\text{ м}$ ), а нижние слои движущейся массы окатышей не нагреваются до необходимой для реализации ХЭТП обжига температуры (см. рис. 3.4.2).

На рисунке 3.4.3 изображено параметрическое семейство кривых для режимного параметра ХЭТП обжига – степени превращения диссоциации карбонатов  $\eta$ , соответствующей определенной высоте движущейся многослойной массы окатышей при ( $0 \leq y \leq 0,35\text{ м}$ ) в ХЭТС и координате нахождения вертикальной многослойной укладки окатышей по длине конвейера ( $0 \leq l \leq 130\text{ м}$ ).

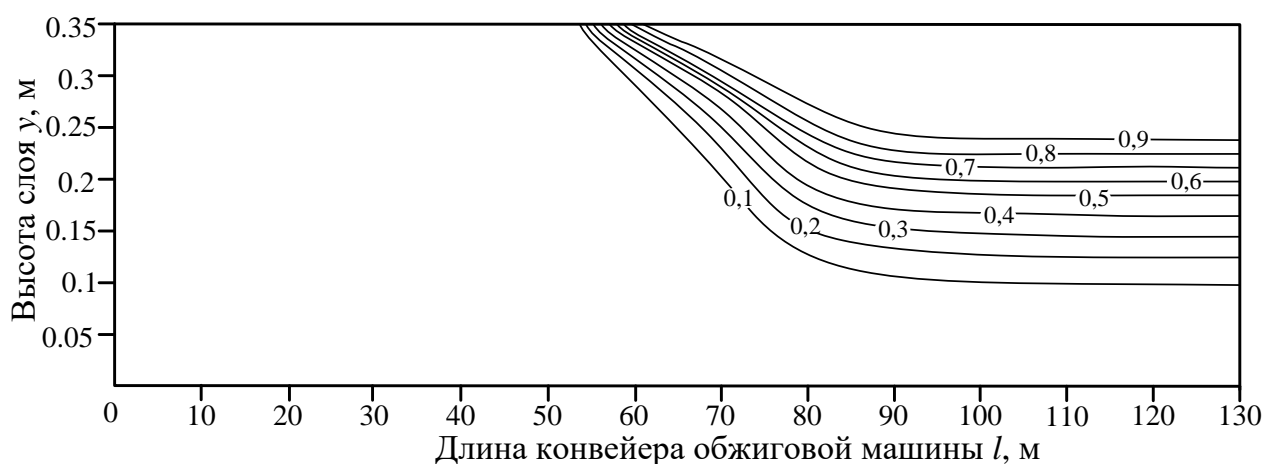


Рис. 3.4.3. Параметрическое семейство кривых изменения параметра  $\eta$  в зависимости от высоты многослойной массы окатышей и координаты нахождения вертикальной многослойной укладки окатышей на конвейере ( $0 \leq \eta \leq 1$ )

Из анализа рисунка 3.4.3 следует, что в нижних слоях окатышей ( $0 \leq y \leq 0,1\text{м}$ ) диссоциация карбонатов не происходит. Это обусловлено тем, что температура в этих слоях недостаточна для активации процесса диссоциации. В верхних слоях окатышей ( $0,25 \leq y \leq 0,35\text{м}$ ) диссоциация карбонатов полностью завершена, так как эти слои окатышей в зоне обжига при длине ( $70\text{м} \leq l \leq 100\text{м}$ ) находятся под воздействием высокой температуры, обеспечивающей завершение реакций диссоциации.

На рисунке 3.4.4 представлено параметрическое семейство кривых для режимного параметра ХЭТП обжига – прочности окатышей  $\sigma$ , соответствующей определенной высоте движущейся многослойной массы окатышей ( $0 \leq y \leq 0,35\text{м}$ ) и координате нахождения вертикальной многослойной укладки окатышей по длине конвейера ( $0 \leq l \leq 130\text{м}$ ).

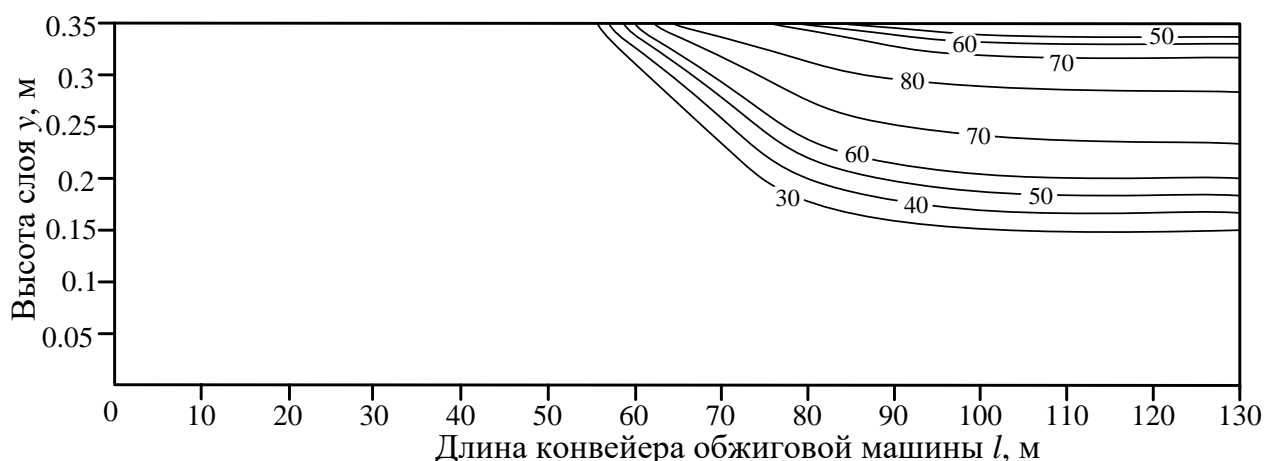


Рис. 3.4.4. Параметрическое семейство кривых изменения параметра  $\sigma$  в зависимости от высоты многослойной массы окатышей и координаты нахождения вертикальной многослойной укладки окатышей на конвейере ( $30\text{кг/ок} \leq \sigma \leq 80\text{кг/ок}$ )

Анализ рисунка 3.4.4 показывает, что в нижних слоях движущейся многослойной массы ( $0 \leq y \leq 0,15\text{м}$ ) увеличение прочности окатышей не наблюдается. Это связано с тем, что температура в этих слоях недостаточна

для активации процессов спекания. В верхних движущихся слоях окатышей ( $0,3\text{ м} \leq y \leq 0,35\text{ м}$ ) наблюдается снижение прочности из-за негативного влияния процесса остеклования, который осуществляется при очень высокой температуре - свыше  $1100^{\circ}\text{C}$ . Кроме того, интенсивное увеличение прочности окатышей ( $30\text{ кг/ок} \leq \sigma \leq 80\text{ кг/ок}$ ) происходит в средних слоях ( $0,15\text{ м} \leq y \leq 0,3\text{ м}$ ).

Так как значения прочности окатышей в движущихся нижних слоях недостаточны, на практике используется специальный технологический приём, когда в нижние слои засыпают уже обожжённые окатыши, что обусловлено техническими особенностями ХЭТС обжиговой машины, не позволяющими обеспечить требуемые значения температуры для эффективного процесса спекания в нижних слоях [280].

В результате проведенных теоретико-экспериментальных исследований авторами разработаны математическая и компьютерная модели многостадийного ХЭТП обжига фосфоритовых окатышей в ХЭТС конвейерной обжиговой машины, отличающиеся учетом явлений внутреннего теплопереноса и поглощения теплоты в окатыше при диссоциации карбонатов, процессов образования новых фаз и возникновения малопрочных оксидов магния и кальция с новыми физико-термическими свойствами.

Проведены многочисленные вычислительные эксперименты по определению значений режимных параметров сложного многостадийного ХЭТП обжига окатышей при различных физико-химических характеристиках исходного фосфатного сырья и газа-теплоносителя, которые позволили определить влияние на качество производимых фосфоритовых окатышей взаимосвязанных реакций диссоциации карбонатов и процессов спекания в движущейся многослойной массе.

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

Так как минералогический состав фосфатного сырья и фосфорно-кремнистых разностей в основном представлен минералами фторкарбонатапатита  $\text{Ca}_{10}\text{P}_6\text{O}_{24}\text{F}_2$ , доломита  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ , кальцита  $\text{CaCO}_3$ , кварца и халцедона  $\text{SiO}_2$  и нерастворимого минерального остатка, часть включений, оказывающих влияние на ТФХ, будем полагать незначительным, поэтому необходимо выявить самые влиятельные характеристики.

Основополагающая массовая доля оолитов допускает несложное строение с небольшими линейными размерами, которые варьируются от 0,04 до 0,3мм. Теплопроводность фосфоритов можно рассматривать по модели трёхкомпонентной смеси с замкнутыми включениями [281]:

$$\lambda = \lambda_1 \left\{ \frac{v_2}{1-v_1} \left[ 1 - \frac{1-v_1}{(1-v_{12})^{-1}-v_1/3} \right] + \frac{v_3}{1-v_1} \left[ 1 - \frac{1-v_1}{(1-v_{13})^{-1}-v_1/3} \right] \right\}, \quad (3.5.1)$$

$$v_{12} = \lambda_2/\lambda_1; v_3 = \lambda_3/\lambda_1,$$

где  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$  – коэффициенты теплопроводности цементирующего материала и включений;  $v_1$  и  $v_2$ ,  $v_3$  – объёмные концентрации цементирующего материала и включений.

Дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования показали, что для расчётов можно использовать зависимости:

$$\lambda_a = \lambda_1 [c^2 + v(1-c)^2 + 2vc(1-c)(vc + 1 - c)^{-1}];$$

$$v = \lambda_2/\lambda_1;$$

$$c = 0,5 + A \cos(\varphi/3), \text{ при } 270^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ;$$

$$A = -1, \quad \varphi = \arccos(1 - 2v_2), \quad 0 \leq v_2 \leq 0,5;$$

$$A = 1, \quad \varphi = \arccos(2v_2 - 1), \quad 0,5 \leq v_2 \leq 1;$$

$$\lambda_{\text{из}} = \lambda_1 \left[ \frac{(1-c)}{c^2+v(1-c)^2} + \frac{c}{c(2-c)+v(1-c)^2} \right]^{-1}.$$

Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры неплохо аппроксимируется квадратичными многочленами в диапазоне  $400 - 1300\text{K}$ , которые приведены выше.

Анализ полученных в многочисленных экспериментах данных исследований разнообразных типов фосфоритов с множеством включений и обработка приобретённой информации с корректировкой явлений превращения  $\alpha$  в  $\beta$  кварц позволил заключить: для кремнистых включений при температуре преобразования  $\alpha$  в  $\beta$  кварц меньше  $850\text{K}$ :

$$c_p = 0,48 + 0,14 \cdot 10^{-2}T - 0,3 \cdot 10^{-6}T^2.$$

При температуре больше  $850\text{K}$ :

$$c_p = 4,15 - 0,572 \cdot 10^{-2}T + 0,27 \cdot 10^{-5}T^2.$$

Фосфатная компонента описывается уравнением:

$$c_p = 0,788 + 0,61 \cdot 10^{-3}T - 0,25 \cdot 10^{-6}T^2.$$

Карбонатная составляющая до температур начала декарбонизации:

$$c_p = 0,41 - 0,155 \cdot 10^{-2}T - 0,4 \cdot 10^{-6}T^2.$$

Карбонатная составляющая после обжига:

$$c_p = 1,943 - 1,58 \cdot 10^{-2}T + 0,98 \cdot 10^{-6}T^2. \quad (3.5.2)$$

Значения теплоёмкости всех составляющих, за исключением последней, хорошо согласовываются с известными опубликованными научными материалами. Для доломита по окончании высокотемпературной обработки и термической диссоциации описанные формулой (3.5.2) значения существенно разнятся с теплоёмкостями оксидов кальция и магния.

Теплоёмкость карбонатной составляющей получают по формуле:

$$\rho c_p(T, \eta) = \rho c_{pd}(T)\eta + (\rho c_{pw}(T) - \rho c_{pd}(T)(1 - \eta)),$$

где  $\rho c_{pd}$ ,  $\rho c_{pw}$  – теплоёмкости обожженного и исходного фосфорита.

Композитный коэффициент теплоемкости фосфатов  $\rho c_{p\text{эф}}$  для температурной области термической диссоциации получается из уравнения баланса теплоты:

$$\rho c_{p \text{ эф}} \frac{dT}{d\tau} = \rho c_p \frac{dT}{d\tau} + \sum_{i=1}^2 Q_i m_i \frac{d\eta_i}{d\tau},$$

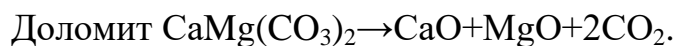
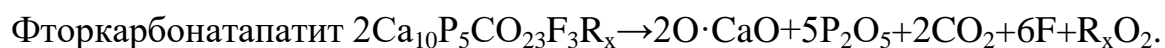
где  $m_i$  – концентрация реагирующих компонент  $\text{MgCO}_3$  и  $\text{CaCO}_3$ ,  
 $Q_1=1,21 \cdot 10^5 \text{ Дж/моль}$  – удельная теплота эндотермической реакции  
 диссоциации  $\text{MgCO}_3$ ,  $Q_2=1,74 \cdot 10^5 \text{ Дж/моль}$  – удельная теплота  
 эндотермической реакции диссоциации  $\text{CaCO}_3$ .

Плотность композиционных фосфатов рассчитывают по формуле:

$$\rho = \sum_i v_i \rho_i,$$

где  $\rho_i$  – плотность  $i$ -го компонента.

Системный анализ реакций диссоциации карбонатов и обработка информации даёт возможность полагать.



Тогда вычисляется массовая доля.

$$\text{Фосфорит } m_{\text{ф}} = 2,79 c_{\text{P}_2\text{O}_5}.$$

$$\text{Доломит } m_{\text{д}} = 4,6 c_{\text{MgO}}.$$

$$\text{Кальцит } m_{\text{с}} = 1,79 (c_{\text{CaO}} - 1,58 c_{\text{P}_2\text{O}_5} - 1,4 c_{\text{MgO}}).$$

$$\text{Кремнезём } m_{\text{кр}} = c_{\text{SiO}_2}.$$

$$\text{Примеси } m_{\text{кр}} = 1 - m_{\text{ф}} - m_{\text{д}} - m_{\text{с}} - m_{\text{кр}}.$$

Результаты расчета теплофизических характеристик для фосфоритов произвольного состава показывают хорошее совпадение с экспериментальными значениями теплопроводности и теплоемкости [284].

### **Теплофизические свойства газообразных теплоносителей.**

В состав печных газов и агломерационных газов для различных типов шихты входят:

фосфор (в модификациях  $\text{P}_4$  и  $\text{P}_2$ );

окись углерода  $\text{CO}$ ;

двуокись углерода  $\text{CO}_2$ ;

азот  $\text{N}_2$ ;

водород  $H_2$ ;  
метан  $CH_4$ ;  
пары воды  $H_2O$ ;  
кислород  $O_2$ ;  
двуокись серы  $SO_2$ ;  
трёхокись серы  $SO_3$ ;  
фтористый водород  $HF$ ;  
сероводород  $H_2S$ ;  
четырёхфтористый кремний  $SiF_4$ ;  
сероокись углерода  $CO$ .

Теплофизические свойства отдельных компонент и их смесей можно определить, используя эмпирические соотношения и выражения, полученные на основе молекулярно-кинетических представлений [285].

В расчетах теплоемкости газовых компонент использовались соотношения:

$$c_p = a + bT + cT^2;$$
$$c_p = a + bT + c^*T^2.$$

Значения коэффициентов  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $c^*$  для составляющих дымовых и печных газов  $c_p$ , Дж/(кг·К), приведены в таблице 3.5.1.

Зависимости для динамической вязкости  $\mu$ , Па·с, и теплопроводности  $\lambda$ , Вт/(м·К), от температуры имеют вид:

$$\lambda = \sum_{n=0}^6 a_n (T/1000)^n,$$
$$\mu = \sum_{n=0}^6 b_n (T/1000)^n,$$
$$\lambda = a_7 + a_8 T + a_9 T^2 + a_{10} T^3,$$
$$\mu = b_7 + b_8 T + b_9 T^2.$$

Значения коэффициентов  $a_n$  приведены в таблицах 3.5.2 и 3.5.3.



Таблица 3.5.1. Значения эмпирических коэффициентов для расчёта  
теплоёмкости дымовых и печных газов

Вещество	$a$	$b$	$c \cdot 10^5$	$c^* \cdot 10^{-5}$
CO	1016	0,1467	0	-16,46
CO <sub>2</sub>	1006	0,20	0	-196,17
N <sub>2</sub>	1022	0,1347	0	-17,96
H <sub>2</sub>	13659	1,6341	0	-251,4
H <sub>2</sub> O	1699	0,5726	0	0
CH <sub>4</sub>	896	4,673	-109	0
P <sub>4</sub>	651	0,0172	0	-10,05
O <sub>2</sub>	801	0,4147	-13,16	0
SO <sub>2</sub>	679	0,166	0	92,81
SO <sub>3</sub>	717	0,336	0	163,25
H <sub>2</sub> S	961	0,3644	0	40,88
HF	1346	0,1715	0	-54,5
SiF <sub>4</sub>	988,2	0,021	0	256,3
COS	790,67	0,1522	0	127,67

Таблица 3.5.2. Значения коэффициентов  $a_n$ ,  $n=0, 1, \dots, 6$

Вещество	$a_0 \cdot 10^5$	$a_1 \cdot 10^5$	$a_2 \cdot 10^5$	$a_3 \cdot 10^5$	$a_4 \cdot 10^5$	$a_5 \cdot 10^5$	$a_6 \cdot 10^5$
CO	23	10219	-9061	9435	-5265	1414	-145
CO <sub>2</sub>	-1075	9764	-2691	840	-299	45	-4
N <sub>2</sub>	925	5085	1981	-2150	927	-200	18
H <sub>2</sub>	4588	57831	-41507	34462	-14866	3192	-273
H <sub>2</sub> O	2176	-6848	25046	-13331	3127	-241	-9
O <sub>2</sub>	179	8335	-894	-894	687	-186	18

Теплопроводность метана аппроксимируется следующим уравнением:

$$\lambda_{\text{CH}_4} = 0,0304(T/T_0)^{1,3}, \text{ где } T_0=273,16\text{K}.$$

Таблица 3.5.3. Значения коэффициентов  $a_n$ ,  $n=7, 8, \dots 10$ 

Вещество	$a_7$	$a_8$	$a_9 \cdot 10^5$	$a_{10} \cdot 10^5$
SO <sub>2</sub>	-8,085	0,06343	-1,382	2,3
SO <sub>3</sub>	-6,682	0,07076	-1,968	12,56
HF	3,856	0,05275	2,261	-9,84

Для составляющих компонент P<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S, SiF<sub>4</sub>, COS коэффициент теплопроводности можно определить из соотношений кинетической теории газов, связывающих между собой вязкость  $\mu$ , Па·с, теплоёмкость  $c_p$ , Дж/(кг·К), и теплопроводность  $\lambda$ , Вт/(м·К):  $\lambda = 1,31\mu c_p$ .

Эмпирические коэффициенты  $b_n$  для расчёта динамической вязкости составляющих дымового и печного газов приведены в таблицах 3.5.4 и 3.5.5.

Таблица 3.5.4. Значения эмпирических коэффициентов  $b_n$ ,  $n=0, 1, \dots 6$ 

Вещество	$b_0 \cdot 10^8$	$b_1 \cdot 10^8$	$b_2 \cdot 10^8$	$b_3 \cdot 10^8$	$b_4 \cdot 10^8$	$b_5 \cdot 10^8$	$b_6 \cdot 10^8$
CO	228	5766	-2952	864	153	141	21
CO <sub>2</sub>	-540	8100	-6466	3999	-1378	273	-15
N <sub>2</sub>	-1	7226	-6064	4049	-1506	285	-21
H <sub>2</sub>	265	2455	-1069	468	-122	16	-1
H <sub>2</sub> O	218	1277	4693	-3476	1053	-127	3
O <sub>2</sub>	802	3847	2422	-4340	2618	-705	71

Таблица 3.5.5. Значения эмпирических коэффициентов  $b_n$ ,  $n=7, 8, 9$ 

Вещество	$b_7 \cdot 10^6$	$b_8 \cdot 10^6$	$b_9 \cdot 10^{12}$
SO <sub>2</sub>	-0,379	0,04645	-7,276
SO <sub>3</sub>	0,421	0,04712	-6834
HF	-1,921	0,04598	-7,996

Для составляющих компонент  $\text{CH}_4$ ,  $\text{P}_4$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SiF}_4$ ,  $\text{COS}$  коэффициент вязкости  $\mu$  можно рассчитать по формуле Лихта и Штехера [286]:

$$\mu = 29,6 \cdot 10^{-12} \frac{M^{\frac{1}{2}} P_{\text{кр}}^{\frac{2}{3}} (T/T_{\text{кр}})^{\frac{2}{3}}}{T_{\text{кр}}^{\frac{1}{6}} \cdot (T/T_{\text{кр}} + 0,8)},$$

где  $M$  – молярная масса,  $P_{\text{кр}}$ ,  $T_{\text{кр}}$  – критические параметры, определяемые в соответствии с таблицей 3.5.6.

Таблица 3.5.6. Значения молярной массы и критических параметров

Вещество	$M \cdot 10^3$ , кг/моль	$P_{\text{кр}}$ , МПа	$T_{\text{кр}}$ , К
$\text{CH}_4$	16	4,626	190,7
$\text{P}_4$	124	8,08	968
$\text{H}_2\text{S}$	34	8,94	373,55
$\text{SiF}_4$	104	5,07	271,7
$\text{COS}$	60	6,34	378

Плотность газовых компонент рассчитывалась из соотношения  $\rho = \rho_0(T_0/T)$ , где  $\rho_0$  – плотность газа при нормальных условиях (таблица 3.5.7).

Таблица 3.5.7. Плотность компонент газа-теплоносителя

Вещество	$\text{CO}$	$\text{CO}_2$	$\text{N}_2$	$\text{H}_2$	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{CH}_4$	$\text{P}_4$
$\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	1,25	1,997	1,25	0,089	0,803	0,717	5,535

Вещество	$\text{O}_2$	$\text{SO}_2$	$\text{SO}_3$	$\text{HF}$	$\text{H}_2\text{S}$	$\text{SiF}_4$	$\text{COS}$
$\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	1,43	2,9268	3,5708	0,9218	1,5392	4,6839	2,668

Удельная теплоёмкость смеси газов хорошо подчиняется закону аддитивности:

$$c_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n \gamma_i c_{pi} = \sum_{i=1}^n \gamma_i \rho_i \tilde{c}_{pi},$$

где  $c_{pi}$  – удельная объёмная теплоёмкость  $i$ -й компоненты, Дж/(м<sup>3</sup>·К);  
 $\rho_i$  – плотность  $i$ -й компоненты, кг/м<sup>3</sup>;  $\tilde{c}_{pi}$  – удельная массовая теплоёмкость, Дж/(кг·К);  $\gamma_i$  – объёмная доля  $i$ -го компонента.

Динамическая вязкость определялась по формуле Хеннинга и Циперера [287]:

$$\mu_{см} = \sum_{i=1}^n (\gamma_i \mu_i \sqrt{M_i T_{кри}}) / \sum_{i=1}^n (\gamma_i \sqrt{M_i T_{кри}}),$$

где  $\gamma_i$  – объёмная доля,  $\mu_i$  – динамическая вязкость,  $M_i$  – молярная масса,  $T_{кри}$  – критическая температура, соответственно, для  $i$ -го компонента.

Значения величины  $\sqrt{M_i T_{кри}}$  для различных газов приведены в таблице 3.5.8.

Таблица 3.5.8. Значение величины  $\sqrt{M_i T_{кри}}$  для различных компонент теплоносителя

Вещество	CO	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>	P <sub>4</sub>
$\sqrt{M_i T_{кри}}$	61,4	115,5	59,5	8,13	108	55,1	351

Вещество	O <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	HF	H <sub>2</sub> S	SiF <sub>4</sub>	COS
$\sqrt{M_i T_{кри}}$	70,3	166	198	100,3	112,7	168,1	150,6

Коэффициент теплопроводности  $\lambda$  для смеси газов определялся по формулам [75]:

$$\lambda_{см} = \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma_i,$$

где  $\lambda_i$  – коэффициент теплопроводности для  $i$ -го компонента, Вт/(м·К),  
 $\gamma_i$  – объёмная доля  $i$ -го компонента.

Плотность смеси газов также вычисляется по правилу аддитивности:

$$\rho_{см} = \sum_{i=1}^n \rho_i \gamma_i,$$

где  $\rho_i$  – плотность  $i$ -го компонента, кг/м<sup>3</sup>,  $\gamma_i$  – объёмная доля  $i$ -го компонента.

По рассмотренным формулам рассчитывались теплофизические свойства печных газов. Для характерного состава дымовых газов фосфорных печей и обжиговых машин значения теплофизических характеристик представлены в таблице 3.5.9.

Учет содержания влаги в газах можно учитывать обобщёнными уравнениями для продуктов горения в обжиговых и агломашинах.

Плотность влажного газа  $\rho_{\text{вг}} = \rho_{\text{сг}} (1 + x) / (1 + 1,24\rho_{\text{сг}})$ , где  $x$  – влагосодержание газа, кг/кг;  $\rho_{\text{сг}}$  – плотность сухого газа;  $\rho_{\text{сг}} = 1,96\dot{c}_{\text{CO}_2} + 1,25\dot{c}_{\text{N}_2} + 1,43\dot{c}_{\text{O}_2}$ ;  $\dot{c}_{\text{CO}_2} = c_{\text{CO}_2} / (1 - c_{\text{H}_2\text{O}})$ ;  $\dot{c}_{\text{N}_2} = c_{\text{N}_2} / (1 - c_{\text{H}_2\text{O}})$ ;  $\dot{c}_{\text{O}_2} = c_{\text{O}_2} / (1 - c_{\text{H}_2\text{O}})$ ;  $c_{\text{CO}_2}$ ,  $c_{\text{N}_2}$ ,  $c_{\text{O}_2}$ ,  $c_{\text{H}_2\text{O}}$  – концентрация компонент в продуктах горения.

Таблица 3.5.9. Значения некоторых теплофизических характеристик газа-теплоносителя

$T, \text{K}$	$\rho_{\text{сг}}, \text{кг/м}^3$	$c_{\text{сг}}, \text{Дж/(м}^3 \cdot \text{K)}$	$\lambda_{\text{сг}}, \text{Вт/(м} \cdot \text{K)}$	$\mu_{\text{сг}} \cdot 10^4, \text{Па} \cdot \text{с}$
373	1,1304	1132,1	0,0334	0,1610
573	0,7353	749,37	0,0470	0,2267
773	0,5454	566,92	0,0599	0,2853
973	0,4333	459,95	0,0724	0,3418
1173	0,3594	369,59	0,0864	0,4025

Теплоемкость продуктов горения можно вычислить по формулам:

$$c_{\text{пр}} = \sum_{i=1}^4 a_i T_{\text{г}}^{i-1}; \quad a_i = b_{i1}\dot{c}_{\text{CO}_2} + b_{i2}\dot{c}_{\text{N}_2} + b_{i3}\dot{c}_{\text{O}_2}.$$

Теплоемкость водяных паров можно вычислить по формуле:

$$c_{\text{рН}_2\text{O}} = 1,24 \sum_{i=1}^4 g_i T_{\text{г}}^{i-1}.$$

Таблица 3.5.10. Коэффициенты для формул расчета теплоёмкости газа-теплоносителя

$i$	$b_{i1}$	$b_{i2}$	$b_{i3}$	$g_i$
1	0,3832	0,3088	0,3107	0,422
2	0,4736	0,0072	0,0936	0,0755
3	-0,3591	0,0969	0,0003	0,142
4	0,1048	-0,0496	-0,0184	-0,066

Коэффициенты для этих уравнений определены и представлены в таблице 3.5.10.

Для динамической вязкости продуктов горения при наличии водяных паров справедлива зависимость:

$$\mu_{\text{гв}} = 0,0575 + 0,161y - 0,0554y^2 + 0,0115y^3; \quad y = T_{\text{г}}/1000.$$

### 3.6 Выводы

Разработаны математическая и компьютерная модели многостадийного химико-энерготехнологического процесса (ХЭТП) обжига фосфоритовых окатышей, включающего реакции декарбонизации и процесс спекания движущейся плотной многослойной массы фосфоритовых окатышей в сложной химико-энерготехнологической системе (ХЭТС), которой является конвейерная обжиговая машина, отличающиеся учетом явлений внутреннего теплопереноса и поглощения теплоты в окатыше, а также процесса образования малопрочных оксидов магния и кальция с новыми физико-термическими свойствами [285].

Проверена адекватность разработанной математической модели ХЭТП обжига по результатам сравнительного анализа рассчитанных с помощью компьютерной модели основных физико-химических переменных ХЭТП (доля подвергшихся диссоциации

карбонатов внутри окатышей, прочность готовых окатышей, температура материала окатышей и газа-теплоносителя) с результатами промышленных экспериментов в высокотемпературной зоне ХЭТС [286].

Проведены многочисленные вычислительные эксперименты по определению режимных параметров ХЭТП обжига ( $T_{g_0}$  - температура и  $W_{g_0}$  - скорость подачи газа-теплоносителя) при различных физико-химических характеристиках исходного фосфатного сырья и внешнего потока газа-теплоносителя, которые позволили выявить влияние взаимосвязанных химических процессов реакции диссоциации карбонатов и процесса спекания на качество окатышей в движущейся многослойной массе фосфоритовых окатышей [287].

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

### **4.1 Содержательная и математическая постановки задачи оптимального управления ХЭТП сушки**

Рассматривается многостадийный ХЭТП сушки многослойной движущейся массы окатышей в сложной ХЭТС обжиговой конвейерной машине, который широко используется в химической и металлургической промышленности [288]. Изменение свойств сырых фосфоритовых окатышей: начальной увлажнённости и прочности – является причиной нарушения технологического режима ХЭТП сушки. Поэтому реализация ХЭТП сушки в режиме оптимума энергозатрат на основе компьютерного моделирования имеет большое значение для практики [289]. Поскольку технологические ограничения ХЭТС существенно сужают диапазон варьирования переменных состояния сушки, требуется тщательный анализ взаимовлияния всех факторов, определяющих режим сушки [290].

Многомасштабное моделирование ХЭТП сушки движущейся многослойной массы фосфоритовых окатышей, с точки зрения системного анализа сложной ХЭТС обжиговой конвейерной машины, представляется в масштабах трёх уровней: 1-й масштаб – модель сушки отдельно взятого окатыша, переменные состояния процесса сушки зависят от одной координаты  $x$  – по радиусу окатыша, 2-й масштаб – модель сушки вертикальной многослойной укладки окатышей, добавляется ещё одна размерность, координата  $y$  – по высоте многослойной вертикальной укладки, 3-й масштаб – модель сушки движущейся вертикальной многослойной укладки окатышей, добавляется время  $\tau$ .



В силу технических особенностей функционирования ХЭТС обжиговой машины плотная многослойная масса окатышей, двигаясь на конвейере длиной  $l_m$  со скоростью  $V_m/c$ , последовательно проходит отдельные ( $i=1, 2, \dots, k$ ) вакуум-камеры длиной  $\Delta l$ , в которых осуществляется подача газа-теплоносителя в слой на нагрев окатышей с определёнными температурой  $T_{g0}$  и скоростью  $W_g$ . Фильтруясь через многослойную массу окатышей с развитой поверхностью теплоотдачи и турбулентным потоком, газ-теплоноситель отдаёт тепло окатышам, покидая слой с температурой  $T_{gh}$ .

Технологический режим высушивания окатышей обуславливается начальной температурой потока газа-теплоносителя, подаваемого в движущийся плотный слой  $T_{g0}(\tau)$ , и его скоростью  $W_g(\tau)$ . Качество и завершённость ХЭТП сушки характеризуются: температурой окатышей  $T_m(x, y, \tau)$ , зависящей от координаты  $x$  по радиусу окатыша, координаты  $y$  высоты в вертикальной многослойной укладке окатышей и времени  $\tau$  их пребывания в зоне сушки при горизонтальном движении многослойной массы на конвейере обжиговой машины ХЭТС, градиентом температуры  $\partial T_m / \partial x$ , скоростью нагрева  $\partial T_m / \partial \tau$ , температурой газа на выходе из слоя окатышей  $T_{gh}(\tau)$ , влагосодержанием  $u(y, \tau)$ , интенсивностью влагопереноса  $I(x, y, \tau)$ , относительной степенью высушивания  $\psi(y, \tau)$  [291]. Критерием завершённости ХЭТП служит минимум среднего по слою влагосодержания

окатышей  $\bar{u} = \int_0^{0,35} u(y; \tau_{\text{кон}}) dy$  при времени покидания технологической зоны сушки  $\tau = \tau_{\text{кон}}$ .



Рис. 4.1.1. Дискретизация времени пребывания окатышей в зоне сушки длиной  $l$  конвейерной обжиговой машины  $0 \leq \tau \leq \tau_{\text{кон}}$  в зависимости от прохождения отдельных вакуум-камер длиной  $\Delta l$ , в которых формируется вектор управляющих переменных  $X_i(T_{g0i}, W_{gi})$

Себестоимость готового продукта в производстве фосфоритовых окатышей формируется в основном за счет затрат электрической  $Q_{\text{эл}}$  и тепловой  $Q_{\text{теп}}$  энергии [292]. Оптимальным считается режим функционирования, в котором требуемое качество обработанных окатышей, определяемое завершенностью процесса сушки  $\bar{u} = 0$ , достигается при минимуме израсходованной тепловой и электрической энергии. Задача оптимизации формулируется так: найти такое значение вектора управляющих переменных  $X(T_{g0}, W_g)$ , чтобы  $Q_{\text{эл}}$  и  $Q_{\text{теп}}$  достигали своего наименьшего значения. В силу технических особенностей обжиговой машины на вектор  $X$  управляющих переменных накладываются

ограничения: на скорость  $W_g \leq W_{gMAX}$  и температуру  $T_{g0}(\tau) \leq T_{gMAX}$  газа-теплоносителя на входе в слой, а так же на вектор переменных состояния ХЭТП сушки  $S(T_m, \partial T_m / \partial x, \partial T_m / \partial \tau, T_{gh}, u, I, \psi)$  – температуру 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  $I \leq I_{MAX}$ .

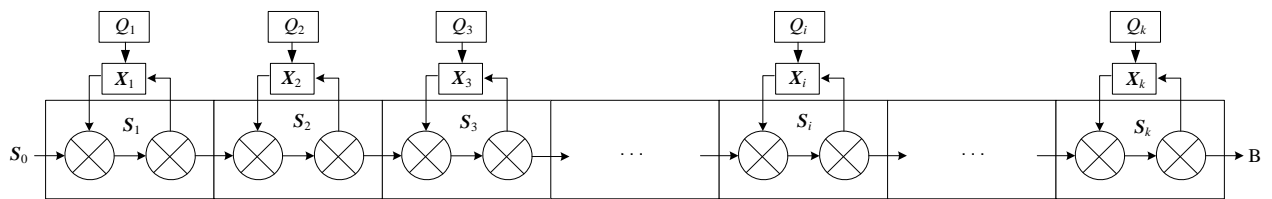


Рис. 4.1.2. Декомпозиционно-топологическая схема оптимизации ХЭТП сушки методом дискретного динамического программирования.  $S_0$  – начальный вектор переменных состояния исходного сырья, сырых окатышей на входе,  $B$  – высушенные окатыши на выходе из зоны сушки,  $Q_i$  – расход энергии,  $X_i$  – вектор управляющих переменных,  $S_i$  – вектор переменных состояния ХЭТП сушки на  $i$  – м этапе декомпозиции

Дискретное динамическое программирование является специальным вычислительным алгоритмом для решения многостадийных оптимизационных задач сложных динамических ХЭТС, который позволяет представлять процедуру оптимизации как последовательность дискретных этапов (или шагов). Применение декомпозиционно-топологических принципов позволяет получать все используемые в динамическом программировании функциональные рекуррентные соотношения [293].

Рассмотрим декомпозицию ХЭТП сушки, разбив время пребывания окатышей в зоне сушки ХЭТС на  $k$  равных частей, соответствующих длинам вакуум-камер  $\Delta l$ , получим промежутки времени  $\Delta \tau$  (см. рис. 4.1.1). Каждый вектор  $S_i$  последующего состояния переменных ХЭТП сушки определяется

его предыдущим состоянием  $S_{i-1}$  и вектором управляющих переменных  $X_i(T_{g0i}, W_{gi}) - S_i = \Phi_i(S_{i-1}; X_i)$  (рис. 4.1.2).

Локальный критерий эффективности (КЭ) на каждом шаге  $i$  есть функция, зависящая от переменных состояния ХЭТП сушки на предыдущем шаге  $i-1$  и решения  $X_i$ , принятого на данном этапе  $F_i = F(X_i; S_{i-1}) = Q_{\text{теп}}(T_{g0i}) + Q_{\text{эл}}(W_{gi})$ , где  $Q_{\text{теп}}$  - количество тепловой энергии сгорания топлива, затраченной на нагрев газа-теплоносителя до температуры  $T_{g0i}$ , и  $Q_{\text{эл}}$  - количество электрической энергии, затраченной на формирование потока газа-теплоносителя со скоростью  $W_{gi}$  в  $i$ -й вакуум-камере.

Глобальный КЭ по всей зоне сушки  $i=1 \dots k$  имеет вид:

$$\min_{X_i} F = \min_{X_i} \sum_{i=1}^k F_i(X_i; S_{i-1}) \quad (4.1.1)$$

КЭ вида (4.1.1.) представляет собой аддитивно-сепарабельную функцию от КЭ отдельных элементов декомпозиции ХЭТП сушки. Воспользовавшись этим, можно записать выражение для КЭ через КЭ для  $k$ -го элемента декомпозиции и для первых  $k-1$  элементов:

$$\min_{X_i} F = \min \left\{ F_k(X_k; S_{k-1}) + \sum_{i=1}^{k-1} F_i(X_i; S_{i-1}) \right\}, \quad (4.1.2)$$

где минимизация первого слагаемого  $F_k(X_k; S_{k-1})$  проводится только изменением одного дискретного оптимизирующего вектора  $X_k(T_{g0k}, W_{gk})$ , а второе слагаемое  $\sum_{i=1}^{k-1} F_i(X_i; S_{i-1})$  минимизируется изменением всех оптимизирующих векторов  $X_i(T_{g0i}, W_{gi})$  при  $i=1, 2, \dots, k-1$ .

Решение задачи динамического программирования начинается с последнего этапа. В этом случае условный минимум КЭ будет определяться по формуле:

$$F_k^*(S_{k-1}) = \min_{X_k} F_k(S_{k-1}, X_k^*),$$

где  $F_k^*$  - условный минимум КЭ,  $X_k^*$  - условное оптимальное управление на последнем шаге  $i=k$ .

Значение критерия эффективности на предпоследнем шаге  $i=k-1$  будет равно:

$$F_{k-1}(S_{k-2}) = F_{k-1}(S_{k-2}, X_{k-1}) + F_k^*(S_{k-1}). \quad (4.1.3)$$

В выражение (4.1.3) входит вектор параметров состояния  $S_{k-1}$ , поэтому, чтобы продолжить решение, необходимо определить, как изменится вектор параметров состояния под влиянием управления  $X_{k-1}$  на  $k-1$  шаге:

$$S_{k-1} = \Phi_{k-1}(S_{k-2}; X_{k-1}).$$

Условный минимум КЭ на  $k-1$  шаге определяется по формуле:

$$F_{k-1}^*(S_{k-2}) = \min_{X_{k-1}} \left\{ F_{k-1}(S_{k-2}, X_{k-1}) + F_k^*(\Phi_{k-1}(S_{k-2}, X_{k-1})) \right\},$$

из которой находится условный минимум  $F_{k-1}^*(S_{k-2})$  и условный вектор оптимального управления  $X_{k-1}^*$ . Далее переходим к шагу  $k-2$  и т.д.

Для  $i$ -го шага ( $k-i+1$  шаг с конца) получается уравнение Беллмана:

$$F_i^*(S_{i-1}) = \min_{X_i} \left\{ F_i(S_{i-1}, X_i) + F_{i+1}^*(\Phi_i(S_{i-1}, X_i)) \right\}. \quad (4.1.4)$$

Решая последовательно уравнение Беллмана (4.1.4) на каждом шаге  $i$ , получим минимумы КЭ  $F_k^* \rightarrow F_{k-1}^* \rightarrow F_{k-2}^* \rightarrow \dots \rightarrow F_2^* \rightarrow F_1^*$  и условное оптимальное управление  $X_k^* \rightarrow X_{k-1}^* \rightarrow X_{k-2}^* \rightarrow \dots \rightarrow X_2^* \rightarrow X_1^*$ . Далее остаётся по известному начальному вектору параметров состояния  $S_0$  определить состояние  $S_1$  и найти минимум  $F_1$  и оптимальное управление  $X_1$  и так далее по цепочке, находя оптимальные значения параметров  $T_{g0i}$ ,  $W_{gi}$  на каждом  $i$ -м этапе декомпозиции, мы получим доминирующую последовательность  $\{X_i(T_{g0i}, W_{gi})\}_{i=1}^k$ , формирующую динамический режим, оптимизирующий ХЭТП высушивания многослойной массы окатышей по всей зоне сушки ХЭТС обжиговой машины.

На каждом  $i$ -м этапе неявной декомпозиции локальный КЭ  $F_i$  представляет собой функцию двух переменных  $F_i(T_{g0i}, W_{gi})$ , для которой требуется определить точку минимума  $X_i^*(T_{g0i}^*, W_{gi}^*)$ . Для решения этой условной оптимизационной задачи применялся высокоэффективный метод деформируемого симплекса или метод Нелдера-Мида. Осуществление накладываемых на управляющие переменные ограничений - скорость  $0 \leq W_{gi} \leq W_{gMAX}$  и температуру  $0 \leq T_{g0i} \leq T_{gMAX}$  теплоносителя на входе в слой достигается введением в функцию  $F_i(T_{g0i}, W_{gi})$  барьерных функций, ибо это основное ограничение обеспечивает корректное математическое, а так же осуществимое физическое решение системы ДУЧП и является самым жестким. Учет других ограничений:  $T_{ghi} \leq T_{ghMAX}$ ,  $u \leq u_{MAX}$ ,  $I \leq I_{MAX}$ ,  $\partial T_m / \partial \tau \leq \Delta_1 T_m^{MAX}$ ,  $\partial T_m / \partial x \leq \Delta_2 T_m^{MAX}$  осуществляется методом скользящего допуска и штрафных функций и специально подобранных вспомогательных коэффициентов, которые определяют равный порядок используемых величин, рассматриваемой системы условий и ограничений.

На основе разработанных алгоритмов динамического программирования и оптимизации, программно-реализованных в компьютерных моделях в среде Borland C++, проводились многочисленные вычислительные эксперименты по оптимизации ХЭТП многослойной сушки фосфоритовых окатышей в обжиговой машине ОК-520Ф, в которой предусмотрено 11 вакуум-камер  $k=11$ .

В найденном оптимальном режиме сушки скорость газа-теплоносителя в течение времени проведения ХЭТП принимает значение 1,3 м/с. Температура газа-теплоносителя умеренно возрастает. Скорость увеличения температуры газа-теплоносителя ограничена условиями прогрева окатышей, градиентом температуры в теле окатышей, предельным значением переувлажнения и интенсивностью переноса паров влаги в окатыше.

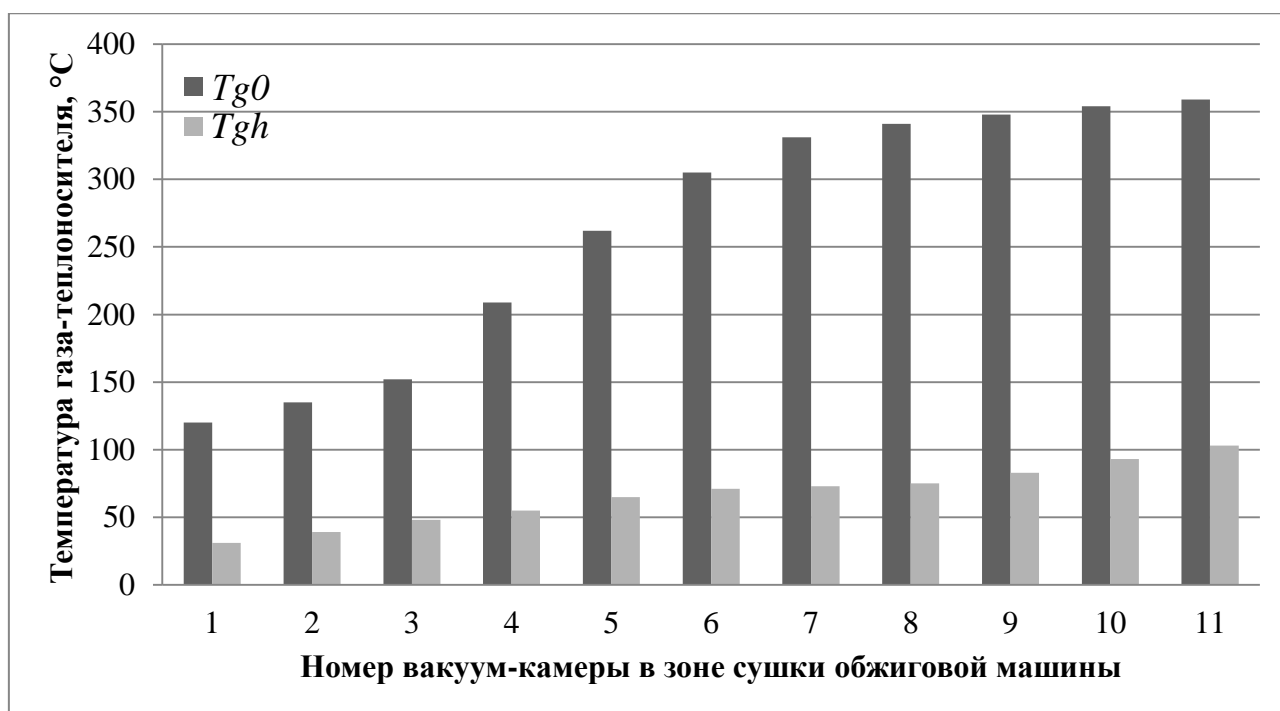


Рис. 4.1.3. Полученные в оптимальном режиме управляющая переменная  $T_{g0i}$  температура подачи газа-теплоносителя в многослойную массу,  $T_{ghi}$  температура отработавшего газа-теплоносителя, покидающего многослойную массу в  $i$ -й вакуум-камере

В полученном режиме функционирования ХЭТС значение управляющей переменной - температуры газа-теплоносителя медленно возрастает, интенсифицирует тепломассообменные процессы и ХЭТП сушки, выполняются ограничения по доле переувлажнения окатышей [293], а газ-теплоноситель уносит максимальное количество влаги из многослойной массы. Затем увеличение температуры газа-теплоносителя не влечёт уменьшения среднего по высоте многослойной массы влагосодержания, а количество тепловой энергии возрастает. Полученные результаты применялись для расчета оптимального режима сушки фосфоритовых окатышей на обжиговой машине конвейерного типа ОК-520/536Ф.

В результате проведенных исследований разработаны математическая и компьютерная модели оптимизации химико-энерготехнологического процесса сушки движущейся плотной многослойной массы фосфоритовых окатышей в конвейерной обжиговой машине, отличающиеся учетом

теплотехнологических особенностей обжиговой машины, интенсивности процесса внутреннего влагопереноса в окатыше и процессов переувлажнения отдельных слоев окатышей и газа-теплоносителя, что позволяет снижать энергозатраты посредством интенсификации тепломассообменных процессов многослойной сушки.

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

Оптимальные значения управляющих переменных для обеспечения энергоэффективности химико-энерготехнологического процесса (ХЭТП) многостадийной сушки фосфоритовых окатышей в движущейся плотной многослойной массе окатышей (см. рис. 4.2.1) на конвейере химико-энерготехнологической системы (ХЭС) определяются минимумом энергозатрат на ХЭТП сушки и качеством высушиваемых окатышей в каждой локальной вакуум-камере ХЭС обжиговой машины [294].

При оптимальном управлении энергоэффективностью многостадийного процесса сушки для каждого интервала времени  $\Delta t$  в каждой отдельной вакуум-камере на конвейере ХЭС (см. рис. 4.2.1) должны быть определены векторы управляющих переменных:  $Tg_0^k$  – температура газа-теплоносителя на входе в слой и  $Wg^k$  – скорость движения газа-теплоносителя в  $k$ -й вакуум-камере  $(Tg_0^k; Wg^k)$ , где  $k=1, \dots, K$ ,  $K$  – число вакуум-камер на конвейере ХЭС.



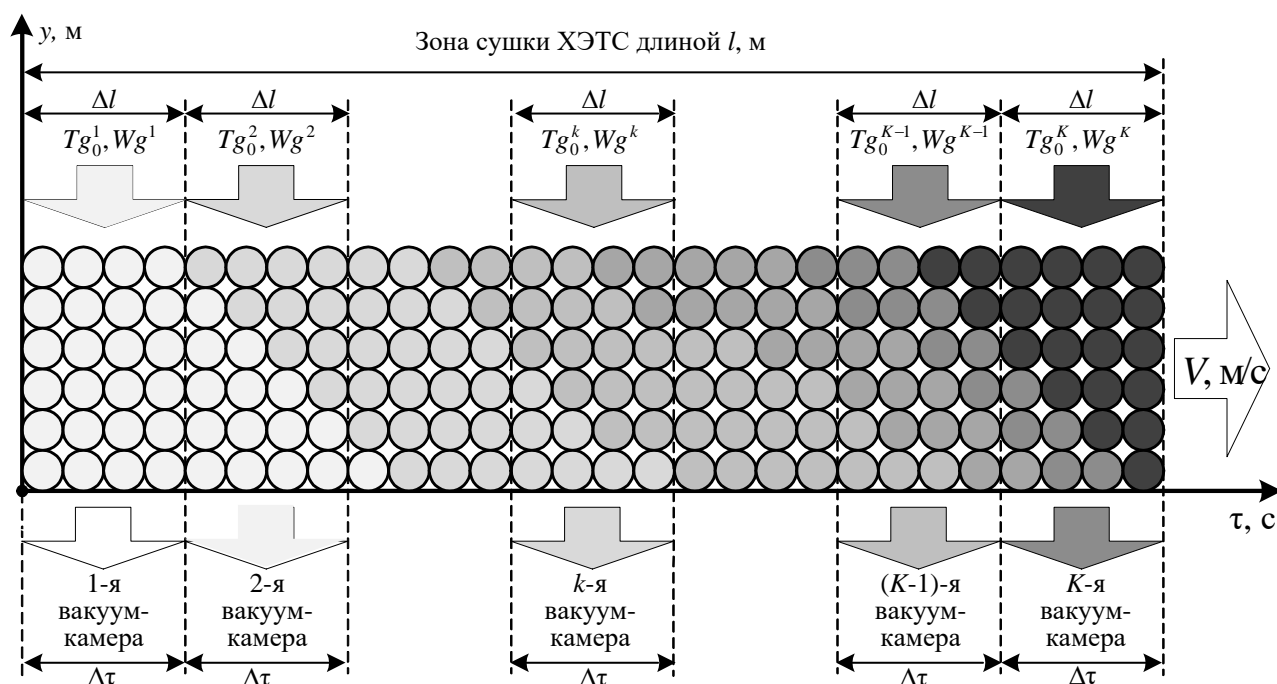


Рис. 4.2.1. Обобщённая схема химико-энерготехнологического процесса многостадийной сушки многослойной массы фосфоритовых окатышей, движущейся через последовательно установленные  $k$ -е локальные вакуум-камеры обжиговой конвейерной машины

Качество и завершённость локального ХЭТП сушки характеризуются для каждого окатыша (см. рис. 4.2.2) следующими показателями: температура окатышей  $Tm(x,y,\tau)$ , где  $x$  - координата по радиусу окатыша,  $y$  - координата высоты в вертикальной многослойной укладке окатышей,  $\tau$  - время; градиент температуры  $\partial Tm/\partial x$ ; скорость нагрева  $\partial Tm/\partial \tau$ ; температура газа-теплоносителя на выходе из многослойной укладки слоёв окатышей  $Tg_j$ ; переменные состояния окатышей: влагосодержание  $U(y,\tau)$  и интенсивность влагопереноса  $I(y,\tau)$ .

Для решения задачи оптимизации локального ХЭТП сушки необходимо сформировать пространственно-временные ячейки  $[\Delta \tau_i, \Delta y_j]$  для каждого рассматриваемого отдельного окатыша (см. рис. 4.2.2). Для каждой пространственно-временной ячейки необходимо решить уравнение теплопроводности с использованием неявной конечно-разностной схемы при

разбиении по радиусу  $R - \Delta x_n, n=1, \dots, N$ , и определить значения температуры материала окатышей  $Tm(x, y, \tau) = Tm_{j,n}^i$ , по значениям которой найти остальные управляемые переменные состояния ХЭТП сушки: градиент температуры  $(\partial Tm / \partial x)_{j,n}^i$  и скорость нагрева  $(\partial Tm / \partial \tau)_{j,n}^i$ .

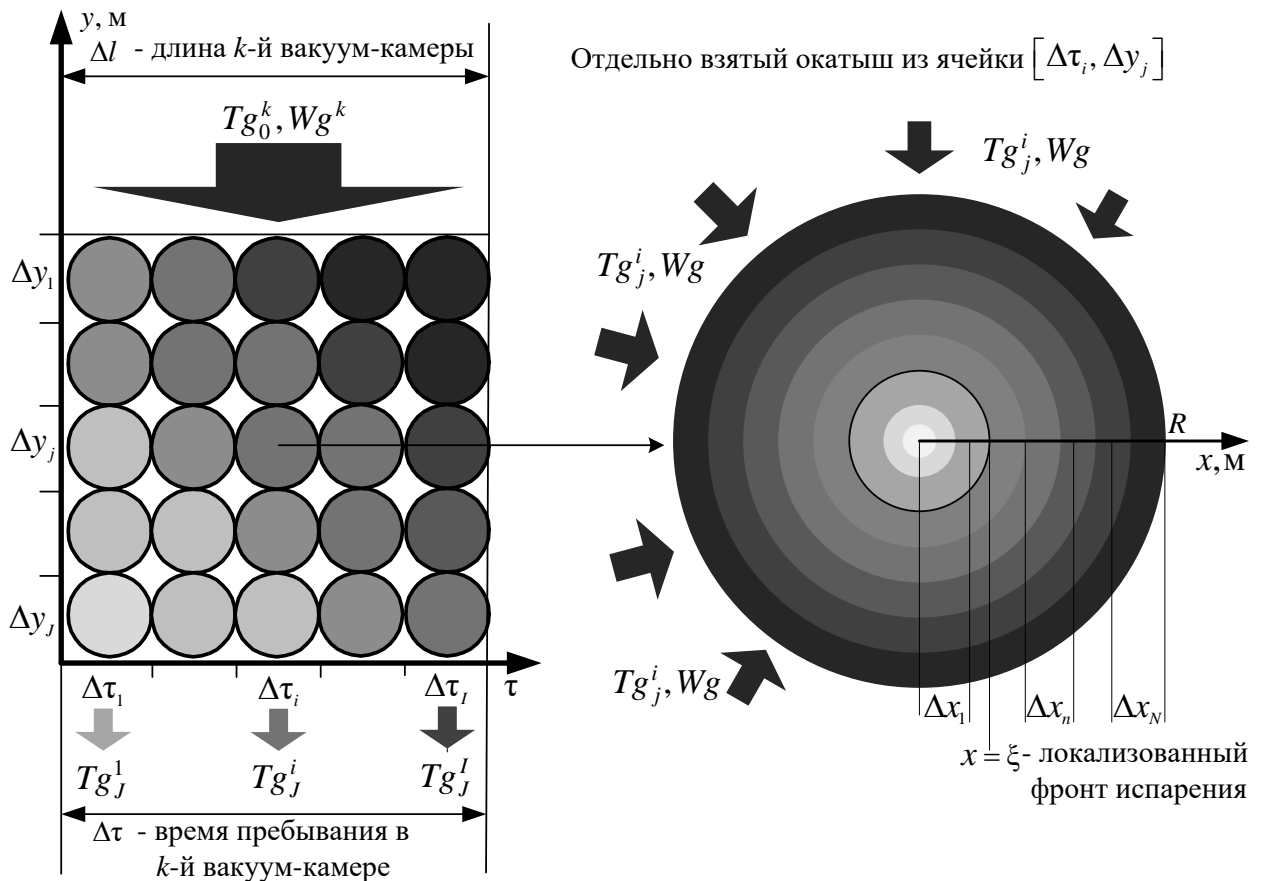


Рис. 4.2.2. Условная схема локальной вакуум-камеры, в которой для выбранной пространственно-временной ячейки  $[\Delta \tau_i, \Delta y_j]$  рассматривается окатыш радиуса  $R$ , нагревающийся от поверхности к центру.

Значения температуры газа-теплоносителя на выходе из вертикальной многослойной укладки окатышей  $T_g^i$ , влагосодержания  $U_j^i$ , интенсивности влагопереноса  $I_j^i$ , относительной степени высушивания  $\psi_j^i$  можно

определить из решения всей системы дифференциальных уравнений в частных производных (ДУЧП) с использованием разработанной в ходе диссертационного исследования математической и компьютерной модели ХЭТП сушки [295].

Энергозатраты ХЭТП сушки определяются расходами электрической  $Q_{эл}$  и тепловой  $Q_{теп}$  энергии. Для одной вакуум-камеры оптимальным будет теплотехнологический режим ХЭТП высушивания, в котором уменьшается среднее по высоте многослойной укладки влагосодержание окатышей на выходе из вакуум-камеры ( $j=J$ ), т.е.  $\bar{U} = \frac{1}{J} \sum_{i=1}^J U_J^i \rightarrow \min$  при минимальной стоимости израсходованной тепловой и электрической энергии.

Содержательная постановка задачи оптимизации локального ХЭТП сушки в пределах одной вакуум-камеры (см. рис. 4.2.2) может быть сформулирована следующим образом. Необходимо найти такое значение вектора управляющих переменных  $(T_{g0}, W_g)$ , чтобы значение среднего влагосодержания  $\bar{U}$  и стоимости расходов энергии  $S = s_{эл} \cdot Q_{эл} + s_{теп} \cdot Q_{теп}$  достигали своего минимального значения:  $\bar{U} \rightarrow \min, S \rightarrow \min$ , где  $s_{эл}$  и  $s_{теп}$  - удельная стоимость электрической и тепловой энергии соответственно [296].

Технические особенности ХЭТС обуславливают следующие ограничения на вектор управляющих переменных:

$$0 < W_g \leq W_g^{\max}, \quad (4.2.1)$$

$$T_{g0}^{\min} \leq T_{g0} \leq T_{g0}^{\max}, \quad (4.2.2)$$

а также на вектор переменных состояния (см. рис. 4.2.2) локализованного ХЭТП сушки в отдельно взятой ячейке  $[\Delta\tau_i, \Delta y_j]$ :

$$T_{gJ} \leq T_{gJ}^{\max}, \quad (4.2.3)$$

$$\partial T_m / \partial \tau \leq \Delta_1 T_m^{\max}, \quad (4.2.4)$$

$$\partial T_m / \partial x \leq \Delta_2 T_m^{\max}, \quad (4.2.5)$$

$$U \leq U^{\max}, \quad (4.2.6)$$

$$I \leq I^{\max}. \quad (4.2.7)$$

Математическая модель ХЭТП сушки движущейся многослойной массы окатышей представляет собой систему дифференциальных уравнений в частных производных (ДУЧП), для решения которой разработаны специальный вычислительно-эвристический алгоритм и компьютерная программа.

В вычислительно-эвристическом алгоритме используются предложенные авторами эвристические процедуры и правила для итерационного формирования векторного критерия энергоэффективности ХЭТП сушки с учетом как детерминированных ограничений (4.2.1) и (4.2.2), 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 (4.2.3) - (4.2.7).

Предложенный вычислительно-эвристический алгоритм состоит из следующих этапов:

Этап 1. Формирование эмпирического векторного критерия энергоэффективности (КЭ) локального ХЭТП сушки, учитывающего затраты энергии и качество высушенных окатышей:

$$F^*(Tg_0, Wg) = \min(\alpha_1 \bar{U}(Tg_0, Wg) + \alpha_2 S(Tg_0, Wg)), \quad (4.2.8)$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  эмпирические коэффициенты – значения «весовых множителей», учитывающих вклад в КЭ среднего по высоте многослойной укладки влагосодержания окатышей на выходе из вакуум-камеры  $\bar{U}$  и стоимости израсходованной тепловой и электрической энергии  $S$  [297].

Этап 2. Решение задачи нелинейной условной оптимизации энергоэффективности локального ХЭТП сушки многослойной массы окатышей в одной вакуум-камере, которая состоит в поиске минимума

векторного КЭ (4.2.8) при заданных ограничениях в виде неравенств (4.2.1)-(4.2.7).

Для решения этой задачи разработана оригинальная эвристическо-вычислительная процедура, использующая априорные представления о характере векторного КЭ (4.2.8) при применении модифицированного метода деформируемого многогранника и ускорения процедуры поиска экстремума  $F$ .

Этап 3. Реализация многошаговой вычислительно-эвристической процедуры построения барьерных функций и штрафных функций для выполнения ограничений условной оптимизации (4.2.1) - (4.2.7), которая включает следующие шаги:

3.1. Проверка выполнения ограничений (1) и (2) на управляющие переменные – скорость подачи  $W_g$  и температуру  $T_{g0}$  газа-теплоносителя на входе в локальную многослойную укладку окатышей с использованием в КЭ (4.2.8) специальной барьерной функции  $f_1$  вида:

$$f_1 = \begin{cases} 0, & \text{при } (W_g; T_{g0}) \in [T_{g0}^{\min}; T_{g0}^{\max}] \times (0; W_g^{\max}] \\ \infty, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (4.2.9)$$

Ограничение (4.2.9) является жестким, так как оно обеспечивает математически корректное и физически реализуемое решение системы ДУЧП [1].

3.2. Проверка выполнения остальных условий-ограничений, накладываемых физически реализуемыми режимами эксплуатации ХЭТС на переменные состояния локального ХЭТП сушки (см. рис. 4.2.1) с использованием метода «штрафных функций» типа «квадрата срезки» и вспомогательных эмпирически подобранных коэффициентов  $\gamma_i$ , которые обеспечивают одинаковый порядок величин, входящих в систему ограничений (4.2.3) -(4.2.7) в виде специальных штрафных функций  $\beta_i$ .

3.3. Проверка выполнения ограничения-неравенства (4.2.3) на значение температуры  $Tg_J^i$  газа-теплоносителя в виде специальной штрафной функции типа «квадрата срезки»:

$$\beta_1 = \begin{cases} (\gamma_1 \cdot Tg_J^i)^2, & \text{при } Tg_J^i > Tg_J^{\max} \\ 0, & \text{при } Tg_J^i \leq Tg_J^{\max} \end{cases}.$$

4.4. Проверка выполнения ограничения-неравенства (4.2.4) для значения скорости нагрева окатыша  $\partial T_m / \partial \tau$  в виде специальной штрафной функции:

$$\beta_2 = \begin{cases} (\gamma_2 \cdot \partial T_m / \partial \tau)^2, & \text{при } \partial T_m / \partial \tau > \Delta_1 T_m^{\max} \\ 0, & \text{при } \partial T_m / \partial \tau \leq \Delta_1 T_m^{\max} \end{cases}.$$

3.5. Проверка выполнения ограничения-неравенства (4.2.5) на значение градиента температуры в окатыше  $\partial T_m / \partial x$  в виде специальной штрафной функции:

$$\beta_3 = \begin{cases} (\gamma_3 \cdot \partial T_m / \partial x)^2, & \text{при } \partial T_m / \partial x > \Delta_2 T_m^{\max} \\ 0, & \text{при } \partial T_m / \partial x \leq \Delta_2 T_m^{\max} \end{cases}.$$

3.6. Проверка выполнения неравенства (4.2.6), т.е. отсутствия переувлажнения окатыша вследствие конденсации паров влаги из газа-теплоносителя, в виде специальной штрафной функции:

$$\beta_4 = \begin{cases} (\gamma_4 \cdot U)^2, & \text{при } U > U^{\max} \\ 0, & \text{при } U \leq U^{\max} \end{cases}.$$

3.7. Проверка выполнения неравенства (4.2.7), т.е. условия разрушения окатыша вследствие повышенного потока влаги (интенсивности влагопереноса  $I$ ) через локализованный фронт испарения, в виде специальной штрафной функции:

$$\beta_5 = \begin{cases} (\gamma_5 \cdot I)^2, & \text{при } I > I^{\max} \\ 0, & \text{при } I \leq I^{\max} \end{cases}.$$

3.8. Проверка выполнения ограничений (4.2.3) - (4.2.7) на переменные состояния локального ХЭТП сушки на основе использования в КЭ (4.2.8) специальной барьерной функции:  $f_2 = \sum_{i=1}^5 \beta_i$ .

Предложенный вычислительно-эмпирический алгоритм реализован в виде комплекса программ в среде Borland C++. С использованием этого комплекса программ проведены многочисленные расчёты при следующих граничных значениях технологических параметров ХЭТП многослойной сушки фосфоритовых окатышей в сложной ХЭТС обжиговой конвейерной машине:  $T_{g0}^{\min} = 290K$ ,  $T_{g0}^{\max} = 1673K$ ,  $W_g^{\max} = 1,3\text{м/с}$ ,  $I^{\max} = 3\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}) \cdot 10^3$ ,  $U^{\max} = 11\%$ ,  $\Delta_1 T_m^{\max} = 10\text{К/с}$ ,  $\Delta_2 T_m^{\max} = 5 \cdot 10^{-3}\text{К/м}$ .

На рис. 4.2.3. показаны результаты расчёта для ХЭТП сушки многослойной массы фосфоритовых окатышей в четвёртой вакуум-камере ( $k=4$ ), представляющие собой поверхности значений КЭ. Значение минимума векторного КЭ (4.2.8) достигается при следующих оптимальных значениях управляющих технологических переменных: скорость газа-теплоносителя  $W_g^* = 1,3\text{м/с}$ , температура подачи газа-теплоносителя  $T_{g0}^* = 478K$  (см. рис. 4.2.3).

При выполнении многочисленных вычислительных экспериментов по определению оптимальных значений управляющих переменных установлено, что для повышения быстродействия разработанного вычислительно-эвристического алгоритма в качестве начальной точки поиска минимума векторного критерия (4.2.8) для  $k$ -й вакуум-камеры конвейера  $F(T_{g0}^k; W_g^k)$  целесообразно рассматривать точку минимума, определенную для предыдущей  $(k-1)$ -й вакуум-камеры  $(T_{g0}^{k-1}; W_g^{k-1})$ .

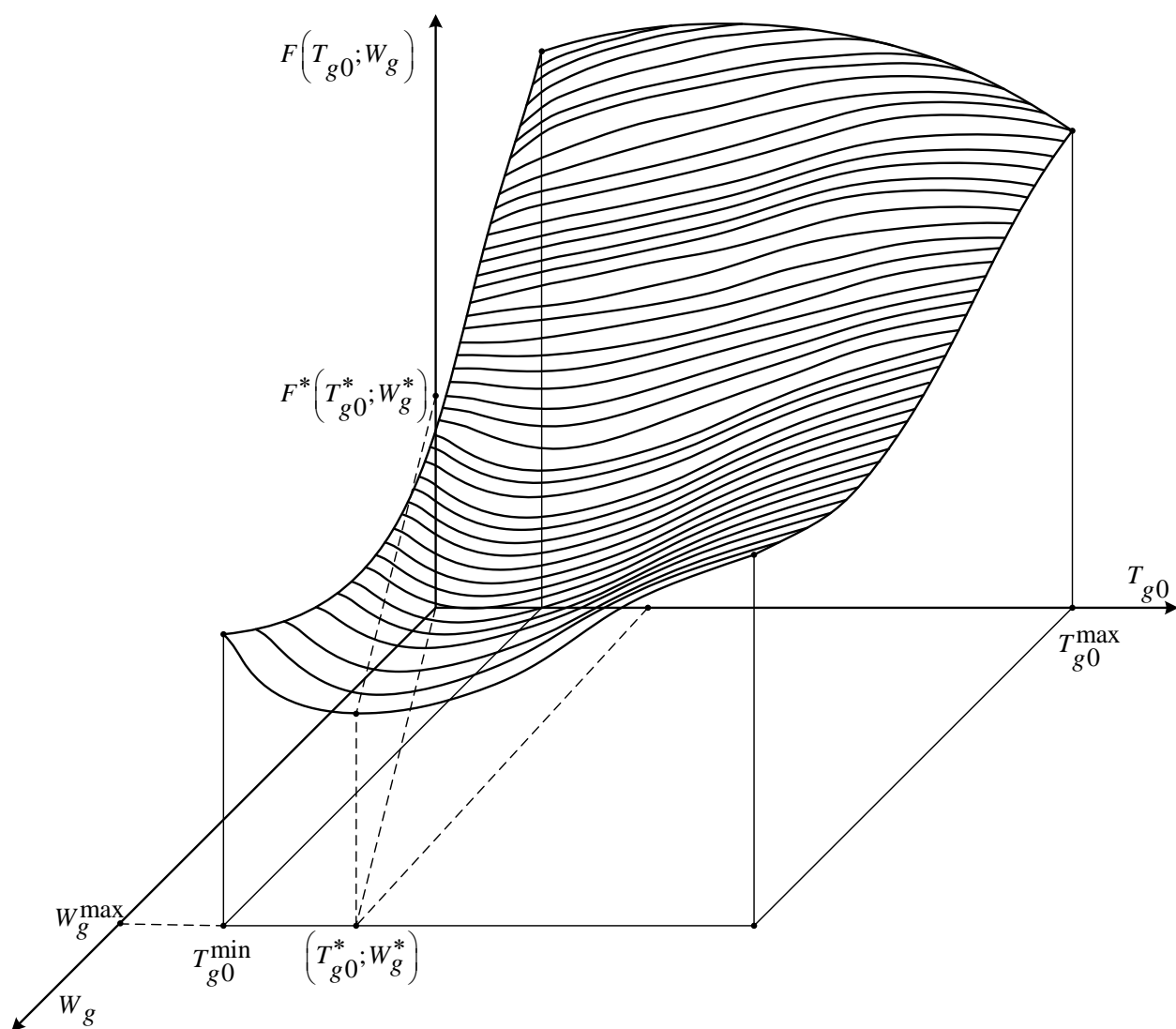


Рис. 4.2.3. Результаты эвристическо-вычислительной процедуры условной оптимизации критерия энергоэффективности для ХЭТП локальной сушки в четвёртой вакуум-камере ( $k=4$ )

Таким образом, разработанный вычислительно-эвристический алгоритм условной оптимизации энергоэффективности многостадийного ХЭТП сушки многослойной массы фосфоритовых окатышей на каждой стадии его дискретизации по времени в каждой вакуум-камере позволяет находить научно обоснованные оптимальные по энергозатратам и качеству высушенных окатышей режимы функционирования ХЭТС в локальных зонах сушки конвейерных обжиговых машин. Получен оптимальный режим



функционирования ХЭТС производства окатышей, снижающий энергозатраты на 8% по сравнению с действующим регламентным технологическим режимом.

#### **4.3 Методика проведения вычислительных экспериментов по оптимальному управлению энергоресурсоэффективностью ХЭТП сушки**

Периодическое изменение характеристик и свойств сырых фосфоритовых окатышей: влагосодержание, начальная прочность, температура, гранулометрический состав – это основная причина нарушения режима обжига кускового или окомкованного сырья на конвейере ХЭТС. Подача фосфоритовых окатышей в ХЭТС для термической обработки с превышенным влагосодержанием в регламентном технологическом режиме функционирования влечёт существенный перерасход тепловой энергии и неполное высушивание окатышей в зоне подогрева и сушки. В результате в зоне подогрева при резком повышении температуры газа-теплоносителя за счёт интенсивного парообразования окатыши с избыточным количеством влаги разрушаются [297].

Поэтому реализация процессов сушки в режиме оптимума энергозатрат и максимума скорости имеет большое значение для практики. Поскольку технологические ограничения существенно сужают диапазон варьирования параметров сушки, требуется тщательный анализ взаимовлияния всех факторов, определяющих режим сушки.

В процессе сушки пористого окатыша происходит перераспределение влаги внутри него. Локализованный фронт сушки движется вглубь сферического окатыша от поверхности к центру. Теплопроводностью высушенного внешнего сферического слоя материала окатыша подводится теплота. На фронте испарения она расходуется на испарение влаги. Таким образом, в глубине пористой структуры окатыша на поверхности локализованного фронта испарения формируется повышенное давление, и

образовавшийся там пар движется по порам от фронта испарения к внешней сфере поверхности окатыша [298].

Теплоперенос в окатыше осуществляется теплопроводностью, а теплоперенос в перекрёстном потоке газа-теплоносителя - конвекцией. Математическая модель тепломассообмена, описываемая системой дифференциальных уравнений, представлена в [288].

Технологическая зона сушки относительно всей площади обжиговой конвейерной машины составляет около 35%. ХЭТП сушки движущейся многослойной массы окатышей в регламентном технологическом режиме протекает примерно за 1200 секунд в режиме переключения реверса подачи газа-теплоносителя в многослойную массу. Проводились исследования по выявлению закономерностей многослойной сушки окомкованного материала [289]. Рассматривался случай, когда теплоноситель (сушильный агент) подавался в многослойную массу окатышей только сверху. Влажные окатыши с влагосодержанием около 10-11%, что соответствует влажности сырых окатышей, сходящих с тарельчатого гранулятора, вертикальными слоями укладывались в многослойную упаковку. Радиус окатыша 1см. Скорость подачи газа-теплоносителя 1,2м/с. На основе разработанной математической модели проводились численные эксперименты. Полученные результаты хорошо совпадают с имеющимися экспериментальными данными [44] и качественными зависимостями [298].

Системный анализ полученных данных выявил, что процесс высушивания протекает более интенсивно при повышении температуры газа-теплоносителя. Сильно выраженное увеличение скорости ХЭТП сушки в начальные промежутки времени сменяется замедлением скорости высушивания в дальнейшее время. Очевидно, этот эффект объясняется тем, что вначале жидкость испаряется с наружной поверхности окатыша и его внешней части, а потом локализованный фронт сушки продвигается вглубь, и подвод теплоты происходит сквозь просушенный материал окатыша. Температура ещё не высохшей внутренней части окатыша, поднявшись до

уровня «влажного термометра», является постоянной величиной. Высохшие внешние слои окатыша нагреваются, и значение температура стремится к значению температуры на поверхности окатыша, которая примерно равна температуре газа-теплоносителя. Из-за этого явления градиент температуры в окатыше ярко выражен на периметре локализованного фронта сушки, расположенного в глубине окатыша. Градиент температуры тем сильнее, чем больше температура газа-теплоносителя. Таким образом форсированный способ организации процесса сушки фосфоритовых окатышей может вызвать их разрушение повышенным градиентом температуры. Также следует учитывать интенсивность влагопереноса  $I$ , кг/(м<sup>2</sup>·с), потому что влажный пар, сформировавшийся на сфере локализованного фронта испарения, движется по порам через просушенный слой окатыша к его поверхности, где увлажняет газ-теплоноситель. Так как наружная большая часть объёма окатышей просушивается в начальном промежутке времени, средняя радиальная температура возрастает умеренно.

В режиме функционирования ХЭТС при термической подготовке фосфоритовых окатышей управляющими переменными являются:  $T_{g0}$  - температура газа-теплоносителя и  $W_g$  - скорость потока подачи газа-теплоносителя в многослойную массу.

Критерием в зоне сушки служит минимум среднего по слою влагосодержания окатышей  $\bar{w} \rightarrow \min$ . Стоимость  $Z$  готового продукта при термической подготовке формируется в основном удельными затратами электрической и тепловой энергий  $Z = Q_{эл} \cdot Z_{эл} + Q_{теп} \cdot Z_{теп}$ . Обычно стоимость электрической энергии  $Z_{эл}$  примерно в четыре раза больше стоимости тепловой энергии  $Z_{теп}$ , что необходимо учитывать при расчете совокупных затрат на энергетические ресурсы. В современной экономике с точки зрения энергоресурсоэффективности оптимальным является режим проведения ХЭТП сушки, в котором требуемое качество высушенных

подготовленных окатышей достигает максимума при минимальной стоимости энергоресурсов.

Рассмотрим постановку задачи условной оптимизации при различных этапах ХЭТП сушки динамической многослойной массы окатышей последовательно в каждом шаге дискретизации времени. Требуется отыскать значения управляющих переменных  $T_{g0}$ ,  $W_g$ , чтобы  $\bar{u}$  и  $Z$  принимали минимальные значения в условиях действия ограничений: на управляющие переменные – скорость подачи потока газа-теплоносителя  $W_{g0} \leq W_{gMAX}$  и его температуру  $T_{g0} \leq T_{gMAX}$  в многослойную массу окатышей и на выходе из неё  $T_{gh} \leq T_{ghMAX}$  в силу технических особенностей теплового аппарата, скорость нагревания  $\partial T_m / \partial \tau \leq \Delta_1 T_m^{MAX}$  и градиент температуры  $\partial T_m / \partial x \leq \Delta_2 T_m^{MAX}$ , степень переувлажнения  $u \leq u_{MAX}$  и интенсивность влагопереноса  $I \leq I_{MAX}$ .

Для поиска оптимального режима сушки рассмотрим функционал  $\Phi = \alpha_1 \bar{u} + \alpha_2 Z$ . Коэффициенты  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  обеспечивают ранжированность критериев в поиске экстремума  $\Phi$ .

Результаты численного эксперимента по оптимизации представлены на рисунках 4.3.1 – 4.3.5. Оптимальным энергоресурсоэффективным оказался режим функционирования ХЭТС, при котором скорость греющего газа-теплоносителя до окончания ХЭТП сушки остается равной 1,3 м/с. Температура потока подаваемого газа-теплоносителя в движущуюся на конвейере ХЭТС многослойную массу окатышей умеренно возрастает. Ограничения, наложенные на переменные состояния ХЭТП сушки, скорость нагрева, градиент температуры, степень переувлажнения окатышей, интенсивность переноса водяного пара внутри пористой структуры окатыша определяют скорость изменения температуры потока.

На рисунке 4.3.1 видно, что вначале скорость увеличения температуры потока газа-теплоносителя больше, чем в конечный период. Достигнув температуры, определяемой температурой влажного термометра, ХЭТП сушки протекает в постоянных термических условиях (рис. 4.3.1).

Этот эффект обусловлен тем, что в начальном периоде ХЭТП сушки не начинается, пока окатыши не прогреются до температуры мокрого термометра. Возрастание температуры газа-теплоносителя ограничено температурным градиентом в материале окатыша и скоростью его прогрева. Как только наружная поверхность окатыша нагреется и сравняется с температурой мокрого термометра, начнётся процесс парообразования и испарения влаги. Так как наружная часть окатыша и расположенный в ней локализованный фронт испарения обладают большим объёмом и увеличенной площадью поверхности соответственно, в этот период сушки интенсивность переноса влаги максимально возрастает (см. рис. 4.3.3). Затем по мере высушивания внешней части окатышей фронт сушки продвигается от поверхности к центру окатыша, уменьшается его поверхность, что влечёт снижение интенсивности влагопереноса.

При течении газа-теплоносителя в вертикальной многослойной укладке окатышей в верхних, сильнее нагретых горизонтах окатышей, где интенсивность ХЭТП сушки наибольшая, проявляется процесс увлажнения газа-теплоносителя.

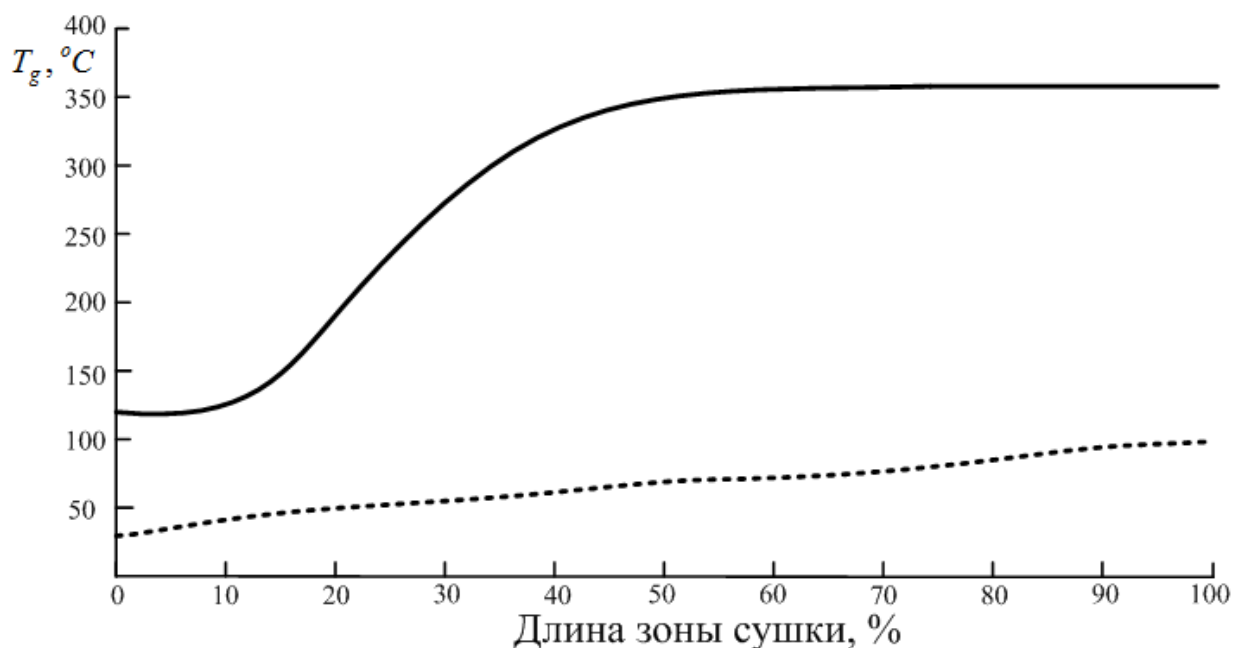


Рис. 4.3.1. Температура газа-теплоносителя в зоне сушки: — на входе; ..... на выходе из движущейся многослойной массы окатышей

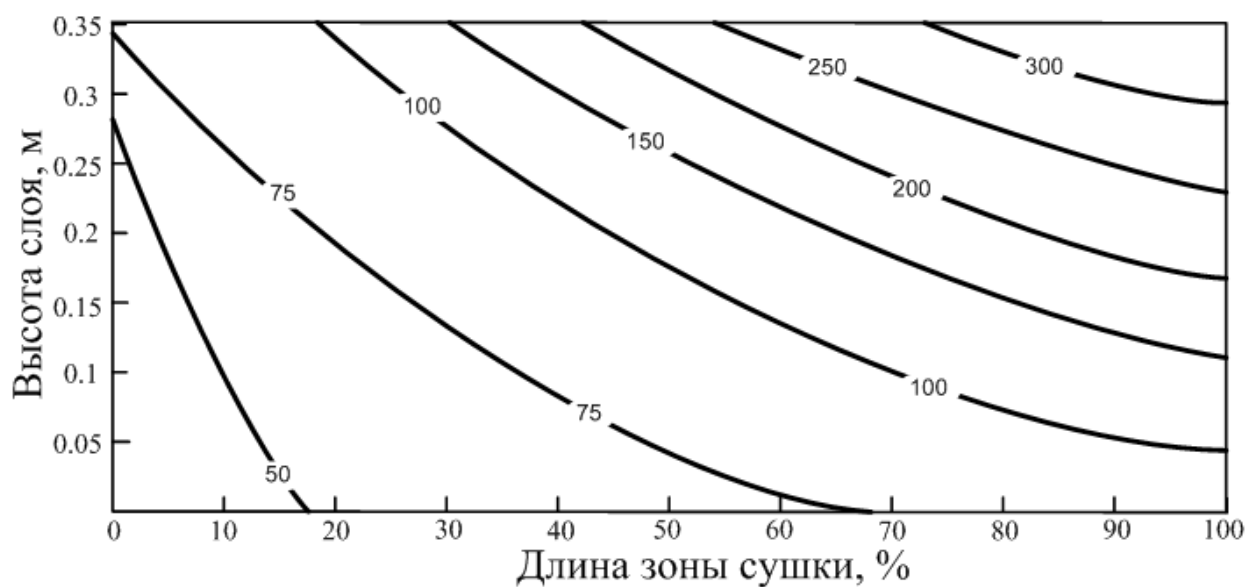


Рис. 4.3.2. Параметрическое семейство изолиний, показывающих среднюю по радиусу температуру материала окатышей в многослойной массе в зоне сушки, °С

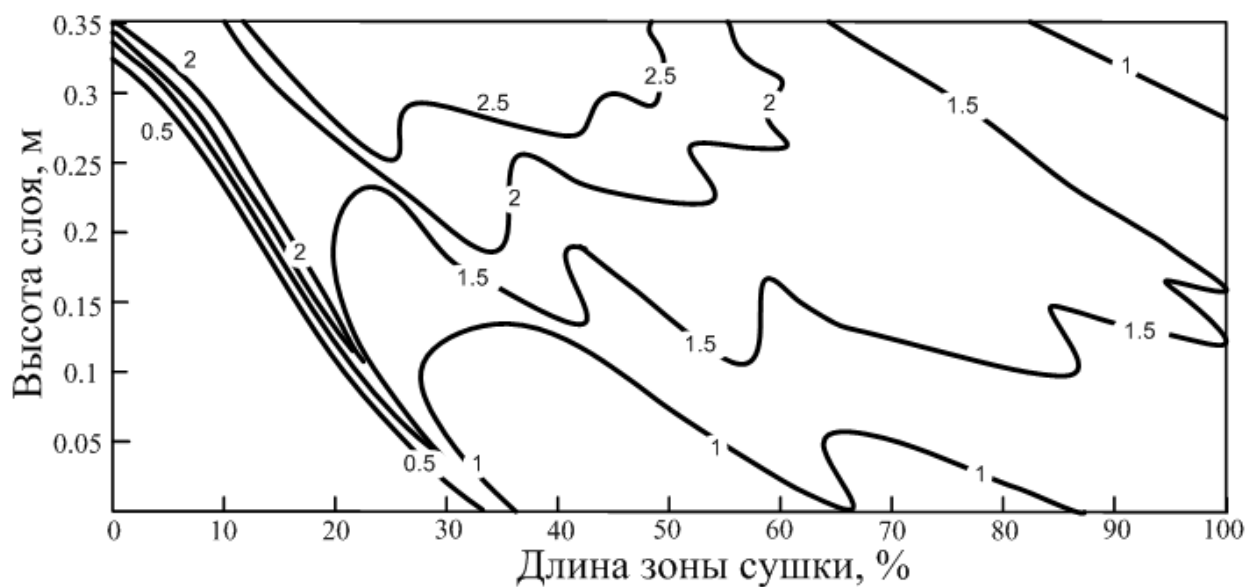


Рис. 4.3.3. Параметрическое семейство изолиний, характеризующих интенсивность ХЭТП сушки движущейся многослойной массы окатышей в зоне сушки,  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}) \times 10^3$

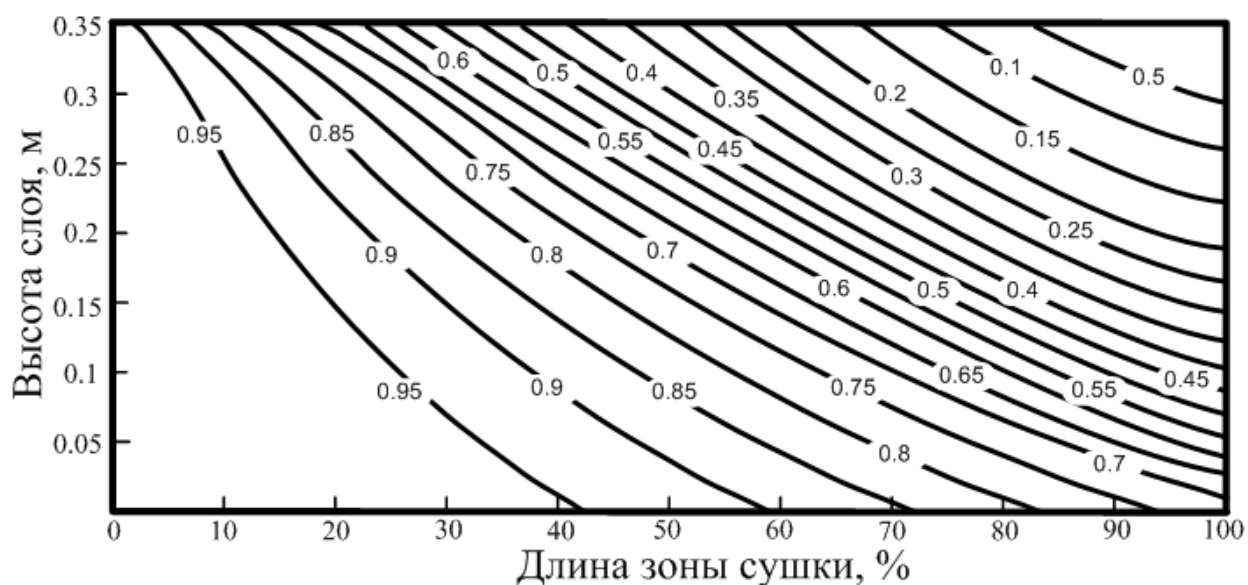


Рис. 4.3.4. Параметрическое семейство изолиний, характеризующих относительную степень высушивания окатышей в многослойной массе в зоне сушки

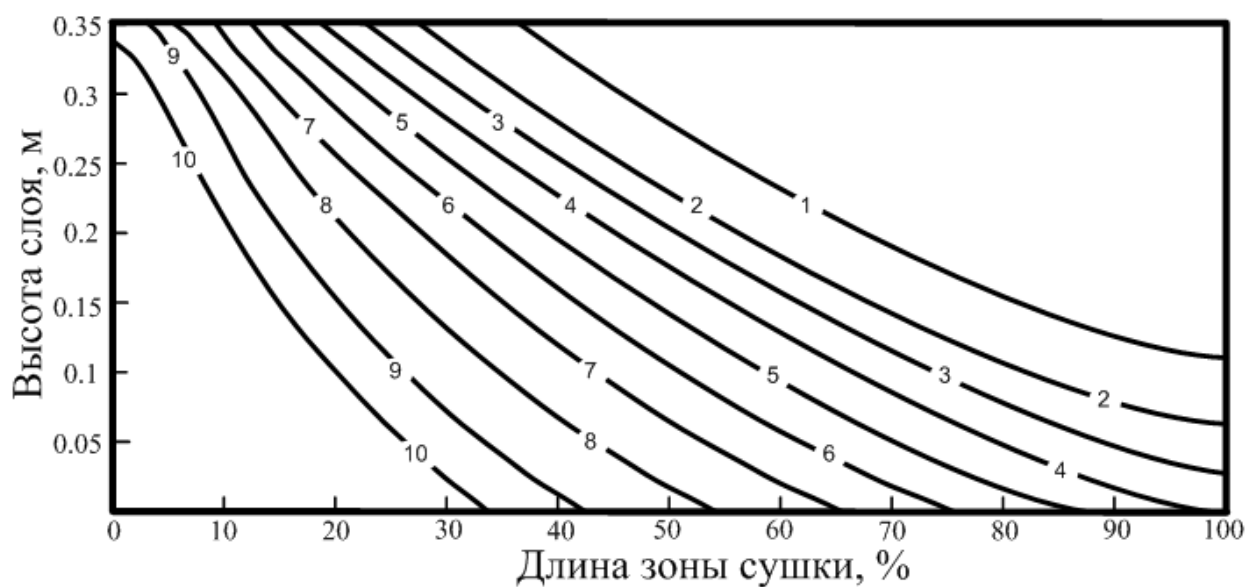


Рис. 4.3.5. Параметрическое семейство изолиний, характеризующих влагосодержание материала окатышей в движущейся многослойной массе в зоне сушки, %

Продвигаясь вниз к менее нагретым горизонтам слоя, теплоноситель остывает, и при достижении точки росы происходит конденсация влаги на внешнюю поверхность окатышей. Следовательно, увеличение температуры в верхних горизонтальных слоях многослойной массы окатышей не определяет в целом по высоте многослойной укладки более эффективного ХЭТП сушки.

А переувлажнение фосфоритовых окатышей свыше 14% влечёт их разрушение, нарушается аэродинамическое сопротивление многослойной массы, происходит перерасход электрической энергии на работу эксгаустеров, обеспечивающих поток газа-теплоносителя. Сформируется режим функционирования ХЭТС, в котором интенсифицируются тепломассообменные процессы удаления влаги в среднем по высоте многослойной укладки окатышей, и не образуются горизонты окатышей с превышенным влагосодержанием под воздействием управляющей переменной – температурой подачи газа-теплоносителя.

В этом энергоэффективном режиме функционирования ХЭТС газ-теплоноситель вбирает в себя наибольшее количество влажного пара, определяемое параметрами внешней среды и свойствами газа-теплоносителя, и уносит его из многослойной массы окатышей. Этот факт подтверждается тем, что влагосодержание окатышей в подвижной многослойной массе уменьшается постепенно (см. рис.4.3.5), значение относительной степени сушки возрастает из-за требования увеличения скорости движения фронта испарения вглубь окатышей и обеспечения наибольшего увлажнения газа-теплоносителя (см. рис.4.3.4).

Так как последующее увеличение температуры газа-теплоносителя не даёт уверенного снижения влагосодержания окатышей в среднем по вертикальной укладке, а затраты на расход тепловой энергии возрастают, температура газа-теплоносителя равномерно увеличивается до некоторого предельного значения, определяемого температурой влажного термометра и параметрами окатышей в многослойной массе (см. рис.4.3.2).

Таким образом, сформированный режим функционирования ХЭТС повышает энергоресурсоэффективность в рассматриваемой технологии термической подготовки окомкованного фосфатного сырья и увеличивает интенсивность ХЭТП многослойной сушки окатышей.



Полученные результаты применялись для расчета оптимального режима сушки окомкованного сырья на обжиговой машине конвейерного типа ОК-520/536Ф.

Полученный тепловой и аэродинамический режим сушки фосфоритовых окатышей в плотной многослойной массе, движущейся на конвейере обжиговой машины, формирует затухающую тепловую волну, интенсифицирующую термически активируемые целевые процессы, и в том числе ХЭТП сушки окатышей. В результате чего снижается удельный расход топлива (около 1.1 тонн условного топлива на тонну готовых окатышей), уменьшается количество возврата, повышается качество готовых просушенных окатышей.

#### **4.4 Выводы**

В результате проведенных исследований разработаны математическая постановка и алгоритм решения задачи динамического программирования, программно-реализованный в среде программирования Borland C++.

Анализ результатов показал, что в зоне сушки из движущейся многослойной массы фосфоритовых окатышей большая по массе часть воды испаряется раньше, чем окатыши поступают в технологические зоны предварительного подогрева и высокотемпературного обжига, и оставшаяся часть влаги может разрушать окатыши при форсированном интенсивном нагревании.

Таким образом, разработанный вычислительно-эвристический алгоритм условной оптимизации энергоэффективности многостадийного ХЭТП сушки многослойной массы фосфоритовых окатышей на каждой стадии его дискретизации по времени в каждой вакуум-камере позволяет находить научно обоснованные оптимальные по энергозатратам и качеству высушенных окатышей режимы функционирования ХЭТС в локальных зонах сушки конвейерных обжиговых машин. Реализация оптимального режима ХЭТП сушки в ХЭТС обеспечивает сокращение удельного расхода энергии на 8%.

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

### 5.1 Содержательная и математическая постановки задачи многоуровневого оптимального управления ХЭТП прокалки и спекания

Разбивая время движения многослойной массы фосфоритовых окатышей в высокотемпературной технологической зоне на  $k$  этапов, получим промежутки времени  $\Delta\tau_k$ . Будем находить оптимальные значения управляющих переменных  $T_{g0}, W_g$  в каждом промежутке времени  $\Delta\tau_k$  последовательно. Получим динамический режим функционирования ХЭТС, оптимизирующий энергоэффективность ХЭТП прокалки и спекания по всему конвейеру в зоне обжига обжиговой машины.

Критериями завершённости ХЭТП прокалки и спекания в технологической зоне предварительного подогрева и высокотемпературного обжига являются минимум в среднем по высоте многослойной укладки степени реагирования реакций диссоциации карбонатов, то есть прокалки  $\bar{\eta} \rightarrow \min$ , и требуемая прочность  $\sigma^*$ , обеспечиваемая успешным проведением ХЭТП спекания  $\|\sigma - \sigma^*\| \rightarrow 0$ . Стоимость готового продукта – термически подготовленных окатышей в теплотехнологии обжига окатанного фосфоритного сырья складывается в основном из стоимости энергетических затрат  $S = Q_{эл} \times S_{эл} + Q_{теп} \times S_{теп}$ , причем стоимость электрической энергии  $S_{эл}$  примерно в четыре раза больше тепловой энергии  $S_{теп}$ .

Рассмотрим постановку задачи условной оптимизации при различных этапах ХЭТП обжига как совокупности двух взаимозависимых термически активируемых химико-физических процессов прокалки и спекания

динамической многослойной массы окатышей последовательно в каждом шаге дискретизации времени. Требуется отыскать значения управляющих переменных  $T_{g0}$ ,  $W_g$ , чтобы  $\bar{\eta}$ ,  $\|\sigma - \sigma^*\|$  и  $S$  принимали минимальные значения в условиях действия ограничений: на управляющие переменные – скорость подачи потока газа-теплоносителя  $W_{g0} \leq W_{gMAX}$  и его температуру  $T_{g0} \leq T_{gMAX}$  в многослойную массу окатышей и на выходе из неё  $T_{gh} \leq T_{ghMAX}$ , в силу технических особенностей теплового аппарата, скорость нагревания  $\partial T_m / \partial \tau \leq \Delta_1 T_m^{MAX}$  и градиент температуры  $\partial T_m / \partial x \leq \Delta_2 T_m^{MAX}$ , предотвратить оплавление материала окатышей или остеклования, проявляющееся при воздействии очень высоких температур.

При решении различных многокритериальных задач оптимизации важно учитывать относительную важность частных критериев. В рассматриваемой многокритериальной оптимизационной задаче частные критерии естественно упорядочены по важности последовательным расположением технологических зон протекания ХЭТП по длине конвейера ХЭТС.

Таким образом, отношение важности и предпочтения  $\frac{\text{lex}}{\approx >}$  во множестве возможных стратегий определяется вектор-критерием  $\{\bar{\eta}, \|\sigma - \sigma^*\|, S\}$ .

Эти рассуждения научно обосновывают существование критерия  $\Phi$  и позволяют достаточно просто и удобно практически реализовать и построить функционал  $\Phi$  по формуле:

$$\Phi = \sum_{r=1}^S \alpha_r K_r. \quad (5.1.1)$$

Определенный на замкнутом множестве  $U$  функционал  $\Phi$  имеет следующее свойство:

$$\left. \begin{array}{l} \text{для любых } u, v \in U \quad \Phi(u) \leq \Phi(v) \\ \text{тогда и только тогда, когда } u \stackrel{\text{lex}}{\approx} v \end{array} \right\}. \quad (5.1.2)$$

Если предположить, что  $u^*$  - оптимальная стратегия, то функционал  $\Phi$ , вычисляемый по формуле (5.1.1) и удовлетворяющий свойству (5.1.2), достигает минимума только на множестве оптимальных стратегий  $U^*$ :

$$U^* = \{u: u \in U \ \& \ \Phi(u) = \min \Phi(v) \}. \quad (5.1.3)$$

Очевидно, чтобы сконструировать функционал типа (5.1.3), линейный по отношению к частным критериям, важно безошибочно и относительно просто выбирать коэффициенты  $\alpha_r$  [299]. В научных трудах по многокритериальной оптимизации научно обосновывается правило подбора коэффициентов  $\alpha_r$ :

$$\alpha_r > \frac{1}{\mu_r} \sum_{l=r+1}^s \alpha_l M_l, \quad (5.1.4)$$

здесь:

$$\begin{aligned} 0 < \mu_r &\leq \inf_{\substack{u, v \in U \\ K_r(u) \neq K_r(v)}} |K_r(u) - K_r(v)| \\ M_l &\geq \max_{u \in U} K_l(u) - \min_{u \in U} K_l(u) \end{aligned}, \quad (5.1.5)$$

согласно неравенству (5.1.4) при выполнении условий (5.1.5)

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

Вектор  $\{T_{g0}^*, W_g^*\}$ , минимизирующий функционал  $\Phi$ , называется оптимальной точкой (стратегией), а соответствующее значение  $\Phi(T_{g0}^*, W_g^*)$  – оптимальным значением целевой функции. Пара  $\{T_{g0}^*, W_g^*\}$  и  $\Phi(T_{g0}^*, W_g^*)$  составляют оптимальную стратегию.

Обеспечение выполнения условий-ограничений в виде неравенств на управляющие переменные: скорость подачи  $0 \leq W_g \leq W_g^{\text{MAX}}$  и температуру  $273 \leq T_{g0} \leq T_g^{\text{MAX}}$  газа-теплоносителя в движущуюся многослойную массу фосфоритовых окатышей – определяется добавлением к функционалу  $\Phi$  специальных функций «барьерного» типа:

$$f_1 = \begin{cases} 0, & \text{при } \{W_g, T_{g0}\} \in [0; W_g^{\text{MAX}}] \cap [273; T_g^{\text{MAX}}] \\ \infty, & \text{в противном случае} \end{cases}.$$

Именно это наложенное на управляющие переменные условие является самым главным, так как оно определяет корректную математическую постановку задачи и реализуемое физически решение системы ДУЧП.

Согласованность других ограничений-условий реализуется штрафными специальными функциями вида “квадрата срезки” и использованием вспомогательных эмпирических коэффициентов, которые гарантируют примерно равный порядок величин, присутствующих в системе условий и ограничений:

$$f_2 = \sum_{i=1}^6 \beta_i,$$

где

$$\beta_1 = \begin{cases} (k_1 \cdot T_{gh})^2, & \text{при } T_{gh} > T_{gh}^{\text{MAX}} \\ 0, & \text{при } T_{gh} \leq T_{gh}^{\text{MAX}} \end{cases},$$

$$\beta_2 = \begin{cases} \left( k_2 \cdot \frac{\partial T_m}{\partial \tau} \right)^2, & \text{при } \frac{\partial T_m}{\partial \tau} > \Delta_1 T_m^{\text{MAX}} \\ 0, & \text{при } \frac{\partial T_m}{\partial \tau} \leq \Delta_1 T_m^{\text{MAX}} \end{cases},$$

$$\beta_3 = \begin{cases} \left( k_3 \cdot \frac{\partial T_m}{\partial x} \right)^2, & \text{при } \frac{\partial T_m}{\partial x} > \Delta_2 T_m^{\text{MAX}} \\ 0, & \text{при } \frac{\partial T_m}{\partial x} \leq \Delta_2 T_m^{\text{MAX}} \end{cases},$$

$$\beta_6 = \begin{cases} (k_6 \cdot g)^2, & \text{при } g > g^{\text{MAX}} \\ 0, & \text{при } g \leq g^{\text{MAX}} \end{cases}.$$

Оптимальное управление ХЭТП обжига посредством управляющих переменных  $W_{g0}$  и  $T_{g0}$  позволяет осуществлять программируемый оптимальный нагрев и выполнить требуемые теплотехнологические и технические ограничения.

### **5.3 Методика проведения вычислительных экспериментов по оптимальному управлению энергоресурсоэффективностью ХЭТП прокалки и спекания**

Обжиг дисперсного материала в плотном слое широко применяется в химической и металлургической промышленности [299]. Целью настоящей главы является: определение оптимальных функциональных режимов ХЭТП прокалки и спекания окатанного фосфоритного рудного сырья, которые обеспечивают нужное качество готовых обожжённых окатышей и реализуют мероприятия по энергоресурсосбережению для теплотехнологии обжига окатышей.

В технологической зоне предварительного нагрева термически активируются реакции диссоциации карбонатов. Этот процесс существенно влияет на конечную прочность обожжённых окатышей. В технологической зоне высокотемпературного обжига процесс прокалки протекает особенно интенсивно, и начинает проявляться ХЭТП спекания. Повышение прочности происходит за счёт заплывания пор в результате твердофазного и жидкофазного спекания. Качество протекания ХЭТП упрочняющего спекания в заключении обеспечивает конечную прочность обожжённых и подготовленных окатышей [300].

Многоуровневые алгоритмы оптимального управления термически активируемыми энергоёмкими ХЭТП спекания и прокалки в движущейся на конвейере многостадийной сложной ХЭТС плотной многослойной массе фосфоритовых окатышей разрабатываются для построения энергоресурсоэффективного технологического режима проведения ХЭТП,

при котором выполняется ряд оговоренных выше требований: завершённость реакций диссоциации карбонатов, приобретение окатышами заданной прочности за счёт успешного проведения процесса спекания. Учитываются также условия и ограничения, наложенные на скорость прогрева, температурный градиент, технические тепловые и аэродинамические особенности обжиговых аппаратов.

В широком смысле содержательная постановка задачи оптимизации ХЭТП прокали и спекания состоит в поиске минимума критерия энергоресурсоэффективности при оговоренных ранее ограничениях теплотехнологического или технического характера в виде неравенств:

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq W_g \leq W_g^{MAX} \\ 273 \leq T_{g0} \leq T_{g0}^{MAX} \\ 0 \leq \bar{\eta} \leq 1 \\ 0 \leq \|\sigma - \sigma^*\| \leq \sigma_K \\ 0 \leq S \leq S^{MAX} \end{array} \right. . \quad (5.3.1)$$

В данной постановке задачи критерий энергоресурсоэффективности представляет собой функционал:

$$\Phi = \alpha_2 \bar{\eta} + \alpha_3 \|\sigma - \sigma^*\| + \alpha_4 S \quad (5.3.2)$$

при ограничениях:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{gh} \leq T_{gh}^{MAX} \\ \frac{\partial T_m}{\partial \tau} \leq T_m^{MAX} \\ \frac{\partial T_m}{\partial x} \leq T_m^{MAX} \\ g \leq g^{MAX} \end{array} \right. . \quad (5.3.3)$$

Величины, представленные в (5.3.1), (5.3.3), определяют условия-ограничения в виде неравенств;  $\{T_{g0}, W_g\}$  – управляющий вектор

соответствующих переменных [301].

Вектор  $\{T_{g0}^*, W_g^*\}$ , удовлетворяющий соотношениям (5.3.1), (5.3.3) и минимизирующий функционал  $\Phi$ , называется оптимальной точкой (стратегией), а соответствующее значение  $\Phi(T_{g0}^*, W_g^*)$  – оптимальным значением целевой функции. Пара  $\{T_{g0}^*, W_g^*\}$  и  $\Phi(T_{g0}^*, W_g^*)$  составляют оптимальное решение [302].

Для изучения характера процессов прокалки и спекания в движущейся плотной многослойной массе окатышей на конвейере многостадийной ХЭТС исследуется особенность подачи перекрёстного потока газа-теплоносителя в многослойную массу только сверху. Термическая обработка материала окатышей, находящихся в вертикальной многослойной массе, продолжается, пока средняя по высоте многослойной укладки окатышей степень реагирования реакции декарбонизации и требуемые показатели прочности  $\bar{\eta} \leq 0.95$ ,  $\bar{\sigma} \geq 125$  не достигнут определённых значений.

По результатам многочисленных вычислительных экспериментов по оптимизации ХЭТП прокалки и спекания были достигнуты следующие показатели (см. рис. 5.3.1 – 5.3.5).

В начальном временном этапе управляющая переменная – температура газа-теплоносителя принимает наибольшее возможное значение 1325°C (см. рис. 5.3.1). Вначале вторая управляющая переменная скорость подачи газа-теплоносителя принимает значение 1,1м/с, а потом её значение становится максимально возможным 1,3м/с (см. рис. 5.3.2). Этот факт объясняется тем, что вначале прогревается верхняя часть многослойной массы окатышей, а потом для более интенсивного нагрева последующих горизонтальных слоёв необходима увеличенная скорость подачи газа-теплоносителя. В последующем временном этапе скорость подачи газа-теплоносителя снижается до наименьшей – 0,2м/с. Это связано с тем, что термически активируемые эндотермические ХЭТП в верхних слоях многослойной массы закончились, и начинается рекуперация теплоты в последующие нижние горизонты многослойной массы.



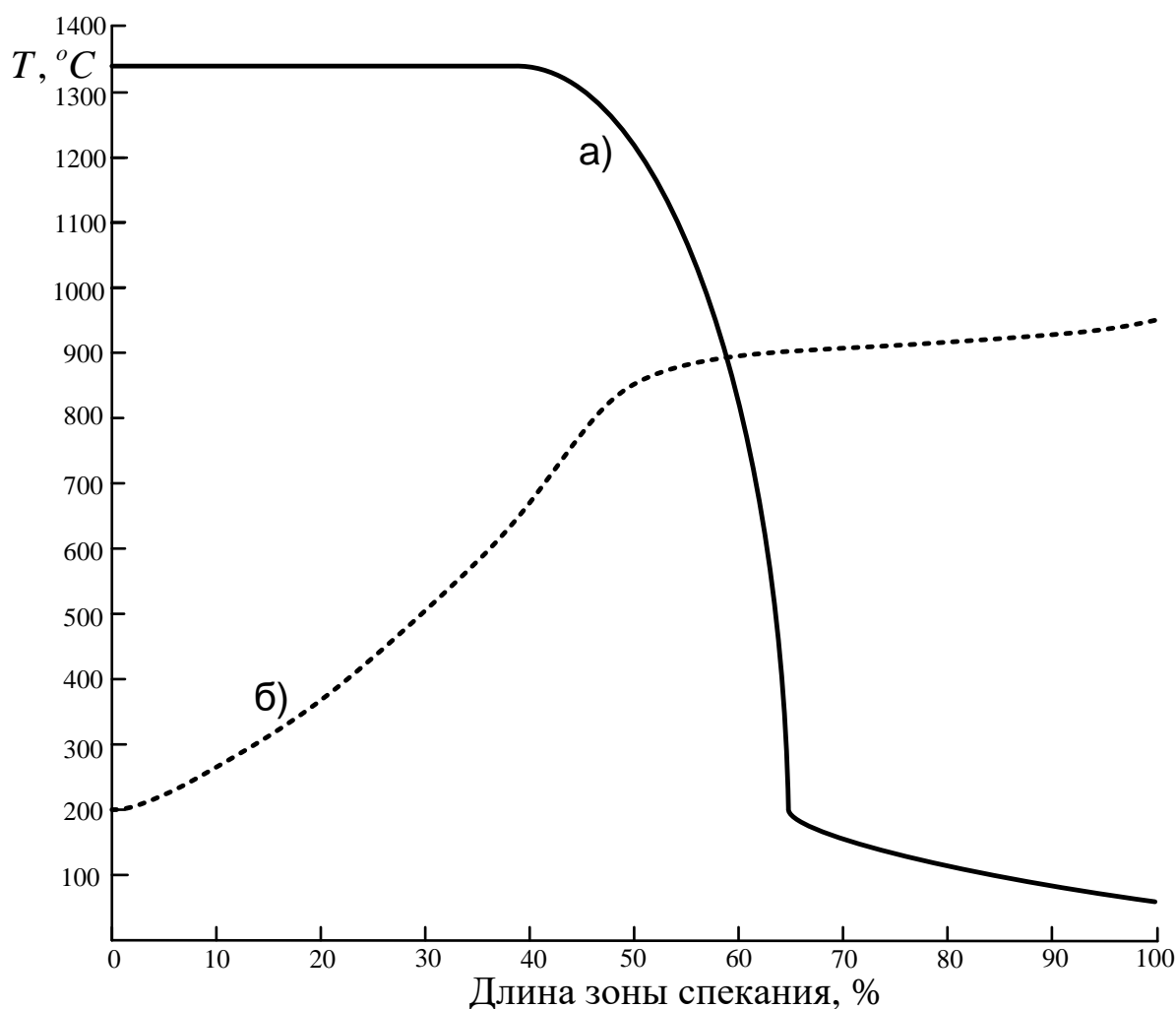


Рис. 5.3.1. Температура газа-теплоносителя в зоне высокотемпературного обжига: а) значения управляющей переменной  $T_{g0}$  на входе; б) значения  $T_{gh}$  на выходе из многослойной массы окатышей

Скорость подачи газа-теплоносителя зависит от режима функционирования эксгаустеров, расходующих электрическую энергию, более дорогую относительно тепловой энергии при сжигании топлива. Следовательно, температура газа-теплоносителя уменьшается сильнее, нежели скорость подачи потока газа-теплоносителя. Полученный оптимальный режим функционирования ХЭТС создаёт затухающую тепловую волну, продвигающуюся вглубь динамической плотной многослойной массы (см. рис. 5.3.3), обеспечивает интенсификацию эндотермических ХЭТП реакций диссоциации карбонатов (см. рис. 5.3.4) и

высокотемпературное спекание (см. рис. 5.3.5), что способствует снижению себестоимость энергетических затрат.

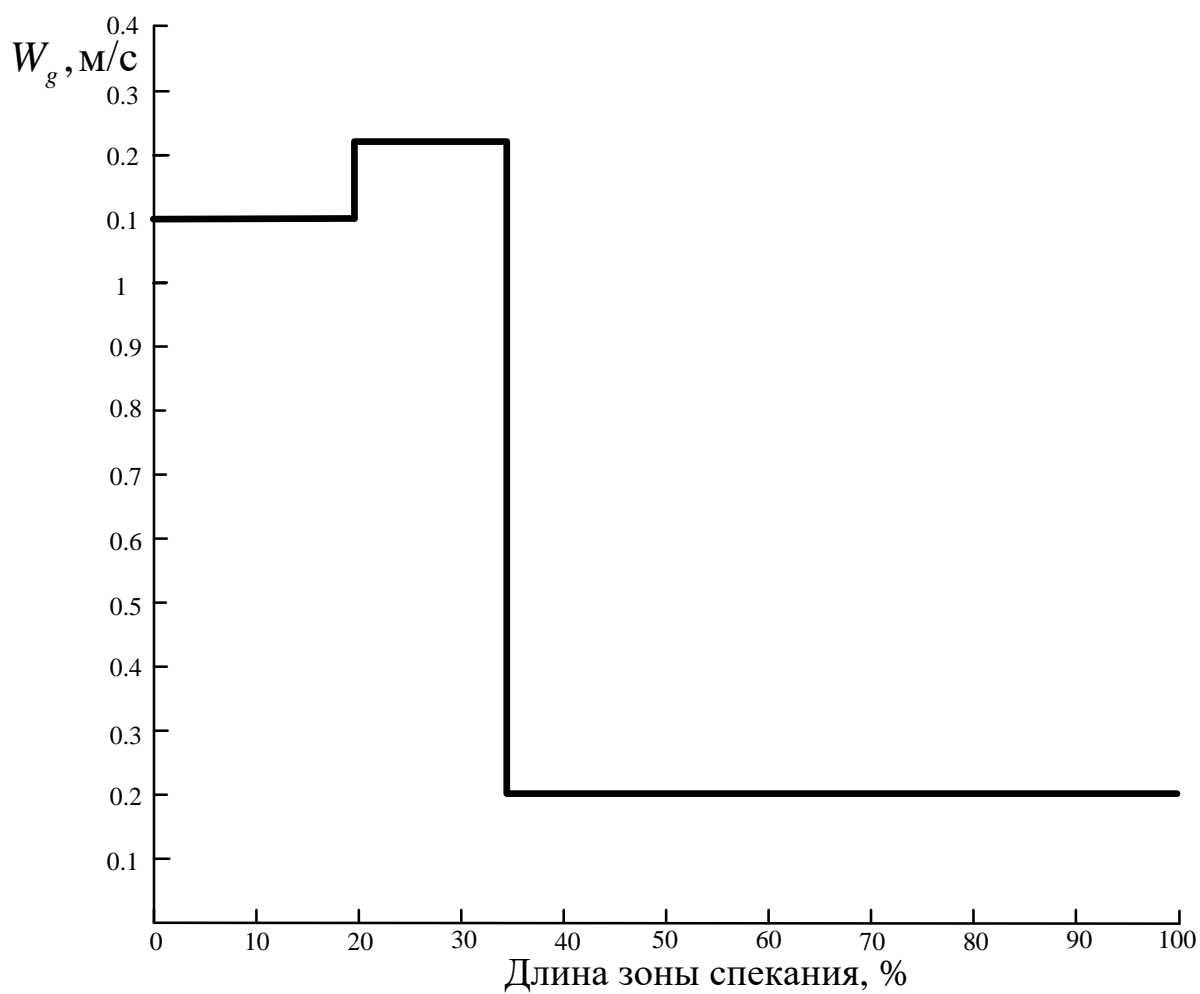


Рис. 5.3.2. Скорость подачи газа-теплоносителя в технологической зоне высокотемпературного обжига

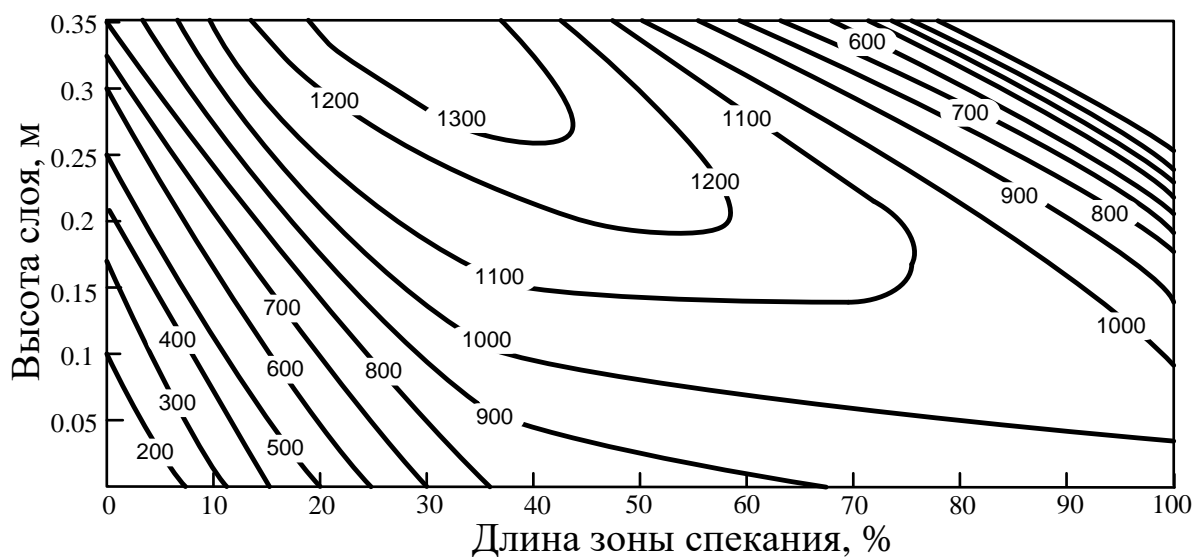


Рис. 5.3.3. Параметрическое семейство изолиний, показывающих среднюю по радиусу температуру материала окатышей в многослойной массе в зоне высокотемпературного обжига, °C

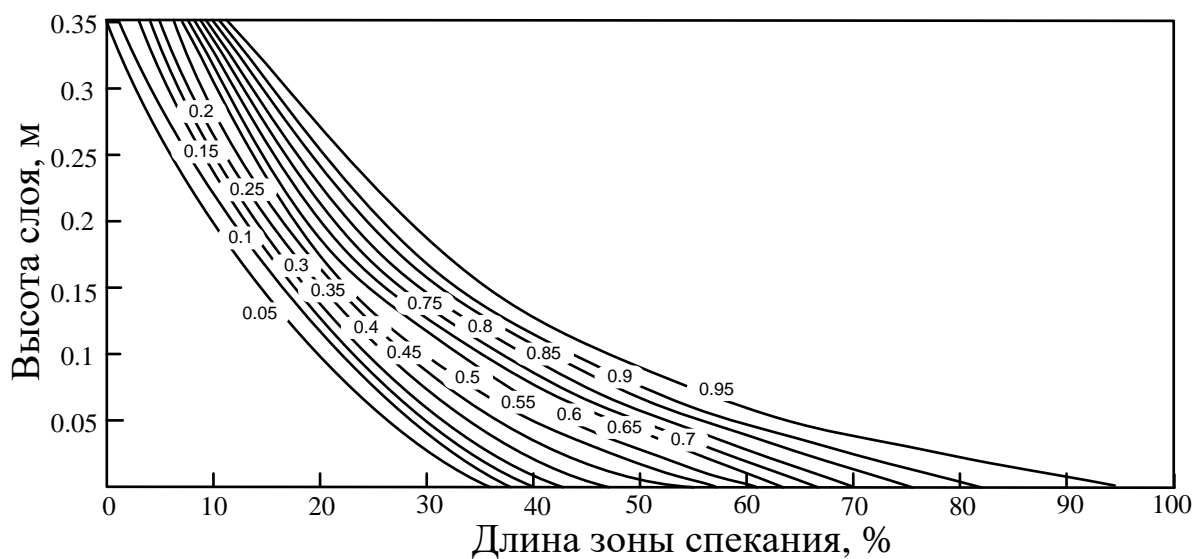


Рис. 5.3.4. Параметрическое семейство изолиний, показывающих степень реагирования в материале окатышей в многослойной массе в зоне высокотемпературного обжига

По рисунку 5.3.4 заметно, что реакции диссоциации карбонатов в целом по высоте многослойной массы окатышей окончены.

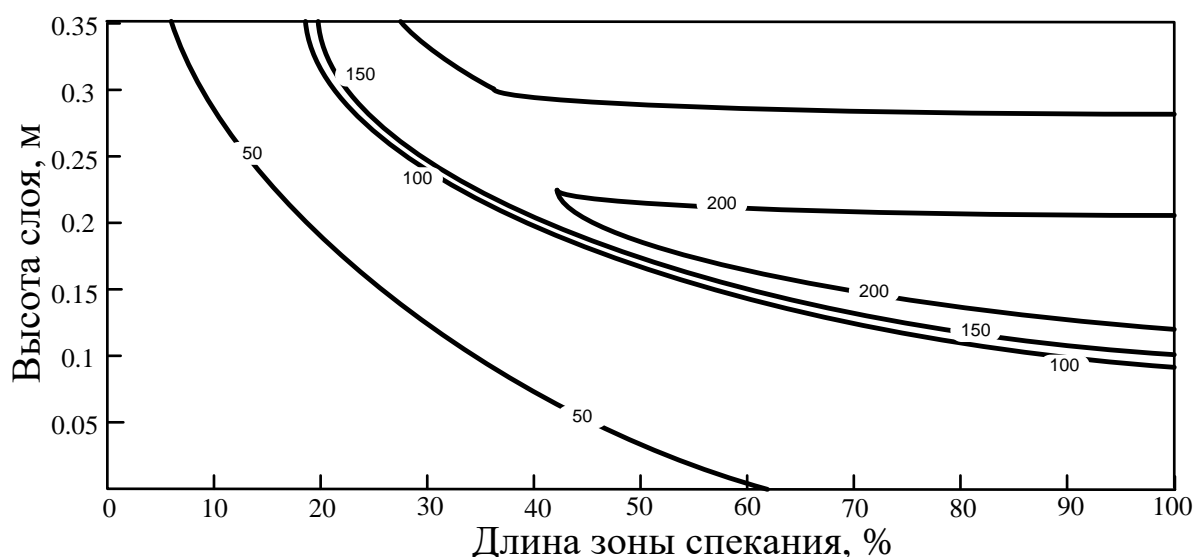


Рис. 5.3.5. Параметрическое семейство изолиний, показывающих прочность окатышей в многослойной массе в зоне высокотемпературного обжига, кг/ок

Проведя системный анализ полученных в вычислительных экспериментах данных представленного оптимального по энергоресурсоэффективности режима функционирования ХЭТС, приходим к заключению, что верхние горизонтальные слои движущейся многослойной массы окатышей в технологической зоне высокотемпературного обжига прогреваются до температуры, требуемой для окончательного завершения термически активируемых и эндотермических ХЭТП, быстрее, чем окатыши проходят зону обжига. Значит, с точки зрения энергосбережения рекуперацию теплоты из верхних сильнее прогретых горизонтов многослойной массы окатышей внутрь следует организовывать быстрее. В многочисленных вычислительных экспериментах было обнаружено, что оптимальным по критерию энергоресурсоэффективности режимом функционирования ХЭТС служит режим, в котором технологическая зона высокотемпературного обжига уменьшается, а технологическая зона рекуперации теплоты увеличивается.

Представленные результаты оптимизации ХЭТС производства фосфоритовых окатышей использовались для выбора оптимальных технологических режимов проведения ХЭТП обжига фосфоритовых

окатышей в движущейся плотной многослойной массе на конвейере ХЭТС обжиговой машины в условиях различных химических, гранулометрических, минералогических составов фосфатного сырья и стоимости энергоносителей.

#### **5.4 Выводы**

В результате проведенных теоретико-экспериментальных исследований авторами разработаны математическая и компьютерная модели оптимизации энергоресурсоэффективности многостадийного ХЭТП обжига фосфоритовых окатышей в ХЭТС конвейерной обжиговой машины, отличающиеся учетом явлений внутреннего теплопереноса и поглощения теплоты в окатыше при диссоциации карбонатов, процессов образования новых фаз и возникновения малопрочных оксидов магния и кальция с новыми физико-термическими свойствами.

Проведены многочисленные вычислительные эксперименты по определению оптимальных значений режимных параметров сложного многостадийного ХЭТП обжига окатышей при различных физико-химических составах исходного фосфатного сырья и газа-теплоносителя, которые позволили определить влияние на качество производимых фосфоритовых окатышей взаимосвязанных реакций диссоциации карбонатов и процессов спекания в движущейся многослойной массе.

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

### 6.1 Содержательная и математическая постановки задачи оптимального управления ХЭТС производства окатышей

Результаты расчета тепловых параметров обжиговой конвейерной машины ОК-3-520/536Ф, общая схема газопотоков которой представлена на рис. 6.1.1, достаточно правильно согласуется с регламентными характеристиками функционирования (рис. 6.1.2).

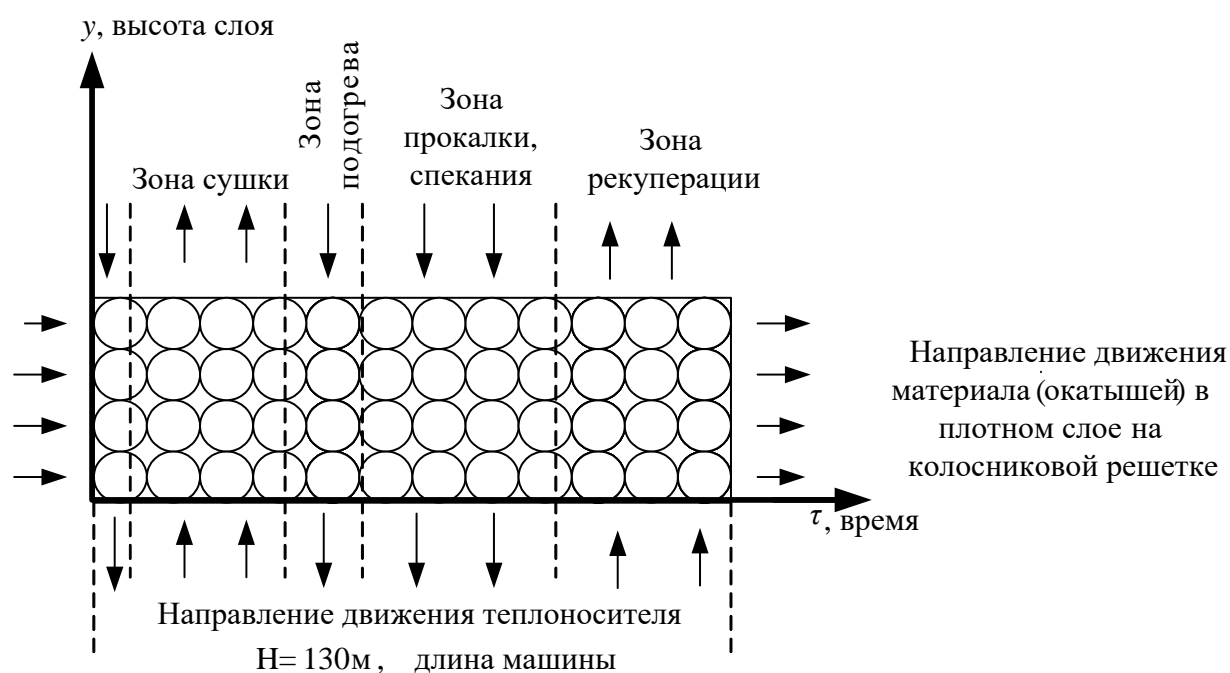


Рис.6.1.1. Общая схема газопотоков и движения материала на колосниковой решетке в обжиговой машине типа ОК

Перераспределение влагосодержания в окатышах в динамической многослойной массе показано на рис. 6.1.4а. Уменьшение относительной

степени высушивания  $\psi$  проиллюстрировано на рисунке 6.1.3. Изучено, что при многослойной сушке окатышей их переувлажнение обеспечивает разрушение и ухудшение аэродинамического сопротивления. Подобный вывод можно сделать по полю изменения интенсивности процесса сушки, изображённого на рис. 6.1.5.

Эндотермические реакции диссоциации карбонатов по высоте многослойной укладки завершены не до конца (см. рис. 6.1.6). По завершении высокотемпературного процесса обжига необходимую прочность приобретает пятая часть окатышей, причем это верхние слои, находившиеся под воздействием большей температуры (см. рис. 6.1.4б). Учитывая, что только такие слои, с завершённой декарбонизацией и требуемой прочностью, при сушке подвергались значительному переувлажнению, можно считать, что годных кондиционных окатышей будет существенно меньше и их качество ниже.

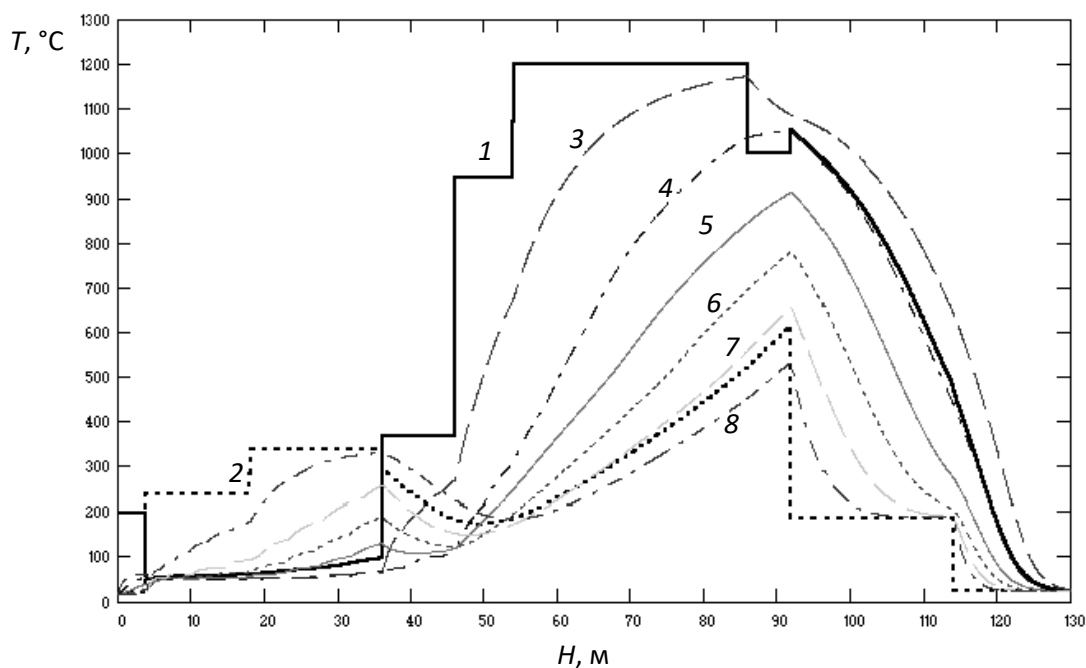


Рис. 6.1.2. Температура газа-теплоносителя над слоем (1) и под колосниками (2). Температура в различных горизонтах многослойной массы окатышей сверху вниз (3-8)

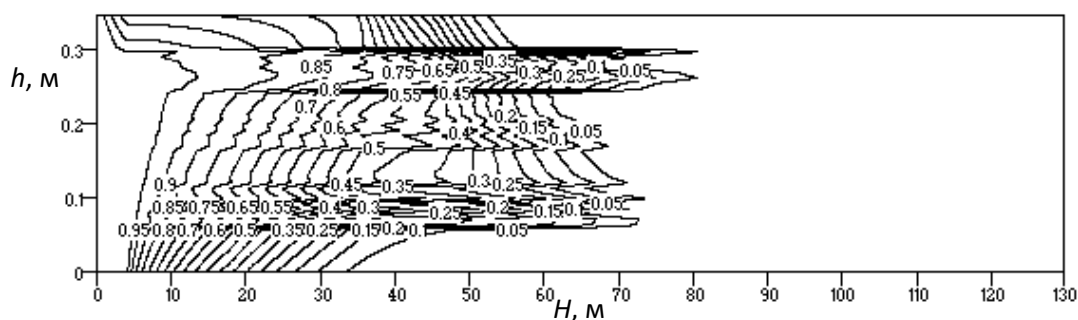


Рис. 6.1.3. Параметрическое семейство изолиний, характеризующих относительную степень высушивания материала окатышей в движущейся на конвейере ХЭТС многослойной массе

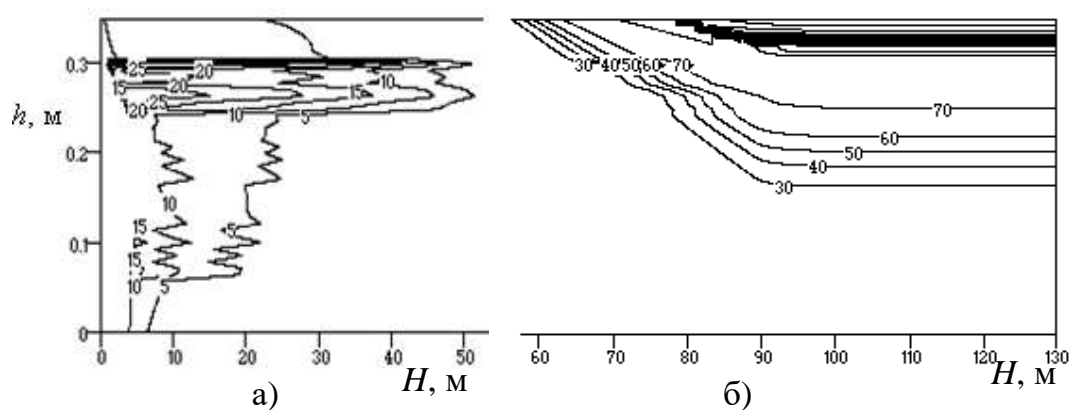


Рис. 6.1.4. Параметрическое семейство изолиний, характеризующих: а) влагосодержание, %; б) прочность окатышей, кг/ок, в движущейся на конвейере ХЭТС многослойной массе

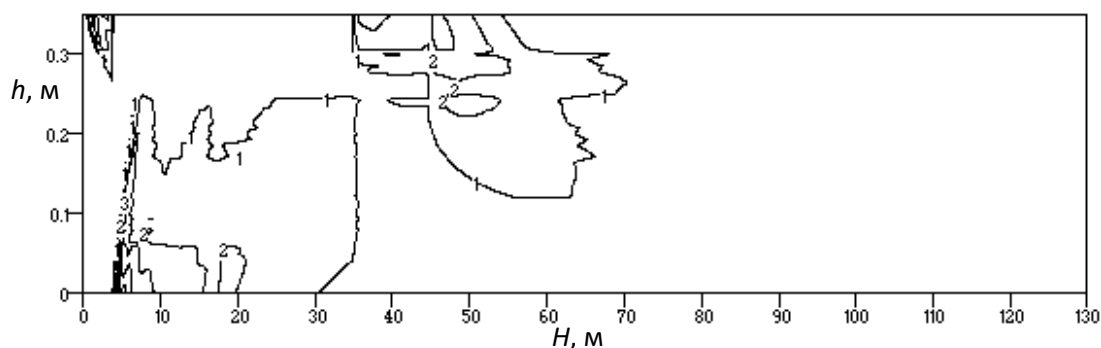


Рис. 6.1.5. Параметрическое семейство изолиний, характеризующих интенсивность сушки материала окатышей в движущейся на конвейере ХЭТС многослойной массе,  $\text{кг}/(\text{м}^2 \times \text{с}) \times 10^3$



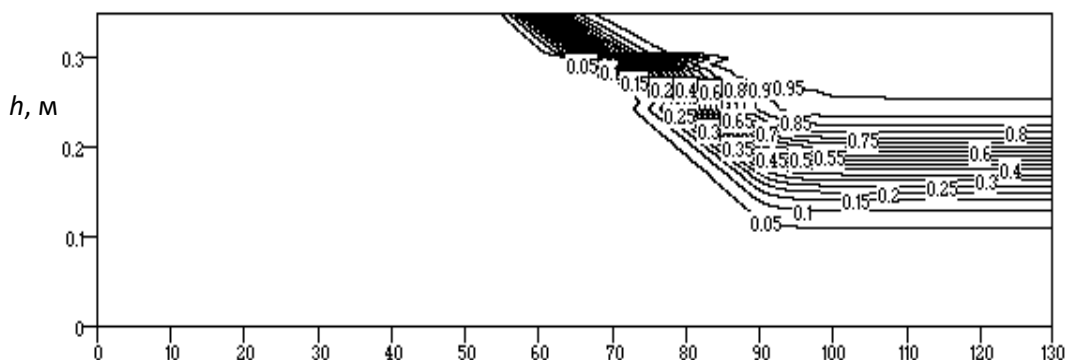


Рис. 6.1.6. Параметрическое семейство изолиний, характеризующих степень реагирования материала окатышей в движущейся на конвейере ХЭТС многослойной массе

В зоне предварительного подогрева термически активизируется процесс декарбонизации, оказывающий сильное влияние на упрочнение материала окатышей [304]. В технологической зоне высокотемпературного обжига реакции диссоциации карбонатов протекают особенно интенсивно. Упрочнение структуры окатыша обусловлено заплыванием пор и трещин между зёрнами вследствие твердо- и жидкофазного спекания. Происходит так же и обратный процесс разупрочнения из-за трещинообразования и появления малопрочного оксида  $\text{CaO}$  ( $\text{MgO}$ ) [305 – 310].

Таким образом, рассчитанные по модели параметры: влагосодержание окатышей на выходе из зоны сушки, интенсивность влагопереноса, прочность, температура теплоносителя и материала – хорошо согласуются с экспериментальными данными для фосфоритовых окатышей, полученными [311] в регламентном режиме работы обжиговой машины конвейерного типа.

## 6.2 Разработка алгоритма принятия решений по оптимальному управлению ХЭТС

Разработанный многоуровневый алгоритм оптимального управления ХЭТС производства фосфоритовых окатышей и многостадийной

оптимизации по критерию энергоресурсоэффективности базируется на разработанной многомасштабной математической и компьютерной модели с учетом сложной структурной схемы управления ХЭТС и иерархически включает в себя следующие уровни:

1. Формирование аддитивно-сепарабельного критерия энергоресурсоэффективности ХЭТС обжига фосфоритовых окатышей, в который входят следующие показатели:

- завершенность ХЭТП сушки, среднее по высоте многослойной укладки влагосодержание окатышей на выходе зоны сушки  $\bar{u} \rightarrow 0$ ;
- завершенность ХЭТП прокалки, средняя по высоте многослойной укладки степень реагирования при покидании высокотемпературной зоны обжига  $\bar{\eta} \rightarrow 1$ ;
- завершенность ХЭТП спекания, достигнута требуемая прочность окатышей  $\sigma^*$ , средняя по высоте слоя прочность окатышей на выходе из высокотемпературной зоны обжига  $\bar{\sigma} \rightarrow \sigma^*$ ;
- минимум стоимости энергозатрат  $Z \rightarrow \min$  на проведение и завершение этих ХЭТП,  $Z = s_{\text{эл}} \cdot Q_{\text{эл}} + s_{\text{теп}} \cdot Q_{\text{теп}}$ , где  $s_{\text{эл}}$  и  $s_{\text{теп}}$  - удельная стоимость электрической и тепловой энергии, соответственно,  $Q_{\text{эл}}$  и  $Q_{\text{теп}}$  - расход электрической и тепловой энергии.

Критерий энергоресурсоэффективности ХЭТС определяется соотношением:

$$F = \alpha_1 \cdot \bar{u} + \alpha_2 \cdot |\bar{\eta} - 1| + \alpha_3 \cdot |\bar{\sigma} - \sigma^*| + \alpha_4 \cdot Z \quad (6.2.1)$$

2. Производится дискретизация ХЭТС по времени пребывания многослойной массы в различных локальных вакуум-камерах с использованием критерия повышения энергоресурсоэффективности для реализации процедуры дискретного динамического программирования. При оптимальном управлении энергоэффективностью многостадийного ХЭТС для каждого интервала времени  $\Delta\tau$  в каждой отдельной вакуум-камере конвейера ХЭТС (см. рис. 4.2.1) должны быть определены векторы

управляющих переменных:  $T_{g0}^k$  – температура газа-теплоносителя на входе в слой и  $W_g^k$  – скорость перекрёстной подачи газа-теплоносителя в  $k$ -й вакуум-камере  $(T_{g0}^k; W_g^k)$ , где  $k=1, \dots, K$ ,  $K$  – число вакуум-камер на конвейере ХЭТС.

Очевидно, что каждый вектор  $S_k$  последующего состояния ХЭТС определяется его предыдущим состоянием  $S_{k-1}$  и вектором управляющих переменных  $X_k (T_{g0}^k; W_g^k)$  (см. рис. 4.1.2).

Локальный критерий энергоресурсоэффективности (КЭ) в каждой локальной вакуум-камере  $k$  есть функция, зависящая от переменных состояния ХЭТС в предыдущей вакуум-камере  $k-1$  и значения управляющего вектора  $X_k$ , принятого на данном этапе  $F_k = F(X_k; S_{k-1}) = Q_{\text{теп}}(T_{g0}^k) + Q_{\text{эл}}(W_g^k)$ , где  $Q_{\text{теп}}$  – количество тепловой энергии сгорания топлива, затраченной на нагрев газа-теплоносителя до температуры  $T_{g0}^k$ , и  $Q_{\text{эл}}$  – количество электрической энергии, затраченной на формирование потока газа-теплоносителя со скоростью  $W_g^k$  в  $k$ -й вакуум-камере.

Глобальный КЭ по всей ХЭТС  $k=1 \dots K$ :

$$\min_{X_k} F = \min_{X_k} \sum_{k=1}^K F_k(X_k; S_{k-1}). \quad (6.2.2)$$

КЭ вида (6.2.2) представляет собой аддитивно-сепарабельную функцию от КЭ отдельных элементов декомпозиции ХЭТП суши. Воспользовавшись этим, можно записать выражение для КЭ через КЭ для  $k$ -й вакуум-камеры элемента декомпозиции ХЭТС и для первых  $k-1$  элементов:

$$\min_{X_K} F = \min \left\{ F_K(X_K; S_{K-1}) + \sum_{i=1}^{K-1} F_i(X_i; S_{i-1}) \right\}. \quad (6.2.3)$$

Здесь минимизация первого слагаемого  $F_K(X_K; S_{K-1})$  проводится только изменением одного дискретного оптимизирующего вектора  $X_K(T_{g0}^K; W_g^K)$ , а

второе слагаемое  $\sum_{k=1}^{K-1} F_k(X_k; S_{k-1})$  минимизируется изменением всех оптимизирующих векторов  $X_k(T_{g0}^k; W_g^k)$ , при  $k=1, 2, \dots, K-1$ .

Решение задачи динамического программирования начинается с последнего этапа. В этом случае условный минимум КЭЭ будет определяться по формуле:

$$F_K^*(S_{K-1}) = \min_{X_K} F_K(S_{K-1}, X_K^*),$$

где  $F_K^*$  - условный минимум КЭ,  $X_K^*$  - условный вектор оптимального управления на последнем шаге  $k=K$ .

Значение критерия эффективности, найденное в предпоследней вакуум-камере  $k=K-1$ , будет равно:

$$F_{K-1}(S_{K-2}) = F_{K-1}(S_{K-2}, X_{K-1}) + F_K^*(S_{K-1}). \quad (6.2.4)$$

В выражение (6.2.4) входит вектор параметров состояния  $S_{K-1}$ , поэтому, чтобы продолжить решение, необходимо определить, как изменится вектор параметров состояния под влиянием управления  $X_{K-1}$  в  $K-1$  вакуум-камере:

$$S_{K-1} = \varphi_{K-1}(S_{K-2}; X_{K-1}).$$

Условный минимум КЭ в  $K-1$ -й локальной вакуум-камере определяется по формуле:

$$F_{K-1}^*(S_{K-2}) = \min_{X_{K-1}} \left\{ F_{K-1}(S_{K-2}, X_{K-1}) + F_K^*(\varphi_{K-1}(S_{K-2}, X_{K-1})) \right\},$$

из которой находится условный минимум  $F_{K-1}^*(S_{K-2})$  и условный вектор оптимального управления  $X_{K-1}^*$ . Далее переходим к вакуум-камере  $K-2$  и т.д. Для  $k$ -й локальной вакуум-камеры на этапе  $(K-k+1)$  шаг с конца) получается уравнение Беллмана:

$$F_k^*(S_{k-1}) = \min_{X_k} \left\{ F_k(S_{k-1}, X_k) + F_{k+1}^*(\varphi_k(S_{k-1}, X_k)) \right\}. \quad (6.2.5)$$

Решая последовательно уравнение Беллмана (6.2.5) для каждой локальной вакуум-камеры с номером  $k$ , получим минимумы КЭ  $F_K^* \rightarrow F_{K-1}^* \rightarrow F_{K-2}^* \rightarrow \dots \rightarrow F_2^* \rightarrow F_1^*$  и векторы условного оптимального управления  $X_K^* \rightarrow X_{K-1}^* \rightarrow X_{K-2}^* \rightarrow \dots \rightarrow X_2^* \rightarrow X_1^*$ . Далее остаётся по известному начальному вектору параметров состояния  $S_0$  определить состояние  $S_1$  и найти минимум КЭ  $F_1$  и оптимальное управление  $X_1$  и так далее по цепочке, находя оптимальные значения управляющих переменных  $T_{g0}^k, W_g^k$  в каждой локальной вакуум-камере  $k$ -го этапа декомпозиции ХЭТС, мы получим доминирующую последовательность  $\{X_k(T_{g0}^k; W_g^k)\}_{k=1}^K$ , формирующую динамический режим, оптимизирующий ХЭТС - обжиговую конвейерную машину (см. рис. 6.2.1).

3. В этом уровне обеспечивается выполнение наложенных ограничений в виде неравенств на управляющие переменные  $T_{g0}^k, W_g^k$ , обусловленные техническими особенностями функционирования тепловых агрегатов и тягодутьевого оборудования ХЭТС.

4. На этом уровне формируются и проверяются условия выполнения ограничений в виде неравенств на переменные состояния ХЭТС обжига движущейся многослойной массы окатышей: градиент температуры, скорость нагрева, интенсивность влагопереноса, скорость ХЭТП суши, относительную степень высушивания, влагосодержание, степень реагирования реакции диссоциации карбонатов, спекания, обеспечивающего конечную прочность, остеклование с целью недопущения формирования горизонтов переувлажнения и разрушения окатышей.

5. В данном уровне учитываются теплотехнологические ограничения на функционирование ХЭТС: реверс перекрёстной подачи газа-теплоносителя в динамическую многослойную массу, а также температуру газа в вакуум-камерах и тягодутьевых каналах.

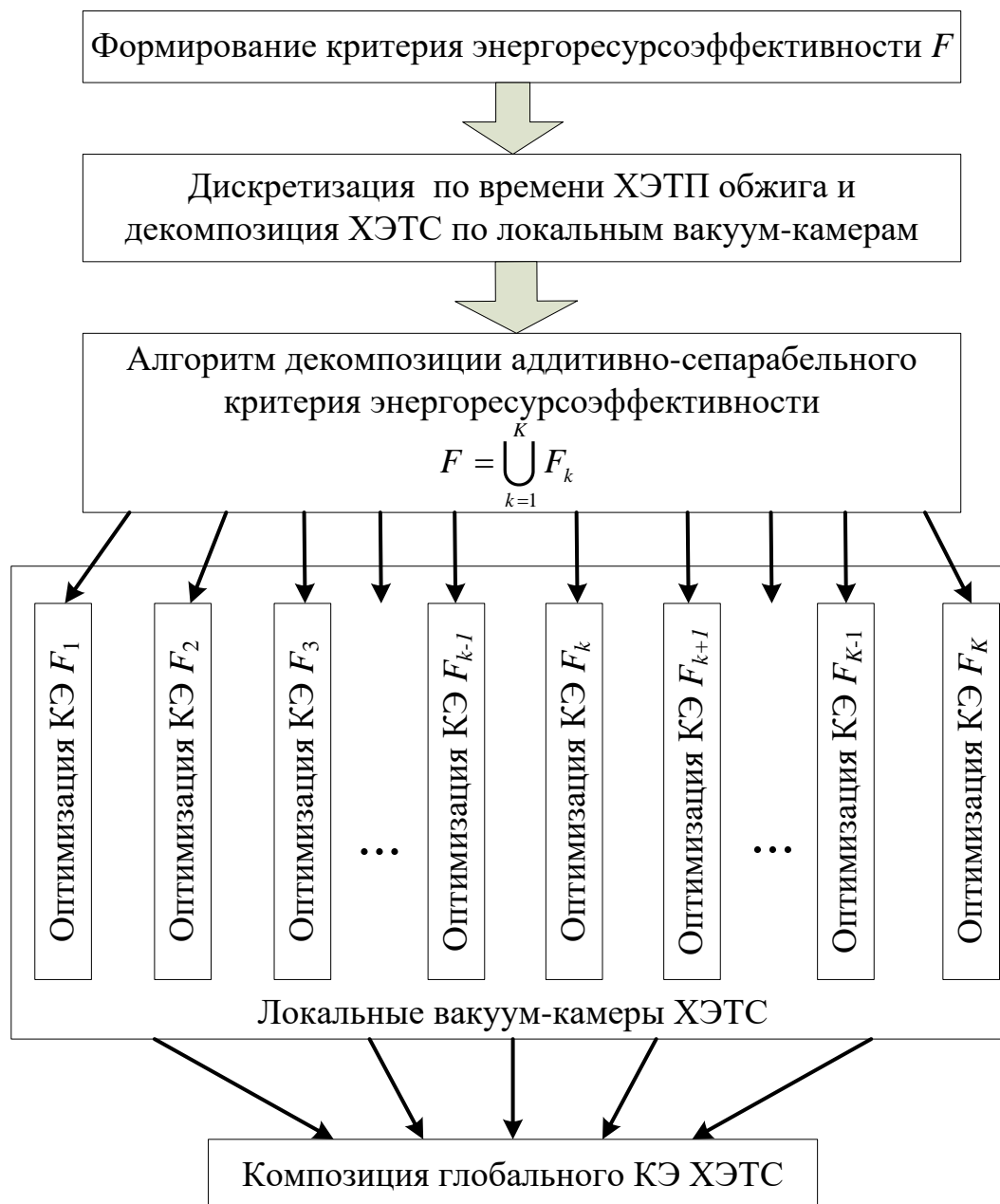


Рис. 6.2.1. Упрощенная схема иерархии уровней алгоритма принятия решений по оптимальному управлению ХЭТС производства фосфоритовых окатышей

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

В ходе разработки научно обоснованных инженерно-технологических

решений по оптимизации энергоресурсоэффективности ХЭТС установлено, что оптимальный с точки зрения энергоресурсосбережения режим функционирования обеспечивается умеренно возрастающей температурой газа-теплоносителя, который не позволяет возникать зонам повышенной влажности и термоградиентным разрушениям окатышей. Скорость подачи газа-теплоносителя является постоянной и максимальной по всей длине конвейера ХЭТС.

В тех зонах ХЭТС, где осуществляется изменение реверса потока газа-теплоносителя в многослойную массу окатышей, скорость потока мгновенно снижается к минимуму.

Такое поведение управляющих переменных объясняется тем, что газ-теплоноситель, поступая в холодные горизонты многослойной массы окатышей, нагревает их, а сам охлаждается. Затем уже охлажденный газ-теплоноситель прибывает в сильнее нагретые слои окатышей, охлаждает их, снижает скорость ХЭТП сушки окатышей. Уменьшение скорости подачи газа-теплоносителя обеспечивает снижение интенсивности теплообмена между газом-теплоносителем и окатышами. Температура окатышей по высоте многослойной укладки равномерно перераспределяется, не уменьшая интенсивности ХЭТП сушки окатышей.

На рис. 6.3.1 и 6.3.2 представлен энергетический режим обжига окатышей в движущейся на конвейере ХЭТС плотной многослойной массе в обжиговой машине, формирующий затухающую тепловую волну (см. рис. 6.3.5) и интенсифицирующий тепломассообменные и химико-энерготехнологические процессы, проиллюстрированные на рисунках 6.3.3, 6.3.4.

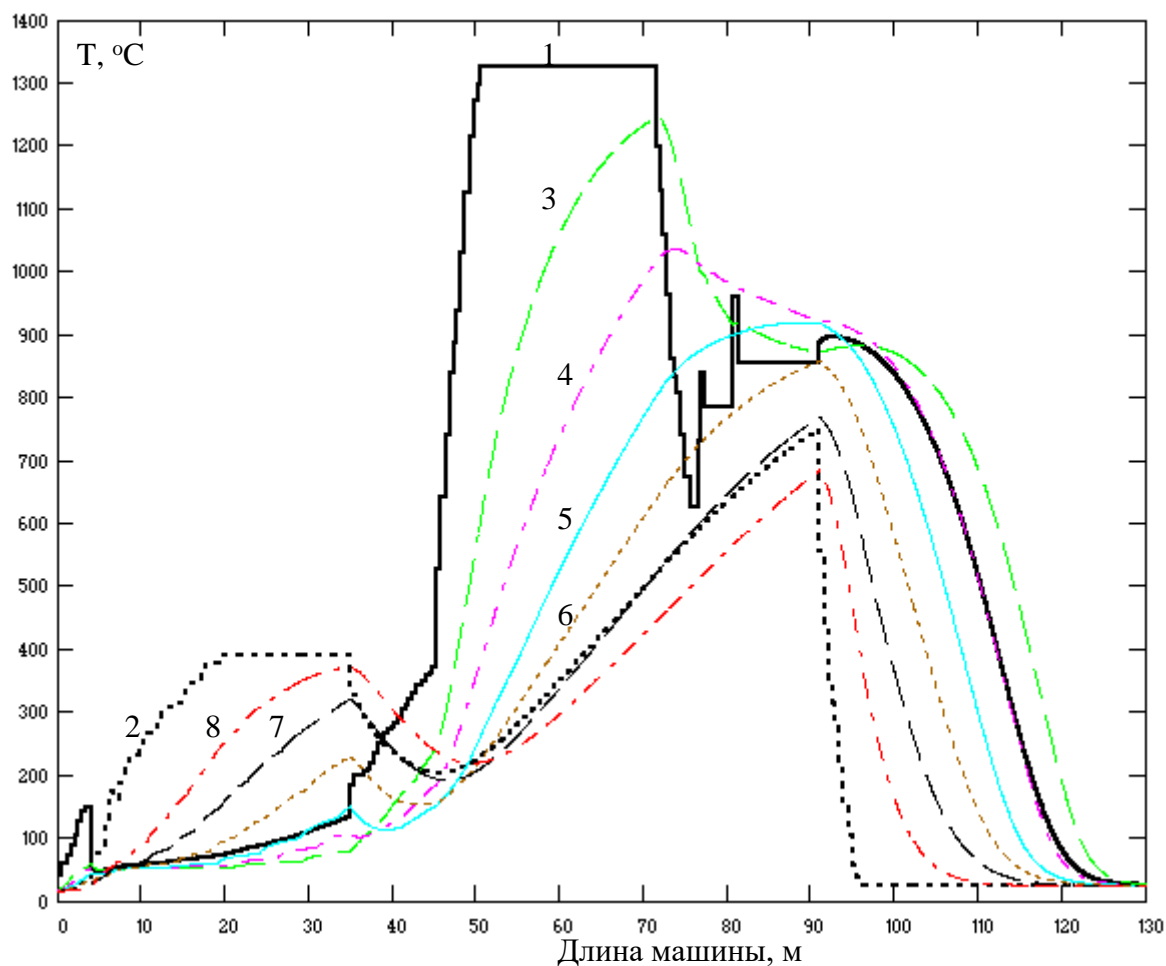


Рис. 6.3.1. Температура газа-теплоносителя над слоем (1) и под колосниками (2). Температура в различных горизонтах многослойной массы окатышей сверху вниз (3-8). Оптимальный режим функционирования ХЭТС

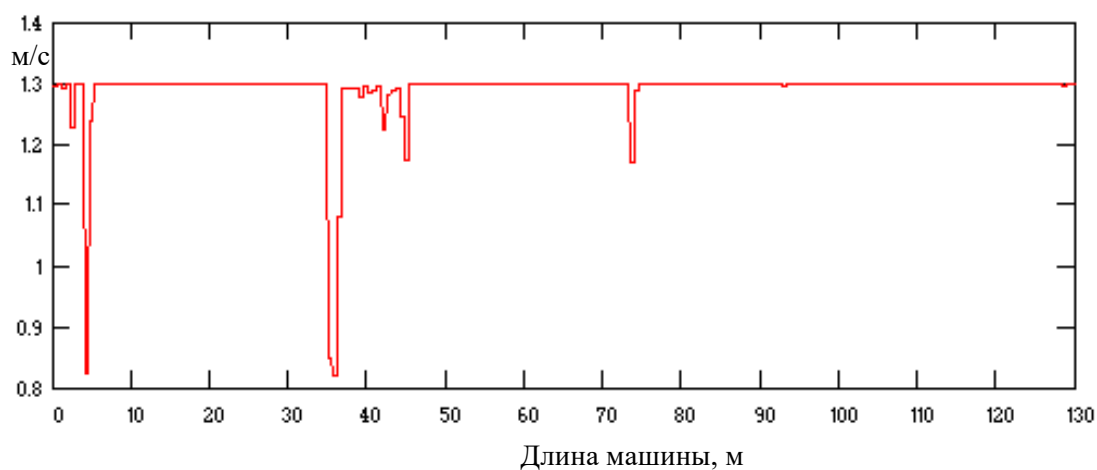


Рис. 6.3.2. Оптимальные значения управляющей переменной - скорости перекрёстной подачи газа-теплоносителя в движущуюся



многослойную массу окатышей на конвейере ХЭТС в оптимальном режиме функционирования

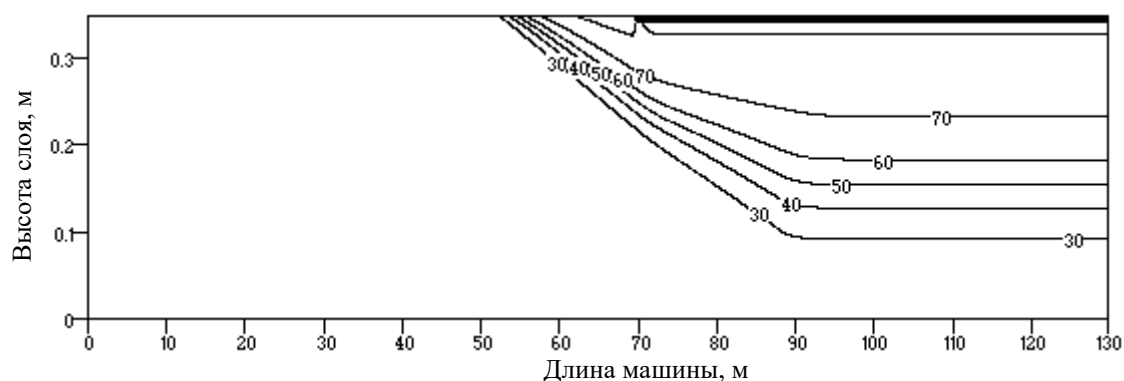


Рис. 6.3.3. Параметрическое семейство изолиний, характеризующих прочность окатышей в движущейся на конвейере ХЭТС многослойной массе в оптимальном режиме функционирования

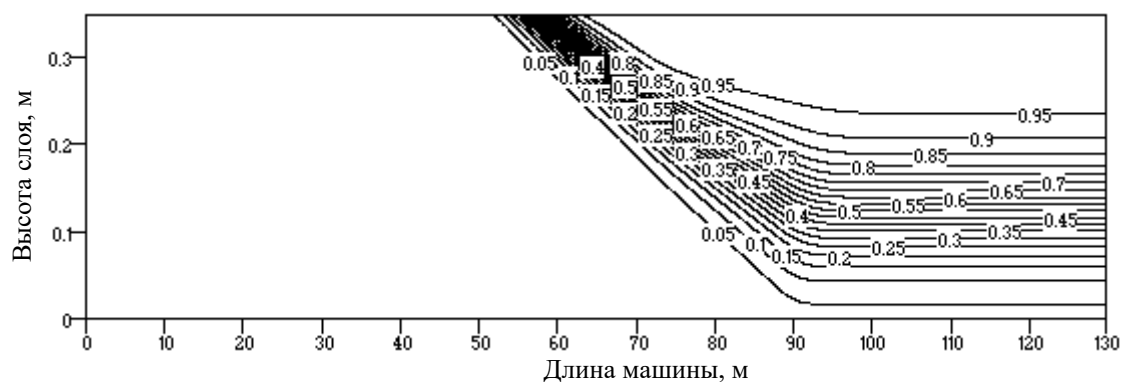


Рис. 6.3.4. Параметрическое семейство изолиний, характеризующих степень реагирования материала окатышей в движущейся на конвейере ХЭТС многослойной массе в оптимальном режиме функционирования

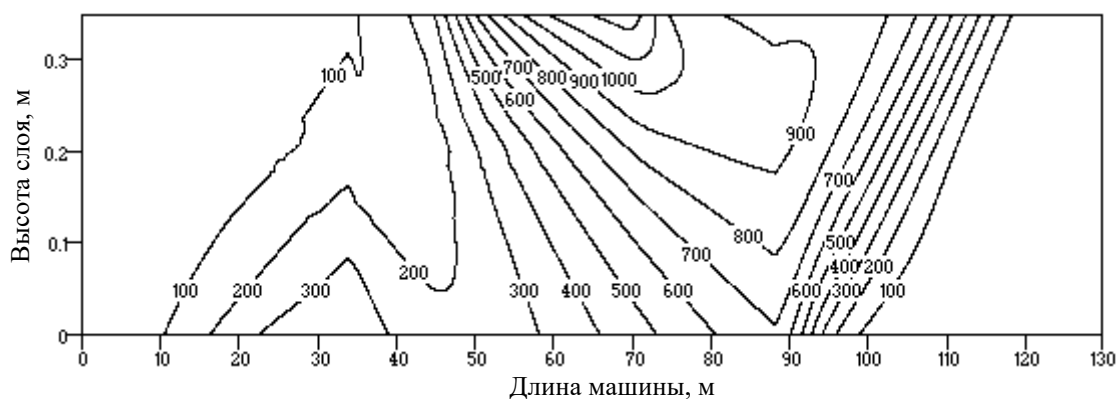


Рис. 6.3.5. Параметрическое семейство изолиний, характеризующих среднюю по радиусу окатышей температуру в движущейся на конвейере ХЭТС многослойной массе в оптимальном режиме функционирования.

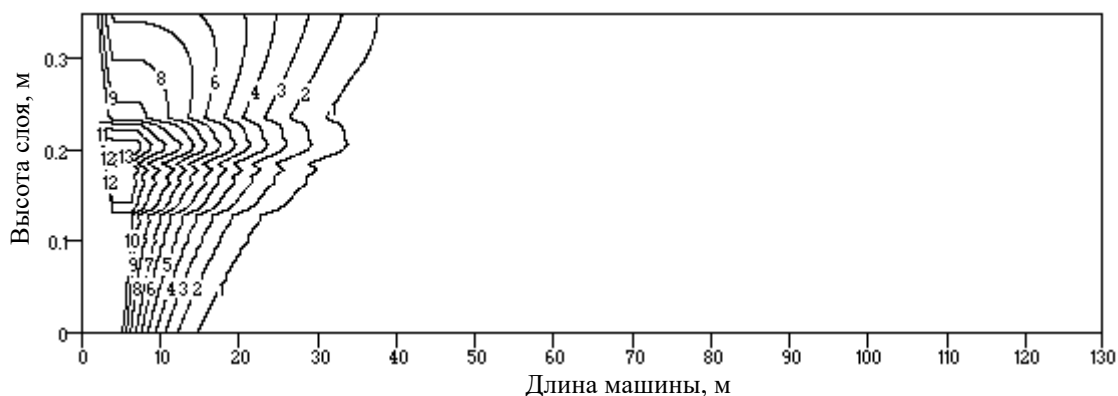


Рис. 6.3.6. Параметрическое семейство изолиний, характеризующих влагосодержание материала окатышей в движущейся на конвейере ХЭТС многослойной массе в оптимальном режиме функционирования

Системный анализ полученных результатов определённого оптимального режима функционирования ХЭТС показал, что в зоне сушки большая часть влаги испаряется быстрее, чем окатыши поступают в высокотемпературную зону подогрева и обжига. Оставшаяся в материале окатышей влага не может разрушить окатыши в условиях интенсификации ТМП.

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

На базе вышеприведенных заключений и выводов разработан оптимальный энергоресурсосберегающий режим функционирования ХЭТС, при внедрении которого зоны сушки и обжига сужаются на 8 %, а зона рекуперации соответственно увеличивается на 16% относительно регламентного распределения в обжиговых машинах.

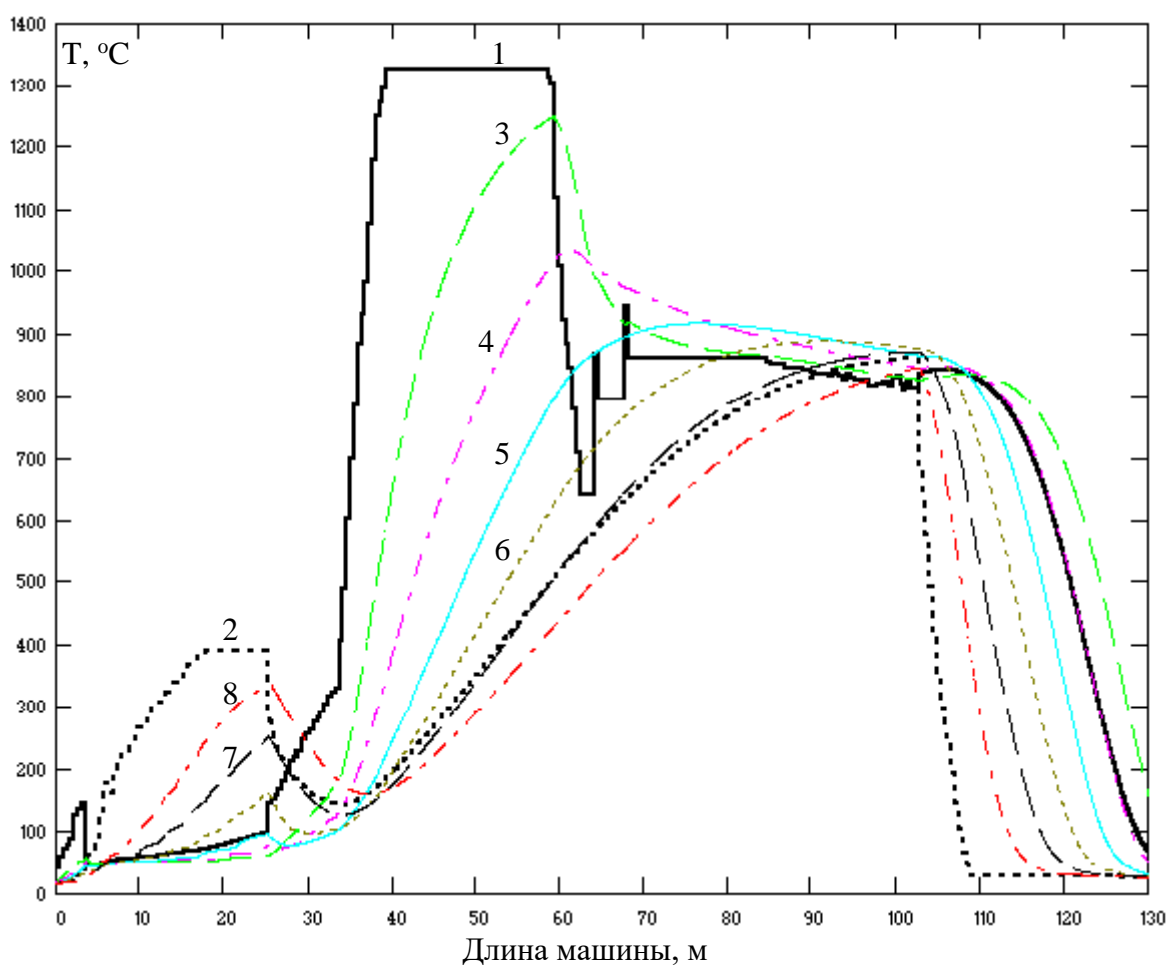


Рис. 6.4.1. Значения управляющей переменной температуры газа-теплоносителя над слоем (1) и под колосниками (2). Температура в различных горизонтах многослойной массы окатышей сверху вниз (3-8). После внедрения аппаратно-технических решений по оптимальному управлению энергоресурсоэффективностью ХЭТС

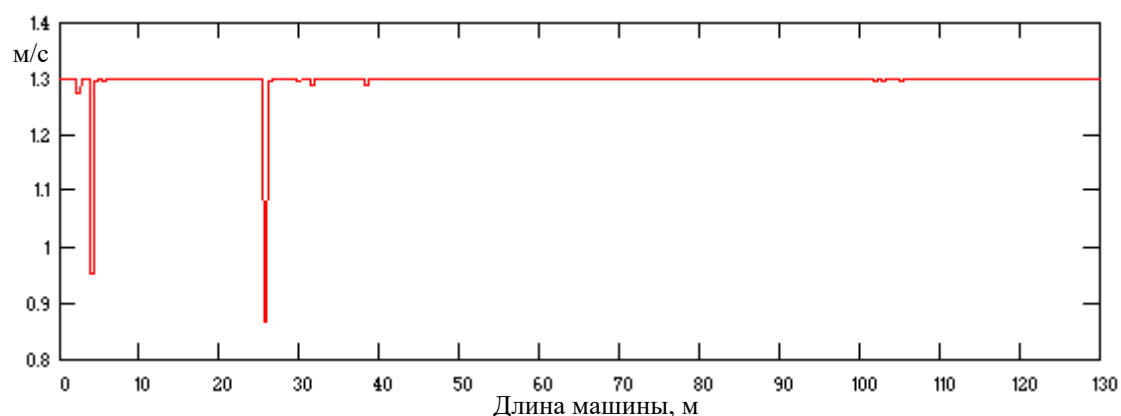


Рис. 6.4.2. Оптимальные значения управляющей переменной - скорости перекрёстной подачи газа-теплоносителя в движущуюся многослойную массу окатышей после внедрения аппаратно-технических решений по оптимальному управлению энергоресурсоэффективностью ХЭТС

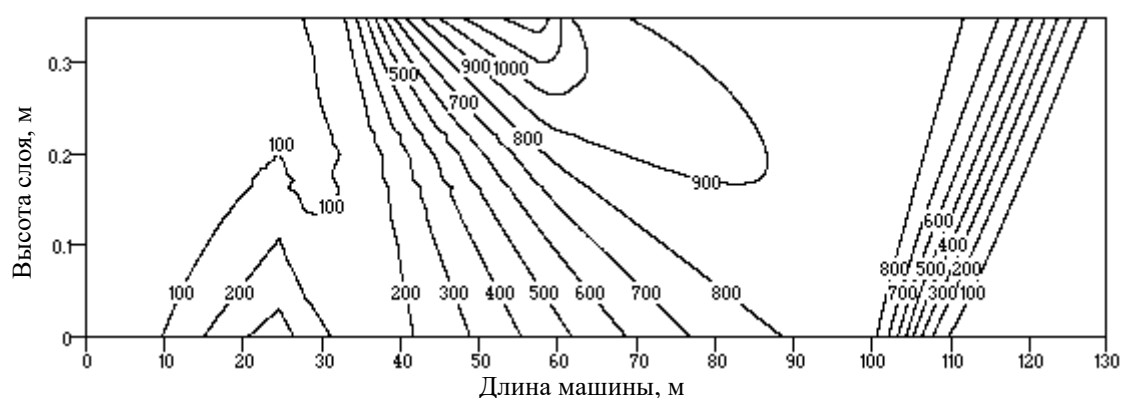


Рис. 6.4.3. Параметрическое семейство изолиний, характеризующих среднюю по радиусу окатышей температуру в движущейся на конвейере ХЭТС многослойной массе, после внедрения аппаратно-технических решений по оптимальному управлению энергоресурсоэффективностью ХЭТС

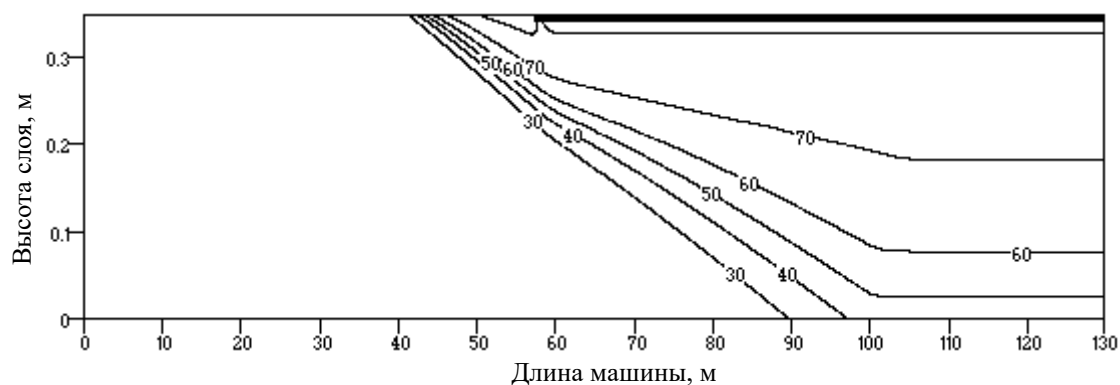


Рис. 6.4.4. Параметрическое семейство изолиний, характеризующих прочность окатышей в движущейся на конвейере ХЭТС многослойной массе, после внедрения аппаратно-технических решений по оптимальному управлению энергоресурсоэффективностью ХЭТС

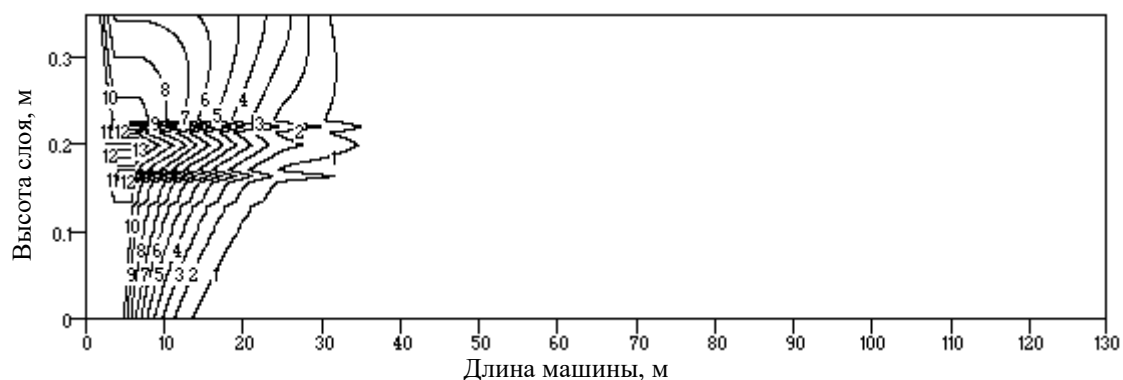


Рис. 6.4.5. Параметрическое семейство изолиний, характеризующих влагосодержание окатышей в движущейся на конвейере ХЭТС многослойной массе, после внедрения аппаратно-технических решений по оптимальному управлению энергоресурсоэффективностью ХЭТС

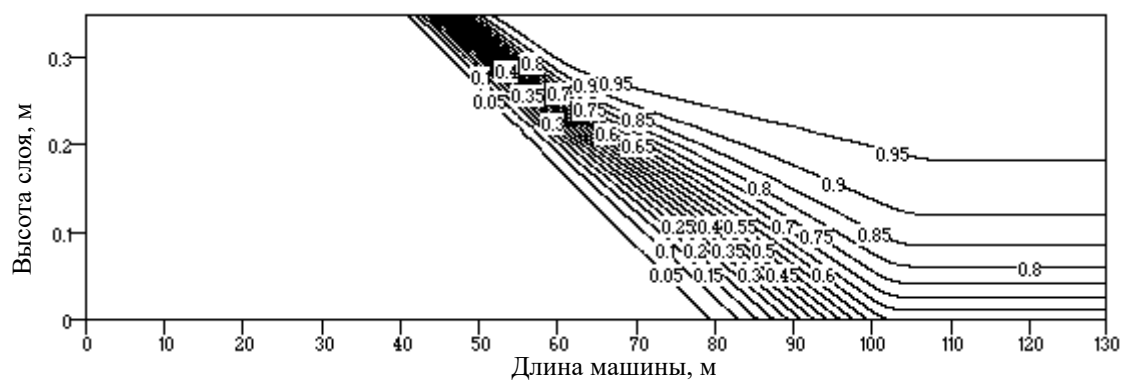


Рис. 6.4.6. Параметрическое семейство изолиний, характеризующих среднюю по радиусу окатышей температуру в движущейся на конвейере ХЭТС

многослойной массе, после внедрения аппаратно-технических решений по оптимальному управлению энергоресурсоэффективностью ХЭТС

Найденный оптимальный энергоресурсоэффективный режим функционирования ХЭТС (см. рис. 5.8, 5.9) формирует в динамической многослойной массе окатышей ярко выраженную существенно мощную температурную волну (см. рис. 5.10). Эта тепловая волна гораздо дальше проникает вглубь многослойной массы окатышей и интенсифицирует протекание термически активируемых ХЭТП обжига (см. рис. 5.11, 5.13). Такой оптимальный по энергоресурсоэффективности режим функционирования не уменьшает затрат энергии по сравнению с предложенным выше в параграфе 6.3, а вот качество готовых обожжённых окатышей на выходе из ХЭТС существенно увеличивается (степень реагирования декарбонизации достигает 0,95, а прочность окатышей 72,03 кг/ок).

## 6.5 Выводы

Основной научный результат, полученный в данной главе, заключается в следующем: рассмотрена постановка содержательной и математической задачи оптимального управления ХЭТС обжига многослойной массы окатышей, учитывающая наличие эндотермических эффектов фазовых переходах влаги при ХЭТП сушки, химических реакций декарбонизации при ХЭТП прокали химико-физического термического ХЭТП спекания.

В комплексе учитываются уменьшение прочности, обусловленное возникновением новой непрочной фазы оксидов, упрочнение окатышей за счет спекания, оплавление материала окатышей, уменьшающее их прочность.

Используя представленную модель, комплексно учитывающую все целевые ХЭТП обжига и полученные результаты, можно определять оптимальный энергоресурсоэффективный температурный и газодинамический режимы обжига окатышей для достижения требуемого влагосодержания [313], необходимых степеней декарбонизации и прочности готовых окатышей.

На практике обжиг окатышей проводится в обжиговых машинах конвейерного типа. Рассматривая обжиг в динамической плотной многослойной массе, можем получить полную картину протекания физико-химических процессов.

Оптимальное управление ХЭТП в ХЭТС с учетом полученных данных и на основе представленной математической модели позволяет максимально снизить количество возврата и обеспечить ресурсо- и энергосберегающие условия функционирования обжиговых агрегатов.

## **ГЛАВА 7. ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРАБОТАННЫХ АЛГОРИТМОВ И КОМПЛЕКСОВ ПРОГРАММ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТИ 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**

Предложенные многоуровневые алгоритмы оптимизации энергоресурсоэффективности ХЭТС и разработанные многомасштабные математические модели ХЭТП были практически реализованы в виде комплекса программ, используемого для оптимального управления ХЭТС производства фосфоритовых окатышей. Данный комплекс позволяет рассчитывать основные термически активируемые ХЭТП, протекающие в фосфоритовых окатышах при высокотемпературном обжиге в движущейся многослойной массе на конвейере ХЭТС. Архитектура комплекса программ оптимизации энергоресурсоэффективности ХЭТС построена по модульному принципу с использованием среды программирования Borland C++ для Windows и пакета программ MathCad.

Разработанный комплекс программ, используемый для оптимизации энергоресурсоэффективности ХЭТС производства фосфоритовых окатышей, включает в себя следующие основные модули (см. рис. 7.1.1):

1. Модуль формирования базы данных, которая содержит информацию о литологическом, гранулометрическом, химическом составе исходного сырья, теплофизических характеристиках: коэффициенте теплопроводности, теплоёмкости материала окатышей с учетом степени реагирования, так как в результате реакции диссоциации карбонатов



образуются новые оксиды с иными теплофизическими характеристиками. Подразумевается ввод информации в виде зависимостей от температуры теплофизических характеристик газа-теплоносителя и сырьевого материала для окатышей

2. Модуль многомасштабного моделирования ХЭТП сушки, прокалки и спекания, организованный в виде класса среды программирования Borland C++, включающий в себя следующие подклассы (см. рис 7.1.2):

2.1. Подкласс для расчёта уравнения теплопроводности для определения температуры окатыша по радиусу. Расчёт продвижения вглубь окатыша локализованного фронта испарения, скорости, интенсивности влагопереноса, влагосодержания окатыша при проведении ХЭТП сушки.

2.2. Подкласс для расчета степени реагирования реакции диссоциации карбонатов, увеличение или уменьшение прочности окатыша, градиент температуры и скорости нагрева при проведении высокотемпературных ХЭТП обжига.

2.3. Подкласс для расчета всех рассматриваемых ХЭТП в вертикальной многослойной укладке окатышей, иерархически включающий в себя подклассы 2.1 и 2.2. В этом подклассе организован расчёт изменения переменных состояния газа-теплоносителя: температуры, давления, влагосодержания при его перекрёстном движении вдоль вертикальной укладки окатышей.

2.4. Класс, включающий в себя иерархически подкласс 2.3. В нем организован расчет модели ХЭТП сушки, прокалки и спекания движущейся плотной многослойной массы фосфоритовых окатышей на конвейере ХЭТС с перекрёстной подачей газа-теплоносителя.

Интеллектуальный блок включает в себя модули: многостадийной оптимизации, дискретного динамического программирования и интеграционный модуль.

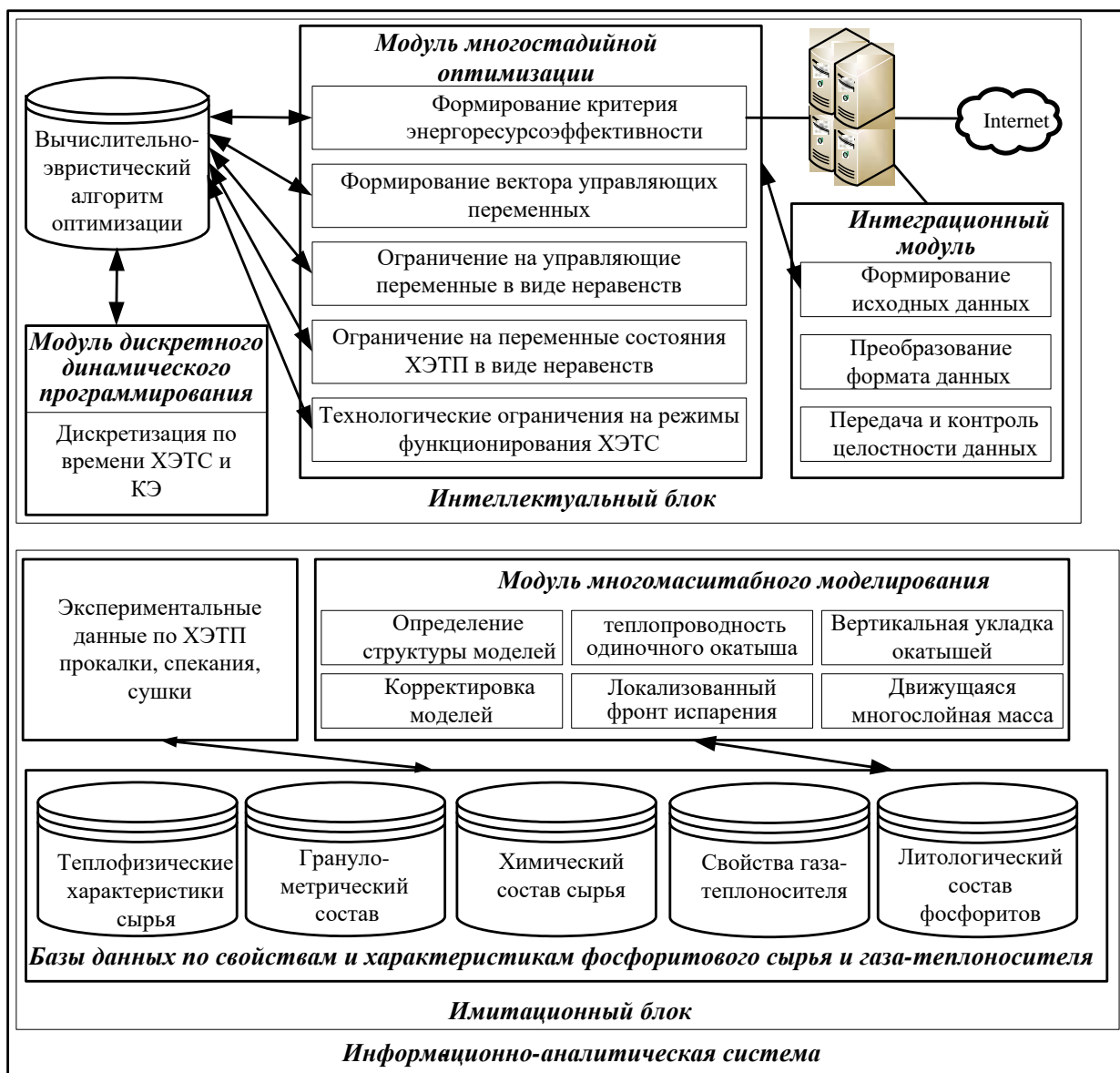


Рис. 7.1.1. Схема архитектуры информационно-аналитической системы обеспечения режимов функционирования автоматизированной системы поддержки принятия решений по оптимальному управлению энергоресурсоэффективностью ХЭТС

3. Модуль многостадийной оптимизации организован в виде объектно-ориентированного класса, который иерархически включает в себя следующие подклассы:



Рис. 7.1.2. Упрощенная схема формирования иерархии классов при объектно-ориентированном программировании многомасштабной математической модели

3.1. В этом подклассе происходит формирование аддитивно-сепарабельного критерия энергоресурсоэффективности ХЭТС обжига фосфоритовых окатышей. В критерий энергоресурсоэффективности входят следующие показатели: завершенность ХЭТП сушки (влажностное содержание окатышей), прокали (степень реагирования реакций диссоциации карбонатов равна 1), спекания (достигнута требуемая прочность окатышей), минимум стоимости энергозатрат на проведение и завершение этих ХЭТП.

3.2. В этом подклассе формируется двумерный вектор управляющих переменных  $(T_{g0}; W_g)$ , где  $T_{g0}$  – температура газа-теплоносителя на входе в динамическую многослойную массу окатышей,  $W_g$  – скорость его перекрёстной подачи.

3.3. Подкласс формирует, использует и проверяет выполнение наложенных ограничений в виде неравенств на управляющие переменные техническими (тепловыми и аэродинамическими) особенностями функционирования теплового и тягодутьевого оборудования ХЭТС.

3.4. В этом подклассе формируются и проверяются условия выполнения ограничений в виде неравенств на переменные состояния ХЭТП обжига движущейся многослойной массы окатышей: градиент температуры, скорость нагрева, интенсивность влагопереноса, скорость ХЭТП суши, относительную степень высушивания, влагосодержание, степень реагирования реакции диссоциации карбонатов, спекания, обеспечивающего конечную прочность, остеклование, с целью недопущения формирования горизонтов переувлажнения и разрушения окатышей.

3.5. В данном подклассе учитываются теплотехнологические ограничения на функционирование ХЭТС: реверс перекрёстной подачи газа-теплоносителя в динамическую многослойную массу, а также температуру газа в вакуум-камерах и тягодутьевых каналах.

4. Модуль, реализующий дискретизацию по времени пребывания многослойной массы в различных локальных вакуум-камерах ХЭТС с учетом критериев энергоресурсоэффективности с целью реализации процедуры дискретного динамического программирования.

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

На основе системного анализа структуры и свойств ХЭТС представлено описание принятия технологических решений по усовершенствованию структуры обжиговой конвейерной машины как сложной ХЭТС, приведены результаты модернизации машин типа ОК-520/536Ф, а также рассчитанного энергоресурсоэффективного технологического режима функционирования обжиговой конвейерной

машины - ХЭТС. Системный анализ обжиговых машин позволил определить современный подход к исследованию технологических и тепловых параметров функционирования обжиговых агрегатов и оборудования, их технико-экономические показатели. Аппаратно-техническая модернизация привела к увеличению производительности и уменьшению энергозатрат.

В начале аппаратно-технической модернизации ХЭТС была использована многосекционная зона сушки, которая позволила существенно интенсифицировать ХЭТП сушки движущейся многослойной массы окатышей. Чтобы увеличить производительность ХЭТС и расширить возможности её функционирования в условиях периодически изменяющихся исходных химико-технологических параметров сырья, были сформулированы перечисленные ниже технологические поправки:

- скорректирован функциональный режим термической обработки динамической многослойной массы окатышей путём приведения его к балансу с внутренними источниками тепловой энергии;

- повышено качество сушки окатышей на основе интенсификации температурно-фильтрационного функционального режима с последующей аппаратно-технической модернизацией зоны сушки и обеспечивающих ее тягодутьевых агрегатов и потоков газа-теплоносителя;

- увеличена эффективность охлаждения многослойной массы фосфоритовых окатышей за счёт изменения фильтрационного режима, перераспределения потоков газа-теплоносителя и реконструкции зоны охлаждения;

- изменена тепловая схема и модернизирована система газоходов, переопределены площадь вакуум-камер и технологических газовоздушных зон, которые соединены с эксгаустерами и дымососами;

- существенно увеличены циркуляция и рециркуляция объемов газа-теплоносителя и сушильного агента.

Таблица 7.2.1

Качественные показатели влияния основных конструктивных элементов на функционирование ХЭТС – обжиговой конвейерной машины

	Наименование конструктивных элементов	Влияние на показатель <sup>1)</sup>			
		Производительность	Расход топлива (тепловой энергии)	Расход электроэнергии	Критерий энергосурсоэффективности
<b>1</b>	<b>Структура зоны сушки</b>				
1.1	сушка реверсом (продув/просасывание газа-теплоносителя)	д	н	н	д
1.2	сушка просасыванием газа-теплоносителя	н	д	д	н
1.3	сушка с просасыванием, послойной загрузкой и промежуточной сушкой отдельных слоев	н	д	д	н
<b>2</b>	<b>Схема возврата тепла из зоны охлаждения в зоны нагрева</b>				
2.1	с разбавлением теплоносителя (вентиляторная)		н	н	н
2.2	с коллектором перетока (безвентиляторная)		д	д	д
2.3	с двумя и более переточными коллекторами (безвентиляторная)		-		-
<b>3</b>	<b>Схема отопления горна обжиговой машины</b>				
3.1	с двухпроводными турбулентными горелками (с принудительной подачей окислителя)	н	н	н	н
3.2	с инжекционными горелками (с эжектированием окислителя)	д	д	д	д
<b>4</b>	<b>Структура схемы охлаждения</b>				
4.1	реверсивное охлаждение	н	н	н	н
4.2	охлаждение в выносном охладителе	н	н	н	н

4.3	охлаждение холодным (атмосферным) воздухом	д	н	д	д
4.4	комбинированное охлаждение (нагретым и атмосферным воздухом)	н	д	-	-

Примечание: «д» реализация конструктивного элемента приводит к повышению показателя, «н» - к его ухудшению, «-» применение данного элемента требует дополнительного исследования и научного подтверждения.

Проведены исследования, выполнен анализ, а также качественная (см. табл. 7.2.1) и количественная классификация основных конструктивных элементов обжиговых машин по их влиянию на производительность, расходы топлива и электроэнергии.

Практический опыт эксплуатации обжиговых машин показал, что, несмотря на повышенный расход тепла и электроэнергии при организации реверсивной схемы сушки, ее использование предотвращает снижение производительности обжиговой машины в целом за счет уменьшения усадки слоя при его сушке, что обеспечивает эффективную работу всех последующих зон за счет снижения газодинамического сопротивления слоя окатышей.

При исследовании различных систем возврата тепла из зоны охлаждения в зоны нагрева, включая вентиляторные, а также одно- и многопоточные безвентиляторные системы прямого перетока, установлено, что, с точки зрения экономии топлива и электроэнергии, в любом случае наиболее целесообразным является применение безвентиляторных систем.

В процессе изучения одно- и многопоточных схем перетока представлена методика расчёта качества и количества потоков, на которые следует разъединять поток газа-теплоносителя при экономии тепловой энергии на обжиг фосфоритовых окатышей. Поэтому формулируется ряд основополагающих и принципиальных требований по экономии тепловой энергии, топлива на функционирование ХЭТС:

- поток газа-теплоносителя, выходящий из зоны охлаждения, необходимо формировать так, чтобы газ-теплоноситель с более высокой температурой, поступал в один коллектор, а с низкой – во второй, затем в третий и т.д.

- разделив таким образом поток газа-теплоносителя, выходящего из технологической зоны охлаждения, самый нагретый теплоноситель следует направлять в те участки конвейера, для которых необходимо получить самую высокую температуру газа-теплоносителя на входе в многослойную массу окатышей, а затем в зону с менее высокой температурой газа-теплоносителя и т.д.

Анализ результатов позволяет определить основные направления снижения затрат энергии (рис. 7.2.1).

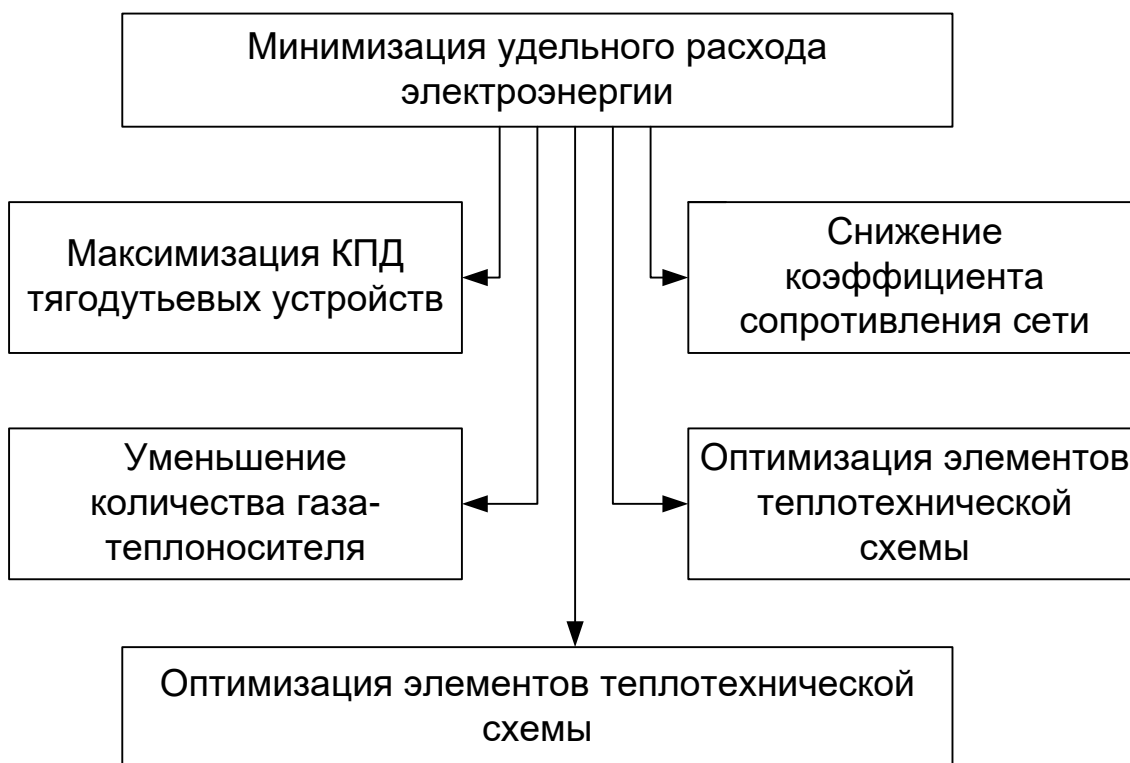


Рис. 7.2.1. Упрощённая схема декомпозиции уменьшения удельного расхода энергии

Системный анализ энерготехнологических схем и оптимизация режимов функционирования и эксплуатации ХЭТС выявили, что в практике



не используются такие важные принципы снижения удельного расхода энергии:

Принцип №1. Увеличение КПД работы тягодутьевых устройств – зачастую они работают в диапазоне КПД 25 - 35%. Если же согласовать тягодутьевые агрегаты и сети газопроводов, то КПД доводится до 70-80%.

Принцип №2. Уменьшение объёмов газа-теплоносителя, перекачиваемых насосами и эксгаустерами, неучтённых подсосов газа-теплоносителя.

Принцип №3. Существенное снижение аэродинамического сопротивления многослойной массы сырых окатышей, колосниковой «постели» обожжённых окатышей.

Принцип №4. Уменьшение аэродинамического сопротивления газопроводов, в которых снижается напор потока газа-теплоносителя, обеспечиваемого работой тягодутьевого оборудования.

Принцип №5. Обеспечение поставок газа-теплоносителя с менее низкой температурой.

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

На получение одной тонны фосфата перерабатывается от 7 до 14т сырья при содержании  $P_2O_5$  37 – 19%. В качестве флюса в производстве фосфора используют кварциты или фосфатизированные кремни, расход которых колеблется от 1 до 3т. В качестве восстановителя применяется кокс 1, 2 – 1,4т.

Технологические требования к сырью включают: однородность гранулометрического состава, минимальное содержание связанной влаги, карбонатов и вредных примесей ( $Fe_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ ,  $K_2O$ ,  $Na_2O$ , серы, органических веществ), а также высокое содержание  $P_2O_5$ .

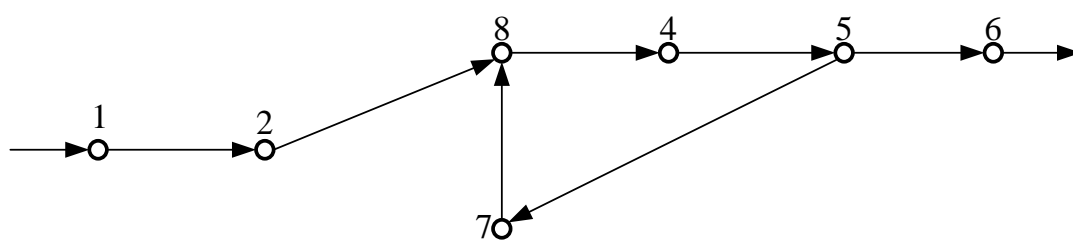
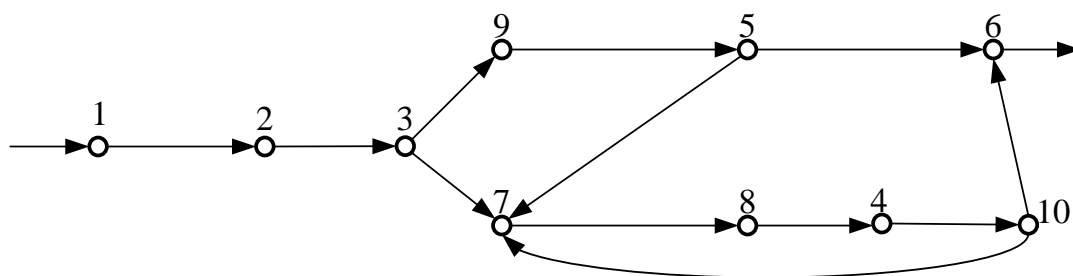
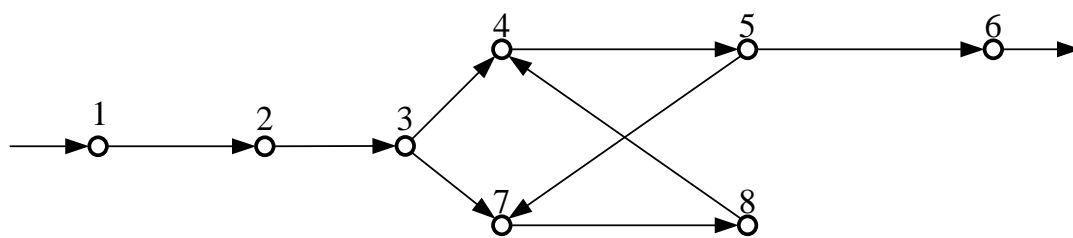
Предварительная термическая обработка фосфатного сырья определяет:

- требуемое качество, предъявляемое к исходному и обогащаемому рудному сырью;
- испарение влаги и завершение эндотермических реакций диссоциации карбонатов;
- необходимый и стабильный гранулометрический состав.

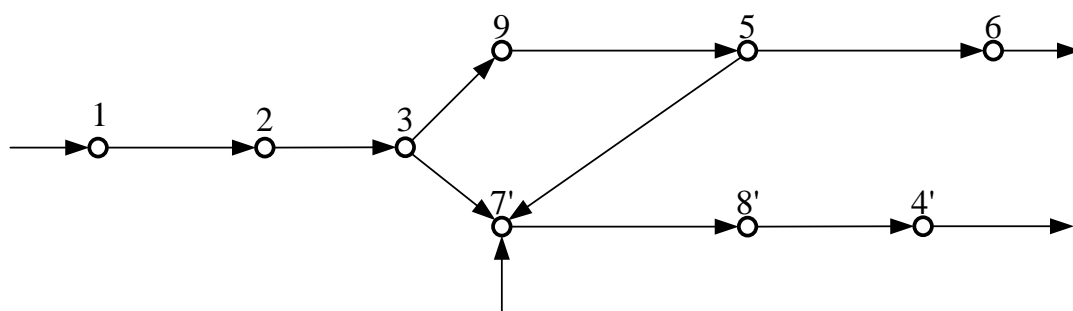
Термическая подготовка может осуществляться по различным технологическим потокам. Разделяют подготовку кускового материала и фосфоритовой мелочи. В свою очередь, термическая подготовка фосфоритовой мелочи может проводиться посредством производства окатышей и агломерата. По всем этим способам термической подготовки в стране имеются технологические линии, и накоплен опыт их эксплуатации на фосфоритовом сырье. В зависимости от условий и применяемого оборудования технологические схемы могут различаться. Однако основная задача обеспечения максимальной эффективности использования сырья предусматривается в каждой из них замыканием материальных потоков.

На графах материальных потоков термической подготовки фосфоритного сырья (см. рис. 7.3.1а) предусмотрен возврат сырья, не удовлетворяющего требованиям, на вторичную переработку. Схема агломерации технологически более сложна, поскольку включает большее количество различных стадий (рис 7.3.1 б, в).

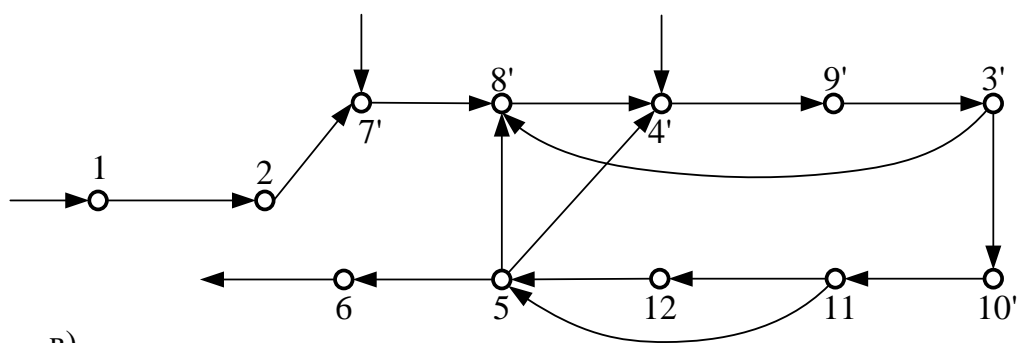
Одна из основных стадий термической переработки – непосредственное энерговоздействие на сырьё на обжиговых и агломашинах и в шахтно-щелевых печах. В дальнейшем анализируется процесс обжига. Он достаточно энергоёмок и во многом определяет качество термической подготовки.



a)



б)



В)

Рис 7.3.1. Графы материальных потоков термической подготовки фосфатного сырья

На рисунке: 1 – приёмное устройство, 2 – склад фосфорита, 3, 5, 10 – грохочение, 4 – обжиговая машина, 6 – шихтовальное отделение, 7 – размол, 8 – окомкование, 9 – шахтно-щелевая печь, 7' – шихтовальное отделение аглоцеха, 3' – грохочение горячего агломерата, 4' – агломерация, 8' – отделение смешения, 9' – дробление горячего агломерата, 10' – охлаждение агломерата, 11 – грохочение холодного агломерата, 12 – дробление холодного агломерата.

а) (0 – 1) – подача фосфорита крупностью 10 – 50мм, 0 – 50мм; (3 – 4) – 10 – 50мм; (3 – 7) – 0 – 10мм; (5 – 6) – 10 – 50мм или 5 – 250мм; (5 – 7) – возврат мелких фракций прокалённого сырья 0 – 10мм; (10 – 7) – мелкие фракции прокалённого сырья 0 – 10мм; (5 – 6) – окатыши крупностью 10 – 25мм.

б) (0 – 1) – подача фосфорита крупностью 0 – 50мм; (3 – 9) – фракция 10 – 50мм; (3 – 7') – фракция 0 – 10мм; (5 – 7') фракция 0 – 5мм; (0 – 7') – кокс 0 – 3мм; (5 – 6) – фракция 5 – 50мм.

в) (0 – 1) подача фосфорита 0 – 10мм; (0 – 7') – кокс 0 – 3мм; (0 – 4') – кокс для корректировки 0 – 3мм; (3' - 8') – мелкие фракции сырья 0 – 8мм; (11 – 12) фракция 50 – 70мм; (12 – 5) - фракция 50 – 70мм; (5 – 6) – фракция 8 – 50мм; (6 – 0) в печной цех; (11 – 5) – агломерат крупностью 50 -70мм; (5 - 8') – мелкие фракции 0 – 5мм; (5 - 4') – фракции для «постели» 4 – 8 мм.

Процесс восстановления фосфора протекает в расплаве и зависит во многом от тепло- и массообменных процессов в шлаковой зоне. Массоотдачу в газожидкостной системе при наличии дисперсной фазы можно приближенно оценить из критериальной зависимости для пульсационного режима движения газа со скоростями  $W_r \approx 0,1 - 0,4 \text{ м/с}$

$$Sh_{гж} = 2,4 Re_{ж}^{0,5} Sc^{0,5} We^{-0,25},$$

где  $Sh$ ,  $Re$ ,  $Sc$ ,  $We$  – критерии Шервуда, Рейнольдса, Шмидта, Вебера;  $Sh_{гж} = \rho_{гж} f_{гж} d_{эк}^2 / D_{ж}$ ;  $Re_{г} = W_{г} d_{эк} / \varepsilon \nu_{г}$ ;  $Re_{ж} = W_{ж} d_{эк} / \varepsilon \nu_{ж}$ ;  $Sc = \nu_{ж} / D_{ж}$ ;  $f_{гж}$  – удельная поверхность межфазного взаимодействия;  $D_{ж}$  – коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с;  $\nu_{г}$  – кинематическая вязкость газа, м<sup>2</sup>/с;  $\nu_{ж}$  – кинематическая вязкость жидкости, м<sup>2</sup>/с;  $d_{эк}$  – эквивалентный диаметр, м;  $\varepsilon$  – порозность.

Для пузырькового режима при  $W_{г} \leq 0,14$  м/с,  $Sh_{гж} = 0,08 Re_{г}^{0,5} Sc^{0,5}$ .

Для теплообмена при движении газожидкостной смеси через плотный слой ориентировочная зависимость имеет вид:  $Nu = 0,26 Re_{эж}^{0,43} Pr^{0,33}$ ,  $0,2 < Re_{эж} < 60$ ,  $3,5 < Pr < 250$ ,  $Nu = \alpha d_{эк} / \lambda_{ж}$ ;  $Re_{эж} = W_{ж} d_{эк} / [\varepsilon \nu_{ж} (1 - \gamma)]$ ;  $Pr = c_{ж} \rho_{ж} \nu_{ж} / \lambda_{ж}$ ;  $\gamma$  – объёмная доля газа;  $c_{ж}$  – теплоёмкость жидкости, Дж/(кг·К);  $\lambda_{ж}$  – коэффициент теплопроводности жидкости, Вт/(м·К);  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\rho_{ж}$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>.

Таким образом, в расплаве фосфорной печи, где протекают процессы восстановления фосфора на частицах кокса с образованием газообразных продуктов, для оценки коэффициентов тепломассообмена необходимо знание как свойств газов, так и теплофизических характеристик шлака. Свойства фосфорных шлаков зависят от температуры и химического состава.

Примерный химический состав расплава фосфоритов приведен в таблице 7.3.1.

Таблица 7.3.1. Химический состав расплавов фосфоритов

Расплав	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F	H <sub>2</sub> O
первичный	13	64,5	1,9	8,8	10	1,4	1,0	4,9
сланцев	9,9	65,2	0,1	7,3	6,7	2,2	1,0	4,5
фосфоритно-кремнистых сланцев	10	76	1,3	6,0	10	1,8	1,0	4,0

Теплоты плавления компонент шихты имеют различные значения – таблица 7.3.2, кДж/кг.

Таблица 7.3.2. Значения теплоты плавления компонент шихты, кДж/кг

вещество	фосфорит	агломерат	шлак	феррофосфор
теплота плав.	415,1	77,21	338,4	243

В твердофазной зоне и расплаве наряду с восстановительной реакцией протекают другие побочные процессы, тепловые эффекты которых приведены в таблице 7.3.3.

Таблица 7.3.3. Значения тепловых эффектов побочных реакций

Тепловые эффекты реакций, кВт·ч/кг	
Образование фосфора	7,60
молекул апатита на кг $P_2O_5$	0,126
Разложение карбоната кальция на кг $CO_2$	1,118
Восстановление $CO_2$ на кг $CO_2$	1,08
$H_2O$ на кг $H_2O$	2,69
Образование $Fe_2P$ из $Fe_2O_3$ на кг $Fe_2O_3$	0,547
моносиликата кальция $CaSiO_3$ на кг $CO_2$	0,443
на кг $P_2O_5$	0,525
двойного силиката кальция $CaSiO_4$ на кг $CaO$	0,311
на кг $P_2O_5$	0,367

Для расчетов на ЭВМ удобно иметь зависимости технологических параметров в виде уравнений. Плотность шлака при температуре  $T=1670K$  может быть оценена из уравнения:

$$1/\rho_{шл0} = 0,45x_{SiO_2} + 0,286x_{CaO} + 0,204x_{FeO} + 0,35x_{Fe_2O_3} + 0,237x_{H_2O} + 0,367x_{MgO} + 0,48x_{P_2O_5} + 0,402x_{Al_2O_3},$$

где  $x_i$  – мольные доли компонентов шлака.

Температурная зависимость имеет вид:

$$\rho_{шл} = \rho_{шл0} - 0,07 \cdot 10^{-2}(T - 1670).$$

Коэффициент поверхностного натяжения шлака  $\sigma_{\text{шл}}=488 \cdot 10^{-3}$  Н/м при температуре  $T=1630$  К и  $\sigma_{\text{шл}}=522 \cdot 10^{-3}$  Н/м при температуре  $T=1670$  К.

У фосфатно-кремнистых расплавов при  $M_K = 0,6 - 0,8$  и содержании  $P_2O_5$  1 – 2%  $\sigma_{\text{шл}}=30 - 35$  Н/м, а при содержании  $P_2O_5$  5 – 18%  $\sigma_{\text{шл}}=0,3 - 0,48$  Н/м.

Теплоёмкость шлака в ккал/(кг·К) подчиняется уравнению:

$$c_{\text{ршл0}} = 1,903x_{\text{CaO}} + 0,1913x_{\text{SiO}_2} + 0,2439x_{\text{MgO}} + 0,2074x_{\text{Al}_2\text{O}_3}.$$

Зависимость теплоёмкости шлака от температуры представлена уравнением:  $c_{\text{ршл}} = c_{\text{ршл0}} + 0,00015T$ .

Теплопроводность шлака  $\lambda_{\text{шл}} \approx 8$  Вт/(м·К) [100], для основных шлаков эта величина 3 – 5 Вт/(м·К) [79], кислых шлаков 1,7 – 2,8 Вт/(м·К). Теплопроводность феррофосфора в твёрдом состоянии  $\lambda \approx 3,9 - 4,2$  Вт/(м·К), а в расплаве  $\lambda \approx 6,2 - 7,3$  Вт/(м·К).

Вязкость фосфоритов в расплаве существенным образом зависит от химического состава (см. рис. 7.3.2).

При температуре  $T=1773$  К, согласно [84], вязкость шлака может быть описана уравнением:

$$\mu_{\text{шл}} = 52,527 - 75,573M_K - 2,55x_{\text{P}_2\text{O}_5} + 36,219M_K^2 + 1,909M_Kx_{\text{P}_2\text{O}_5} + 0,0176x_{\text{P}_2\text{O}_5}^2.$$

В [4] приведена также формула для системы CaO – SiO<sub>2</sub>:

$$\mu_{\text{шл}} = \mu_{\text{шл0}} + b_1x_{\text{Al}_2\text{O}_3} + b_2x_{\text{P}_2\text{O}_5} - b_3x_{\text{MgO}} - b_4x_{\text{CaF}_2},$$

где  $\mu_{\text{шл0}}$  – вязкость шлака при заданном модуле кислотности  $M_K = 0,81$ ;  $b_i$  – коэффициенты из таблицы 7.3.4.

Имеется корреляционная связь вязкости с электропроводностью расплавов, выражаемая соотношением:  $\mu_{\text{шл}} \cdot \rho_{\text{эшл}}^{1,3} = 0,111$ .

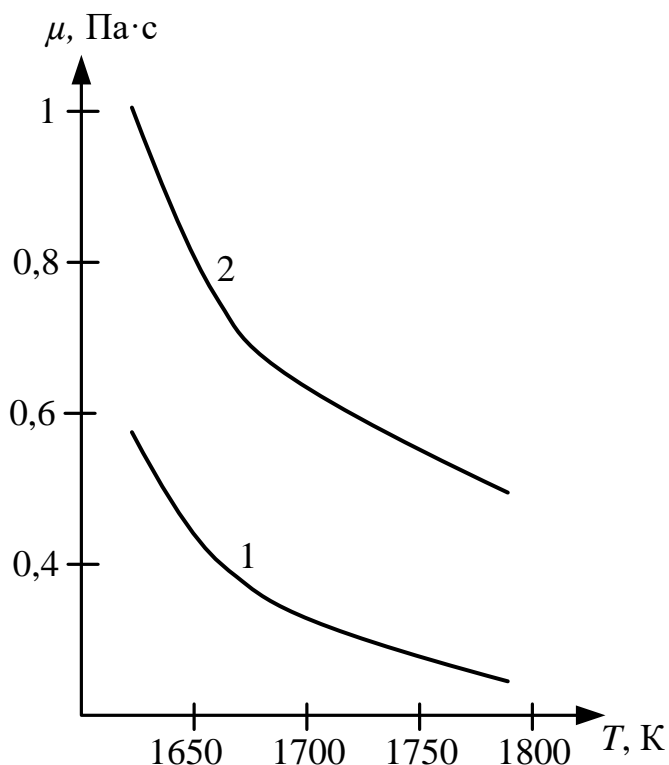


Рис. 7.3.2. Вязкость фосфатно-кремнистых расплавов при заданном модуле кислотности  $M_K = 0,91$ : 1 – при концентрации  $P_2O_5$  0,01 и 2 - при концентрации  $P_2O_5 = 0,1$

Таблица 7.3.4. Значения коэффициентов  $b_i$ ,  $i=1, 2, 3, 4$  для определения вязкости шлака

$T, K$	$\mu_{\text{шл0}}$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$
1773	0,22	0,019	0,026	0,011	0,023
1723	0,27	0,023	0,028	0,012	0,034
1673	0,37	0,030	0,033	0,021	0,045
1623	0,5	0,047	0,053	0,038	0,065

Для расчетов электропроводности расплавов фосфоритов может быть использована зависимость:  $\rho_{\text{эшл}} = \rho_{\text{эшл0}} + \sum x_i k_i$ , где  $\rho_{\text{эшл0}}$  – электропроводность чистой системы  $CaO - SiO_2$ . Необходимые для расчетов коэффициенты приведены в таблице 7.3.5.



Таблица 7.3.5. Значения коэффициентов для расчета электропроводности расплавов фосфоритов

$T, K$	$M_K$	$\rho_{\text{эшл}}, \text{Ом}\cdot\text{см}$	$k_{\text{Al}_2\text{O}_3}$	$k_{\text{P}_2\text{O}_5}$	$\rho_{\text{эшл}}, \text{Ом}\cdot\text{см}$	
					1% $\text{P}_2\text{O}_5$	10% $\text{P}_2\text{O}_5$
1723	0,76	0,391	0,0016	0,0025	0,393	0,416
	0,89	0,289			0,291	0,314
1773	0,76	0,411	0,0012	0,0021	0,483	0,502
	0,89	0,381			0,383	0,402
1823	0,76	0,558	0,0009	0,0017	0,560	0,575
	0,89	0,481			0,486	0,498
1873	0,76	0,658	0,0008	0,0013	0,659	0,671
	0,89	0,568			0,567	0,581

Кокс используется в руднотермических печах как восстановитель, подаваемый в печь с шихтой, а также в процессах агломерации как источник энергии для спекания.

Теплопроводность кокса в интервале температур  $T$  0 – 1273К описывается зависимостями согласно [76]:

$$\lambda_{\text{кпа}} = 0,115 + 1,956 \cdot 10^{-3} T, \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К}),$$

$$\lambda_{\text{кпе}} = 0,36 + 1,762 \cdot 10^{-3} T, \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К}),$$

где  $\lambda_{\text{кпа}}$ ,  $\lambda_{\text{кпе}}$  – теплопроводность параллельно и перпендикулярно слоям.

Теплоёмкость кокса может быть рассчитана по зависимостям:

$$c_k = 4,187 (0,2 + 3,54 \cdot 10^{-4} T - 1,05 \cdot 10^{-7} T^2), \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}),$$

$$\bar{c}_k = 4,187 (0,2 + 1,77 \cdot 10^{-4} T - 0,35 \cdot 10^{-7} T^2), \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}),$$

где  $c_k$ ,  $\bar{c}_k$  – истинная и средняя теплоёмкость в интервале температур 0 – 1273К для кокса с зольностью 7,73%, пористостью  $\varepsilon = 0,53$ , выходом летучих  $V^r = 0,95$  и кажущейся плотностью  $\rho_k = 1,02 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

Для золы кокса:

$$c_{\text{кз}} = 4,187 (0,19 + 1,21 \cdot 10^{-4} T - 3,2 \cdot 10^{-8} T^2), \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}),$$

$$\bar{c}_{кз} = 4,187 (0,19 + 0,605 \cdot 10^{-4}T - 1,07 \cdot 10^{-8}T^2), \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}.$$

Теплоемкость агломерата:

$$c_a = 0,2503 + 2,4650 \cdot 10^{-3}T - 1,57 \cdot 10^{-6}T^2, \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)},$$

$$\bar{c}_a = 0,2403 + 2,4320 \cdot 10^{-3}T - 0,946 \cdot 10^{-6}T^2 - 1,2480 \cdot 10^{-9}T^3 + 0,531 \cdot 10^{-12}T^4, \\ \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}.$$

Свойства электронной массы, используемой в руднотермических печах для самоспекающихся электродов, необходимы для анализа теплового режима спекания и температурных неравномерностей для избегания критических температурных напряжений.

Основные свойства электродов приведены в таблице 7.3.6.

Таблица 7.3.6. Основные свойства электродов

Свойство	Тип электрода		
	графитизированные	угольные	набивные самоспекающиеся
Плотность, кг/м <sup>3</sup>			
кажущаяся	1500 - 1700	1480 - 1650	1450
истинная	2200 - 2240	1900 - 2050	1900
Пористость, %	28 - 30	20 - 22	23
Зола, %	0,1 – 1,5	4 – 8	
Удельное электро- сопротивление, МОм·см	0,8 – 1,2	3,5 – 6,5	6,0 – 10,0
Механическая прочность, МН/м <sup>2</sup>			
на сжатие	19,6 – 34,4	19,6 – 44,2	25,6 – 29,4
на растяжение	14,74 – 27,5	6,34 – 19,6	
на изгиб	4,9 – 9,81	2,95 – 7,85	

Теплопроводность угольных электродов имеет значения  $\lambda \approx 4,2 - 9,3$ , Вт/(м·К); самоспекающихся - близка к теплопроводности кокса.

Теплопроводность зависит от плотности и температуры. Теплоёмкость электродов при различных температурах приведена в таблице 7.3.7.

Таблица 7.3.7. Значения теплоёмкости электродов при различных температурах

$T, K$	373	1273	2273
$c, \text{кВт/кг}\cdot\text{K}$	0,783	1,49	1,895

Коэффициент линейного расширения электродов в диапазоне 473-2073K:

угольные с коксом  $\alpha_l = 7,2 \cdot 10^{-6}$ ;

угольные с антрацитом  $\alpha_l = 11 \cdot 10^{-6}$ ;

графитизированные с нефтяными коксами  $\alpha_l = 2,3 \cdot 10^{-6} - 3 \cdot 10^{-6}$ .

Окисление электродов начинается при 773K, а интенсивно протекает при 873 – 973K.

Для самоспекающихся электродов теплофизические свойства изучены в [78] и сведены в таблицу 7.3.8.

Таблица 7.3.8. Теплофизические свойства электродов

	$\rho \cdot 10^{-3},$ Ом·м	$\sigma,$ кгс/см <sup>2</sup>	состав		Коэффициент текучности	$\lambda,$ Вт/(м·K)	$T_c,$ Вт/м
			зола	летучие			
ЧПО Фосфор	113,5	17	1,6 – 2,3	17,3 – 18,4		1,74	700
Нов. ЭЗ							
марка С	79,08	21,6	3,5	16,6	2,86	2,8 – 3	943
марка А	90,65	19,7	4,8	16,3	2,20	2,1 – 2,9	835
Химпром							
марка Ф1	48,5	20,1	6,7	16,0	2,4	3,32	1070
марка Ф2	87,9	23,2	8,5	15,9	2,42	2,9	986
ДЭЗ							
марка Б	95,0	20,4	6,1	14,5	2,6	2,1	794

Теплофизические свойства высокотемпературных материалов, используемых в качестве обмуровки для печей, приведены в виде уравнений в [79], теплопроводность и теплоёмкость материала графитовой и коксовой обмуровок можно оценить по зависимостям:

$$\lambda_{\text{гр}} = 162,8 - 4070 \cdot 10^{-5} T, \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)},$$

$$c_{\text{р гр}} = 0,89 + 41,9 \cdot 10^{-5} T, \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)},$$

$$\lambda_{\text{кок}} = 23,2 - 3500 \cdot 10^{-5} T, \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)},$$

$$c_{\text{р кок}} = 1,42 + 19 \cdot 10^{-5} T, \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)},$$

где  $\lambda_{\text{гр}}$ ,  $\lambda_{\text{кок}}$  – теплопроводность графитовой и коксовой обмуровок;  
 $c_{\text{р гр}}$ ,  $c_{\text{р кок}}$  – теплоёмкость графитовой и коксовой обмуровок.

В качестве характеристик проницаемости газозаполненных теплоносителей при фильтрации через дисперсный слой используются коэффициенты фильтрации  $k = k_0/\mu$ , где  $k_0$  – коэффициент проницаемости.

Согласно теории проницаемости слоя с правильной кубической укладкой, коэффициент проницаемости может быть оценен из выражения:

$$k_0 = d_{\text{м}}^2 \varepsilon^3 / 72 (1 - \varepsilon)^2.$$

Полуэмпирическая зависимость имеет поправку в виде числового коэффициента, равного 150:

$$k_0 = d_{\text{м}}^2 \varepsilon^3 / 150 (1 - \varepsilon)^2.$$

Для беспорядочно уложенных монодисперсных частиц:

$$k_0 = 6,15 \cdot 10^{-4} d_{\text{м}}^2, \text{ м}^2.$$

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

Используя предложенные автором многомасштабные математические модели ХЭТП сушки, прокали 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 управляющие переменные ХЭТП обжига фосфоритовых окатышей – температуру газа-теплоносителя, которая равномерно возрастает и обеспечивает качественное перераспределение влагосодержания окатышей, предотвращая появление горизонтов переувлажнения и термического разрушения окатышей; скорость подачи потока газа-теплоносителя наибольшая.

На рис. 7.4.1 представлено параметрическое семейство изолиний переменной  $T_m$  температуры окатышей в многослойной массе на конвейере действующей обжиговой машины ОК-520/536Ф в оптимальном технологическом режиме.

Установлено формирование затухающей тепловой волны (см. рис. 7.4.1), которая интенсифицирует ХЭТП сушки (см. рис. 7.4.2, а) и прокалики (см. рис. 7.4.2, б). В результате этого явления уменьшается расход энергии, снижается доля возвратных некондиционных окатышей, возрастает качество готовых обожжённых окатышей – степень завершённости реакций диссоциации карбонатов в среднем по высоте многослойной укладки покидания ХЭТС составляет 0,75, а прочность обожжённых окатышей достигает значения 60,3кг/ок.

Проанализировав полученные экспериментально-расчетные данные, автор пришёл к следующему заключению: в зоне ХЭТП сушки значительная масса влаги испаряется быстрее, чем многослойная масса окатышей поступает в горячую зону подогрева и высокотемпературную зону обжига, при этом оставшаяся незначительная масса влаги не может разрушить окатыши.

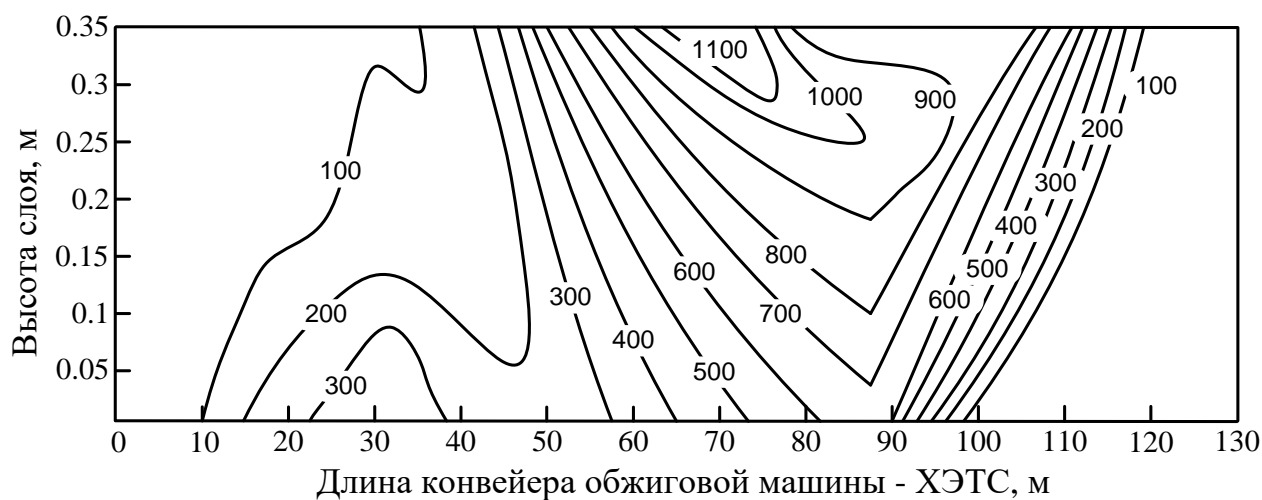


Рис. 7.4.1. Параметрическое семейство изолиний по температуре окатышей в слое  $T_m$ , °C

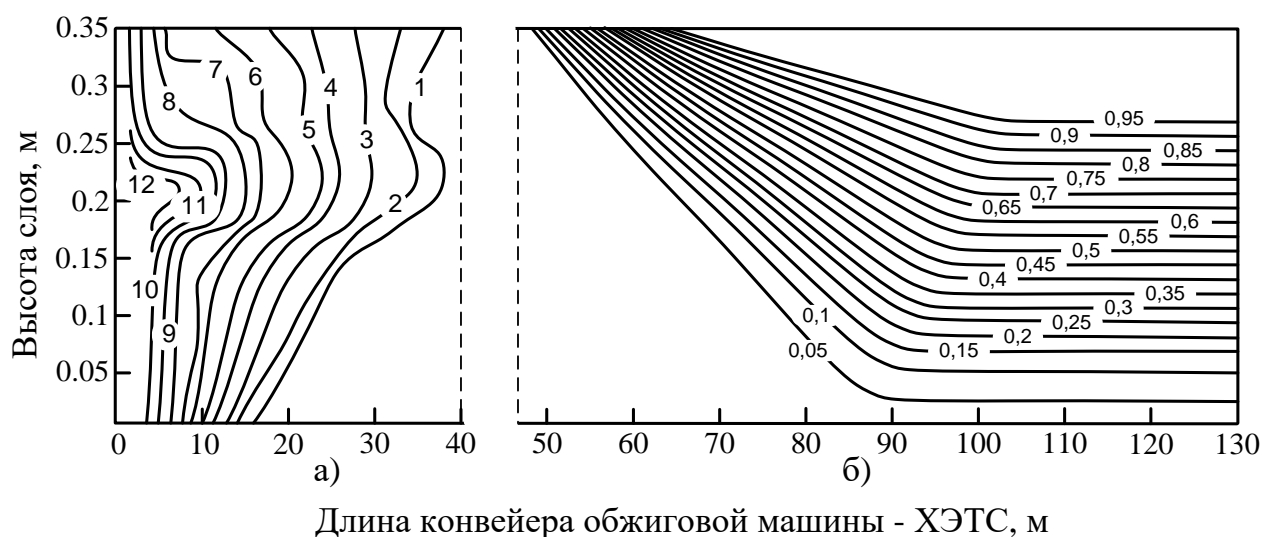


Рис. 7.4.2. Параметрическое семейство изолиний: а) - по влагосодержанию окатышей в слое  $u$ , %; б) - по степени реагирования реакции диссоциации карбонатов в материале окатышей в слое,  $0 \leq \eta \leq 1$

Окатыши из самых верхних горизонтов многослойной массы (см. рис. 7.4.1) в зоне высокотемпературного обжига находятся достаточно долго при требуемой температуре, необходимой для завершения ХЭТП обжига. В связи с чем для повышения энергоресурсоэффективности ХЭТС

рекуперацию тепловой энергии из более нагретых верхних горизонтов многослойной массы окатышей следует производить немного быстрее. По результатам вычислительных экспериментов установлено, что оптимальным энергоресурсоэффективным режимом при существенном повышении качества готовых окатышей является функциональный режим, для которого уменьшается зона подогрева и расширяется зона рекуперации тепла с невысокой температурой газа-теплоносителя.

## **7.5 Разработка научно обоснованных рекомендаций по аппаратурно-технической модернизации обжиговой 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 управляющие оптимальные переменные технологического режима функционирования с перераспределёнными технологическими зонами в ХЭТС.

Рассчитанные 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, прокали и спекания [315].

Несмотря на то, что указанный режим не приводит к уменьшению затрат энергии в сравнении с предложенным в предыдущем параграфе, качество обожжённых окатышей на выходе из ХЭТС существенно увеличивается. Средняя по высоте многослойной укладки окатышей степень реагирования ХЭТП прокали возрастает до 0,95, а прочность до 72кг/ок.

На рис. 7.5.1 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 в движущуюся многослойную массу окатышей, обеспечивая интенсивное протекание и завершённость ХЭТП сушки (см. рис. 7.5.2, а), прокалики (см. рис. 7.5.2, б) и спекания, обеспечивающего конечную прочность (см. рис. 7.5.3).

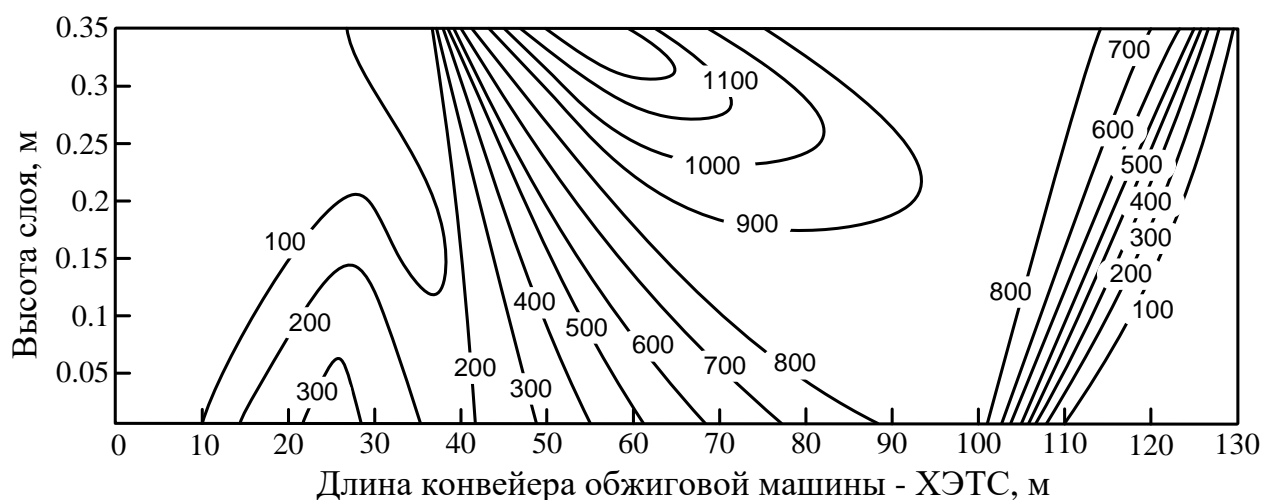


Рис. 7.5.1. Параметрическое семейство изолиний по температуре окатышей в слое  $T_m$ , °C

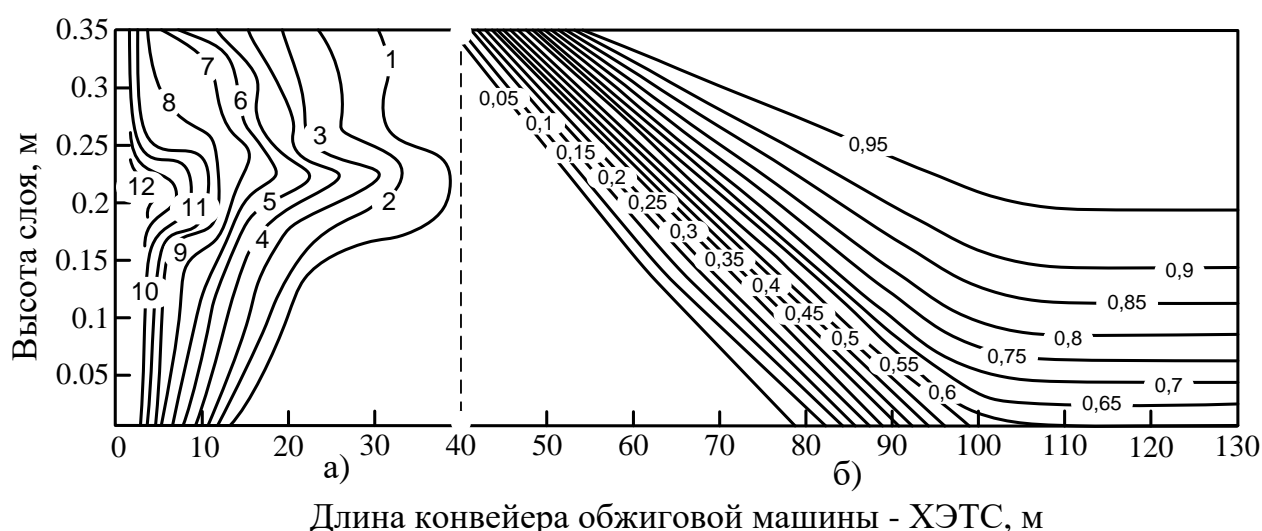


Рис. 7.5.2. Параметрическое семейство изолиний: а) - по влагосодержанию окатышей в слое  $u$ , %; б) - по степени реагирования диссоциации карбонатов в материале окатышей в слое,  $0 \leq \eta \leq 1$



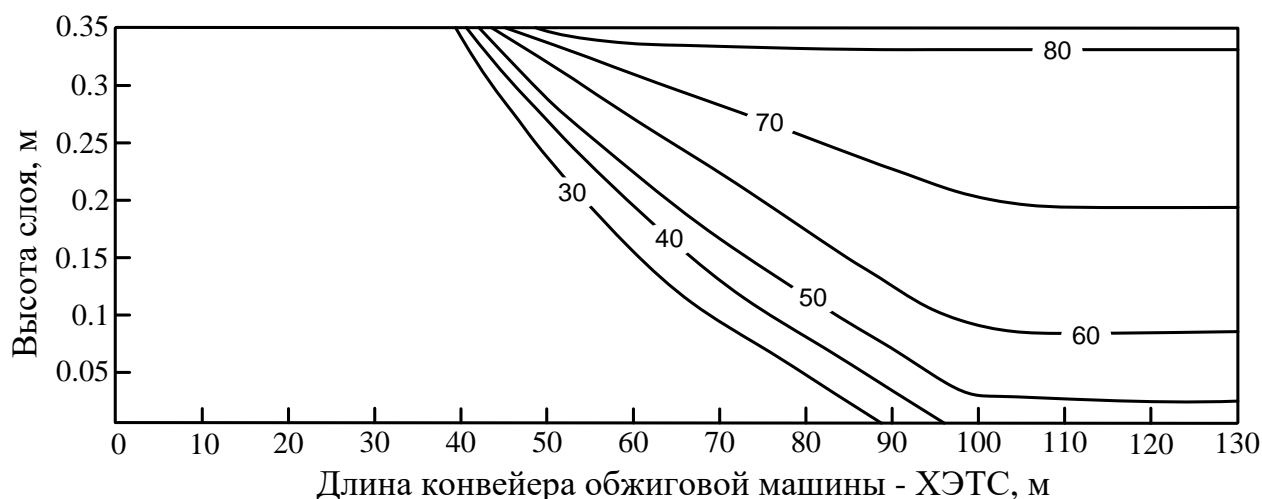


Рис. 7.5.3. Параметрическое семейство изолиний по прочности окатышей в слое  $\sigma$ , кг/ок

Разработанная в диссертационной работе совокупность методов обеспечения повышения энергоресурсоэффективности в химико-энерготехнологических системах (ХЭТС) производства желтого фосфора практически использовалась в 2011 - 2017гг. в ТОО «Казфосфат» «Новоджамбульский фосфорный завод» республика Казахстан при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по повышению качества производимой продукции и услуг технологического инжиниринга, предоставляемых предприятием.

Полученные в диссертации научно-практические результаты развивают методический аппарат анализа и оптимизации сложных ХЭТС по критериям энергоресурсоэффективности, успешно разрабатываемых научной школой академика РАН, профессора, д.т.н. В.П. Мешалкина.

Несмотря на то, что в процессе термической подготовки фосфатного сырья для электротермической возгонки желтого фосфора предприятие использует современные компьютерные средства и системы, ряд задач повышения энергоэффективности ХЭТС термической переработки и обогащения фосфатного сырья на производстве остались нерешенными.

Применение комплексной многомасштабной математической модели ХЭТС термической подготовки фосфатного сырья, предложенной в диссертационной работе, позволило выявить потенциал ресурсоэнергосбережения при обжиге фосфатного сырья, а также систематизировать инженерно-технологические знания о взаимозависимых химико-энерготехнологических процессах (ХЭТП) обжига и повысило результативность конечных результатов деятельности предприятия.

Расчеты, проведенные с использованием разработанных в диссертации математической модели и методов, позволили выявить узкие места в организации процесса научных исследований и разработок и связанных с ними этапов конструкторской и технологической подготовки производства.

Таким образом разработанные методическое и программно-информационное обеспечение принятия решений по оптимизации энергоресурсоэффективности химико-энерготехнологической системы производства фосфоритовых окатышей в ТОО «Казфосфат» «Новоджамбульский фосфорный завод» позволило предприятию выявить потенциал энергоресурсосбережения и повысить энергоресурсоэффективность и качество обожжённых фосфоритовых окатышей. Повышение показателей энергоресурсоэффективности и качества продукции показано в таблице 7.5.1.

В ОАО «Уральский институт металлов» практическое применение разработанных соискателем методик и алгоритмов позволяет определять теплофизические и химико-физические свойства сырья, а также оптимальные параметры режимов работы обжиговых машин.

С использованием полученных соискателем результатов и выводов определён оптимальный режим обжиговой машины типа ОК, в которой технологическая зона сушки и зона высокотемпературного обжига сужаются на 8 %, и за счет этого расширяется технологическая зона рекуперации на

16% по сравнению с традиционным регламентным распределением технологических зон в обжиговой конвейерной машине.

Таблица 7.5.1. Показатели повышения энергоресурсоэффективности ХЭТС и качества готовых фосфоритовых окатышей

	Регламентный режим функционирования ХЭТС	Внедрение инженерно-технологических решений	Исполнение аппаратно-технических решений
Степень реагирования	0,594	0,775	0,948
Прочность, кг/ок	51,223	60,334	72,032
Удельный расход энергии, ТУТ/т	1,93	1,74	1,59

Этот оптимальный теплотехнологический режим позволяет формировать в движущейся на конвейере обжиговой машины плотной многослойной массе окатышей мощную устойчивую тепловую волну, более сильную по сравнению с регламентированным традиционным режимом и глубже проникающую внутрь многослойной массы слоя, что обеспечивает оптимизацию переменных ХЭТП сушки, диссоциации карбонатов и спекания. Рассчитанные и обоснованные соискателем оптимальные параметры и технологические режимы обеспечивают повышение энергоресурсоэффективности, значительное улучшение качества готового продукта при максимальном сужении горизонтов слоя критического переувлажнения окатышей, а средняя по высоте многослойной укладки степень реагирования увеличивается при требуемых показателях прочности готовых окатышей.

## 7.6 Выводы

1. Разработаны архитектура, программно-информационное обеспечение и режимы функционирования автоматизированной системы поддержки и принятия решений по оптимальному управлению энергоресурсоэффективностью ХЭТС.
2. Выполнен системный анализ структуры и свойств обжиговой машины ОК-520/536Ф как сложной многостадийной ХЭТС.
3. С помощью разработанного комплекса программ произведен расчет оптимальных значений физико-химических параметров готовых окатышей при работе обжиговой машины конвейерного типа ОК-520/536Ф.
4. Разработаны научно обоснованные инженерно-технологические рекомендации по оптимизации режима функционирования ХЭТС обжиговой машины ОК-520/536Ф.
5. Разработаны научно обоснованные рекомендации по аппаратно-технической модернизации обжиговой машины ОК-520/536Ф.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **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; разработаны математическая модель распространения локализованного фронта испарения в окатыше, а также 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 натурных 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. Разработаны 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 1,1ТУТ 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), было повышено качество выпускаемой продукции при существенном снижении удельной энергоемкости.

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 прокали, 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 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, которые 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.

## ГЛОССАРИЙ ОСНОВНЫХ ТЕРМИНОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЙ

### **Раздел 1. Системный анализ, обработка информации и управления химико-энерготехнологическими системами.**

**Алгоритм** – набор процедур и инструкций, описывающих порядок действия для достижения требуемых результатов, в том числе результатов по оптимальному управлению, анализу и оптимизации ХЭТС и ХЭТП.

**Анализ ХЭТС** – инженерно-техническая операция исследования структуры ХЭТС, расчёта характеристик, показателей свойств и качества функционирования ХЭТС, определения влияния параметров ХЭТС на её характеристики и режимы эксплуатации.

**Декомпозиция** – процедура представления сложной системы в виде совокупности подсистем, состоящих из простых элементов.

**Достоверность** – обоснованность, доказательность и бесспорность знания; применительно к результатам эксперимента достоверным считается эксперимент, результаты которого теоретически корректны и не вызывают сомнений.

**Иерархичность** – упорядоченное множество элементов в соответствии с подчинением элементов низшего уровня элементам высшего уровня.

**Качество функционирования ХЭТС** – совокупность свойств, определяющих техническое состояние и степень пригодности данной системы к выполнению заданных целей функционирования.

**Конструкционные параметры ХЭТС** – совокупность геометрических размеров конструкций аппаратов, входящих в ХЭТС.

**Критерий эффективности** – некоторый обобщённый показатель, оценивающий степень приспособленности ХЭТС к достижению требуемой результативности и выполнению поставленных целей функционирования и уровень использования различных ресурсов при функционировании системы. Критерии эффективности необходимы для определения оптимальных параметров химико-энерготехнологических процессов и технологических



режимов ХЭТС, для сравнительной оценки альтернативных вариантов ХЭТС при решении задач разработки структуры ХЭТС и задач реконструкции и проектирования объектов химической промышленности, для сравнительной оценки качества различных алгоритмов управления ХЭТС.

**Математическое моделирование ХЭТС** – метод изучения структуры и свойств некоторых реальных ХЭТС на основе проведения вычислительных экспериментов на математических моделях этих ХЭТС с использованием различных математических вычислительных методов и информационно-коммуникационных инструментов. Решение задач анализа и оптимизации ХЭТС, а также задач синтеза оптимальных энергоресурсоэффективных ХЭТС возможно лишь при наличии математических моделей ХЭТС, которые в формализованном виде отображают не только физико-химическую сущность входящих в систему ХЭТП, но и особенности структуры технологических взаимосвязей между отдельными ХЭТП, которые имеют каждый в отдельности разные, а иногда и противоречивые цели функционирования.

**Многомасштабное математическое моделирование** сложного объекта или процесса – разработка иерархической совокупности взаимосвязанных математических моделей, формализующих взаимозависимые отдельные явления и события, протекающие на различных уровнях функционирования (микро-, макро- и мегауровне) исследования сложного объекта или процесса.

**Множественность** – принцип системного подхода, позволяющий использовать множество кибернетических, физических и математических моделей для описания отдельных элементов и системы в целом.

**Обработка информации** - получение одних информационных объектов из других информационных объектов путем выполнения некоторых алгоритмов. Обработка является одной из основных операций, выполняемых над информацией, и главным средством увеличения объёма и разнообразия информации.

**Оптимизация** – целенаправленная деятельность, обеспечивающая получение наилучших в определённом смысле результатов при соответствующих условиях и ограничениях.

**Параметры технологического режима ХЭТС** – основные физико-химические факторы внутри элементов ХЭТС, влияющие на скорость протекания ХЭТП, на выход и качество готового продукта.

**Параметры ХЭТС** – физические, химические и инженерно-технические величины, которые характеризуют особенности протекания различных физико-химических явлений в каждом ХЭТП, условия проведения и особенности инженерно-аппаратного оформления каждого ХЭТП системы. Параметры ХЭТС подразделяют на конструкционные и технологические.

**Подсистема** – часть системы, выделенная по определённому признаку, обладающая некоторой самостоятельностью и допускающая разложения на элементы в рамках данного рассмотрения.

**Синтез ХЭТС** – инженерно-техническая операция создания принципов, выбора типов и способа функционирования ХЭТС, разработки структуры ХЭТС, определения параметров и характеристик, входящих в систему ХЭТП, совокупность которых обеспечивает требуемые цели функционирования ХЭТС.

**Системность** – принцип изучения свойств объекта как сложной системы в целом.

**Системный анализ** – междисциплинарная область исследования, изучающая совокупность методов и инструментов исследования и разработки сложных объектов, в том числе и методов принятия научно обоснованных решений при рассмотрении всего жизненного цикла проектирования, создания и управления технических, технологических, экономических и социальных систем.

**Системный подход** – методология научного познания, в основе которой лежит рассмотрение объекта как сложной системы, представляющей собой целостный комплекс взаимосвязанных элементов.

**Системный подход в химической технологии** – методологическое направление по разработке общих принципов и стратегии, а также специальных неформализованных, или эвристических, и формализованных, или вычислительных, методов комплексного исследования свойств и методов создания разных типов и классов сложных ХЭТП и структур ХЭТС.

Системный подход предполагает, что взаимосвязь и взаимодействие ХЭТП, входящих в некоторую сложную ХЭТС, обеспечивают появление в результате свойства эмерджентности у этой ХЭТС принципиально новых свойств, которые не присущи её отдельным ХЭТП.

**Структуризация** – совокупность упорядоченных внутренних взаимосвязей между элементами системы. Свойства и процесс функционирования системы в целом обусловлены не только свойствами составляющих её отдельных элементов, но и свойствами структуры этой системы.

**Теория анализа и синтеза химико-технологической системы (ХТС)** – представляет собой комплексную научную дисциплину по разработке и применению методологии системного подхода, эвристических вычислительных методов и инструментов достижения показателей ускорения научно-технического прогресса в химических отраслях промышленности при реконструкции действующих производств, представляющих собой сложные ХТС, для повышения их энергоресурсоэффективности; оптимизации технологических режимов ХТС с целью экономии удельных расходов сырья и ТЭР; разработки оптимальных технологических схем энергоресурсоэффективных экологически безопасных компьютерно-информационных ХТС по выпуску высококачественной химической продукции.

**Технологические параметры ХЭТС** – совокупность физико-химических величин, характеризующих свойства, механизм и режимы функционирования ХЭТП, происходящих в системе.

**Технологическая структура, или технологическая топология ХТС** – строение и форма внутренней организации системы, отражающая состав

элементов ХТС и особенности взаимосвязей между ними. Технологическую структуру, или технологическую топологию, ХТС формально можно охарактеризовать числом элементов-аппаратов определённого конструкционного типа, в которых протекают определённые химико-технологические процессы, а также особенностями взаимосвязей между отдельными элементами и числом технологических потоков в системе.

**Управление** – процесс воздействия и организации целенаправленного функционирования системы посредством вырабатываемых специальных команд либо человеком-оператором, либо специальным управляющим устройством, или регулятором.

**Химико-энерготехнологическая система (ХЭТС)** - целенаправленная совокупность аппаратов и машин химической технологии, в которых происходят различные химико-энерготехнологические процессы, обеспечивающие проведение требуемых энергоёмких технологических операций химической и физической переработки сырья в продукты потребления и в промежуточные продукты.

В структуру ХЭТС входят, наряду с высокоэффективными энергоёмкими аппаратами и машинами химической технологии, разнообразные специальное теплотехнологическое и энергетическое оборудование.

**Целостность** – один из основных принципов системного подхода, позволяющий рассматривать одновременно систему как единое целое и в то же время как подсистему для вышестоящих уровней иерархии.

**Эмерджентность** – это такое свойство системы, которое принципиально не сводится к сумме свойств элементов, составляющих систему, и не выводится из них.

## **Раздел 2. Химико-энерготехнологические процессы и химико-энерготехнологические системы.**

**Гранулятор** – тарельчатый агрегат, в котором на вращающуюся под углом к горизонту тарелку агрегата подаётся измельчённая в порошок руда и влага для формирования окатышей за счёт процесса окомкования.

Контроль формирования и регулирование качества сырых окатышей осуществляют путем изменения режима работы гранулятора, гранулометрического состава и соотношения компонентов исходной шихты и т.п.

Входными переменными процесса окомкования исходной шихты являются: дисперсность исходной шихты, частота вращения и угол наклона тарелки, расход шихты, массовая доля влаги в шихте.

Выходными переменными гранулятора являются: влажность, прочность, химический и гранулометрический состав сырых окатышей. При управлении процессом окомкования фосфатного сырья используют опыт работы металлургических предприятий по производству железорудных окатышей.

**Интенсивность** – удельный показатель функционирования, или средняя величина во времени, каких-либо характеристик процесса, явления, действия и т. п.

**Коэффициент динамической вязкости** — показатель вязкости жидкости,  $\text{Па} \cdot \text{с}$ , равный отношению напряжения, вызывающего сдвиг соседних слоев жидкости или газа, к скорости этого сдвига.

**Локализованный фронт испарения в окатыше** – поток пара, формируемый в процессе сушки окатыша и представляющий собой концентрическую сжимающуюся от поверхности к центру сферическую поверхность в окатыше. Теплота к фронту испарения подводится за счёт теплопроводности сухого слоя материала, в котором теплота расходуется на превращение жидкости в пар.

В результате испарения внутри пористой структуры окатыша создаётся избыточное давление, под действием которого образовавшиеся пары

проникают (фильтруются) от фронта испарения к наружной поверхности окатыша.

Скорость удаления влаги зависит от двух последовательных сопротивлений – термического и фильтрационного. Давление паров и температура на фронте испарения устанавливаются в процессе сушки и связаны между собой как параметры насыщенного пара.

**Межзеренная трещина** – трещина, образованная по границам зерен вследствие низкой прочности этих границ.

**Обжиг окатышей** – сложный энергоёмкий ХЭТП физической обработки окатышей, включающий совокупность трёх основных целевых процессов: сушку, прокалку и спекание.

**Окатыши** – крупнопористые округлые тела, полученные путём послойного окатывания измельчённого в порошок сырья, с добавлением влаги и, возможно, связующих. В зависимости от вида сырья различают железорудные и фосфоритовые окатыши.

**Окомкование** (окатывание) – процесс получения окатышей из рудной мелочи или концентратов при подготовке их к плавке, осуществляющийся в барабанных, тарельчатых или чашечных окомкователях при взаимодействии между частицами руды или концентрата с водой.

Окомкование шихты – сложная совокупность процессов смачивания, капиллярного насыщения, осмоса, набухания, поверхностного диспергирования и др. Основные стадии сложного процесса окомкования окатышей – образование зародышей гранул за счёт флуктуации влажности, налипание частиц рудных материалов на поверхность зародышей по принципу «снежного кома». Для улучшения процесса окомкования используют добавки связующих веществ (бентонита, нонтронита и др.) Сырые окатыши затем подвергают упрочняющему обжигу.

**Окомкователь** – устройство барабанного, тарельчатого и чашечного вида для окомкования руд или концентратов. Преимущество чашечных окомкователей, по сравнению с барабанными и тарельчатыми — лучшая

управляемость. Меняя наклон и число оборотов чаши, можно повысить качество окатышей и производительность.

**Остеклование окатышей** – процесс оплавления окатышей под действием высоких температур, который негативно сказывается на прочности окатышей.

**Отвал** – искусственная насыпь из пустых пород, некондиционных полезных ископаемых, твердого шлака и т. п.

**Плотный слой окатышей** – многоуровневая неперемешивающаяся укладка окатышей на конвейер обжиговой машины.

**Прокалка окатышей** – энергоёмкий термически активируемый ХЭТП диссоциации карбонатов:  $\text{MgCO}_3 \rightarrow \text{MgO} + \text{CO}_2 - Q_1$  и  $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2 - Q_2$ .  
 $Q_1 = 1,21 \cdot 10^5$  Дж/моль – тепловой эффект реакции диссоциации  $\text{MgCO}_3$ ,  
 $Q_2 = 1,74 \cdot 10^5$  Дж/моль – тепловой эффект реакции диссоциации  $\text{CaCO}_3$ .

**Рудная мелочь** – руда крупностью менее определенного размера (в России <10 мм, в Японии — 5 — 8 мм), идущая на агломерацию или окомкование.

**Спекание окатышей** – ХЭТП изменения прочности окатыша, обусловленное изменением порозности вещества, включающие процессы твердофазного и жидкофазного спекания.

**Сушка окатышей** – ХЭТП удаления влаги из окатышей.

**Теплотехнологический агрегат** – агрегат, в котором протекание какого-либо технологического процесса определяется условиями теплообмена.

**Химико-энерготехнологический процесс (ХЭТП)** – совокупность экзотермических и эндотермических физико-химических явлений, осуществляющих химические и физические преобразования вещества, тесно взаимодействующих с определёнными энерготехнологическими явлениями.

**Химическое вещество** – либо химический элемент, либо химическое соединение, существующее в природе или полученное искусственно.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технология фосфора. Под ред. В.А. Ершова и В.Н. Белова. Л.: Химия, 1979. 336с.
2. Переработка фосфоритов Каратау. Под ред. М.Е. Позина, Б.А. Копылева, В.Н. Белова, В.А. Ершова. Л.: Химия, 1979. 272с.
3. Большакова А.П., Осипов В.Ф., Заикина Л.И. Требования, предъявляемые к сырью, используемому в производстве желтого фосфора, и существующие методы подготовки сырья перед электровозгонкой. // Тр. ЛенНИИГипрохима. 1967. Вып.1. с.8-23.
4. Альперович И.Г., Ершов В.А., Мухтаров М.А. Исследования в области химической электротермии. // Тр. ЛенНИИГипрохима. 1969. Вып.2. с.13-24.
5. Ильясов Р. Вопросы использования фосфатного сырья и охрана природы на Чимкентском производственном объединении “Фосфор” // Комплексное использование минерального сырья. 1980. № 5. С.83-86.
6. Казов М.Н., Казова Р.А., Альжанов Т.М. Термохимическая подготовка сырья для электротермического производства фосфора. Алма-Ата: Наука. 1989. 216с.
7. Шумаков Н.С., Талхаев М.П., Ковалев О.С. и др. Термическая обработка и окускование фосфатного сырья. М. 1987. 191с.
8. Е.Ф. Вегман. Окускование руд и концентратов. М.: Металлургия. 1984. 256с.
9. Шумаков Н.С., Кунаев А.М. Агломерация фосфоритов. Алма-Ата. 1982. 264с.
10. Производство агломерата и окатышей: Справочное издание / Под ред. С.В. Базилевича, А.Г. Астахова, Г.М. Майзеля и др. М., 1984. 216с.
11. Шумаков Н.С., Павлов В.П., Паршаков А.И., Талхаев М.П. Агломерация фосфоритной мелочи, соответствующей требованиям нового ГОСТа // Фосфорная промышленность. 1978. Вып. 2. С. 9-11.
12. Е.И. Сулименко. Производство окатышей. М.: МЕТАЛЛУРГИЯ. 1988. 128с.



13. Автоматизация и контроль подготовки фосфатного сырья в производстве фосфора. Лифсон М.И., Талхаев М.П., Савицкий С.К. Обзорн. Информ. / ЛенНИИгипрохим. М.: НИИТЭХИМ, 1989. 60с.

14. Борисова Л.И., Гальперина С.Я., Талхаев М.П. и др. Разработка безотходной технологии производства фосфоритных окатышей // Переработка и утилизация отходов производства промышленности минеральных удобрений: Тез. докл. Черкассы. С.90-91.

15. Талхаев М.П., Борисова Л.И., Гальперина С.Я. и др. Термообработка фосфоритовых окатышей на обжиговой машине типа ОК // Интенсификация процессов химической электротермии: Сб. науч. тр. / ЛенНИИгипрохим. Л., 1987. С. 159-166.

16. Юсфин Ю.С., Пашков Н.Ф., Антоненко Л.К., Жак Р.М., Майзель Г.М., Базилевич Т.Н. Интенсификация производства и улучшение качества окатышей. М.: Металлургия. 1994. 240с.

17. Ершов В.А., Пименов С.Д. Электротермия фосфора. СПб.: Химия, 1996. 80с.

18. Мешалкин В.П., Белозерский А.Ю., Какатунова Т.В. Информационный менеджмент в промышленности: Учеб. Пособие. Смоленск: Универсум, 2016. 121с.

19. Шелудяков Л.Н. Состав, структура и вязкость гомогенных силикатных и алюмосиликатных расплавов. Алма-Ата: Наука.1980. 156с.

20. Бабошин В.М. Повышение эффективности использования топлива в черной металлургии. М.: Металлургия. 1986. 184с.

21. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Хоанг Ань Фыонг. Сравнительный анализ эффективности некоторых алгоритмов синтеза теплообменных систем // Известия вузов. Химия и химическая технология. 1980. Т. 23. № 6. С. 782-787.

22. Майзель Г.М., Абзалов В.М., Буткарев А.П. и др. Оценка расхода топлива на обжиг железорудных окатышей // Сталь. 1978. № 7. с. 585-587.

23. Щелоков Я.М., Винтовкин А.А. Использование устройств для пульсирующего сжигания топлива в черной металлургии // Бюллетень научно-технической информации. Черная металлургия. №11. 1985. С. 22-32.

24. Мешалкин В.П., Белозерский А.Ю. Управление информатизацией для повышения эффективности промышленных предприятий: Учеб. Пособие. - Смоленск: Универсум. 2016. 81 с.

25. Бережной Н.Н., Журавлев Ф.М., Кренделев В.Л. и др. // Освоение комбинированного газового обжига железорудных офлюсованных окатышей // Бюллетень ЦНИИЧМ. 1967. №3. С. 22-25.

26. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Нгуен Суан Нгуен. Двухуровневый метод оптимизации сложных химико-технологических систем на основе компактного преобразования матриц и функции Лагранжа // Доклады Академии наук СССР. 1979. Т. 249. № 5. С. 1167-1172.

27. Майзель Г.М., Братчиков С.Г., Лобанов В.И. и др. Сжигание газа при окусковании железорудных материалов // В кн.: Теория и практика сжигания газа. У-Л.: Недра. 1972. С. 18-20.

28. Бережной Н.Н., Минкин Б.Л., Лобанов В.И. и др. Обжиг окатышей комбинированным сжиганием природного газа над слоем и в слое // Бюллетень ЦНИИЧМ. 1972. № 6. С. 18-20.

29. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Манко Г.И. Принципы системно-информационного анализа эффективности химико-технологических систем // Доклады Академии наук СССР. 1981. Т. 259. № 5. С. 1160-1165.

30. Лобанов В.И., Братчиков С.Г., Писцов С.Н. Горение газа в плотном слое железорудных окатышей: Сообщ. 1 // Известия вузов. Чёрная металлургия. 1972. № 4. с. 41-46.

31. Лобанов В.И., Братчиков С.Г., Писцов С.Н. Горение газа в плотном слое железорудных окатышей: Сообщ. 2 // Известия вузов. Чёрная металлургия. 1972. № 6. с. 31-35.

32. Лобанов В.И., Братчиков С.Г. Горение газа в плотном слое железорудных окатышей: Сообщ. 3 // Известия вузов. Чёрная металлургия. 1973. № 2. с. 25-27.

33. Панченко С.В., Мешалкин В.П., Дли М.И., Борисов В.В. Компьютерно-визуальная модель теплофизических процессов в электротермическом реакторе // Цветные металлы. 2015. № 4 (868). С. 55-60.

34. Лобанов В.И., Братчиков С.Г., Майзель Г.М. и др. Особенности окислительного обжига железорудных окатышей при горении газа в слое // В кн.: Окускование железорудных руд. Свердловск: Уралмеханобр. 1973. с. 78-87.

35. Кафаров В.В., Манко Г.И., Мешалкин В.П., Пинский В.И. Информационная оценка точности моделирования химико-технологических процессов // Автоматика и телемеханика. 1980. № 1. С. 176-181.

36. Холькин А.И., Кулов Н.Н. О деятельности научного совета РАН по научным основам химической технологии // Химическая технология. 2006. Т. 7. № 4. С. 38-40.

37. Петров А.В., Бережной Н.Н., Воскеричан Н.В. Влияние углерод- и марганецсодержащих добавок на качество обожженных окатышей // Металлургическая и горнорудная промышленность. 1976, № 4. С. 3-5.

38. Бережной Н.Н., Петров А.В., Воскеричан Н.В., Дрожилов Л.А. Методы интенсификации процесса термообработки окатышей на конвейерной машине // Бюллетень ЦНИИЧМ. 1977. № 6.

39. Бережной Н.Н., Паталах А.А., Гребенкин Н.Н. и др. Промышленные испытания технологии производства железорудных окатышей из шихты с твердым топливом // Сталь. 1982. № 11. С. 10-12.

40. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Правниченко А.В. Многоуровневый алгоритм синтеза неоднородных химико-технологических систем с использованием сепарабельной модифицированной функции Лагранжа // Доклады Академии наук СССР. 1980. Т. 255. № 5. С. 1196-1199.

41. Miyashita T., Sakamoto N., Fukuyo H. Addition of Carbonaceous Materials in Pellet Induration Process. Tetsu-to-Hagane. 1982. V. 68. № 15. P. 174-181.
42. Кожевников И.Ю. Бескоксовая металлургия железа. М.: Металлургия. 1970. 336с.
43. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Нгуен Суан Нгуен. Моделирование химико- технологических систем методом компактного преобразования // Доклады Академии наук СССР. 1979. Т. 245. № 2. С. 408-410.
44. Канторович Г.И., Ярхо Н.А., Рейторовская Л.А. Окускование железорудных концентратов с частичным их восстановлением // Сталь. 1959. № 11. с. 10-12.
45. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Нгуен Суан Нгуен. Декомпозиционный метод оптимизации сложных химико-технологических систем с использованием компактного преобразования матриц и модифицированных функций Лагранжа // Доклады Академии наук СССР. 1979. Т. 249. № 6. С. 1403-1407.
46. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Нгуен Суан Нгуен. Метод выбора свободных переменных химико-технологических систем на основе компактного преобразования информационной структуры матриц // Доклады Академии наук СССР. 1979. Т. 245. № 4. С. 888-892.
47. Леонтьев Л.И., Ефимов А.Л., Шаврин С.В. и др. Разработка технологии производства вюститно-магнетитовых окатышей из качканарского концентрата с использованием твердого топлива // В сб.: Окускование железных руд и концентратов. Свердловск. 1975. №2. с. 80-92.
48. Кудрявцев В.С., Пчелкин С.А. Металлизированные окатыши. М.: Металлургия. 1974. 136с.
49. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Сабанин В.Р., Радун Д.В. Оптимальный алгоритм стратегии решения систем нелинейных уравнений математических моделей ХТС // Теоретические основы химической технологии. 1981. Т. 15. № 4. С. 620-624.

50. Лыков А.В. Тепло- и массообмен в процессах сушки. М.-Л.: Госэнергоиздат. 1956. 464с.
51. Фролов В.Ф. Моделирование сушки дисперсных материалов. Л.: Химия. 1987. 432с.
52. Krischer O., Kast W. Die Wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. 3. Aufl. – Berlin: Springer, 1978. 489s.
53. Рудобашта С.П. Массоперенос в системах с твердой фазой. М.: Химия, 1980. 248с.
54. Плановский А.Н., Муштаев В.И., Ульянов В.М. Сушка дисперсных материалов в химической промышленности. М.: Химия. 1979. 288с.
55. Романков П.Г., Рашковская Н.Б., Фролов В.Ф. Массообменные процессы химической технологии. Л.: Химия. 1975. 324 с.
56. Е.В. Некрасова, А.П. Буткарев, Г.М. Майзель и др. Параметры сушки окатышей из концентратов разных месторождений // В кн.: Совершенствование тепловой работы и конструкций металлургических агрегатов. М.: Металлургия. 1982. С. 5 – 9.
57. А.П. Буткарев, Е.В. Некрасова, Г.М. Майзель и др. Исследование кинетики сушки окатышей из концентратов различных месторождений // В кн.: Повышение производительности и экономичности работы тепловых металлургических агрегатов. М.: Металлургия, 1982. С. 11-14.
58. Талхаев М.П., Борисова Л.И., Сухарников Ю.И., Гальперина С.Я. Производство фосфоритовых окатышей. Алма-Ата: Наука, 1989. 88с.
59. Tigerschiold M.J. Aspects on pelletizing of iron ore Concentrates // J. Iron and Steel Institute. 1954. V. 177, part 1. P. 12-44.
60. Joseph T.L. Pelletizing of Iron ore Concentrates // Blast Furnace and Steel Plant. 1956. V. 43. P. 641-646.
61. Юсфин Ю.С., Базилевич Т.Н. Обжиг железорудных окатышей. М.: Металлургия. 1973. 272с.

62. Малышева Т.Я., Чернышев А.М. Сравнительное изучение особенностей механизма формирования офлюсованных и неофлюсованных окатышей // Сталь. 1974. № 5. С. 392-394.

63. Дрожилов Л.А., Журавлев Ф.М., Мерлин А.В. и др. Свойства обожженных окатышей в зависимости от их основности и содержания кремнезема в исходном концентрате // Бюллетень Черметинформация. 1975. № 2. С. 33-36.

64. Мешалкин В.П., Сиваев С.Б. Анализ сложных химико-технологических систем с использованием методов имитационного моделирования//Моск. хим.-технол. ин-т им. Д.И. Менделеева. М., 1983. 27 с. Деп. в ВИНТИ 14.11.83, № 6058.

65. Ефименко Ю.Г., Гладков Н.Л. Зависимость качества железорудных материалов от их свойств в исходном и восстановленном состоянии // Бюллетень Черметинформация. 1975. № 1. С. 33-35.

66. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Манко Г.И. Информационный метод оценки адекватности моделей химико-технологических процессов // Доклады Академии наук СССР. 1978. Т. 242. № 2. С. 383-385.

67. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Перов В.Л., Пинский В.И., Гавлин А.Г., Вачков Г.Л. Автоматизированный анализ динамических характеристик многомерных химико-технологических систем // Теоретические основы химической технологии. 1978. Т. 12. № 5. С. 787-790.

68. Ершов В.А., Качанова Е.А., Пучкова Б.Б. и др. Влияние минерализующих примесей на появление жидкой фазы в фосфатно-кремнистых разностях // Технология неорганических веществ. Л.: ЛТИ. 1975. № 1. С. 51-57.

69. Маерчак Ш. Производство окатышей / Пер. со словац.: Под ред. Ю.С. Юсфина. М.: Металлургия. 1982. 232 с.

70. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Федосеев А.М., Черепанов А.И. Иерархическая модель и квазидинамический алгоритм оптимизации качества

продукции дискретно-непрерывных химико-технологических систем // Доклады Академии наук СССР. 1983. Т. 270. № 3. С. 656-659.

71. Гилунг В.Ф. Образование и поведение расплава, формирующегося при обжиге офлюсованных железорудных окатышей: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1983. 23с.

72. Еремеев В.С., Гудков А.И. О связи реологических и микроскопических моделей спекания // Порошковая металлургия. 1978. № 3. С. 31-36.

73. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Буровцов В.М. Стратегия синтеза однородных химико-технологических систем в условиях неопределенности исходной информации // Доклады Академии наук СССР. 1980. Т. 250. № 6. С. 1417-1421.

74. Гилунг В.Ф., Журавлев Ф.М., Юсфин Ю.С. Влияние фазового состава и количества силикатной связки окатышей на их металлургические свойства // Металлы. 1983. № 3. С. 3-8.

75. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Каплинский В.Я. Декомпозиционно-аппроксимационный метод анализа больших гидравлических цепей химико-технологических систем // Доклады Академии наук СССР. 1983. Т. 268. № 4. С. 930-933.

76. Юсфин Ю.С., Даньшин В.В., Литвиненко Ю.А. и др. Жидкофазное упрочнение гранул // Известия вузов. Черная металлургия. 1981. № 7. С. 18-21.

77. Ершов В.А., Качанова Е.А., Лепилина Р.Г. и др. Фазовые превращения фосфатно-кремнистых разностей месторождения Джанатас при нагревании в зоне температур 500-1200°C // Исследования в области химической электротермии. Л.: Ленниигипрохим. 1972. № 6. С. 15-19.

78. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Каплинский В.Я. Аппроксимационно-параметрический метод расчета гидравлических цепей химико-технологических систем с использованием структурных графов // Доклады Академии СССР. 1983. Т. 268. № 5. С. 1174-1177.

79. Качанова Е.А., Пучкова Б.Б., Цвигун Л.С. и др. Изменения фосфатизированных кремней месторождения Джанатас при нагревании // Исследования в области химической электротермии. Л.: Ленниигипрохим, 1972. № 6. С. 20-30.

80. Качанова Е.А. Исследования поведения фосфатно-кремнистых руд и пород бассейна Каратау при нагревании: Автореферат дис. ... канд. техн. наук. Л., 1972. 23с.

81. Кафаров В.В., Мазуров В.М., Мешалкин В.П., Саломыков В.И. Цифровые системы управления химико-технологическими процессами с запаздыванием // Доклады Академии наук СССР. 1983. Т. 270. № 6. С. 1416-1419.

82. Ковалев В.Н., Крестникова Л.Б., Цвигун Л.С. Некоторые закономерности процесса окомкования и обжига фосфоритных руд // Фосфорная промышленность. М.: НИИТЭХИМ. 1976. № 7 (27). С. 10-15.

83. Ковалев В.Н., Крестникова Л.Б. Обжиг фосфатных гранул с использованием комбинированного топлива. // Фосфорная промышленность. М.: НИИТЭХИМ. 1975. № 1 (16). С. 4-11.

84. Патрушев Д.А., Амелин Е.С. Сачко А.П. и др. Лабораторные исследования процесса обжига фосфорита // Элементарный фосфор и продукты его переработки: Тр. УНИХИМ. Л.: Химия. Ленингр. Отд., 1970. №19. С. 21-24.

85. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Нгуен Суан Нгуен, Козина О.А. Исследование свойств критерия эффективности комплексной задачи синтеза теплообменных систем для целей разработки алгоритмов поиска его глобального экстремума // Доклады Академии наук СССР. 1982. Т. 266, № 3. С. 685-688.

86. Султанова И.Г. Связь физико-химических свойств фосфатного сырья с его вещественным составом // Ленниигипрохим. Л., 1979. 14с. деп. в ОНИИТЭХИМ, 1980. № 157, хп-Д80.



87. Альперович И.Г., Гужков В.А., Качанова Е.А. и др. Параметрические критерии оценки фосфатно-кремнистого сырья бассейна Каратау для электротермической переработки // Фосфорная промышленность. М.: НИИТЭХИМ. 1976. № 7(27). С. 1-9.

88. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Нгуен Суан Нгуен, Козина О.А. Декомпозиционно-вариационный метод автоматизированного комплексного синтеза теплообменных систем // Доклады Академии наук СССР. 1982. Т. 266. № 1. С. 183-187.

89. Адамсон А.У. Физическая химия поверхностей. / Пер. с англ.; Под ред. З.М. Зорина, В.М. Муллера. М.: Мир, 1979. 586с.

90. Коротич В.И. Основы теории и технологии подготовки сырья к доменной плавке. М.: Металлургия, 1978. 208с.

91. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Нгуен Суан Нгуен, Козина О.А. Декомпозиционный метод автоматизированного комплексного синтеза теплообменных систем // Доклады Академии наук СССР. 1982. Т. 264. № 6. С. 1445-1448.

92. Пащенко А.А. Физическая химия силикатов. Киев: Высшая школа, 1977. 384с.

93. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Манко Г.И. Системно-информационный анализ эффективности химико-технологических систем // Теоретические основы химической технологии. 1982. Т. 16. № 4. С. 524 -529.

94. Шумаков Н.С. Исследование процессов размягчения и плавления фосфоритовых руд и агломератов // Комплексное использование минерального сырья. 1978. № 6. С. 32-37.

95. Богатырев А.Ф., Панченко С.В. Математические модели в теплотехнологии фосфора. М.: МЭИ. 1996. 207с.

96. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Правниченко А.В. Аппроксимационно-гибридный алгоритм расчета многоконтурных химико-технологических систем // Доклады Академии наук СССР. 1980. Т. 251. № 4. С. 925-928.

97. Малышев В.П. Математическое планирование химического и металлургического эксперимента. Алма-Ата: Наука. 1977. 27с.

98. Малышев В.П. Вероятностно-детерминированное планирование эксперимента. Алма-Ата: Наука. 1981. 116с.

99. Кафаров В.В., Мешалкин В.И., Нгуен Суан Нгуен, Козина О.А. Декомпозиционно-вариационный метод автоматизированного комплексного синтеза теплообменных систем // Доклады Академии наук СССР. 1982. Т. 266. № 1. С. 183-186.

100. Казов М.Н., Жуманова З.С., Кадырбеков Р.Н. и др. Декарбонизирующий обжиг фосфоритов в шахтной печи // Мат-лы конф. МАХТ. Чимкент. 1980. Т.1. с.264.

101. Жуманова З.С., Казова Р.А., Громакова З.И., Саркулов Ж.Х., Казов М.Н. Исследование процесса обжига фосфоритов в условиях газодинамики стабильного слоя // Тез. Докл. Респ. Совещ. По повышению качества продукции химической промышленности. Актюбинск. 1979. С. 37-40.

102. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Федосеев А.М., Черепанов А.И. Иерархический алгоритм оптимального управления качеством продукции дискретно- непрерывных химико-технологических систем // Теоретические основы химической технологии. 1981. Т. 15. № 2. С. 254-265.

103. Павлов С.Ю., Кулов Н.Н., Керимов Р.М. Совершенствование химико-технологических процессов на основе системного анализа // Теоретические основы химической технологии. 2014. Т. 48. № 2. С. 131-140.

104. Казов М.Н., Казова Р.А., Саркулов Ж.Х.. Исследование процесса окислительного обжига фосфорита с содой методом термического анализа // Тез. Докл. 8-й Всесоюз. Конф. По термическому анализу. Куйбышев, 1982. С. 231.

105. Казов М.Н., Казова Р.А., Жуманова З.С., Кадырбеков Р.Н. Исследования кинетики термической обработки фосфоритов // Мат-лы 2-й Всесоюз. науч. конф. По комплексному использованию руд и концентратов

“Научные основы комплексного использования руд и концентратов”. М. 1982. Ч.1. с. 208-209.

106. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Сиваев С.Б., Пенциак Ю. Стохастический квазиградиентный алгоритм глобальной оптимизации для решения задач синтеза неоднородных химико-технологических систем // Доклады Академии наук СССР. 1984. Т. 275. № 3. С. 670-674.

107. Требухова Т.А., Казова Р.А., Казов М.Н. Кинетика процесса выщелачивания спека гранулированного феррофосфора с содой // Журнал прикладной химии. 1983. №4. С. 749-753.

108. Ю.С. Юсфин, А.Д. Каменов, А.П. Буткарев. Управление окускованием железорудных материалов. М.: Metallurgy. 1990. 280 с.

109. Белозерский А.Ю., Бутусов О.Б., Мешалкин В.П. Основы компьютерного моделирования в технике и менеджменте: Учебное пособие - Смоленск: Универсум. 2015. 174 с.

110. Базилевич С.В., Астахов А.Г., Майзель Г.М. и др. Производство агломерата и окатышей. Справочное издание. М.: Metallurgy. 1984. 216с.

111. С.Г. Федоров, С.Г. Савельев, В.Н. Соломаха и др. Производство офлюсованных окатышей с использованием различных связующих добавок // Metallurgical and Iron and Steel Industry. 1985. №3. с. 60 - 62.

112. Пашков Н.Ф., Юсфин Ю.С., Щеблыкин Г.В. Влияние добавок извести на свойства железорудных окатышей // Известия ВУЗов. Черная металлургия. 1985. №5. С. 154 – 155.

113. Meshalkin V.P., Katerishchuk M.Yu. Effective Business Processes Reengineering on the Bakery Enterprises // International Journal of Advanced Studies. 2014. Т. 4. С. 3 – 8.

114. Алексеев Л.Ф., Горбачев В.А., Кудинов Д.З., Шаврин С.В. Структура и разрушение окатышей при восстановлении. М.: Наука. 1983. с. 25-28.

115. Гольдман А.Я. Прогнозирование деформационно-прочностных свойств полимерных и композиционных материалов. Л.: Химия. 1988. 144с.

116. Андриевский Р.А. Порошковое материаловедение. М.: Металлургия. 1991. 118с
117. Мешалкин В.П., Новосельцев В.Н., Созиев А.С., Кафаров В.В. Принципы построения интеллектуализированной системы анализа эффективности энергосберегающего оборудования химико-технологических систем // Методы киберн. хим.-техн. проц. (КХТП-1): Тез. докл. Всесоюз. науч. конф. М. 1984. С. 161-162.
118. Соболева В.А., Шарова В.И.. Спекание фосфатно-кремнистых руд в области температур изменения агрегатного состояния // В сб.: Фосфатное сырье и его термическая подготовка для электровозгонки желтого фосфора. Л.:ЛенНИИГипрохим. 1982. с. 42
119. Лыков М.В. Сушка в химической промышленности. М. Химия. 1970. 432с.
120. Katerishchuk M.J., Belozerskiy A.J., Vasilenko E.A., Meshalkin V.P. Effective business processes reengineering on the bakery enterprises // Applied and Fundamental Studies: Proc 5. Int. Academic Conf. - St. Louis, Missouri, USA, 2014. p. 283 – 288.
121. Першуков А.А., Соболев А.В. Справочник рабочего фабрики окомкования. Челябинск. Металлургия, Челябинское отделение. 1988. 240с.
122. Мешалкин В.П., Сиваев С.Б., Грун Г., Нойманн В. Метод синтеза оптимальных химико-технологических систем в условиях неопределенности с использованием обобщенного векторного критерия принятия решений // Методы киберн. хим.-техн. проц. (КХТП-1): Тез.докл. Всесоюз. науч. конф. - М. 1984. С. 87-88.
123. Подиновский В.В., Гаврилов В.М. Оптимизация по последовательно применяемым критериям. М., “Советское радио”. 1975. 192 с.
124. Д. Химмельблау. Прикладное нелинейное программирование. М.: МИР. 1975. 534с.

125. Тихонов А.Н., Кальнер В.Д., Гласко В.Б. Математическое моделирование технологических процессов и метод обратных задач в машиностроении. М., "Машиностроение". 1990. 382с.

126. Мешалкин В.П., Ходченко С.М. Химический лизинг как инструмент повышения ресурсоэнергосбережения и экоэффективности цепей поставок химических предприятий // Логистика и экономика ресурсоэнергосбережения в промышленности (МНТК «ЛЭРЭП-8-2014»): Сб. Науч. тр. 8 Междунар. Науч.-практ. Конф., 19-20 нояб. 2014. С. 13 – 17.

127. Болнокин В.Е. Чинаев П.И. Анализ и синтез систем автоматического управления на ЭВМ. М., "Радио и связь". 1986. 234с.

128. Кафаров В.В., Мешалкин В.П. Анализ и синтез химико-технологических систем. М.: Химия. 1991. 432с.

129. Luis P., Van der Bruggen B. Exergy analysis of energy-intensive production processes: advancing towards a sustainable chemical industry // Journal of Chemical Technology and Biotechnology. 2014. Т. 89. № 9. pp. 1288-1303.

130. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Гурьева Л.В. Оптимизация теплообменных процессов и систем. М.: Энергоатомиздат. 1988. 192с.

131. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Грун Г., Нойманн В. Методы обеспечения и оптимизации надежности химических и нефтехимических производств. М.: Химия. 1987. 270с.

132. Elgharbi S., Horchani-Naifer K., Férid M. Investigation of the structural and mineralogical changes of Tunisian phosphorite during calcinations // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2015. Т. 119. № 1. pp. 265-271.

133. Боковиков Б.А., Брагин В.В., Швыдкий В.С. О роли зоны тепловой инерции при термообработке окатышей на обжиговых конвейерных машинах // Сталь. 2014. № 8. С. 43-48.

134. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Перов В.Л. Математические основы автоматизированного проектирования химических производств. Методология и теория разработки оптимальных технологических систем. М.: Химия. 1979. 318 с.

135. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Нгуен Суан Нгуен. Алгоритм моделирования химико-технологических систем на основе метода компактного преобразования // Доклады Академии наук СССР. 1979. Т. 245. № 3. С. 669-672.

136. Буткарев А.А. Исследование и оптимизация теплотехнологических схем обжиговых конвейерных машин и режимов термообработки железорудных окатышей. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук // Институт металлургии уральского отделения Российской академии наук. Екатеринбург, 2012.

137. Мешалкин В.П. Принципы и методы автоматизированного синтеза химико-технологических систем с оптимальным расходом материальных ресурсов: Дис. ... докт. техн. н. М. 1983. 471 с.

138. Абзалов, Б.И. Борисенко, В.В. Брагин, В.П. Бруев, В.Н. Неволин В.М. Модернизация обжиговых машин ОК-520 ОАО Михайловский ГОК // Сталь. 2005. №2. с. 3-4.

139. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Перлов Н.А. Программное обеспечение автоматизированного выбора оптимального унифицированного парка теплообменных аппаратов // Теоретические основы химической технологии. 1985. Т. 19. № 6. С. 814-818.

140. Брагин В.В., Гонтарук Е.И., Зинягин Г.А., Неволин В.Н., Шляхов Н.А., Абзалов В.М. Теплотехническое обследование и технические решения по увеличению производительности обжиговой машины фирмы Лурги // Сталь. 2005. № 2. с. 7-8.

141. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Сиваев С.Б. Метод имитационного моделирования для анализа влияния стохастических факторов на функционирование химико-технологических систем // Доклады Академии наук СССР. 1986. Т. 288. № 5. С. 1176-1180.

142. 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.

143. Кулов Н.Н., Слинько М.Г. Современное состояние науки и образования в области теоретических основ химической технологии // Теоретические основы химической технологии. 2004. Т. 38. № 2. С. 115-122.

144. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Сиваев С.Б. Метод синтеза оптимальных химико-технологических систем при интервальной неопределенности информации о параметрах технологических процессов с использованием обобщенного критерия принятия решений // Доклады Академии наук СССР. 1986. Т. 288. № 3. С. 689-693.

145. Тимофеева А.С., Никитченко Т.В., Федина В.В. Определение комкуемости железорудной шихты с целью прогнозирования прочностных свойств окатышей // Современные наукоемкие технологии. 2015. № 8. С. 53-57.

146. Kafarov V.V., Badell M., Meshalkin V.P. Analisis y optimizacion de la prodaccion de claro y sosa caustica // Revista Technologica. 1986. Vol. 16. 5 p.

147. 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.

148. Кафаров В.В., Мешалкин В.П. Ресурсосберегающие химические производства // Итоги науки и техники. ВИНТИ. Сер. Процессы и аппараты хим. технологии. 1987. Т. 15. С. 85-158.

149. Виноградов А.П., Сверчков А.М., Егоров А.Ф. Компьютерный тренажёрный комплекс системы поддержки принятия решений для подготовки операторов химических производств // Успехи в химии и химической технологии. 2012. Т. 26. № 1 (130). С. 48-50.

150. Кафаров В.В., Мешалкин В.П. Топологические модели представления знаний для автоматизированного синтеза ресурсосберегающих химико-

технологических систем // Доклады Академии наук СССР. 1987. Т. 293. № 4. С. 933-937.

151. 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.

152. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Манко Г.И., Русалин С.М., Жиденко В.Ф. Методологические принципы автоматизированного выбора оптимальных конструкций химико-технологических аппаратов // Известия вузов. Химия и химическая технология. 1987. Т. 30. №6. С. 101-105.

153. Бобков В.И. Особенности теплотехнологической схемы производства фосфоритовых окатышей // Энергетика, информатика, инновации: Сб. тр. VII Межд. науч.-тех. конф. Смоленск: Универсум, 2017. Т.1. С.42-46.

154. Гартман Т.Н., Советин Ф.С., Асеев К.М. Некоторые аспекты разработки концептуальных проектов химических производств на основе совместного применения пакетов моделирующих программ и систем прикладной математики // В книге: XX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии Тезисы докладов в 5 томах. Уральское отделение Российской академии наук. 2016. С. 272.

155. 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.

156. 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. Т.10. С. 56-60.



157. Кришнев В.К., Мешалкин В.П., Капканщиков А.С. Системно-функциональный подход к проблеме обеспечения надежности и эффективности автоматизированных химико-технологических комплексов // Математическое моделирование сложных химико-технологических систем: Тез. докл. 5 Всесоюзн. науч. конф. Казань, 1988. С. 16-17.

158. 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.

159. 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. Т.3. С.220-224.

160. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Авиновицкая Т.И. Эвристический декомпозиционно-дискретный метод синтеза ресурсосберегающих теплообменных систем при заданном множестве стандартных теплообменных аппаратов // Доклады Академии наук СССР. 1989. Т. 306. №3. С. 672-675.

161. 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.

162. 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.

163. Кафаров В.В., Мешалкин В.П. Искусственный интеллект // Хим. энциклопедия: В 5 т. - М.: Сов. энциклопедия, 1990. Т.2. С. 274.

164. 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.

165. 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.

166. Кафаров В.В., Мешалкин В.П. Анализ и синтез химико-технологических систем : Учеб. для вузов. - М.: Химия. 1991. 432 с.

167. Игнатов В.Н., Мешалкин В.П., Дови В. Структурно-логический алгоритм расчета надежности химико-технологических систем с применением параметрических графов надежности // Теоретические основы химической технологии. 1991. Т. 25. № 6. С. 912-917.

168. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Шубин И.А. Предикатно-фреймовые модели представления знаний для поиска оптимальной компоновки химико-технологических систем // Теоретические основы химической технологии. 1991. Т. 25. № 1. С. 104-109.

169. Баженов В.И., Говоров А.А., Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Подсевалов В.В., Фролов А.А. Алгоритмы анализа и оптимизации автоматических систем регулирования с расширенными функциональными возможностями для химико-технологических процессов // Теоретические основы химической технологии. 1992. Т. 26. № 4. С. 562-569.

170. Мешалкин В.П., Мазуров В.М., Чумаков А.В. Анализ эффективности оптимальных по точности алгоритмов управления химико-технологическими процессами с запаздыванием // Приборы и системы управления. 1993. №11. С. 22-25.

171. Богомолов Б.В., Мешалкин В.П. Принципы разработки экспертной системы оптимальной компоновки оборудования химических производств // Теоретические основы химической технологии. 1994. Т.28. №6. С. 638-643.

172. Мешалкин В.П., Гурьева Л.В. Разработка моделей представления знаний для автоматизированного синтеза оптимальных теплообменных систем // Химическая промышленность. 1994. № 8. С. 562-567.

173. 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. Т.2. С. 299 – 304.

174. 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.

175. Мешалкин В.П. Экспертные системы в химической технологии: Основы теории, опыт разработки и применения. М.: Химия. 1995. 368с.

176. Gareev R., Meshalkin V.P. Selective decompositional thermoeconomics algorithm for synthesis of optimal heat exchanger network //Efficiency, Costs. Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS-95): Proc. Int. Conf. – Istambul, Turkey. 1995. V.1. P. 243-248.

177. Meshalkin V.P. Computer-aided design of the resource-saving refinery processes //Proc. of 1 Europ. Congr. on Chem. Eng. – Florence. 1997. V.4. P. 3055-3058.

178. Егоров С.В., Мешалкин В.П., Сельский Б.Е. Декомпозиционно-координационная концепция управления и оптимизации сложных химико-технологических систем // Теоретические основы химической технологии. 1998. Т.32. №1. С. 82-91.

179. Егоров С.В., Мешалкин В.П., Сельский Б.Е., Занг Н.Х. Системотехнический и архитектурный синтез АСУТП с использованием типовых решений // Приборы и системы управления. 1998. №1. С. 14-19.

180. 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.

181. 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.

182. Клименкова Л.А., Мешалкин В.П. Основы интеллектуального управления химико-технологическими системами. Учеб. пособие НИ РХТУ им. Д.И.Менделеева. Новомосковск. 2001. 95с.

183. Мешалкин В.П., Дови' В., Марсанич А. Принципы промышленной логистики. РХТУ им. Д.И.Менделеева. М. 2002. 722 с.

184. Булкатов А.Н., Бутусов О.Б., Мешалкин В.П. Интегральные индексы как обобщенные показатели математического моделирования нестационарных гидродинамических процессов в аппаратах химической технологии // Известия вузов. Химическая технология. 2002. Т.45. №1. С. 110-116.

185. Клименкова Л.А., Мешалкин В.П. Архитектура и режимы систем ситуационного управления химическими производствами //Интеллектуальные системы: Тр. 5 Междунар. Симп. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2002. С. 355-356.

186. Мага Л., Мешалкин В.П., Дови' В., Соболева И.В. Метод синтеза систем управления ХТП при ограничениях на управляемые переменные // Теоретические основы химической технологии. 2002. Т. 36. № 4. С. 426-432.

187. Мешалкин В.П. Логистическое управление химическими предприятиями // Логинфо. 2002. № 9. С. 39-45.

188. Мешалкин В.П., Клименкова Л.А. Принципы ситуационного управления логистическими цепями химических предприятий // Химическая технология. 2002. № 9. С. 26-31.

189. Пуйджанер Л.К., Мешалкин В.П. Методы логистического управления экономической эффективностью предприятий с периодическими химико-технологическими системами // Химическая технология. 2003. № 4. С. 32-38.

190. Мешалкин В.П., Митин С.Г., Клименкова Л.А. Принципы создания экспертных систем в химической промышленности // Химическая технология. 2004. №2. С. 42-47.
191. Мешалкин В.П., Дли М.И., Гимаров В.А. Динамическая классификация сложных технологических систем. Методы, алгоритмы и практические результаты. М.: Физматлит. 2006. 343 с.
192. Матковский П.Е., Алдошин С.М., Троицкий В.Н., Яруллин Р.С., Смирнов М.Н., Борисов А.А., Мешалкин В.П. Современная энергетика // Альтернативная энергетика и экология. 2007. № 11. С. 25-72.
193. Матковский П.Е., Алдошин С.М., Троицкий В.Н., Яруллин В.С., Смирнов М.Н., Борисов А.А., Мешалкин В.П. Современная энергетика // Машиностроитель. 2008. №2. С. 2-7.
194. Мешалкин В.П., Михайлов С.А. Приоритетные направления инвестирования в области энерго- и ресурсосбережения // Повышение ресурсо- и энергоэффективности: наука, технология, образование: Тр. Междунар. Симп., посвящ. 175-летию со дня рождения Д.И. Менделеева. Т.2. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева. 2009. С. 133-140.
195. Бобков В.И. Оптимизация процесса сушки окатышей при их термической подготовке по критерию энергосбережения // Научные технологии. 2016. Т. 17. № 11. С. 33-37
196. Бобков В.И. Особенности тепловых процессов при агломерации фосфатного сырья // Тепловые процессы в технике. 2017. № 1. С. 40-46.
197. Бобков В.И., Кулага Н.Ф. Модели для описания свойств фосфатного сырья // Успехи современной науки и образования. 2017. Т.4. № 4. С. 73-77.
198. Бобков В.И. Оптимизация химико-технологической системы обжига окомкованного сырья в плотном слое // Автоматизация. Современные технологии. 2017. Т. 71. № 4. С. 157-162.
199. Мешалкин В.П., Образцов А.А. Декомпозиционно-эвристический алгоритм оптимального размещения технологического оборудования

химических производств // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2009. Т.52. №10. С. 102-105.

200. Егоров А.Ф., Савицкая Т.В., Запасная Л.А. Междисциплинарная автоматизированная система обучения на основе сетевых технологий для многоуровневой подготовки химиков-технологов // Открытое образование. 2012. № 6. С. 20-33.

201. Мешалкин В.П., Образцов А.А. Оптимизация компоновки объектов химических производств как задача ресурсосбережения // Логистика и экономика ресурсосбережения и энергосбережения в промышленности («ЛЭРЭП-4-2009»): Сб. науч. Тр. По матер. Междунар. науч.-практ. конф. Самара. 2009. Т.1. С. 168-172.

202. Мешалкин В.П., Образцов А.А., Панченко С.В. Комплекс программ оптимизации компоновки объектов химических производств // Программные продукты и системы. 2009. №3. С. 143-146.

203. Meshalkin V.P. Energy-saving technology performance and efficiency indexes // Chem. Eng. Transactions. 2009. V.18. p. 953-958.

204. Мешалкин В.П., Бутусов О.Б., Гнаук А.Г. Основы информатизации и математического моделирования экологических систем: Учеб. Пособие. М.: ИНФРА-М. 2010. 357с.

205. Мешалкин В.П. Инновационные стратегии управления энергоэффективностью промышленных комплексов // Инновационные химические технологии и биотехнологии материалов и продуктов: Тез. докл. 2 Междунар. конф. Рос. хим. о-ва им. Д.И. Менделеева. М. 2010. С. 67-72.

206. Мешалкин В.П., Бояринов Ю.Г. Полумарковские модели процессов функционирования сложных химико-технологических систем // Теоретические основы химической технологии. 2010. Т.44. №2. С. 198-204.

207. Мешалкин В.П., Михайлов С.А., Балябина А.А. Оценка потенциала энергосбережения в регионах // Менеджмент в России и за рубежом. 2010. №3. С. 52-58.

208. Menshikov V., Meshalkin V., Obraztsov A. Heuristic algorithms for 3D optimal chemical plant layout design // Proc. of 19th Int. Congr. of Chem. and Process Eng. (CHISA-2010), Prague, Czech Rep. – Prague. 2010. V.4. P. 1425.

209. Гартман Т.Н., Советин Ф.С., Лосев В.А. Современный подход к модернизации химических производств на основе применения пакетов моделирующих программ // Химическая техника. 2008. № 12. С. 8-10.

210. Meshalkin V., Obraztsov A. Genetic algorithms for 3D optimal chemical plant equipment plac // ESCAPE20: Proc/ of Symp. – Naples, Italy. 2010. P. 112.

211. Мешалкин В.П. Высокоэнергохимические процессы и аппараты в охране окружающей среды: Учебное пособие. М.: Химия. 2011. 191 с.

212. Ларин Е.А., Мешалкин В.П., Долотовский И.В., Пермин С.М., Дремков Ю.В., Долотовская Н.В. Теоретические и экспериментальные исследования энергоэффективности технологических систем предприятий переработки углеводородного сырья // 19 Менделеевский съезд по общ. и прикл. химии: Тез. докл. - Волгоград: ИУНЛ ВолгГТУ. 2011. Т.3. С. 385.

213. Мешалкин В.П. Методики логистики ресурсоэнергосбережения как инструменты повышения экономической эффективности промышленных производств // Все материалы. Энциклпед. Справочник. 2011. №8. С. 4-16.

214. Гартман Т.Н., Советин Ф.С. Аналитический обзор современных пакетов моделирующих программ для компьютерного моделирования химико-технологических систем // Успехи в химии и химической технологии. 2012. Т. 26. № 11 (140). С. 117-120.

215. Мешалкин В.П. Многоуровневая методология разработки ресурсоэнергоэффективных экологически безопасных технологий переработки техногенных образований и отходов // Ресурсосберегающие энергоэффективные технологии в химической и нефтехимической промышленности: Тез. докл. 3 Междунар. конф. Рос. хим. о-ва им. Д.И. Менделеева . - М.: РХТУ. 2011. С. 68-70.

216. Егоров А.Ф., Савицкая Т.В., Михайлова П.Г. Модели и методы решения задач оперативного управления безопасностью непрерывных

химико-технологических систем ч.1. управление в условиях неопределённости // Проблемы управления. 2005. № 6. С. 50-56.

217. Егоров А.Ф., Савицкая Т.В., Михайлова П.Г. Модели и методы решения задач оперативного управления безопасностью непрерывных химико-технологических систем ч.2. продукционные модели представления знаний в системах поддержки принятия решений // Проблемы управления. 2006. № 3. С. 25-30.

218. Мешалкин В.П., Белозерский А.Ю., Дли М.И. Методика построения комплексной математической модели управления рисками предприятия металлургической промышленности // Прикладная информатика. 2011. №3. С. 100-120

219. Мешалкин В.П., Михайлов С.А., Дли М.И. Прогнозный топливно-энергетический баланс региона как инструмент управления энергосбережением // Энциклопедия инженера-химика. 2011. №8. С. 8-13.

220. Токарев А.Л., Мешалкин В.П., Саломыков В.И. Компьютерно-информационная система учета теплоэнергоресурсов химического предприятия // Информационные системы и модели в научных исследованиях, промышленности, образовании и экологии: Сб. тр. Всерос. науч.-техн. Конф. – Тула: Инновац. Технологии. 2011. С. 10-14.

221. Reverberi A.P., Cerrato C., Meshalkin V.P., Savina Yu.O. Dynamics of a reverse osmosis unit with application to pulsating regimes for process optimization // Теоретические основы химической технологии. 2011. Т.45. №2. С. 204-211.

222. 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.

223. 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.



224. Бобков В.И. Исследование процессов упрочнения и разрушения фосфоритовых окатышей при высокотемпературном обжиге // Химическая технология. 2017. № 9. С. 418-425.

225. Мешалкин В.П., Заходякин Г.В., Ходченко С.М. Методы комбинаторной оптимизации. Метод ветвей и границ в решении задач химической технологии и логистики: Учеб. пособие. - М. : РХТУ им. Д.И. Менделеева. 2013. 83с.

226. Мешалкин В.П., Мошев Е.Р. Автоматизированная система логистического обеспечения технического обслуживания оборудования химических производств // Теоретические основы химической технологии. 2014. Т.48. №6. С. 709 – 718.

227. Мешалкин В.П., Панченко С.В., Широких Т.В., Панченко Д.С. Анализ теплофизических процессов в электротермическом реакторе в приближении сосредоточенных параметров // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ: Тез. докл. конф. 2014. №8 (67). С. 217-219.

228. Бобков В.И. Моделирование технологических процессов при термической подготовке дисперсного фосфатного сырья // Химическая технология. 2016. №6. С. 263-271.

229. Бобков В.И. Моделирование кинетики сушки окомкованного сырья // Тепловые процессы в технике. 2016. №6. С. 272-277.

230. Бобков В.И., Мищенко М.Н. Исследование теплофизических характеристик окомкованного фосфатного материала // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 7-1. С. 26-29.

231. Бобков В.И. Химико-технологические особенности фосфоросодержащих руд и пород // Успехи современной науки. 2016. №6. Том 1. С. 157 – 159.

232. Брагин В.В., Клейн В.И., Солодухин А.А., Стародумов А.В. Влияние влажности окатышей на газопроницаемость слоя и показатели работы обжиговых машин // Сталь. 2006. № 6. с. 31-32.

233. Кафаров В.В., Мешалкин В.П. Диалоговый эвристическо-семантический алгоритм автоматизированного синтеза ресурсосберегающих химико-технологических систем // Доклады Академии наук СССР. 1987. Т. 293. №6. С. 1432-1437.

234. Абзалов В.М., Борисенко Б.И., Брагин В.В., Евстюгин С.Н., Копоть Н.Н., Кретов С.И., Неволин В.Н. Эффективность модернизации фабрики окомкования ОАО “Михайловский ГОК” // Сталь. 2006. № 6. с. 9-10.

235. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Гареев Р.Г., Теляшев Г.Г. Декомпозиционно-термодинамический метод автоматизированного синтеза ресурсосберегающих теплообменных систем // Доклады Академии наук СССР. 1987. Т. 295. №4. С. 923-927.

236. Абзалов В.М., Борисенко Б.И., Брагин В.В., Калинин Ю.П., Кононыхин А.В., Неволин В.Н. Модернизация действующих обжиговых машин // Сталь. 2008. № 12. с. 6-7.

237. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Перлов Н.А. Эвристическо-эволюционный алгоритм оптимальной унификации парка теплообменных аппаратов химического предприятия // Информ. бюлл. СЭВ по хим. промышленности. 1987. № 2. С. 36-40.

238. Гартман Т.Н., Советин Ф.С. Процедура синтеза ресурсосберегающих интегрированных сложных крупнотоннажных химико-технологических систем непрерывного действия // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2012. № 17 (43). С. 103-106.

239. Абзалов В.М., Брагин В.В., Вяткин А.А., Евстюгин С.Н., Лелеко С.Н. Разработка обжиговой конвейерной машины нового поколения // Сталь. 2008. №12. с. 13-14.

240. Kafarov V.V., Meshalkin V.P. Automated design of optimum pipeline in chemical industry // Desalination. 1987. V.66. P. 119-125.

241. Боковиков Б.А., Брагин В.В., Клейн В.И. Влияние усадки слоя на его газодинамическое сопротивление в процессе термообработки на обжиговой машине // Сталь. 2008. № 12. с. 30-34.

242. Абзалов В.М., Брагин В.В., Груздев А.И., Неволин В.Н., Судай А.В. Опыт модернизации обжиговых машин России и стран СНГ // Сталь. 2010. № 9. с. 7-9.

243. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Дюкова Е.А. Принципы разработки семантико-математической модели понимания смысла технологических текстов // Доклады Академии наук СССР. 1989. Т.306. № 4. С. 916-919.

244. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Зархина И.И. Продукционно-фреймовые модели представления знаний для автоматизированного синтеза ресурсосберегающих химико-технологических систем // Доклады Академии наук СССР. 1989. Т. 307. № 3. С. 660-664.

245. Абзалов В.М., Брагин В.В., Евстюгин С.Н., Клейн В.И., Солодухин А.А. Стратегия создания тепловых схем обжиговых конвейерных машин // Сталь. 2010. № 9. с. 10-12.

246. Брагин В.В., Воробьев М.А., Кондраков М.А., Судай А.В., Шахтер О.С. Опыт использования эффективных тягодутьевых установок при производстве железорудных окатышей // Сталь. 2010. № 9. с. 38-40.

247. Яковлев И.И., Буткарев А.П., Борисенко Б.И., Пазынич Г.П. Стабилизация работы отопливаемых секций горна обжиговой машины ОК-520 // Сталь. 2011. № 2. С. 7-12.

248. Meshalkin V.P. Hybrid expert systems in process systems engineering // Intellegente Informationstechnologien in der Entscheidungsfindung: Vortage des 1. Russisch-Deutschen Symp., 4 Int. Forum fuer Informatisierung IRI-95. M. 1995. P. 141-148.

249. Meshalkin V.P., Bessarabov A.M. The computer-aided analysis of efficiently highlevel technologies and choice of their raw resources in a chemical and petrochemical industry // Neue Medien in der Informatik-Aus-und

Weiterbildung: Vortage des 2. Russisch-Deutschen Symp., 5 Int. Forum fuer Informatisierung IRI-96. M. 1996. P. 30-32.

250. Буткарев А.А. Исследование и совершенствование процесса управления термообработкой окатышей на обжиговых конвейерных машинах // Сталь. 2011. № 5. С. 4-8.

251. Буткарев А.А. Особенности практического использования методологии ВНИИМТ для оптимизации теплотехнических схем обжиговых конвейерных машин // Metallurg. 2011. № 4. С. 38-43.

252. Копоть Н.Н., Воробьев А.Б., Гончаров С.С., Буткарев А.А., Буткарев А.П. Сравнительный анализ теплотехнических схем современных обжиговых конвейерных машин // Сталь. 2010. № 3. С. 8-13.

253. Буткарев А.А. Методология комплексного исследования и оптимизации теплотехнических схем обжиговых конвейерных машин // Сталь. 2008. №4. С. 2-9.

254. Мешалкин В.П., Клименкова Л.А. Введение в ситуационное управление химико-технологическими системами: Учеб. пособие / РХТУ им. Д.И.Менделеева. М. 2002. 65 с.

255. Буткарев А.А. Принципы построения оптимальных теплотехнических схем обжиговых машин по критерию минимума расхода электроэнергии // Сталь. 2007. №9. С. 8-14.

256. Буткарев А. А., Буткарев А. П., Зинчук Б.А., Шевченко А.А., Дворниченко И.Ф., Посохов А.В. Разработка технических решений по увеличению производительности обжиговой машины фирмы Лурги // Сталь. 2007. № 6. С. 3-7.

257. Клименкова Л.А., Койфман О.И., Мешалкин В.П. Использование принципов искусственного интеллекта при создании систем управления химическими производствами // Химическая технология. 2004. №1. С. 42-46.

258. Мешалкин В.П. Логистика - организационно-управленческий фактор экономической эффективности химических предприятий // Химическая промышленность сегодня. 2004. № 9. С. 15-19.

259. Буткарев А.А., Буткарев А.П. Реверсирование охлаждающего агента при охлаждении окатышей на обжиговых конвейерных машинах // Сталь. 2005. №4. С. 71-73.

260. Буткарев А.А., Буткарев А.П. Оптимизация параметров переточной системы обжиговых конвейерных машин // Сталь. 2005. №3. С. 109-112.

261. Буткарев А.А., Буткарев А.П., Жилин С.Н. Эффективность использования тепла нагретых газов для охлаждения окатышей на обжиговых конвейерных машинах // Сталь. 2005. №3. С. 106-108.

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

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

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

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

266. Буткарев А.А., Буткарев А.П. Оптимизация параметров процесса термообработки окатышей на конвейерных машинах // Сталь. 2000. №4. С. 10-15.

267. Егоров А.Ф., Савицкая Т.В., Капустин Ю.И., Дударов С.П., Горанский А.В. Организация процесса обучения и контроля знаний с использованием автоматизированного лабораторного комплекса для подготовки химиков-технологов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2006. Т. 12. № 2. С. 477-485.

268. Буткарев А.П., Буткарев А.А., Майзель Г.М., Некрасова Е.В. Математические модели для управления процессом производства окатышей на конвейерной машине // Сталь. 2000. № 3. С. 10-13.

269. Буткарев А.А., Лисиенко В.Г., Майзель Г.М. Моделирование переходных режимов обжига окатышей на конвейерных машинах // Известия ВУЗов. Черная металлургия. 1997. № 5. С. 15-18.

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

271. Леонтьев Л. И. Физико-химические особенности комплексной переработки железосодержащих руд и техногенных отходов // XX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии. Екатеринбург, 2016. С. 92.

272. 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. 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.

273. 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. 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.

274. 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.

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

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

277. Бобков В.И. Проблема наискорейшего нагрева плотного слоя дисперсного материала // Научное обозрение. 2015. №24. С.143-147.

278. Бобков В.И. Энергосбережение в технологии сушки материала в плотном слое на основе интенсификации тепломассообмена // Современные наукоемкие технологии. 2015. № 12-4. С. 585-589.

279. Бобков В.И. Моделирование термически активируемых процессов обжига окомкованного сырья // Тепловые процессы в технике. 2016. №1. С. 42-47.

280. Бобков В.И. Энергосбережение при термической подготовке дисперсного сырья в плотном слое // Энергобезопасность и энергосбережение. 2016. №2. С. 16-20.

281. Бобков В.И. О проблеме переувлажнения сырых окатышей в зоне сушки обжиговой машины конвейерного типа // Электromеталлургия. 2016. №4. С. 20-27.

282. Гартман Т.Н., Курилова А.В. Эмпирический подход к построению математических моделей для прямого цифрового управления действующими производствами // Химическая промышленность сегодня. 2006. № 9. С. 41-50.

283. Бобков В.И. Энергосбережение при сушке окомкованного рудного материала в обжиговой машине конвейерного типа // Энергосбережение и водоподготовка. 2016. №3. С.58-64.

284. Бобков В.И. Исследование процессов спекания фосфоритовых окатышей // Химическая промышленность сегодня. 2016. №8. С. 20 - 28.

285. 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.

286. Энергосбережение в процессах спекания и прокалки при термической подготовке окатышей в плотном слое // Энергосбережение и водоподготовка. 2016. №5. С.56-62.

287. Бобков В.И. Исследование кинетических особенностей сушки окатышей // Электromеталлургия. 2016. №11. С. 23-30.

288. 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. 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.

289. 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. 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.

290. 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. 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.

291. Бобков В.И., Мищенко М.Н. Электропроводность и дилатометрические характеристики фосфоритов // Успехи современной радиоэлектроники. 2017. № 7. С. 61-65.



292. 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. 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.

293. 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. 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.

294. 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.

295. Гартман Т.Н., Бояринов А.И. Комплекс интеллектуальных программ для технологического проектирования химических производств // Доклады Академии наук. 1999. Т. 366. № 4. С. 503-506.

296. 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. 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.

297. Туманов Д.Н., Гартман Т.Н. Комплексный подход к оперативному управлению ресурсами предприятий по производству минеральных

удобрений на базе учета и контроля эксплуатационных затрат // Химическая промышленность сегодня. 2010. № 5. С. 6-14.

298. 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.

299. 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.

300. 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.

301. Мешалкин В.П., Гурьева Л.В., Сельский Б.Е. Модели представления знаний о процедуре технической диагностики отказов теплообменных аппаратов // Теоретические основы химической технологии. 1998. Т. 32. № 2. С. 201-207.

302. Дови В.Г., Мешалкин В.П., Кантюков Р.А., Солисио С., Сиваев С.Б., Ледеява В.А. Стохастический метод синтеза экономически оптимальных химико-технологических систем в условиях неопределенности // Химическая промышленность. 1999. № 8. С. 510-513.

303. 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. Т.5. С.332-335.

304. 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. Т.1. С.180-185.

305. Гартман Т.Н., Левин Б.В., Миронов В.И., Богин И.В. Компьютерное управление произвольными технологическими процессами с использованием

автоматически адаптируемых математических моделей действующих производств // Химическая промышленность сегодня. 2007. № 9. С. 49-56.

306. 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.

307. Мешалкин В.П., Богомолов В.П. Функционально-информационная структура интеллектуальной системы оптимальной компоновки оборудования химических производств // Химическая промышленность. 1990. № 11. С. 691-694.

308. Meshalkin V.P. Knowledge representation models for computer-aided synthesis of multi-item batch process systems //Computer application to batch process-90: Proc. Int. Conf., Cengio, Italy. 1990. P. 19.

309. 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.

310. 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.

311. 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.

312. Кафаров В.В., Мешалкин В.П. Принципы разработки интеллектуальных систем в химической технологии //Доклады Академии наук СССР. 1989. Т. 306. № 2. С. 409-412.

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

314. Мешалкин В.П., Бобков В.И. Свойства веществ, используемых в тепло-технологических аппаратах производства фосфора // Логистика и

экономика ресурсоэнергосбережения в промышленности: Сб. тр. XI Межд. науч.-тех. конф. Тула: Саратов. гос. техн. ун-т. 2017. С. 205-208.

315. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Кобяков А.И., Торопчин В.Д. Алгоритм оптимизации пуска аппаратов с псевдооживленным слоем на основе обобщенных функций // Доклады Академии наук СССР. 1988. Т. 299. № 4. С. 932-937.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**СВИДЕТЕЛЬСТВО**  
о государственной регистрации программы для ЭВМ  
**№ 2017616974**

**Программа для расчёта неоднородного дифференциального уравнения теплопроводности для фосфоритового окатыша**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ») (RU)*

Авторы: *Бобков Владимир Иванович (RU), Мешалкин Валерий Павлович (RU), Филиппов Дмитрий Леонидович (RU)*

Заявка № **2017613914**  
Дата поступления **26 апреля 2017 г.**  
Дата государственной регистрации  
в Реестре программ для ЭВМ **21 июня 2017 г.**



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

 **Г.П. Ивлиев**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017618204

**Программа для расчёта теплоотдачи турбулентного потока  
газа-теплоносителя на границе сферического фосфоритового  
окатыша**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
(ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ») (RU)*

Авторы: *Бобков Владимир Иванович (RU), Мешалкин Валерий  
Павлович (RU), Филиппов Дмитрий Леонидович (RU)*

Заявка № 2017615287

Дата поступления 01 июня 2017 г.

Дата государственной регистрации  
в Реестре программ для ЭВМ 25 июля 2017 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

*Г.П. Излиев* Г.П. Излиев





## ПРИЛОЖЕНИЕ 3

### СПРАВКА

о практическом использовании результатов диссертационной работы  
Бобкова Владимира Ивановича «Методическое и программно-информационное обеспечение принятия решений по оптимизации энергоресурсоэффективности химико-энерготехнологических систем производства фосфоритовых окатышей» представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.01 - «Системный анализ, управление и обработка информации (химическая технология)» (научный консультант - академик РАН Мешалкин В. П.)

Разработанная в диссертационной работе совокупность методов обеспечения ресурсоэнергосбережения в химико-энерготехнологических системах (ХЭТС) производства желтого фосфора практически использовалась в период с 2011 - 2017гг. в ТОО «Казфосфат» «Новоджамбульский фосфорный завод» при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по повышению качества производимой продукции и услуг технологического инжиниринга, предоставляемых предприятием.

Полученные в диссертации научно-практические результаты развивают методический аппарат анализа и оптимизации сложных ХЭТС по критериям энергоресурсоэффективности, успешно разрабатываемых научной школой академика РАН, профессора, д.т.н. В.П. Мешалкина.

Несмотря на то, что в процессе термической подготовки фосфатного сырья для электротермической возгонки желтого фосфора предприятие использует современные компьютерные средства и системы, решение ряда задач повышения энергоэффективности ХЭТС термической переработки сырья на производстве остались нерешенными.

Применение комплексной математической модели ХЭТС термической подготовки фосфатного сырья, предложенной в диссертационной работе, позволило выявить потенциал ресурсоэнергосбережения при обжиге фосфатного сырья, а также систематизировать инженерно-технологические знания о взаимозависимых химико-энерготехнологических процессах (ХЭТП) обжига и повысило результативность конечных результатов деятельности предприятия.

Расчеты, проведенные с использованием разработанных в диссертации математической модели и методов, позволили выявить узкие места в организации процесса научных исследований и разработок, и связанных с ними этапов конструкторской и технологической подготовки производства.

Особый интерес в диссертационной работе соискателя вызывает глава, посвященная исследованию, моделированию и оптимизации ХЭТС агломерации фосфоритов. Агломерация в слое – один из наиболее совершенных в тепловом отношении ХЭТП процессов. При расходе топлива от 3 – 7% шихта доводится до размягчения и частичного оплавления с достижением температур порядка 1500°C в зоне формирования агломерата.

При рациональной организации технологического процесса тепловая энергия может быть регенерирована, что позволяет повысить эффективность её использования примерно на 40%.

При агломерации фосфоритной шихты в слое одновременно протекают различные физико-химические превращения на различных высотах слоя:

- испарение влаги;
- зажигание частиц кокса;
- декарбонизация фосфоритов и другие химические реакции;
- горение кокса и плавление частиц шихты;
- появление аглоспека;
- конденсация паров влаги в нижних слоях.

Все эти процессы в большей степени зависят от условий теплообмена в слое.

Высокая энергоэффективность достигается при горении топлива внутри агломерируемого слоя с большой удельной поверхностью частиц шихты, обеспечивающей



высокую интенсивность теплообмена между газом-теплоносителем и шихтой. В процессе агломерации в слой подаётся воздух для горения кокса и переноса тепловой энергии от нагретых верхних слоёв шихты к нижним. Причём обмен тепловой энергией имеет регенерационный характер, то есть просасываемый через слой теплоноситель передаёт тепло от верхних слоёв к нижним. Зона формирования агломерата перемещается вниз со скоростью, которая определяется условиями теплообмена и скоростью протекания физико-химических превращений.

Таким образом, диссертационная работа Бобкова В.И. имеет несомненное практическое значение для исследования, моделирования и оптимизации сложных ХЭТС термической подготовки фосфатного сырья к электротермической возгонке жёлтого фосфора.

Директор ЖФ ТОО «Казфосфат»

Новошахтинский фосфорный завод



Д.Х. Франгулиди



Открытое акционерное общество  
«УРАЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ МЕТАЛЛОВ»

620062 г. Екатеринбург, ул. Гагарина, 14.  
Тел.: (343) 374-03-91, факс: (343) 374-14-33, e-mail: [uim@ural.ru](mailto:uim@ural.ru)  
[www.uim-stavan.ru](http://www.uim-stavan.ru)

**СПРАВКА**

о практическом использовании основных результатов диссертационной работы  
Бобкова Владимира Ивановича «МЕТОДИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНО-  
ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО  
ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТИ ХИМИКО-  
ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРОИЗВОДСТВА ФОСФОРИТОВЫХ  
ОКАТЫШЕЙ», представленной на соискание учёной степени доктора технических  
наук по специальности 05.13.01 - «Системный анализ, управление и обработка  
информации (в химической технологии)».

Основной теоретическо-прикладной проблемой повышения экономической  
эффективности металлургических и химических производств является проблема  
оптимизации расходов сырья и топливно-энергетических ресурсов. Указанная  
проблема является особенно важной для энергоемких промышленных систем, к  
которым относятся химико-энерготехнологические системы (ХЭС) термической  
обработки сырьевых материалов в специальных обжиговых конвейерных машинах.  
Наиболее энергоёмкими химико-технологическими процессами (ХТП) термической  
переработки сырья являются процессы сушки, диссоциации карбонатов и спекания  
окатышей, определяющими качество готовой продукции – фосфоритовых и  
металлургических окатышей.

Выбор рациональных технологических схем и адаптация технологических  
режимов аппаратов ХЭС к периодически меняющимся свойствами сырья является  
весьма трудоёмкими задачами. Изменения химического или гранулометрического  
состава сырья ХЭС приводят к необходимости проведения многочисленных  
экспериментальных исследований и адаптации технологических режимов работы  
агрегатов.

Экспериментальные исследования очень дорогостоящие, а иногда они и не осуществимы из-за особенностей протекания ХТП при высоких температурах в химически активных средах.

В связи с этим проблема разработки системного подхода к математическому моделированию энергоёмких химико-технологических процессов термической подготовки сырья и оптимизации технологических режимов ХТП, обеспечивающих энергоресурсоэффективность и качество готового продукта, является актуальной.

В диссертационной работе предложены методологические основы принятия решений по обеспечению повышения энергоресурсоэффективности производства фосфоритовых окатышей и оптимальному управлению технологическими режимами конвейерных обжиговых машин, что представляет интерес и для металлургии.

Практическое применение разработанных соискателем методик и алгоритмов в научно – производственной деятельности в ОАО «Уральский институт металлов» позволяет определять теплофизические и физико-химические свойства сырья, а также оптимальные параметры режимов работы действующих обжиговых машин. В частности, используя полученные соискателем результаты, определён оптимальный режим обжиговой машины типа ОК, в которой зона сушки и зона высокотемпературного обжига сужаются на 8 – 9% и на 16 – 18% увеличивается зона рекуперации по сравнению с регламентным распределением зон в стандартной обжиговой конвейерной машине.

Оптимальный технологический режим позволяет сформировать в движущейся на конвейере обжиговой машины многослойной массе окатышей устойчивую тепловую волну, более мощную по сравнению с традиционным режимом, что обеспечивает оптимизацию параметров процессов сушки, диссоциации карбонатов и спекания. Рассчитанные и обоснованные соискателем оптимальные параметры и технологические режимы обеспечивают повышение энергоресурсоэффективности, максимальное сужение горизонтов слоя критического переувлажнения окатышей, достижение средней по слою степени реагирования 0.948, значительное улучшение качества готовых окатышей.

На основании выше изложенного можно сделать следующие выводы:

1) Автором разработана методология системного подхода к описанию физико-химических процессов сложной ХЭТС термической подготовки фосфоритовых окатышей в обжиговой машине на основе использования математической модели зависимости свойств окатышей от характеристик исходного сырья, использования управляющих воздействий на технологический процесс при обжиге окатышей и критериев, определяющих эффективность ХТП - минимизацию расходов топливно-энергетических ресурсов различных видов с обеспечением высокого качества готового продукта. Это позволяет оценить потенциал энергоресурсосбережения в ХЭТС и определить способы его реализации.

2) Полученные в диссертационной работе научно-обоснованные выводы и инженерно-технологические результаты можно использовать для определения оптимальных технологических режимов действующих обжиговых машин конвейерного типа для производства окатышей в металлургии с учетом отличий химического состава исходного сырья.

Научный руководитель института,  
академик Российской Академии наук,  
доктор технических наук, профессор,  
лауреат Государственных премий СССР и РФ,  
премий Правительства РФ в области науки и техники

  
Л.А. Смирнов



## 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.