

На правах рукописи

**Солодухин Андрей Александрович**

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ  
ЗОНЫ ПЕРЕУВЛАЖНЕНИЯ ОКАТЫШЕЙ  
НА ОБЖИГОВОЙ КОНВЕЙЕРНОЙ МАШИНЕ**

**Специальность 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2012

Работа выполнена на кафедре «Теплофизика и информатика в металлургии» ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н.Ельцина» и в ООО «НПВП ТОРЭКС»

**Научный руководитель:** Заслуженный деятель науки и техники РФ,  
профессор, доктор технических наук  
**Ярошенко Юрий Гаврилович**

**Официальные оппоненты:**

**Дмитриев Андрей Николаевич** – доктор технических наук, заведующий лабораторией пирометаллургии восстановительных процессов Института металлургии УрО РАН.

**Кобелев Владимир Андреевич** – кандидат технических наук, исполнительный директор «Научно-инженерного центра подготовки сырья и рудотермических процессов» ОАО «Уральский институт металлов»

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВПО Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

Защита диссертации состоится **«22» июня 2012** года в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.285.05 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н.Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Главный учебный корпус, ауд. I (зал Ученого совета). Тел. (343) 375-95-49

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н.Ельцина».

Автореферат разослан «22» мая 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук,  
профессор

Карелов Станислав Викторович

# 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## 1.1. Актуальность работы

Качественное изменение сырьевой базы основных переделов черной металлургии за счет увеличения в шихте материалов с высокой добавленной стоимостью обусловило повышение требований к металлургическим свойствам железорудных окатышей как для доменного производства, так и для металлизации. Ужесточение требований определяет необходимость корректировок в технологии производства окатышей, начиная со стадии сушки. Опыт эксплуатации действующих обжиговых машин убедительно показывает, что именно эффективность работы зон сушки является определяющим фактором в обеспечении требуемых характеристик окатышей. Задача увеличения производительности эксплуатируемых в России обжиговых машин, в частности, интенсификации режима сушки окатышей в последние десятилетия становится актуальной. Для её решения целесообразно привлечь кинетические закономерности процессов сушки и переувлажнения.

Определение эффективных путей интенсификации производства, с непременным повышением качественных характеристик обожженных окатышей, может быть достигнуто путем детальных исследований процессов сушки окатышей и их переувлажнения методами математического моделирования, которые по сравнению с физическим моделированием обладают очевидными преимуществами в выборе характеристик материала, параметров теплоносителя и схем их взаимодействия.

Результативность мероприятий по модернизации обжиговых машин, проводимых в настоящее время на многих горно-обогачительных комбинатах, и достижение проектных технико-экономических показателей связано в первую очередь с рациональной организацией работы зон сушки.

## 1.2. Цель работы

Целью исследований является разработка способов уменьшения переувлажнения слоя окатышей при различных тепловых схемах зоны сушки обжиговой машины и выработка рекомендаций для фабрик окомкования различных горно-обогачительных комбинатов России. Для достижения указанной цели были выделены следующие задачи:

- развитие математической модели слоевой сушки с учетом протекания в слое процессов переувлажнения, образования свободной влаги и переноса ее по высоте слоя, а также возникновения и существования «дождя» в зоне с продувом теплоносителя;
- исследование закономерностей развития процессов переувлажнения в слое в зоне сушки с помощью адаптированной математической модели с учетом влияния физических свойств сырых окатышей и параметров слоя, а также влияния параметров теплоносителя на характеристики переувлажнения;
- определение возможности уменьшения переувлажнения слоя окатышей на обжиговых машинах, в том числе за счет выбора режима сушки и изменения тепловой схемы, оперируя макропараметрами объекта исследования

(физическими характеристиками газа и материала) как принципиальными характеристиками при изменении схемы термообработки.

– разработка на основании проведенных исследований способы уменьшения переувлажнения слоя окатышей при различных тепловых схемах зоны сушки обжиговой машины и выработать рекомендации для фабрик окомкования различных горно-обогатительных комбинатов России.

*Объект исследования* – технология термообработки железорудных окатышей на обжиговой конвейерной машине.

*Предмет исследования* – процессы сушки и переувлажнения слоя окатышей.

### **1.3. Научная новизна**

– усовершенствовано математическое описание процессов сушки и переувлажнения слоя окатышей на обжиговой машине с использованием современных представлений о поведении влаги;

– впервые описаны условия возникновения потока капельной влаги над слоем при продуве и разработан математический инструмент для оценки влияния различных факторов на интенсивность «дождя» при сушке окатышей продувом теплоносителя;

– установлены закономерности и специальные характеристики процессов переувлажнения, которые затем включены в существующую общую математическую модель термообработки окатышей;

– определены практически применимые условия уменьшения степени переувлажнения окатышей посредством оптимизации тепловой схемы обжиговой машины.

### **1.4. Практическая значимость работы**

Математическая модель термообработки слоя окатышей, дополненная закономерностями сушки и переувлажнения, обеспечила возможность исследования процессов тепло- и массообмена, совершаемых в рамках единого теплового агрегата в соответствии с технологическими стадиями.

### **1.5. Реализация результатов**

Результаты экспериментальных и расчетно-аналитических исследований использованы при разработке технических заданий на модернизацию тепловых схем действующих обжиговых машин ОАО «Михайловский ГОК», ОАО «Карельский окатыш», ОАО «ЕВРАЗ Качканарский ГОК».

Усовершенствованная модель термообработки слоя окатышей применена в расчетах новых тепловых схем обжиговых машин, реализуемых на предприятиях России, Казахстана, Ирана, Индии.

### **1.6. Методы исследования**

Методы исследований базируются на принципах физического моделирования слоевых процессов. Опытнo-промышленный эксперимент технологии спекания выполнен на действующем производстве. При обработке

экспериментальных данных использован расчетно-теоретический анализ, основу которого составили положения теории тепло- и массообмена и теории металлургических процессов, закон сохранения энергии, при этом противоречий известным физическим и химическим положениям установлено не было. Исследования основных закономерностей процесса переувлажнения и масштабные эксперименты, направленные на его минимизацию, выполнены с помощью математической модели, учитывающей известные в исследуемой области закономерности и адаптированной к условиям обжиговой машины.

### **1.7. Публикации.**

По теме диссертации опубликовано 10 статей в изданиях, рекомендованных ВАК, 4 тезиса докладов, получено 2 патента на изобретения.

### **1.8. Структура и объем работы.**

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературных источников из 84 наименований и 2 приложений. Общий объем работы составляет 120 страниц, в том числе 41 рисунок и 7 таблиц.

## **2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность данной диссертационной работы

В **главе 1** представлен анализ проведенных ранее различными авторами исследований процессов, протекающих при сушке железорудных окатышей на обжиговой конвейерной машине. Изучение литературных источников показало, что механизм и количественные характеристики явления переувлажнения, возникающего в определенный период процесса сушки, изучены в недостаточной степени. Увеличение влажности сырых окатышей сверх исходной по ряду причин приводит к их разупрочнению (под действием расклинивающих сил избыточной влаги, размывания и шокового воздействию высокой температуры). В результате развития таких явлений снижается газопроницаемость слоя и падает производительность обжиговой машины.

Отдельные аспекты при решении этих вопросов изучались Юсфиным Ю.С., Майзелем Г.М. и Некрасовой Е.В., Шкляром Ф.Р. и Поляковым В.М., Берманом Ю.А., Коротичем В.И. и др. Анализ литературных данных показывает, что:

- изучение закономерностей сушки и переувлажнения на примере одиночного окатыша или небольшого объема материала не дает строгого представления о протекании этого процесса в реальных условиях термообработки слоя окатышей;
- перенос свободной влаги в агломерационном слое не имеет большого значения в отличие от аналогичного явления, происходящего при сушке окатышей;
- сведения о закономерностях перераспределения влаги по горизонтам слоя вследствие ее испарения и последующей конденсации, а также в виде свободной влаги, носят исключительно качественный характер;

- количественного изучения процесса переувлажнения окатышей в слое до сих пор не проводилось из-за сложности непосредственного измерения таких характеристик, как интенсивность и размер области переувлажнения, количество свободной и испаренной влаги и других;
- попытки создания математических инструментов имеются, но вследствие несовершенств методик исследований, на которых они базируются, требуют существенной корректировки и дополнений в приложении их к слою окатышей.

Решение этих вопросов имеет как научное, так и практическое значение для определения эффективного теплотехнического режима сушки окатышей как с точки зрения ускорения процесса термообработки, так и с точки зрения сохранения качества окатышей. В связи с этим, задачами дальнейших исследований явилось:

- развитие математической модели слоевой сушки с учетом протекания в слое процессов переувлажнения, образования свободной влаги и переноса ее по высоте слоя, а также возникновения и существования «дождя» в зоне с продувом теплоносителя;
- исследование закономерностей развития процессов переувлажнения в слое в зоне сушки с помощью адаптированной математической модели с учетом влияния физических свойств сырых окатышей и параметров слоя, а также влияния параметров теплоносителя на характеристики переувлажнения;
- определение возможности уменьшения переувлажнения слоя окатышей на обжиговых машинах, в том числе за счет выбора режима сушки и изменения тепловой схемы, оперируя макропараметрами объекта исследования (физическими характеристиками газа и материала) как принципиальными характеристиками при изменении схемы термообработки.
- разработка на основании проведенных исследований способов уменьшения переувлажнения слоя окатышей при различных тепловых схемах зоны сушки обжиговой машины и выработать рекомендации для фабрик окомкования различных горно-обогачительных комбинатов России.

**В главе 2** описана физическая модель сушки слоя окатышей в условиях перекрестного тока теплоносителя на обжиговой конвейерной машине. Тепломассообмен в такой системе осуществляется в слое высотой  $H$  и порозностью  $E$ , состоящем из окатышей диаметром  $d_{cp}$  с температурой  $t_0$  и влажностью  $b_0$ . Теплоносителем является воздух, нагретый в зонах обжига, рекуперации или охлаждения, который продувается через слой со скоростью фильтрации  $W_z$ , и в зависимости от источника обладает определенной температурой  $T$ , плотностью  $\rho_z$  и влагосодержанием  $f_z$ .

В качестве основы для математической модели сушки и переувлажнения окатышей принята предложенная Шкляром Ф.Р., Фроловым Ю.А. и другими авторами математическая формулировка задачи сушки агломерационного слоя в перекрестном токе в приближении термически «тонкого» тела:

- материальный баланс переноса влаги в газе и материале

$$-\rho_{м,с} \frac{\partial b}{\partial \tau} = \rho_{г,с} W_z \frac{\partial X}{\partial y};$$

- побудительный механизм переноса влаги

$$\rho_{г,с} W_z \frac{\partial X}{\partial y} = s \cdot g_M \left( \frac{X_n - X}{1 + X} \right);$$

- тепловой баланс материала

$$c_{м,с} \rho_{м,с} \frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha_V (T - t) + q_m;$$

- тепловой баланс газа

$$-c_g W_z \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_V (T - t) - q_g$$

и имеющая граничные условия, учитывающие изменение режимных параметров по длине машины. Здесь  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $b$  – влажность материала, % масс.;  $\tau$  – время, час;  $W$  – скорость фильтрации, м/с;  $X$  – влагосодержание газа, кг<sub>воды</sub>/кг<sub>сухого газа</sub>;  $y$  – координата по высоте слоя, м;  $s$  – удельная поверхность материала в единице объема слоя, м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>;  $g_M$  – коэффициент массообмена, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  – теплоемкость, кДж/кг·К;  $T$  и  $t$  – температура теплоносителя и материала, К;  $\alpha_V$  – коэффициент теплообмена объемный, кДж/м<sup>3</sup>·ч·К;  $q$  – источники теплоты, кДж/м<sup>3</sup>·ч; индексы: <sub>м</sub> – материал, <sub>г</sub> – газ, <sub>с</sub> – сухой; <sub>н</sub> – насыщение.

В алгоритме численного решения применена конечно-разностная аппроксимация, в которой величины расчетного участка по времени  $\Delta\tau$  и высоте  $\Delta y$  выбираются методом последовательных приближений до достижения устойчивости решения задачи. Применительно к слою окатышей представленная модель получила развитие в виде следующих дополнений:

- ограничение предельной влажности окатыша, зависящее от его пористости:  $b \leq b_n = f(\varepsilon)$ ;
- учет доли потока конденсата  $A_K$  из газа в окатыш, определяющей кинетику (торможение) процесса переувлажнения с одной стороны и добавление свободной влаги с другой  $(1 - A_K)$ ;
- введение коэффициента  $k_{св}$  усвоения свободной влаги, имеющейся на данном горизонте слоя, которая может быть адсорбирована окатышами;
- уточнение уравнения теплового баланса за счет оставшейся в газе после конденсации части капельной влаги  $D$ , которая повышает энтальпию газа  $Q_K$  и, соответственно, изменяет энтальпию окатышей  $Q_{ок} = Q_K (1 - D)$ .

Принятые в дополнениях к модели константы определены в процессе её адаптации с использованием результатов физического моделирования.

Математическая модель реализована в виде вычислительной программы, являющейся частью общей модели тепломассообмена в слое окатышей при термообработке их на обжиговой конвейерной машине. Для зоны сушки результаты моделирования выдаются в виде полей переменных по длине машине и высоте слоя: влажности окатышей  $b$ , %; влагосодержания газа  $f_g$ , % объемн.; термограмм процесса взаимодействия окатышей и газа. В программе предусмотрен расчет и графическое представление отдельных значимых

характеристик: средней по высоте слоя степени удаления влаги из окатышей, величины переувлажнения  $\Delta b$ , % на заданных горизонтах слоя, движения границы зоны переувлажнения по высоте слоя, количества «свободной» влаги на горизонтах и на выходе из слоя  $g_{св}$ , % по длине машины и др.

Для сравнительного анализа влияния параметров теплоносителя и слоя на величину переувлажнения введено понятие об *общем интеграле переувлажнения слоя*  $F_{\Sigma}$ , %·м·мин, характеризующем суммарное количество влаги, превысившее ее исходное содержание во всем объеме материала в рассматриваемой зоне.

Аналогичный общему интегралу переувлажнения, но рассчитываемый на критическом участке и в области, близкой к предельному насыщению окатышей, параметр получил наименование «*опасного*» *интеграла переувлажнения*  $F_{он}$ , %·м·мин.

Следствием выноса капельной влаги за пределы слоя в зоне сушки продувом является размытие окатышей верхней части и ощутимое снижение качества конечного продукта. Поэтому полученные на практике сведения о влажности окатышей верха слоя в этой зоне были сопоставлены с результатами расчета интенсивности образования свободной влаги в глубине слоя. Затем с учетом структуры слоя окатышей и физических закономерностей были представлены и математически описаны условия возникновения на поверхности слоя пленки воды, разрыва её и уноса капельной влаги за пределы камеры сушки в виде вертикально восходящего дождя. В результате был получен математический инструмент для оценки влияния различных факторов на интенсивность «обратного дождя» при сушке окатышей продувом теплоносителя.

Представленная математическая модель процессов сушки и переувлажнения слоя окатышей была применена для численного моделирования, которое способно заменить эксперимент на натурном объекте благодаря высокой степени адекватности модели и адаптации её к реальным условиям производства железорудных окатышей.

**Глава 3** посвящена исследованию основных закономерностей процесса переувлажнения, развивающегося при сушке окатышей. В качестве базовых параметров для анализа были определены физические характеристики газа и материала, существенно влияющие на интенсивность процесса переувлажнения, при этом управляемые на действующей обжиговой машине либо определяемые при проектировании новой тепловой схемы. Параметры были сгруппированы по отношению к участникам тепломассообмена: теплоносителю, окатышам и слою в целом. В качестве критериев для оценки интенсивности процесса переувлажнения применены абсолютная величина переувлажнения ( $\Delta b$ ), общий ( $F_{\Sigma}$ ) и «опасный» ( $F_{он}$ ) для целостности окатышей интегралы переувлажнения, а также количество свободной влаги на выходе из слоя  $g_{св}$ .

Основные характеристики теплоносителя – температура  $T_0$  и скорость фильтрации  $W$ , определяются тепловой схемой обжиговой машины и варьируются в ограниченных пределах, установленных при проектировании.



Влагосодержание сушильного агента  $f_0$  в зависимости от источника его образования изменяется от 0,5 до 4 %.

При повышении температуры газа область переувлажнения в слое прямо пропорционально сокращается, что способствует увеличению производительности за счет уменьшения продолжительности сушки. Однако также пропорционально увеличивается интенсивность образования свободной влаги за счет развития процесса конденсации, которая при этом развивается в меньшем объеме слоя, что приводит к снижению качества конечного продукта.

При увеличении скорости фильтрации в любой технологической зоне сушки обжиговой машины снижается суммарное переувлажнение слоя за счет роста интенсивности выноса влаги и ограничения её поглощения окатышами других слоев. Причем, при различной величине скоростей фильтрации в последовательно расположенных секциях сушки отмечается перераспределение в них интенсивности протекания процесса переувлажнения (рис.1).

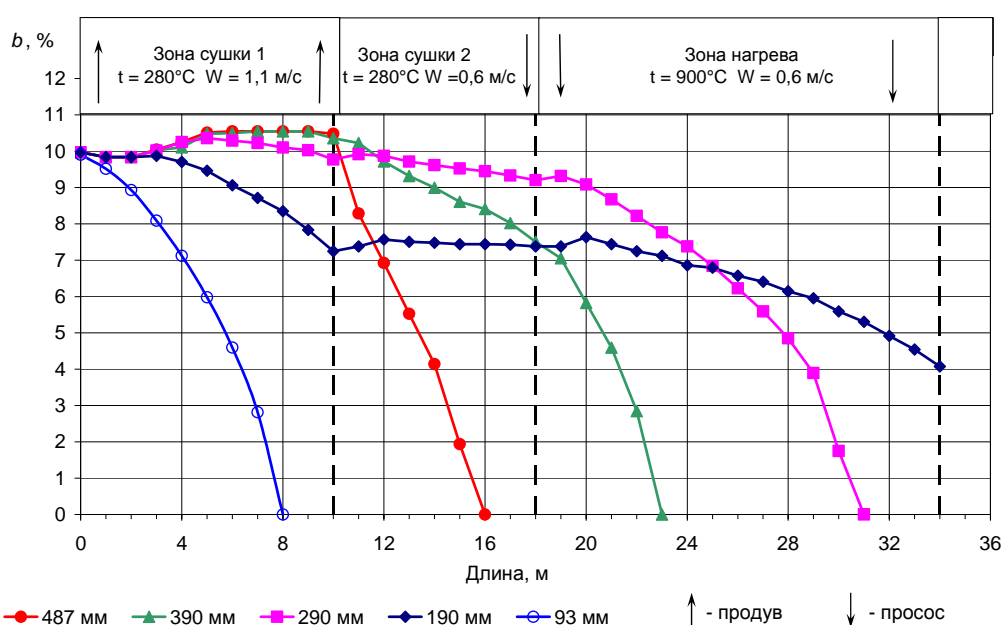


Рисунок 1 – Изменение влажности материала на различных горизонтах от низа слоя по длине машины при повышенной скорости фильтрации в зоне сушки 1

На рисунке 1 отчетливо наблюдается, как эффективно в зоне продува ( $W = 1,1$  м/с) протекает сушка нижнего слоя, за счет чего повышается влагосодержание газа и происходит конденсация влаги на окатышах середины и верха слоя, увеличивая их влажность. Реверс теплоносителя с сохранением температуры позволяет сгладить переход к интенсивной сушке, но даже при этом очень высокая температура в зоне нагрева провоцирует вторичное переувлажнение в середине слоя, здесь уже безопасное.

С увеличением влагосодержания теплоносителя линейно возрастают и суммарное переувлажнение и количество свободной влаги, что накладывает ограничение по использованию горячего, но влажного теплоносителя из зон нагрева и обжига в качестве сушильного агента при организации тепловой схемы.

Вторую группу базовых для настоящего исследования параметров составили характеристики исходных окатышей: средний диаметр  $d_{cp}$ , пористость  $\varepsilon$ , влажность  $b_0$  и начальная температура  $t_0$ .

Результаты численного моделирования процессов, протекающих при сушке окатышей различного размера исключительно «прососом» теплоносителя с  $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ , подтвердили справедливость выдвинутой гипотезы о влиянии удельной поверхности слоя на развитие процессов переувлажнения. Увеличение  $d_{cp}$  окатышей в практическом диапазоне 10 - 16 мм приводит к уменьшению образования свободной влаги  $g_{св}$  более чем в два раза, а суммарное переувлажнение слоя  $F_{\Sigma}$  уменьшается всего на 10 отн.% (рис.2).

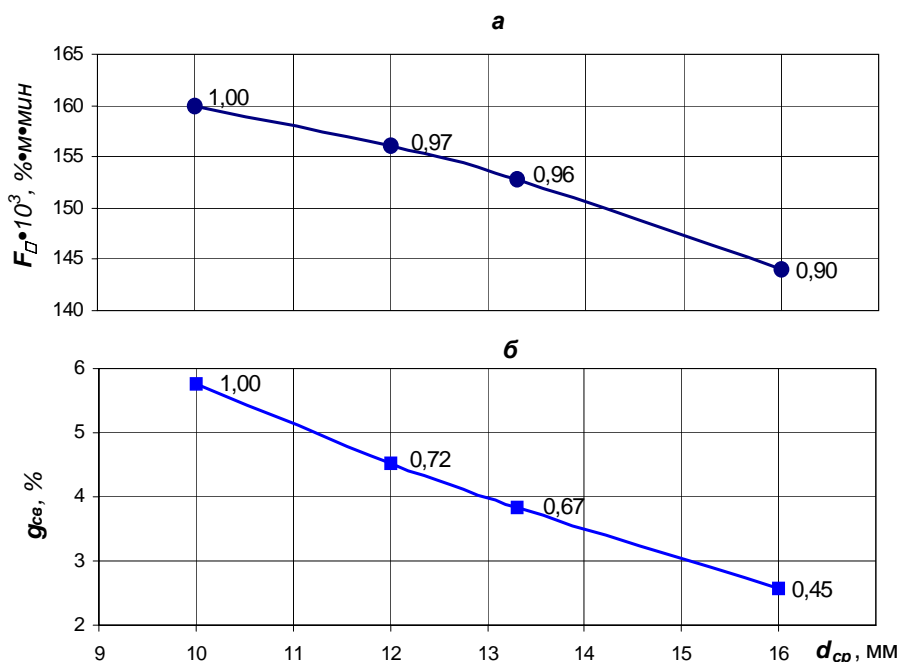


Рисунок 2 – Влияние среднего диаметра окатышей на характеристики переувлажнения ( $H = 360$  мм); *а*) суммарное переувлажнение слоя; *б*) выход свободной влаги  
Цифры у точек – относительные значения

Аналогичные расчеты для условий постепенного подъема температуры газа подтвердили сложный характер влияния размера окатышей на кинетику образования и величину области переувлажнения вследствие наложения процессов массообмена и теплообмена, протекающих в слое по различным законам (рис.3).

В таком случае, при  $d_{cp} = 10$  мм в нижней части слоя имеются две области предельного переувлажнения, а для крупных окатышей величина и время существования вторичного переувлажнения заметно уменьшается, что объясняется снижением, интенсивности массообмена (испарения и конденсации), вследствие уменьшения удельной поверхности материала.

Характер влияния начальной влажности окатышей на развитие процессов переувлажнения в слое в значительной степени зависит от ее взаимосвязи с пористостью и величиной предельного увлажнения ( $\Delta b_{пред}$ ). Модельные исследования такой зависимости при условии ограничения  $\Delta b_{пред}$  показали, что начальная влажность окатышей слабо влияет на суммарное переувлажнение слоя

и количество образующейся свободной влаги. Однако отмеченная выше взаимосвязь, определяемая свойствами частиц концентрата и условиями окомкования, представляет серьезный практический интерес и подлежит дополнительному исследованию.

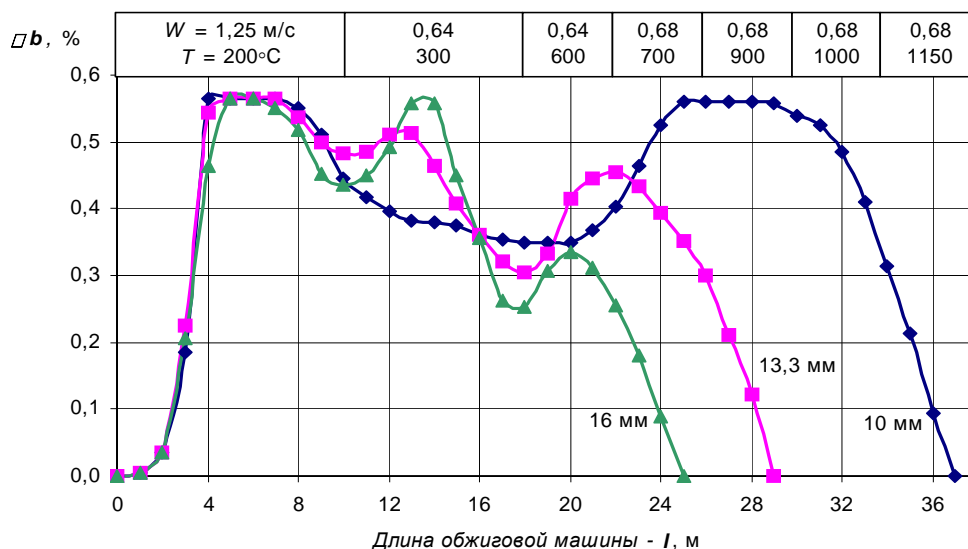


Рисунок 3 – Изменение величины переувлажнения в нижней части слоя окатышей различного диаметра по длине машины при сушке прососом с постепенным повышением температуры теплоносителя  
Цифры у кривых – средний диаметр окатышей

Численное моделирование процессов сушки и конденсации влаги с повышением начальной температуры окатышей от 10 до 40 °C, определило фактор практически полного подавления конденсации влаги и процесса переувлажнения в слое высотой до 400 мм. Причем прогрев должен быть осуществлен по всей высоте слоя, а не только на его поверхности.

Исходные окатыши, будучи загруженными на обжиговую машину, формируют новый объект – неразрывный слой окатышей с индивидуальными характеристиками: высотой, порозностью, удельной поверхностью и др.

Увеличение высоты слоя сырых окатышей ( $H$ ) является наиболее важным фактором улучшения технико-экономических показателей работы обжиговых машин. Однако в практике её ограничивают на уровне около 350 мм, обосновывая, как правило, нестабильностью хода процесса термообработки высокого слоя.

Модельные исследования показали, что увеличение высоты слоя сырых окатышей более 300 мм резко усиливает его суммарное переувлажнение. Суть обнаруженной закономерности состоит в увеличении площади поверхности материала в слое с ростом его высоты, как и при снижении диаметра окатышей, рассмотренном ранее.

Поскольку удельная поверхность окатышей  $s = 6(1-E)/d$ , то при условии постоянной порозности слоя ( $E = \text{const}$ ) соотношение  $H/d$  определяет общую поверхность окатышей на 1 м<sup>3</sup> слоя. Однако количественное влияние  $H$  и  $d$  на развитие процесса переувлажнения отличается существенно (рис.4), так как

ввиду сложного характера теплообмена в неподвижном слое, увеличение его высоты создает специфические условия для конденсации влаги.

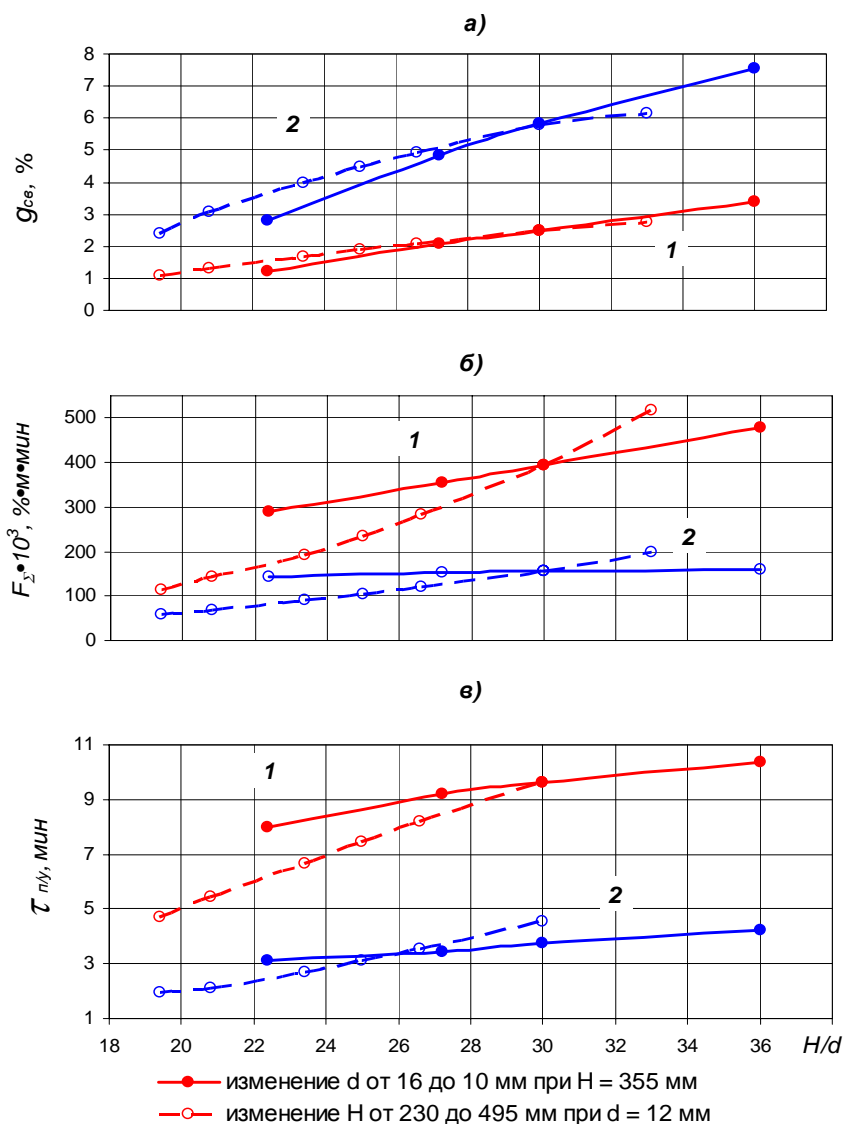


Рисунок 4 – Зависимость характеристик переувлажнения от общей поверхности окатышей в слое при различной температуре теплоносителя в зоне сушки 1  
 1 –  $T_{Cl} = 200^\circ\text{C}$ ; 2 –  $T_{Cl} = 300^\circ\text{C}$ ; а) выход свободной влаги; б) суммарное переувлажнение слоя; в) время нахождения слоя в переувлажненном состоянии

Исследовано также экстремальное проявление переувлажнения в зоне сушки продувом, связанное с накоплением влаги в верхних частях слоя и даже её выносом на поверхность слоя. Расчеты показали, что уменьшение толщины пленки воды (от 2,5 до 0,7 мм) эффективно происходит при снижении температуры теплоносителя (от 340 до 220 °C), что, однако ограничено необходимостью прогрева слоя для дальнейшей термообработки. Количественная оценка подтвердила, что более практически применимо увеличение скорости фильтрации теплоносителя, при котором повышаются интенсивность испарения водяного пара и вероятность уноса более крупных капель воды. Очевидно, что применение для сушки продувом теплоносителя с повышенным влагосодержанием, например из зоны обжига ( $f_2 = 4 \%$ ),

способствует усилению конденсации паров на верхних горизонтах слоя (увеличению толщины пленки до 3,5 мм) и резкому увеличению интенсивности «дождя».

Управление интенсивностью поверхностного переувлажнения в зоне сушки продувом с помощью представленных способов позволит избежать разупрочнения окатышей поверхностного слоя, составляющих до 5 % от всего объема материала.

**Глава 4** посвящена разработке способов уменьшения переувлажнения в зоне сушки при различных схемах подачи теплоносителя и соотношении длин технологических секций, а также конкретных рекомендаций для действующих обжиговых машин.

Интенсивность переувлажнения окатышей в слое, как это было показано в предыдущем разделе, зависит от многих факторов. Однако возможность управления наиболее влиятельными параметрами, такими как диаметр окатышей, высота слоя, температура и скорость фильтрации теплоносителя ограничена по экономическим или техническим соображениям. В связи с этим наиболее перспективным мероприятием по подавлению переувлажнения является повышение температуры загружаемых на обжиговую машину сырых окатышей, при котором создаются условия, препятствующие конденсации испаренной в нижележащих горизонтах слоя влаги и способствующих выносу ее за пределы слоя. Сущность представленных в главе способов состоит в реализации такого мероприятия для различных схем подачи теплоносителя.

Первым способом является выделение камеры предварительного подогрева (КПП) перед зоной сушки (схема с двумя реверсами теплоносителя), а основной задачей разработки способа становится определение оптимального режима работы этой камеры и всех зон сушки в целом.

Для оценки эффективности работы КПП при различных тепловых схемах зоны сушки проведено численное моделирование. Расчеты произведены при следующих параметрах работы обжиговой машины: скорость движения материала  $U = 2,9$  м/мин, высота слоя сырых окатышей  $H = 360$  мм, высота слоя постели  $H_{II} = 80$  мм, исходная влажность  $b_0 = 9,6$  %, предельное переувлажнение  $\Delta b_{пред} = 0,55$  %. Сравнение проводилось для двух схем подачи теплоносителя: обычная схема «продув \ просос» с реверсом на 10 метре и схема с камерой предварительного подогрева работающей на просос и установленной перед первой секцией продува (рис.5). Для схемы без КПП характеристики переувлажнения:  $F_{\Sigma} = 209 \times 10^{-3}$  %·м·мин,  $F_{on} = 49 \times 10^{-3}$  %·м·мин,  $g_{cs} = 2,1$  %, а для схемы с КПП  $F_{\Sigma} = 74 \times 10^{-3}$  %·м·мин,  $F_{on} = 0$  %·м·мин,  $g_{cs} = 0$  %. Эффективность сушки  $\varphi_{C1}$  увеличивается с 26,9 до 29,8 %.

Из сопоставления рисунков 5-а и 5-б следует, что при наличии КПП к моменту начала продува слой уже подогрет по всей высоте, причем его нагрев осуществляется не только газом, но и за счет тепла, выделяющегося при конденсации влаги. В меньшей степени прогрет верх слоя, где идет испарение, и низ, куда еще не дошел фронт конденсации при прососе газа на предыдущей стадии термообработки окатышей. Под поверхностью же слоя (на глубине

90 мм) температура окатышей достигает и превышает 40 °С, а в середине слоя – 34 °С. Именно поэтому далее при продуве в зоне сушки 1 на этих горизонтах переувлажнение развивается значительно слабее, чем в случае отсутствия камеры предварительного подогрева, а на верхнем горизонте даже не начинается.

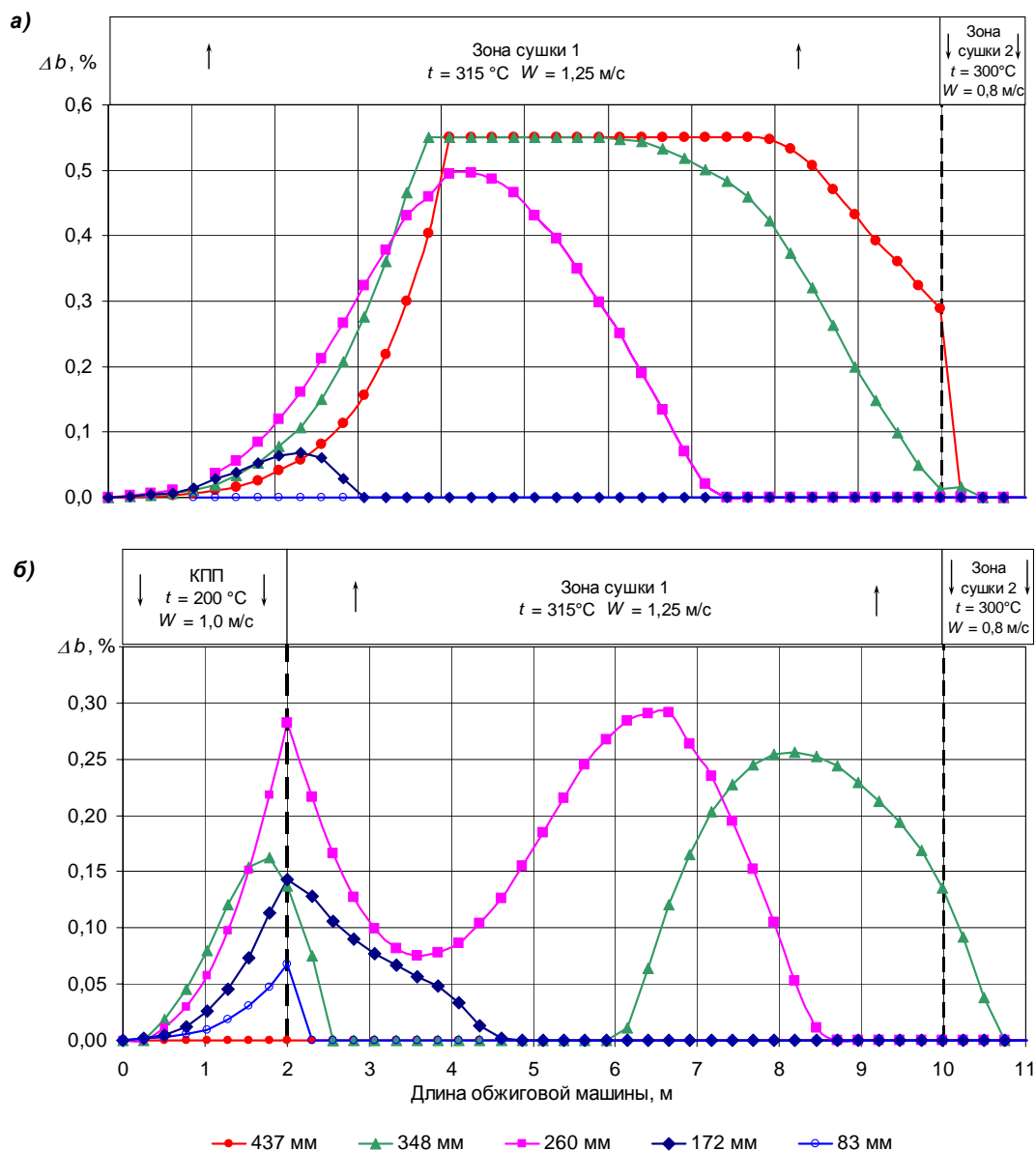


Рисунок 5 – Изменение величины переувлажнения на различных горизонтах слоя по длине машины; а) – действующая схема зоны сушки; б) – с камерой предварительного подогрева

Очевидно, что принятые для сравнительных расчетов параметры КПП (длина камеры  $l$ , температура и скорость фильтрации теплоносителя) следует выбирать исходя из достижения максимальной эффективности предварительного подогрева. В качестве обобщенного критерия для камеры предварительного подогрева предложено использовать количество теплоты, введенное в слой на единицу массы окатышей ( $q_{\text{кпп}}$ , кДж/кг). Оказалось, что оптимальная величина  $q_{\text{кпп}}$  может быть одинаковой при различных значениях, определяющих ее частных параметров:

$$q_{кпп} = \frac{60c_z \cdot W \cdot T \cdot l}{\rho_{сл}^{6л} \cdot U \cdot H} = \text{idem},$$

где  $\rho_{сл}^{6л}$  – насыпная плотность слоя сырых окатышей, кг/м<sup>3</sup>;

Расчетами было определено максимальное удельное количество тепла на камеру предварительного подогрева, при котором в самой камере еще не развивается переувлажнение ( $g_{св} = 0$  и  $F_{он} = 0$ ), а в первой зоне сушки создаются условия, при которых переувлажнение не достигает определенного опасного значения.

Необходимо заметить, что интенсифицировать работу КПП целесообразно только до предела, после которого значительное переувлажнение нижней части слоя может развиваться в самой камере (см. рис.5-б). Как было показано ранее, такой предел определяют характеристики материала и теплоносителя. Поэтому аналогично определению базовых закономерностей были найдены функциональные зависимости оптимальной величины  $q_{кпп}$  от высоты слоя сырых окатышей, влагосодержания теплоносителя и начальной температуры сырых окатышей.

Так в диапазоне изменения высоты слоя  $H = 350 - 550$  мм и при начальной температуре сырых окатышей  $t_0 = 20$  °С установлено соотношение справедливое в области исследованных характеристик слоя и режима:  $q_{кпп} = 1,27(H - 200)^{0,45}$ . При изменении влагосодержания теплоносителя в возможных на практике пределах от 1 до 4 об.% количество теплоты на КПП следует изменять обратно пропорционально на величину 10 - 12 отн.% на каждый 1 об.% влажности теплоносителя. Относительно влияния температуры сырых окатышей на величину  $q_{кпп}$  следует учитывать, что при достижении средней температуры окатышей в конце КПП  $t_{ср}^{кпп} = 30$  °С образование свободной влаги в зоне сушки продувом ликвидируется полностью, но при этом в самой камере максимальное переувлажнение достигает предела 0,5 %. Поэтому, исходя из опасности «перегрева» слоя, для высоты слоя  $H = 400$  мм и в диапазоне  $t_0 = 10 - 35$  °С получено соотношение:  $q_{кпп} = 3,07(40 - t_0)^{0,5}$ , кДж/кг. В таблице 1 приведены оптимальные области значений параметров КПП для различной начальной температуры окатышей.

Таблица 1

Оптимальная область значений параметров камеры предварительного подогрева в зависимости от начальной температуры сырых окатышей

$t_0$	$W$	$T'$	$l$	$q_{кпп}$	$t_{ср}^{кпп}$	$\Delta t$	Примечания
°С	м/с	°С	м	кДж/кг	°С	°С	
10	0,7÷0,8	80÷120	4	16,9	23,3	13,3	$T > 120^\circ\text{C}$ недопустима $l = 2$ м недостаточна
20	0,5÷0,75	100÷200	2÷4	13,8	31,4	11,4	$T > 200^\circ\text{C}$ снижает эффективность КПП
30	0,5÷1,0	100÷220	2÷4	9,7	37,6	7,6	$q_{кпп} > 10$ кДж/кг при $T = 200^\circ\text{C}$ приводит к переувлажнению низа слоя

Таким образом, показано, что количество тепла, которое получает 1 кг окатышей в камере предварительного подогрева, является управляемым

параметром. Проектирование КПП следует выполнять в соответствии с изложенными в работе закономерностями, которые оформлены в качестве изобретения, позволяющего существенно улучшить качество обожженного продукта.

Реализация описанного способа возможна в рамках комплексной модернизации тепловой схемы существующих обжиговых машин, однако интенсифицировать процесс сушки существенно путем организации еще одного реверса теплоносителя невозможно, так как реверсирование само по себе замедляет процесс сушки слоя в целом.

Второй способ подавления переувлажнения относится к тепловой схеме с одним реверсом теплоносителя в зоне сушки, при которой параметры в первой секции должны быть оптимизированы так, чтобы она выполняла функцию предварительного подогрева и только предотвращала интенсивное переувлажнение во второй секции.

В качестве базовой конструкции обжиговой машины для определения оптимального соотношения зон и параметров теплоносителя с одним реверсом

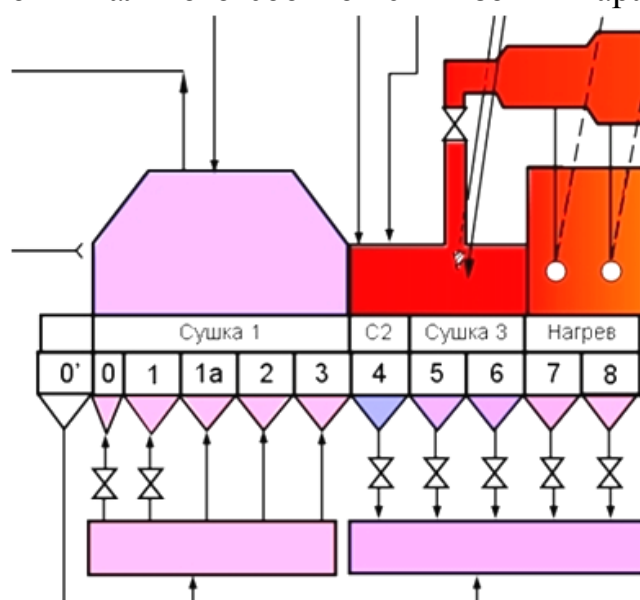


Рисунок 6 – Схема подачи теплоносителя в зоны сушки и нагрева ОКМ-520 (C2 – секция сушки 2; 0-8 – номера газоподогревателей)

была принята схема действующей ОКМ-520, в которой первая секция зоны сушки продувом имеет длину 18 м, а теплоноситель в эту секцию подается с температурой 250 - 350 °С и скоростью фильтрации 1,0 - 1,5 м/с (рис.6).

Таким образом, удельный расход тепла в базовой схеме составляет от 100 до 300 кДж/кг окатышей, на порядок больше, чем оптимальное значение для камеры предварительного подогрева при схеме сушки «просос / продув / просос», что обусловило значительную величину переувлажнения и проблемы с качеством продукции.

Расчеты с использованием математической модели были проведены для вариантов сокращения существующей зоны продува до 2, 4 или 6 м и присоединении оставшейся ее части к сушилке 2. Параметры работы секций сушки в расчетах были приняты идентичными действующим на производстве, а для измененных секций – реально достижимыми по техническим возможностям ( $U = 2,9$  м/мин,  $H = 400$  мм,  $H_{II} = 90$  мм,  $t_0 = 20$  °С;  $T_{CI} = 280$  °С,  $W_{CI} = 1,5 \div 1,8$  м/с,  $W_{C2} = 0,85 \div 1,38$  м/с,  $W_{C3} = 0,7$  м/с). Результаты расчетов представлены в таблице 2.

Здесь  $\Delta L_{ппу}$  – длина существования предельного переувлажнения, м, то есть разница между координатами по длине машины возникновения  $L'_{ппу}$  и завершения  $L''_{ппу}$  предельного переувлажнения окатышей на любой высоте слоя;



$L''_{ny}$  – координата завершения зоны переувлажнения, м;  $g_{св}^{верх}$  и  $g_{св}^{с/п}$  – выход свободной влаги на верху слоя и на границе слой/постель; индексы при эффективности сушки  $\varphi$  и влажности окатышей  $b$ : 290, 390 – координаты по высоте слоя, мм; 18 - 30 – координаты по длине машины, мм.

Таблица 2

Влияние соотношения параметров секций 1 и 2  
зоны сушки обжиговой машины на показатели сушки и переувлажнения

№ варианта			601	743	744	745	746	747	748	749	750	751	752	753	754	755
Исходные данные	$L_{C1}$	м	18	6				4				2				0
	$L_{C2}$	м	4	16				18				20				22
	$W_{C1}$	м/с	1,5	1,5	1,5	1,6	1,8	1,5	1,5	1,6	1,8	1,5	1,5	1,6	1,8	
	$W_{C2}$	м/с	0,85	0,85	1,33	1,3	1,22	0,85	1,36	1,33	1,29	0,85	1,37	1,36	1,34	1,38
	$q_{C1}$	кДж/кг	263	88	88	94	105	58	58	62	70	29	29	31	35	0
Результаты расчетов	$F_{\Sigma}$	%·м·мин	0,295	0,202	0,185	0,185	0,182	0,173	0,123	0,123	0,122	0,295	0,130	0,119	0,101	0,218
	$F_{оп}$	%·м·мин	0,050	0,033	0,032	0,032	0,033	0,015	0,010	0,012	0,015	0,045	0,009	0,006	0,002	0,040
	$L''_{ny}$	м	14,9	8,8	7,7	7,5	7,3	10,7	7,1	6,8	6,3	17,9	8,9	8,6	8,0	10,9
	$g_{св}^{верх}$	%	1,16	0,97	0,97	0,95	0,93	0,23	0,23	0,50	0,69	0	0	0	0	0
	$\varphi_{\Sigma}^{18}$	%	61,4	49,5	67,2	68,4	69,9	44,0	65,0	65,1	66,0	41,3	65,0	65,0	65,1	70,0
	$\varphi_{\Sigma}^{22}$	%	74,0	59,3	81,3	82,2	82,8	53,6	78,5	78,4	79,0	50,7	78,2	78,1	78,0	83,0
	$\varphi_{\Sigma}^{30}$	%	97,0	74,8	95,4	96,5	97,4	68,7	90,9	91,0	92,1	65,7	90,0	90,0	90,0	93,7
	$b_{390}^{22}$	%	6,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	$b_{290}^{22}$	%	2,2	6,8	0	0	1,8	7,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	$\varphi_{390}^{22}$	%	36,3	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	$\varphi_{290}^{22}$	%	77,7	24,2	100	100	81,8	23,2	100	100	100	100	100	100	100	100
	$L'_{ппу}$	м	4,0	4,0	4,0	3,8	3,4	4,0	4,0	3,8	3,4	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0
	$L''_{ппу}$	м	7,5	6,0	6,0	6,0	6,0	4,0	4,0	4,0	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,5
	$\Delta L_{ппу}$	м	3,5	2,0	2,0	2,2	2,6	0,0	0,0	0,3	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	2,5
	$g_{св}^{с/п}$	%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,007	0,001	0	0	2,95

Из анализа полученных данных следует, что при уменьшении длины зоны сушки 1 и, как следствие, значительном снижении в ней удельного расхода тепла эффективность сушки верхней части слоя на 18-м и 22-м метре по сравнению с базовой тепловой схемой значительно повышается. И к началу секции сушки 3, куда необходимо подавать высокотемпературный теплоноситель, верх слоя приходит всегда высушенным ( $b_{390}^{22}$ ), а, следовательно, опасность шокового разрушения окатышей отсутствует. Однако оптимальный диапазон удельного количества тепла, подаваемого в секцию сушки 1, при котором размеры области суммарного и опасного переувлажнения минимальны, а предельное переувлажнение и образование свободной влаги отсутствует, составляет

35-60 кДж/кг, что в 2-3 раза больше, чем для камеры предварительного подогрева в схеме с двумя реверсами. Объясняется это условиями подвода теплоносителя к сырым окатышам: при прососе (КПП) – напрямую, а при продуве – через колосники и донную постель, на нагрев которых тратится значительное количество тепла.

В качестве перспективы: подогрев постели (до уровня температуры теплоносителя в коллекторе секции сушки 1) и снижение температуры теплоносителя в начале зоны сушки 2, приводят однореверсную схему к параметрам схем с камерой предварительного подогрева. При этом экономически нецелесообразная зона продува сокращается и становится достижима высота слоя сырых окатышей до 550 мм.

Закономерности процессов сушки и переувлажнения окатышей, изученные в настоящей работе, применены при модернизации тепловых схем обжиговых машин. Так, в частности, на основе модельного анализа работы обжиговой машины ОКМ-520 ОАО «Карельский окатыш» для различных схем зон сушки и нагрева были определены возможности и пределы повышения производительности машины, представленные руководству предприятия в виде вариантов реконструкции с различными капитальными затратами и экономическим эффектом. Принятый для реализации вариант реконструкции с сокращением длины зоны с продувом теплоносителя, обеспечил увеличение производительности на 3,5 %, снижение расхода топлива на 4,5 % и сокращение выбросов дымовых газов на 9 %.

## **ОБЩИЕ ВЫВОДЫ**

В диссертационной работе, посвященной разработке способов управления процессом переувлажнения на обжиговой конвейерной машине, получены следующие основные научные и практические результаты:

1. Сформулирована физическая модель процессов сушки, переувлажнения, образования и поведения свободной влаги в слое и разработана математическая модель сушки слоя окатышей, включающая материальные и тепловые балансы материала и газа. Осуществлено развитие существующей математической модели сушки слоя с учетом кинетики процесса переувлажнения и переноса свободной влаги в слое и за его пределами. Модель адаптирована к условиям зон сушки действующей обжиговой машины ОК-520.
2. Введены специальные характеристики для сравнительного анализа влияния параметров теплоносителя и слоя на общую величину зоны переувлажнения – суммарное за время существования переувлажнение слоя ( $F_{\Sigma}$ ), опасное для целостности окатышей переувлажнение слоя ( $F_{on}$ ) и интенсивность образования свободной влаги ( $g_{ce}$ ). Программная реализация адаптированной математической модели позволила получить результаты моделирования процесса сушки по длине машины и высоте слоя: влажности окатышей, влагосодержания газа, термограмм окатышей и газа.
3. Исследованы и обобщены закономерности процессов сушки и переувлажнения окатышей по группам определяющих факторов: параметры

теплоносителя, индивидуальные свойства сырых окатышей и параметры слоя окатышей. Температура, скорость фильтрации и начальное влагосодержание теплоносителя, ввиду их прямого влияния на интенсивность влагообмена и условия конденсации в слое теплоносителя, однозначно определяют процесс переувлажнения окатышей.

4. Выявлены особенности влияния размера и начальной влажности окатышей на основные характеристики переувлажнения, обусловленные наложением процессов массообмена и теплообмена, а также взаимосвязью пористости и величины предельного увлажнения. Показано, что температура исходных окатышей является наиболее действенным фактором подавления конденсации влаги и процессов переувлажнения в слое.
5. Определена степень усиления суммарного переувлажнения слоя при увеличении его высоты, необходимом для интенсификации термообработки окатышей в целом, вследствие создания особенных условий для конденсации влаги в слое за счет сложного характера теплообмена в неподвижном слое. Выявлены возможности подавления отрицательного воздействия интенсификации термообработки путем согласования параметров теплоносителя, производительности обжиговой машины и соотношения площадей технологических зон.
6. Показано, что уменьшение переувлажнения в слое может быть достигнуто путем повышения температуры загружаемых на машину сырых окатышей или созданием условий, препятствующих конденсации и способствующих выносу влаги за пределы слоя.
7. Разработаны способы организации перед зоной сушки камеры предварительного подогрева и определены параметры её работы. В качестве обобщенного критерия эффективной работы камеры предварительного подогрева следует использовать количество тепла, введенное в слой на единицу массы окатышей. Способ сравнительно малозатратен и предлагается для действующих обжиговых машин. Второй способ реализуется за счет сокращения длины зоны сушки 1 с продувом теплоносителя и выбора оптимального режима работы этой зоны, при котором слой окатышей подготавливается к эффективной сушке в основной зоне сушки 2 с исключением переувлажнением.
8. Определено, что подогрев постели и снижение температуры теплоносителя в начале зоны сушки 2, позволят сократить экономически нецелесообразную зону продувом и увеличить высоту слоя сырых окатышей до 500 – 550 мм.
9. Применены на практике результаты экспериментальных и расчетно-аналитических исследований, использованные при разработке технических заданий на модернизацию тепловых схем обжиговых машин ОК-520 (ОАО «Михайловский ГОК»), ОК-536 (ОАО «Карельский окатыш») и ОК-228 (ОАО «Качканарский ГОК»), а также в тепловой схеме новой обжиговой машины МОК-592 строящегося технологического комплекса на ОАО «Михайловский ГОК».

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основное содержание работы отражено в следующих печатных работах в научных изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Особенности слоевой сушки железорудных окатышей./ В.И.Клейн, А.В.Кононыхин, В.Е.Мальцева, А.А.Солодухин // Сталь-2002 г.-№4,-с.13- 16.
2. Характер разрушения железорудных окатышей в процессе интенсивной сушки / В.М.Абзалов, А.В.Кононыхин, Г.С.Лихачев, А.А.Солодухин // Сталь – 2003 - №1 - с.20 – 22.
3. Анализ возможных путей совершенствования работы зоны сушки окатышей на конвейерных машинах / Б.А.Боковиков, Б.И.Борисенко, В.И.Клейн, Г.М.Майзель, А.А.Солодухин // Сталь – 2003 - №9 - с.17 – 20.
4. Механизм формирования области переувлажнения окатышей в зоне сушки обжиговой конвейерной машины / Б.А.Боковиков, В.И.Клейн, В.М.Малкин, А.А.Солодухин, Ю.Г.Ярошенко // Сталь - 2003 г. - №9, - с.20 – 23.
5. Основные технические решения по дальнейшему совершенствованию тепловой схемы обжиговых машин ОК-310М / В.М.Абзалов, А.В.Кононыхин, Ю.Г.Макаров, А.А.Солодухин // Сталь – 2003 - №9 - с.24-25.
6. Анализ механизма переувлажнения поверхности слоя при сушке окатышей на обжиговой конвейерной машине / А.А.Авдеенко, Б.А.Боковиков, В.М.Малкин, А.А.Солодухин, Ю.Г.Ярошенко // Сталь-2005 г.-№2, -с.28 - 30.
7. Интенсификация процесса сушки окатышей на обжиговых конвейерных машинах / В.М.Абзалов, Б.И.Борисенко, В.Н.Неволин, А.А.Солодухин // Сталь – 2006 - №6 - с.28 – 30.
8. Влияние влажности окатышей на газопроницаемость слоя и показатели работы обжиговых машин / В.В.Брагин, В.И.Клейн, А.А.Солодухин, А.В.Стародумов // Сталь – 2006 - №6 - с.31 – 32.
9. Эффективность работы зон сушки обжиговых машин / В.М.Абзалов, В.В.Брагин, В.И.Клейн, А.А.Солодухин // Сталь - 2008г. - №12 - с.25 – 27.
10. Математическая модель обжиговой конвейерной машины как инструмент для оптимизации тепловой схемы агрегата. / Б.А.Боковиков, Г.М.Малкин, В.В.Брагин, М.И.Найдич, А.А.Солодухин // Сталь – 2010 - №9 - с.33 – 37.

В тезисах докладов:

- 11.«Обжиговая машина нового поколения для производства окатышей с высокими металлургическими свойствами» / Брагин В.В., Солодухин А.А., Швыдкий В.С., Ярошенко Ю.Г. // международная научно-техническая конференция «Теория и практика производства чугуна» - 2004 - с.196 – 200.
- 12.«Оптимизация высоты слоя на обжиговой машине в зависимости от переувлажнения окатышей при сушке» / Евстюгин С.Н., Солодухин А.А., Боковиков Б.А // международная научно-практическая конференция «Творческое наследие Б.И.Китаева» - 2009г. - с.181 – 185.

По теме диссертации получены два патента на изобретения:

1. Способ сушки окатышей с предварительным подогревом / Б.А.Боковиков, С.Н.Евстюгин, В.И.Клейн, А.А.Солодухин // Патент РФ № 2353675.
2. Способ трехстадийной сушки окатышей на обжиговой конвейерной машине / В.М.Абзалов, С.Н.Евстюгин, В.И.Клейн, В.Н.Неволин, А.А.Солодухин // Патент РФ № 2350664.