

Министерство образования и науки Украины  
Запорожская государственная инженерная академия

На правах рукописи

Мных Антон Сергеевич

УДК 669.162.1

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОВЫХ  
ПРОЦЕССОВ ОКУСКОВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ  
ИНТЕНСИФИКАЦИИ СЕГРЕГАЦИИ В СТАЦИОНАРНЫХ СЛОЯХ**

05.14.06 – Техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика

Диссертация на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Научный консультант  
д.т.н., проф. Яковлева И.Г.

Запорожье – 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЙ	18
1.1 Методы интенсификации процессов тепло- и массообмена в агломерируемом слое	21
1.1.1 Многослойная загрузка сыпучего материала	22
1.1.2 Спекание сыпучего материала в повышенном слое	24
1.1.3 Способы повышения вертикальной скорости термообработки сыпучего материала	25
1.1.4 Влияние свойств твердого топлива на качество термообработки шихты	30
1.2 Влияние газодинамических характеристик слоя на тепловой режим обработки сыпучего материала	33
1.3 Управление сегрегацией с позиции выравнивания теплового режима спекания сыпучего материала	39
1.4 Методы интенсификации обжига стационарного слоя железорудных окатышей	46
1.4.1 Увеличение скорости фильтрации и высоты слоя	49
1.4.2 Выбор температурного режима обжига	51
1.4.3 Сжигание газа в слое окатышей	52
1.4.4 Рециркуляция схемы газопотоков обжиговой машины	53
1.5 Снижение вредных выбросов при горении топлива	55
1.6 Выводы по разделу 1	59
2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА В СТАЦИОНАРНЫХ СЛОЯХ СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА	61
2.1 Структурные характеристики стационарного зернистого слоя	61
2.2 Тепловые процессы в слое монодисперсных материалов	68

2.2.1 Уравнение газодинамического сопротивления при описании тепловых процессов, протекающих в зернистом слое	74
2.3 Тепловые процессы в слое полидисперсных материалов	80
2.4 Комбинированный нагрев слоя сыпучих материалов с учетом внутренних источников энергии	86
2.5 Решение задачи распределения температуры в единичном объеме агломерационного слоя	89
2.6 Синтез модели теплового режима процесса спекания полидисперсной агломерационной шихты	98
2.7 Выводы по разделу 2	111
3 ИССЛЕДОВАНИЕ СЕГРЕГАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В СЛОЕ ПОЛИДИСПЕРСНОЙ ШИХТЫ И ИХ ВЛИЯНИЯ НА ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ АГЛОМЕРАЦИИ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО МАТЕРИАЛА	114
3.1 Идентификация гранулометрического состава агломерационной шихты, подготовленной к спеканию	114
3.2 Исследование влияния гранулометрического состава агломерационной шихты на распределение топлива и химических компонентов в слое материала	125
3.3 Определение количества тепловой энергии, выделяемой в слое полидисперсной шихты в зависимости от сегрегации топлива и химкомпонентов по высоте слоя	133
3.4 Совершенствование подготовки твердого топлива к тепловой обработке агломерационной шихты	142
3.5 Определение оптимального распределения твердого топлива в слое загружаемой железорудной шихты для выравнивания теплового режима аглопроцесса	155
3.6 Определение сегрегации фракций шихты, требуемой для стабилизации теплового режима спекания	170
3.7 Выводы по разделу 3	182

4 СТАБИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ТЕРМООБРАБОТКИ СЛОЕВ БОКСИТОВОЙ ШИХТЫ И ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ	185
4.1 Тепловые процессы в агломерируемом слое бокситов с зависимости от сегрегации топлива и химкомпонентов по высоте	185
4.2 Расчет оптимального распределения твердого топлива в агломерируемом слое бокситовой шихты	200
4.3 Тепловые процессы в слое обжигаемых железорудных окатышей	209
4.4 Моделирование процесса термообработки железорудных окатышей с целью определения требуемой сегрегации гранул по высоте слоя	218
4.5 Выводы по разделу 4	229
5 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ПОДГОТОВКИ СЛОЯ СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА К ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКЕ	232
5.1 Исследование динамики процесса формирования слоя аглошихты, подготовленной к тепловой обработке	232
5.2 Исследование систем загрузки полидисперсной шихты	243
5.2.1 Выбор системы для загрузки полидисперсной бокситовой шихты	261
5.2.2 Выбор системы для загрузки сырых железорудных окатышей	265
5.3 Исследование газодинамических характеристик слоя полидисперсной шихты, подготовленной к спеканию	267
5.4 Оптимизация структуры слоя агломерационной шихты с целью стабилизации теплового режима процесса спекания	277
5.5 Исследование влияния теплового режима процесса спекания на качественные показатели агломерата	285
5.6 Влияние структуры слоя агломерационной шихты, подготовленной к тепловой обработке на количество вредных выбросов в атмосферу	391
5.7 Выводы к разделу 5	298
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ	301

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	307
ПРИЛОЖЕНИЯ	337
Приложение А Акт проверки адекватности тепловой модели процесса агломерации железорудной шихты ОАО «Запорожсталь»	338
Приложение Б Протокол научно-технического совещания по рассмотрению результатов проверки адекватности тепловой модели процесса агломерации железорудной шихты	339
Приложение В Акт о внедрении методики оптимизации теплового режима процесса производства железорудного офлюсованного агломерата ОАО «Запорожсталь» (2014 г.)	341
Приложение Г Расчет ожидаемого экономического эффекта от внедрения результатов работы в условиях ОАО «Запорожсталь»	342
Приложение Д Акт о внедрении рекомендаций диссертационной работы на ПАО «Запорожский абразивный комбинат» (2015 г.)	345
Приложение Е Акт о внедрении результатов диссертационной работы Ассоциацией «ЭНЕРГОИНТЕХ» (2015 г.)	346
Приложение Ж Акт о внедрении результатов диссертационной работы в учебный процесс кафедр ЗГИА	347
Приложение З Листинг программы оптимизации структуры слоя агломерационной шихты	348

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Агломерационные и обжиговые машины конвейерного типа представляют собой сложные энергетические системы, обеспечивающие тепловую обработку мелкодисперсных концентратов, и являющихся одними из наиболее энергозатратных этапов аглодоменного передела. Исследования показывают, что удельные расходы топлива в агломерационных и обжиговых машинах отечественных промышленных предприятий значительно выше, чем этот же показатель в западных странах. Количество вредных выбросов в атмосферу также зависит от эффективности работы агрегатов. Использование современных технических решений, внедрение рациональных методов подготовки материала, разработка и оптимизация систем производства, распределения и использования энергетических ресурсов, выравнивание теплового режима термообработки сыпучего материала, приближение удельного расхода топлива в процессах окускования к научно-обоснованным показателям, в значительной мере предопределяет конкурентоспособность продукции, уровень производства и его соответствие мировым требованиям.

В настоящий момент, с учетом отсутствия капитальной реконструкции аглофабрик и ГОКов, наблюдается износ и серьезное отставание по техническому уровню процесса и оборудования от зарубежных аналогов, что обуславливает высокое содержание мелочи в агломерате, и существенный выход некондиционных окатышей в связи с недостаточным температурно-временным режимом их обработки. Высокий выход слабообожженных гранул и мелочи при грохочении спека, вызван неудовлетворительной подготовкой топлива и материала, нарушениями при его укладке на паллеты конвейерной машины, тем самым обуславливая неравномерность теплового режима по сечению пирога, и как следствие, снижение производительности процессов окускования.

Качественную и энергоэффективную тепловую обработку слоя сыпучего материала на машинах конвейерного типа можно осуществить с помощью управления процессами сегрегации частиц в слое, подготовки твердого топлива. Важное значение для обеспечения стандартного и равномерного температурного поля в слое материала, имеют его газодинамические характеристики, обуславливающие ширину и скорость перемещения высокотемпературной зоны. Таким образом, необходимость оптимального распределения топлива в слое, с учетом сокращения его общего содержания, и минимизации перепада давления в слое материала в процессе его термообработки, для выравнивания теплового режима процессов термоупрочнения, является важной научно-практической проблемой. Снижение общего потребления твердого топлива процессами спекания, помимо снижения себестоимости продукции, позволит сократить объемы вредных выбросов в атмосферу.

Актуальными становятся вопросы исследования закономерностей и процессов, протекающих в слое при его подготовке к термообработке, и разработки технических решений, призванных обеспечить требуемую структурно-химическую неоднородность материала и улучшение газодинамических характеристик слоя.

Таким образом, комплексное решение проблемы энергосбережения, методов и средств повышения эффективности использования энергетических ресурсов за счет снижения расхода твердого топлива, повышения качества тепловой обработки материала и снижения количества вредных выбросов в атмосферу благодаря управлению процессами сегрегации частиц в слое, подготовки твердого топлива, формирования структуры слоя с заданными газодинамическими характеристиками, определяют актуальность развития научных основ теплотехнических процессов окускования сыпучих материалов.

### **Связь работы с научными программами, планами, темами.**

Результаты работы направлены на решение задач, поставленных в «Концепции Государственной целевой научно-технической программы развития и реформирования горно-металлургического комплекса Украины на период до 2020 года», в отраслевых и региональных программах повышения энергоэффективности и снижения потребления энергоресурсов. Базовой для диссертационной работы стала НИР «Научное обоснование и разработка эффективных тепло- массообменных процессов в инновационных металлургических технологиях» (№ гос. рег. 0115U003176), где автор диссертации являлся ответственным исполнителем.

Исследования, результаты которых представлены в работе, проводились на основании двухсторонних договоров о научно-техническом сотрудничестве: № 20/2013/1065 от 08.05.2013 с ОАО «Запорожсталь» и №12-1с/2015 от 15.04.2015 с ПАО «Запорожский абразивный комбинат».

**Цель и задачи исследования.** Повышение энергоэффективности технологических процессов окускования, за счет оптимизации формирования структуры слоя сыпучего материала, что позволяет стабилизировать температурный режим обработки и сократить объем потребления твердого топлива.

Для достижения поставленной цели диссертационной работы необходимо решить следующие задачи:

1. Выполнить анализ и обобщить научную информацию о современных направлениях совершенствования процессов теплообмена при окусковании материалов на машинах конвейерного типа, для повышения качества продукта и производительности, снижения расхода топлива и количества вредных выбросов, образующихся при горении;

2. Разработать математическую модель сопряженных процессов газодинамики, тепломассообмена и горения твердого топлива в слое с учетом



тепловыделения химических реакций и изменения теплофизических свойств материала при обжиге;

3. Исследовать комплексное влияние физических величин (температура, влажность, крупность) на значения коэффициента теплопроводности слоя материала. Установить закономерности изменения коэффициента теплоотдачи от сегрегационных процессов в слое;

4. Теоретически обосновать влияние усиления сегрегационных процессов в слое на выравнивание теплового режима окускования материала, разработать методику идентификации структуры слоя шихтовых материалов, подготовленных к спеканию;

5. Установить опытным путем влияние гранулометрического состава шихты на распределение твердого топлива и химических компонентов по горизонтам слоя, изучить особенности физико-химических процессов при протекании экзо- и эндотермических реакций в слое железорудных и бокситовых материалов в зависимости от его гранулометрической неоднородности;

6. Разработать принципы организации оптимальной подготовки твердого топлива для агломерационного процесса, на базе изучения механизмов дробления материала в четырехвалковой дробилке;

7. На основе математического моделирования провести численные исследования с целью определения оптимального распределения твердого топлива для процессов агломерации железорудных и бокситовых материалов, обеспечивающих стабилизацию теплового режима процесса спекания, установить закономерности требуемого распределения фракционного состава материала;

8. С целью стабилизации температурно-временного режима обработки железорудных окатышей, выполнить исследования по установлению количества теплоты, необходимой для обжига окатышей заданного размера,

определить требуемое время и распределение крупности окатышей по горизонтам слоя;

9. Исследовать влияние сегрегации сыпучего материала и скорости фильтрации продуктов горения на газодинамические характеристики высокого слоя полидисперсной шихты, подготовленной к спеканию;

10. Исследовать динамику процессов формирования слоя сыпучего материала при использовании загрузочных устройств различной конструкции, влияющей на распределение твердого топлива и химических компонентов по горизонтам, определить характеристики движения частиц по поверхности лотка и откосу слоя. Разработать и внедрить технологии загрузки материала на базе рациональных конструкций загрузочных устройств материала для процессов агломерации железорудной и бокситовой шихты и процесса обжига железорудных окатышей;

11. С целью стабилизации теплового режима процесса термообработки с учетом минимизации объемов потребления твердого топлива и улучшения газодинамических характеристик слоя разработать алгоритм оптимизации структуры слоя сыпучего материала;

12. Провести анализ энергоэффективности мероприятий по усилению сегрегационных процессов в слое загружаемого материала, за счет использования новых загрузочных узлов. Путем полупромышленного эксперимента, оценить потенциал сокращения объемов потребления твердого топлива, установить влияние оптимизации структуры слоя на количество вредных выбросов в атмосферу.

*Объект исследования* – теплофизические процессы при окусковании сыпучих материалов в стационарных слоях.

*Предмет исследования* – влияние процессов теплообмена, газодинамики и сегрегации на энергоэффективность и качество окускования сыпучих материалов в стационарных слоях.

### *Методы исследования.*

При выполнении работы использовались методы математического моделирования, физического моделирования, методы математической статистики и пассивного эксперимента, ситовый метод анализа гранулометрического состава и параметров слоя окомкованной шихты, спектральный метод анализа химического состава гранул материала, балансовый метод анализа процессов термообработки.

### **Научная новизна полученных результатов.**

Теоретически обоснован, подтвержден результатами математического моделирования и полупромышленного эксперимента потенциал повышения энергоэффективности процессов окускования железорудных и бокситовых материалов путем усиления сегрегационных процессов в слое, обуславливающих увеличение неравномерности распределения твердого топлива и химических компонентов по высоте материала, улучшение газодинамических характеристик и стабилизацию теплового режима термообработки последнего.

1. Получили дальнейшее развитие научные основы идентификации структуры слоя сыпучего материала, что впервые позволило в динамике определять распределение твердого топлива и химических компонентов по высоте сформированного слоя. Изучен химический состав гранул полидисперсных шихтовых материалов подготовленных к спеканию, установлены функциональные зависимости содержания твердого топлива и химических компонентов в железорудных и бокситовых материалах в зависимости от размера гранул, что позволило составить топливно-энергетический баланс энергетической системы.

2. Экспериментально подтверждено влияние сегрегационных процессов на структуру слоя и стабилизацию температуры зоны горения в рациональном диапазоне 1280...1340° С при агломерации железорудных материалов и 1290...1380° С при агломерации бокситов, что обеспечивает

образование мелкопористого, легковосстановимого агломерата с достаточной прочностью.

3. Впервые получены зависимости, характеризующие распределение мощности внутренних источников тепловой энергии (горение топлива, эндо- и экзотермические реакции при спекании и т.д.) по высоте и ширине слоя, позволяющие определить рациональное распределение твердого топлива, обеспечивающее стабилизацию максимальной температуры зоны горения. Установлены процентные соотношения составляющих источников тепловой энергии процесса спекания.

4. Впервые получены зависимости, характеризующие удельные энергозатраты на обжиг окатышей и их нагрев до температуры 1250...1300° С в зависимости от их диаметра. На основе этих зависимостей установлено продолжительность и рациональное распределение крупности окатышей по горизонтам слоя, обеспечивающее выравнивание температурно-временного режима обжига.

5. Установлено комплексное влияние физико-химических параметров (температура, влажность, крупность) на коэффициент теплопроводности сыпучего материала. Предложено использование средневзвешенного коэффициента теплопроводности, определены его численные значения в зависимости от интервала варьирования степени влияния  $r_i$  указанных параметров.

6. Установлены закономерности изменения коэффициента теплоотдачи по высоте слоя от степени разделения классов крупности сыпучего материала, что обусловлено типом применяемой загрузочной системы. При загрузке железорудного материала вибрационным питателем, происходит ослабление связей между частицами сыпучего материала, что усиливает сегрегационные процессы в слое, коэффициент  $\alpha_v$  в данном случае изменяется в пределах 2800...9500 Вт/(м<sup>3</sup>·К). При использовании барабанного питателя, сегрегационные процессы не значительны, в

результате наблюдается монотонное снижение величины коэффициента, для случая железорудного материала диапазон изменения  $\alpha_v$  составил 3300...4800 Вт/(м<sup>3</sup>·К), а бокситов 5900...7200 Вт/(м<sup>3</sup>·К). Последнее связано с большим размером частиц бокситового материала.

7. Развита научная основа повышения энергоэффективности процесса дробления твердого топлива в четырехвалковой дробилке. Установлено влияние сдвливающих и истирающих нагрузок на выход кондиционной фракции 0,5...3,0 мм. Получены зависимости, характеризующие интенсивность выхода кондиционной фракции и рациональной производительности дробилки при измельчении антрацитового штыба и коксовой мелочи. Получены функциональные зависимости времени выгорания кондиционной фракции от диаметра частиц топлива.

8. Получили обобщение и дальнейшее развитие теоретические основы динамики структурообразования слоя сыпучего материала, при использовании загрузочных устройств различной конструкции. Экспериментально определены значения коэффициентов трения качения и трения скольжения по поверхности загрузочного устройства и откосу слоя, в зависимости от влажности и грансостава частиц шихтового материала. Показано влияние конструктивных характеристик составного загрузочного лотка на формирования структуры полидисперсного материала с заданными газодинамическими характеристиками и требуемым распределением твердого топлива и химкомпонентов по высоте слоя.

#### **Практическое значение полученных результатов.**

1. Разработана и внедрена технология загрузки материала на основе конструкции составного двухступенчатого загрузочного лотка (Патент Украины на полезную модель №110975), обеспечивающего образование структуры слоя с максимально близким к оптимальному распределением твердого топлива по высоте и ширине спекательной тележки, с целью

стабилизации температурного режима спекания. Лоток дополнен стреловидной секцией для снижения влияния прибортовых подсосов воздуха и повышения концентрации твердого топлива в этих зонах. Расчет ожидаемого экономического эффекта в условиях аглофабрики ОАО «Запорожсталь» показал, что объем производства от внедрения увеличится с 5872,9 тыс. т/год до 5902,64 тыс. т/год, съём агломерата увеличится с 41,74 т/(м<sup>2</sup>·сут) до 41,95 т/(м<sup>2</sup>·сут), увеличение выхода годного на 4,22 % при снижении удельного расхода твердого топлива на 9,81...15,14% отн. Экономический эффект от снижения расхода твердого топлива и увеличения выхода годного составил до 45 млн. грн. в год с шести агломашин, для условий аглофабрики предприятия (по состоянию цен на энергоносители на 09.2016 г.).

2. Разработаны и внедрены технологии загрузки на базе конструкций загрузочных узлов для процессов агломерации бокситовой шихты в условиях ПАО «Запорожский абразивный комбинат» и обжига железорудных окатышей (Патент Украины на полезную модель №104024), для условий ЦГОК г. Кривой-Рог. Разработана методика расчета конструктивных характеристик загрузочных узлов, позволяющих добиться формирования структуры материала подготовленного к термообработке с заданными газодинамическими характеристиками и требуемым распределением физико-химических компонентов.

3. Разработана методология расчета производительности четырехвалковой дробилки для решения задачи рационализации процесса измельчения твердого топлива, с целью увеличения выхода кондиционной фракции (0,5...3 мм). Предложена новая схема дробления, устраняющая вредное переизмельчение топлива со снижением доли истирающих нагрузок при дроблении.

4. Получила развитие методология идентификации структуры слоя шихтовых материалов, позволяющая в непрерывном режиме реального

времени оценивать распределение фракционного состава шихты, по горизонтам слоя подготовленного к спеканию, устраняющая необходимость проведения ситового анализа и повышающая оперативность генерации корректирующих воздействий на загрузочный узел конвейерной машины.

5. Разработана комплексная математическая модель теплового режима окускования сыпучих материалов, базирующаяся на методе конечных элементов, учитывающая сегрегационные процессы в слое и переменные теплофизические свойства материала, позволяющая производить расчет температурного поля по горизонтам слоя, подвергаемого тепловой обработке и формировать рекомендации к требуемому распределению твердого топлива и химических компонентов по высоте паллеты конвейерной машины.

6. Разработан алгоритм и программное обеспечение для решения задачи оптимизации структуры слоя агломерационной шихты. С помощью предложенной программы и математического моделирования осуществлен расчет углов наклона загрузочных плоскостей составного лотка, что позволило обеспечить максимально близкое к требуемому распределение твердого топлива по горизонтам и снижение газодинамического сопротивления слоя материала.

7. Научные разработки по стабилизации теплового режима процесса спекания железорудных и бокситовых материалов нашли отражение в патентах Украины на полезные модели № 104024 и №110975, а также приняты к использованию ОАО «Запорожсталь» и ПАО «Запорожский абразивный комбинат». Проектные и технические решения по исключению неравномерности тепловой обработки железорудных окатышей использованы Ассоциацией «ЭНЕРГОИНТЕХ». Разработки, выполненные в диссертации, использованы в учебном процессе кафедр металлургии черных металлов, энергоэффективности энергообеспечения, теплоэнергетики и автоматизированного управления технологическими процессами Запорожской государственной инженерной академии.

**Личный вклад соискателя.** Основные идеи исследования, концепция работы, ее положения и принципы разработаны автором самостоятельно. В исследовании особенностей металлургических процессов участвовали сотрудники ОАО «Запорожсталь», ПАО «ЗАК», что нашло отражение в совместных работах. В научных трудах автора, которые опубликованы в соавторстве, личный вклад соискателя состоит в: [238] проведении исследований по изучению сегрегационных процессов в слое полидисперсной агломерационной шихты; [263] в установлении закономерностей изменения коэффициента теплоотдачи по высоте слоя; [184, 183] разработке методологии идентификации гранулометрического состава шихты в динамике; [182] разработке и проведении эксперимента по определению химсостава гранул шихты; [204] в получении экспериментальных данных с целью определения адекватности модели; [215] разработке методики расчета фракционного состава слоя сыпучего материала; [243] в расчете конструктивных характеристик модифицированного составного загрузочного лотка; [249] проведении экспериментов по определению газодинамических характеристик слоя полидисперсной агломерационной шихты; [260] в разработке решений по повышению энергоэффективности подготовки твердого топлива; [252] разработке алгоритма оптимизации структуры слоя сыпучего материала; расчете сокращения объемов вредных выбросов в атмосферу за счет снижения потребления твердого топлива [251], разработке методики и проведения исследований по оценке эффективности окомкования шихты [257].

**Апробация результатов диссертации.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедр ТЕ, АУТП и МЧМ ЗГИА, г. Запорожье, 2014-2015 гг.; на Приднепровском научном семинаре «Техническая теплофизика, промышленная теплоэнергетика и



теплотехника», г. Днепропетровск, 2015-2016 гг.; на международных конференциях, семинарах, симпозиумах, форумах, всего принято участие в 10 конференциях, в том числе:

*проведенных в Украине* – Всеукраинская научно-практическая конференция «Актуальные вопросы энергоэффективности горно-металлургического производства», г. Кривой-Рог, 2015 г.; Всеукраинская научно-практическая конференция «Проблемы энергоресурсосбережения в промышленном регионе. Наука и практика», г. Мариуполь, 2015 г.; Международная научно-техническая конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современных технологий», г. Тернополь, 2015 г.; IV Международная научно-практическая конференция «Проектирование предприятий горно-металлургического комплекса, энерго- и ресурсосбережения, защиты окружающей природной среды», г. Харьков, 2015 г.

*проведенных в странах Европейского Союза* – XI Международная научно-практическая конференция «Новости научной мысли - 2015», г. Прага, Чехия, 2015 г.; X Международная научно-практическая конференция «Перспективные вопросы мировой науки», г. София, Болгария, 2015 г.

**Публикации.** По результатам диссертационной работы опубликовано 39 работ, в том числе 27 статей в специализированных научных изданиях, которые входят в соответствующих перечень научных специализированных изданий Украины и в научных периодических иностранных изданиях (из них 12 – без соавторов), 10 статей в научных периодических изданиях имеющих индекс цитирования в международных наукометрических базах, 2 патента Украины на полезную модель, 10 тезисов докладов, из них 2 работы в материалах и трудах зарубежных международных конференций (без соавторов), 2 работы в материалах международных конференций в Украине (без соавторов).

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы и 8 приложений. Основной материал изложен на 309 страницах машинописного текста с учетом 112 рисунков и 29 таблиц. Библиография содержит 263 наименования работ и приведена на 30 страницах. Общий объем работы составляет 357 страницы.

## РАЗДЕЛ 1

### СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

В настоящее время известно три возможных способа окускования сыпучих материалов: агломерация, производство окатышей и брикетирование руд [1].

Метод брикетирования руд в настоящее время является не конкурентоспособным из-за низкой производительности, и, как известно, нет оснований ожидать изменения этого положения в будущем.

Возникновение агломерационного процесса связано с именами Ф. Геберлейна, Т. Хантингтона (1887г.) и Д. Завельберга (1905г.), разработавших способ окускования пылеватых руд в смеси с коксовой мелочью [2]. Процесс осуществлялся путем просасывания воздуха снизу вверх через спекаемый слой, уложенный поверх слоя раскаленного кокса.

В настоящий момент процесс агломерации превратился в весьма развитую отрасль металлургии. Используемая конструкция конвейерных машин Дуайт-Ллойда, превратило процесс термообработки на ленточных машинах в высокопроизводительный и экономически эффективный способ окускования руд. Современные агломерационные машины имеют площадь спекания 300 м<sup>2</sup> и выше, что позволяет обеспечить суточную производительность 10 тыс. т. агломерата и более.

В тоже время, при неуклонном росте количества добываемой руды, существенно снижается среднее содержание железа в рудах, что приводит к увеличению доли руд, подвергаемых обогащению. Агломерация такого материала связана со значительной потерей производительности.

Удачным решением проблемы окускования тонких концентратов явилось производство железорудных окатышей. Изобретение данного процесса связано с именами Андерсона (1912 г.) и Браккельсберга (1916 г.),

первыми запатентовавшими способ окомкования тонкоизмельченных железных руд.

Теория процессов теплообмена при окусковании сыпучих материалов как уже сформировавшаяся отрасль науки получила развитие в трудах С.Т. Ростовцева и С.М. Меерова [3], исследовавших количество теплоты необходимое для зажигания слоя шихты и определивших условия получения качественного неофлюсованного агломерата. В работах Л.А. Ковальского [4] разработана методика расчета теплоты, учитывающая особенности процесса окускования той или иной руды через скорость движения паллет, связанную с вертикальной скоростью спекания.

Наряду с упомянутыми выше основоположниками науки о процессах спекания, существенный вклад в развитие процессов теплообмена и газодинамики при окусковании сыпучих материалов внесли представители мировой и украинской научных школ, известные ученые Г. Вендеборн, Е. Войс, В.Я. Миллер, А.М. Парфенов, А.А. Сигов, С.В. Базилевич, Е.Ф. Вегман, С.Н. Петрушов, М.Ю. Пазюк и многие другие. Большая роль в развитии теории сложного теплообмена в слоевых процессах принадлежит таким ученым как: М.А. Глинков, Б.И. Китаев, В.Н. Тимофеев, В.Г. Лисиенко, Э.М. Гольдфарб и др.

В последнее время основные решения, направленные на развитие теории и технологии процессов окускования, связывались с переходом к спеканию материала в повышенных и высоких слоях [5], что позволяет интенсифицировать теплообменные процессы за счет регенерации теплоты. Следует отметить, что подобное решение не всегда может быть использовано в полной мере в связи с тем, что повышение высоты слоя, при прочих равных условиях, сопровождается увеличением его газодинамического сопротивления, снижением скорости термообработки материала и производительности процесса по годному.

Особенностью сегодняшнего этапа развития процессов окускования является то, что наряду с проблемами интенсификации теплообмена, повышением скорости спекания и производительности, все более актуальными становятся вопросы экономической составляющей процесса – энергоэффективности, качества спека и окатышей, экологии производства.

Таким образом, можно выделить следующие основные задачи совершенствования теории тепловой обработки стационарных слоев сыпучих материалов:

1. Сокращение объемов использования энергетических ресурсов, в частности твердого топлива, с целью снижения себестоимости производимой продукции.

2. Исследование условий загрузки материала и сегрегационных процессов в нем, с целью улучшения газодинамических характеристик высоких слоев и сокращения нагрузки на тягодутьевое оборудование конвейерных машин.

3. Получение конечного продукта высокого качества, с учетом снижения уровня вредных выбросов и минимального негативного влияния на окружающую среду.

Анализ теплофизических процессов, протекающих при окусковании сыпучих материалов, в зависимости от целей и точности расчетов, базируется либо на сложных математических моделях, рассматривающих основные особенности технологических зон конвейерной машины и протекающих в ней процессов, либо на более упрощенных инженерных моделях, обладающих достаточной для практики точностью расчетов. Следует отметить, что физическое моделирование, по-прежнему является неотъемлемой составляющей исследований, дающее наглядное и простое в понимании представление особенностей исследуемого процесса.

## 1.1. Методы интенсификации процессов тепло- и массообмена в агломерируемом слое

Теплообмен в плотном слое – сложное явление, характеризующееся зависимостью от многих факторов (размера частиц, их формы, температуры теплоносителя, фракционного состава сыпучей массы). Экспериментальному исследованию теплообмена в условиях агломерационного процесса посвящен ряд работ [6-11]. Для процессов окускования с просасыванием газа присущи основные закономерности тепло и массообмена в слое зернистого материала [12].

При спекании топливосодержащего сыпучего материала четко различимы две ступени теплообмена: нижняя - между шихтой и газом, образующимся в процессе спекания, и верхняя - между аглоспеком и просасываемой газовой фазой. Часть теплоты, аккумулированной спекаемым материалом поверхностного пласта в период внешнего нагрева в результате теплообмена, горения углерода твердого топлива и протекания других экзотермических процессов, переносится в нижележащие пласты.

Прочностные характеристики агломерата во многом зависят от закономерностей изменения химического состава и теплового уровня процесса спекания по высоте слоя. Поскольку его начальный период характеризуется недостаточным приходом теплоты, верхняя часть агломерата, достигающая одной трети всей спекаемой массы материала, является наименее прочной.

В [13] экспериментально установлена значительная разница механических характеристик агломерата и содержания в нем железа из различных зон по высоте спека. В барабанной пробе агломерата из верхней части спека выход фракции - 5 мм составил 29 – 30% против 20 – 21% в нижней части, при содержании закиси железа, соответственно, 10 – 11% и

26 – 27%. Неравномерность свойств агломерата по высоте слоя подтверждена и лабораторными исследованиями [14]. После испытаний агломерата сбрасыванием, из верхней части спека содержание фракции – 5 мм составило 9,0%, а из нижней части - 3,5%. После четырехкратного сбрасывания аглоспека на стальную плиту [15], выход фракции - 5 мм агломерата из нижней части аглоспека составил 15,6% против 21,2% из верхней части.

На основании анализа литературных данных можно сделать вывод, что преобладающее влияние на качественные показатели агломерата оказывает структура подготовленного к спеканию слоя сыпучего материала и закономерности распределения по его высоте топлива и флюсов. Последнее обуславливает интенсивность экзо- и эндотермических реакций, протекающих в слое и тепловой режим процесса окускования.

Основными задачами в совершенствовании процессов окускования являются улучшение качества спека, снижение удельных расходов топлива на процесс термообработки и повышение экологичности процесса. Указанные задачи неразрывно связаны между собой. Ниже рассмотрены основные подходы к решению этих задач для процессов окускования на конвейерных машинах.

#### 1.1.1. Многослойная загрузка сыпучего материала

Для получения из исходного сыпучего полидисперсного материала однородного по качеству агломерата необходимо создать равные тепловые условия на всех горизонтах спекаемой массы шихты. Такая задача решается неравномерным распределением углерода, с увеличением его количества от нижней части слоя к верхней. Необходимое распределение твердого топлива может достигаться путем загрузки шихты на конвейерную машину двумя-тремя слоями со снижением расхода углерода от верхнего

горизонта к нижнему [16, 17-20]. Основное достоинство двухслойной загрузки шихты на агломашину заключается в том, что представляется возможным управлять распределением топлива по высоте слоя с целью оптимизации теплового режима спекания.

Опыт работы конвейерных машин с двухслойной загрузкой шихты показал, что этот способ формирования слоя наряду с положительными, имеет и отрицательные качества. При последовательной укладке верхнего слоя на нижний, нарушаются общие закономерности в формировании структуры сыпучей массы, свойственные однослойной загрузке шихты на агломашину. Слой шихты приобретает зональную структуру с четко выраженной нижней, средней и верхней зонами. Структуры нижней и верхней зон слоя характеризуются неравномерным распределением частиц шихты по крупности и составу. Средняя зона отличается однородной структурой по высоте.

Измерения физико-механических параметров шихты показали, что эта зона обладает максимальной плотностью укладки частиц, в связи с чем, здесь происходят наибольшие потери газопроницаемости. Поэтому газопроницаемость "двухслойной" массы шихты на 15 – 20% ниже, чем газопроницаемость "однослойной". Образование смешанной зоны при двухслойной загрузке не только ухудшает газопроницаемость слоя, но и сводит к минимуму эффект раздельного дозирования топлива по слоям. Это происходит из-за скачкообразного изменения содержания топлива при переходе от нижнего слоя к верхнему, что отрицательно влияет на скорость спекания.

Другим недостатком двухслойной загрузки шихты является то, что под загрузку занята вдвое большая часть полезной площади спекания конвейерной машины. Замена двухслойной загрузки шихты на однослойную на агломашинах с площадью спекания  $252\text{ м}^2$  и  $312\text{ м}^2$ , позволит увеличить



полезную площадь спекания на 4,0%, что дает соответственно такой же (4,0%) прирост производства агломерата.

### 1.1.2. Спекание сыпучего материала в повышенном слое

Технология термообработки шихтовых материалов, содержащих большое количество тонкоизмельченных концентратов, имеет ряд трудностей и особенностей [21].

При спекании агломерационных шихт, содержащих 60% и более концентратов в железорудной части шихты, высота слоя на большинстве отечественных аглофабрик не превышала 0,18 – 0,22 м. Производимый агломерат не удовлетворял возрастающие требования доменного производства. В настоящее время проблемы экономии топлива и повышения качества окускования материала решаются комплексными методами, в состав которых входит спекание шихт в повышенных и высоких слоях [22].

Работа на повышенном слое имеет ряд преимуществ. В процессе перемещения тепловой волны от поверхности слоя к колосниковой решетке, происходит расширение зоны высоких температур, за счет регенерации теплоты, и наблюдается повышение температуры спекания. Условия термообработки материала в нижних, высокотемпературных, зонах слоя становятся более благоприятными, чем в верхних. При увеличении высоты слоя нижняя высокотемпературная, медленноохлаждаемая часть спека составляет все большую долю от всего слоя, в результате прочность агломерата, в целом, увеличивается.

На заводе Хирохата (Япония), начиная с 1989 г., проводились работы, направленные на повышение качества агломерата, полученного при использовании загрузки шихты высоким слоем. В результате за два года выход качественной продукции увеличился на 7% (от 82 до 89 %), общий выход годного - на 10 % (с 70 до 80 %), а доля возврата снизилась с 220 до

120 кг/т. Для достижения высокой производительности повысили однородность распределения материала, как по высоте, так и в поперечном направлении спека, стабилизировали свойства загружаемого материала по крупности, влажности и химическому составу [23].

Как было отмечено выше, возможности улучшения теплового режима спекания и, как следствие, прочности агломерата за счет увеличения высоты слоя не всегда можно использовать в полной мере в связи с тем, что повышение высоты слоя при прочих равных условиях, сопровождается снижением скорости фильтрации продуктов горения и скорости спекания.

### 1.1.3. Способы повышения вертикальной скорости термообработки сыпучего материала

Основным лимитирующим звеном повышения производительности процессов окускования является улучшение качества агломерата при увеличении скорости спекания. Высокая скорость перемещения зоны горения тесно связана с интенсивностью теплообмена между шихтой и движущимися газами, нагретыми горячим агломератом и теплотой горения топлива. Формирование структуры агломерата определяет его важнейшие свойства - прочность и восстановимость. Рост скорости фильтрации газов через слой способствует быстрому нагреву шихты под зоной горения топлива до температуры его зажигания. Однако, понижает максимальную температуру в зоне ее горения и ускоряет охлаждение готового агломерата, ухудшая его прочность. Агломерат с оплавленной поверхностью и повышенным содержанием закристилизовавшихся соединений имеет лучшую механическую прочность, но обладает пониженной восстановимостью [24].

В процессе спекания окислы, входящие в состав агломерационной шихты, в твердых фазах вступают в химическую реакцию при температурах 500 – 1100 °С и образуют твердые растворы. Взаимодействие твердых фаз

содержащих  $CaO, SiO_2, Fe_2O_3$  и другие соединения определяется крупностью взаимодействующих частиц, теснотой смешивания, температурой и временем взаимодействия. Механизм взаимодействия в твердой фазе заключается в диффузии ионов через кристаллическую решетку. Это становится возможным при конкретном для данного вещества уровне температуры.

Для различных шихт существуют значения скорости движения воздуха в слое, соответствующие лучшим технико-экономическим показателям процесса термообработки. Поэтому разработка различных технологий спекания должна обязательно осуществляться с соблюдением принципа, сформулированного Войсом: наилучшее качество агломерата и максимальная производительность аглопроцесса достигаются при равенстве скоростей передвижения фронта горения топлива (горизонта с температурой воспламенения) и теплопередачи (горизонта с максимальной температурой) [25-30].

Большинство способов интенсификации процессов окускования направлены на повышение газопроницаемости спекаемого слоя. Для соблюдения принципа Войса, улучшение газопроницаемости должно сопровождаться увеличением его высоты.

Значительный эффект повышения вертикальной скорости спекания дает предварительный подогрев шихты с повышением ее начальной температуры с 20 °С до 65 °С [31, 32], Причем чем крупнее исходная шихта, тем меньше рост производительности, что особенно важно для спекания шихт с высоким содержанием концентратов. Это объясняется образованием скелетной структуры, которая препятствует усадке слоя и снижению газопроницаемости [33, 34]. Ввиду того, что возврат является интенсификатором, улучшающим газопроницаемость шихты, то чем больше в шихте горячего возврата, тем слабее эффект от подогрева.

При предварительном подогреве в шихте существенно снижается конденсация влаги в нижележащие холодные слои шихты. Вследствие этого обеспечивается рост производительности конвейерной машины на 20-30%. Так как переувлажнение нижних слоев шихты требует некоторого повышения расхода коксовой мелочи, то при спекании подогретой шихты можно получить также экономию 10 – 15 % твердого топлива.

Использование горячего возврата (600 °С) вызывает ряд практических затруднений: использование пластинчатых конвейеров и вибрационных трубчатых конвейеров для его транспортировки; усиление системы проточно-вытяжной вентиляции и т.д. Поэтому трудности внедрения данной технологии, позволяющей простым методом нагреть шихту перед спеканием до 60 - 80° С, стали причиной организации охлаждения возврата и шихты до 100-120 °С и 25-30 °С, соответственно.

В связи с этим возникла задача использования других теплоносителей для подогрева шихты, хотя предложенные способы не исключают, а дополняют способ использования горячего возврата и могут применяться совместно. Однако чрезмерный перегрев шихты активизирует процессы испарения влаги, разрушения комков и может привести к снижению эффекта от подогрева [35].

Существуют способы подогрева шихты путем просасывания или продувки через слой горячего воздуха или газов [36, 37], нагрева шихты теплотой конденсации пара, пропускаемого через шихту в бункере или смесительном барабане [38] (при нагреве шихты до 60°С доувлажнение шихты за счет конденсации пара составляет всего около 1 % [39]), пламенем газовых горелок в смесительном барабане [40].

Однако КПД использования в качестве теплоносителей газа, пара или горячей воды не превышал 50 % и подогреть сыпучий материал смогли лишь до 45°С, а в летнее время до 55°С. При сжигании газа в барабанах-окомкователях ухудшаются условия труда на верхних этажах спекательного

отделения, усложняются условия эксплуатации оборудования в результате возможных перегревов и коробления барабана, ухудшается процесс грануляции из-за подсушки и неравномерного прогрева составляющих шихты с поверхности. Поэтому указанные способы подогрева шихты практического применения до настоящего времени не нашли.

В работе [30] представлена конструкция устройства подогрева шихты паром в барабане-окомкователе. Коэффициент полезного использования пара при работе такого устройства составил 85 % при нагреве шихты до температуры 55 – 65 °С. Спекание обработанной паром шихты сопровождается ростом производительности на 2 – 4 % в расчете на каждые 10 °С увеличения температуры шихты, загруженной на аглоленту.

При отсутствии подогрева шихты некоторый эффект дает снижение ее влажности на 1,0–1,5% относительно влажности, соответствующей максимальной газопроницаемости слоя незажженной шихты, позволяющее несколько компенсировать переувлажнение, или снижение содержания воды только в нижнем слое.

Предложен подогрев шихты с использованием горячей извести [41]. Кроме того, свежесожженная известь имеет большую контактную поверхность и улучшает комкуемость шихты. Объем извести при соприкосновении с водой резко возрастает, что способствует увеличению газопроницаемости слоя материала подготовленного к тепловой обработке.

Кроме улучшения газопроницаемости слоя спекаемой шихты, известь понижает температуру плавления легкоплавких соединений. Следовательно, ускоряет образование жидкой фазы, связывающей гранулы между собой в агломерат.

Создание в верхней части слоя определенного запаса тепловой энергии для нормального протекания процесса спекания шихты с минимальной затратой твердого топлива и постоянства температурно-тепловых условий

процесса по всей высоте слоя возможно за счет использования внешнего нагрева слоя.

Возможен нагрев шихты, до температур 1000 – 1500°C до зажигания зажигательным горном, продуктами горения газов без избытка воздуха [42]. Эти требования могут быть выполнены только при достаточной продолжительности и температуре внешнего нагрева.

Предложен способ термообработки материала с применением дополнительного нагрева спекаемого слоя после зажигания. При этом уменьшается разность температур расплава и воздуха и снижается скорость охлаждения расплава, что повышает температуру в зоне горения твердого топлива и качество верхней части пирога [43, 44]. При проходе горячего воздуха через корку агломерата частично снимаются внутренние напряжения, связанные с быстрой массовой кристаллизацией расплава. Дополнительный нагрев возможен с использованием тепла от сжигания газа [42], рециркуляционных газов [45, 46], кроме того обогащенных кислородом [47] и т.д. В связи с высокой стоимостью энергоносителей и сложностью реализации, данный способ в настоящее время не нашел широкого применения.

Производительность агломерационных машин существенно возрастает при подаче в слой воздуха, обогащенного кислородом, который позволяет существенно увеличить скорость горения топлива шихты без изменения газопроницаемости слоя [48, 49]. Но скорость спекания ограничивается низкой скоростью перемещения зоны горения топлива из-за низкой скорости нагрева шихты до температуры зажигания топлива в зоне, расположенной непосредственно под зоной горения, из-за значительных расходов теплоты на подогрев шихты и испарение влаги из зоны переувлажнения. Поэтому при повышении содержания кислорода в воздухе на 1 % производительность аглопроцесса увеличивается на 1 – 2%, а также содержание фракции менее 10 мм в агломерате уменьшается на 10 – 15 % (отн).

Устранение причин, ограничивающих повышение производительности аглопроцесса с сохранением высокого качества агломерата возможно совмещением процессов, происходящих в слое, при использовании предварительного подогрева шихты и просасывания воздуха, обогащенного кислородом. В результате обеспечив соответствие высокой скорости теплообмена в слое со скоростью горения топлива шихты и получив более существенное повышение производительности процесса агломерации со снижением расхода топлива без ухудшения качества агломерата, чем при суммировании этих показателей каждой из указанных технологий.

В настоящее время на металлургических предприятиях мощности производства позволяют производить технический кислород с избытком. Поэтому есть возможность его использования для агломерации. Отмечено, что себестоимость агломерата при этом увеличивается [29, 48], но необходимо предпринимать меры по снижению себестоимости агломерата и рассматривать суммарный эффект аглодоменного производства.

#### 1.1.4. Влияние свойств твердого топлива на качество термообработки шихты

Согласования скоростей горения твердого топлива в слое и перемещения теплового импульса возможно добиться за счет рационального распределения температурно-теплового импульса по высоте спекаемого слоя [50, 51]. В работе [52] режимом термообработки материала в слое управляют по химическому составу ( $CaO / SiO_2$ ,  $FeO / Fe_{общ}$ ,  $Al_2O_3 / SiO_2$ ,  $MgO / SiO_2$ ) мелких фракций окомкованной шихты. Однако на выравнивание температуры по высоте слоя в ходе процесса спекания существенное влияние оказывает распределение топлива в нем.

Большое влияние на качество агломерата оказывают свойства твердого топлива. К топливу для агломерации предъявляют следующие требования:

содержание золы в топливе должно быть минимальным; топливо не должно содержать летучих веществ, осаждающихся при охлаждении [53]. Последнее вызвано тем, что летучие вещества, имеющиеся в топливе, при агломерации возгоняются, и затем, в более холодных зонах, конденсируются, снижая газопроницаемость шихты. В работах [29, 30, 41, 54-56, 59] указано, что наилучшим топливом является мелкодробленая коксовая мелочь. При этом следует учитывать, что для уменьшения содержания монооксида углерода и оксидов азота в отходящих агломерационных газах необходимо снижать включение классов менее 0,05 мм в коксовой мелочи [60].

Однако интенсивность горения топлива и, соответственно, скорость перемещения фронта горения во многом определяется температурой его зажигания. Температура зажигания кокса составляет 650-700°C и при низком содержании кислорода в газах значительно увеличивается [61, 62]. При высокой скорости теплообмена, когда температура подогрева шихты более 65 - 80°C, скорости горения топлива недостаточные. В результате принцип Войса не выполняется и качество термообработки сыпучего материала ухудшается.

Следовательно, управляя температурой зажигания твердого топлива подогретой шихты возможно изменять интенсивность горения твердого топлива в слое. Температура зажигания зависит как от содержания кислорода в газах, так и свойств самого топлива. Для разных видов топлива эта температура различна. Добавляя в шихту топливо с меньшей температурой зажигания, чем у дробленого кокса, можно ускорить процесс зажигания основного топлива. В качестве такого топлива, можно использовать торф [63], гранулированные древесные опилки [70], нефтяной кокс [64, 65], жидкое топливо [66] и т.д. В [67, 68] предложено повышать реакционную способность различных видов твердого топлива, применяемых при агломерации, добавлением к шихте катализаторов (раствора калия). Активизация твердофазных реакций топлива и железной руды,



способствующих образованию легкоплавких соединений, возможна за счет их совместного дробления [69]. При этом температура начала восстановления оксидов железа снижается на  $\approx 300$  °С.

Существует способ спекания агломерационной шихты с подачей в слой горючего газа [71]. С целью выравнивания уровня температуры по высоте слоя после зажигания в слой подают незажженное газообразное топливо при коэффициенте расхода воздуха в пределах 3,0–5,0. Данный способ обладает высокой взрывоопасностью и требует повышенных мер безопасности при внедрении в производство.

На качество агломерата существенное влияние оказывает тепло экзотермических реакций в зоне охлаждения агломерата, где обычно избыток кислорода. Добавлением в шихту окалина, которая играет роль источника тепла при ее окислении, осуществляют дополнительный нагрев верха пирога [30]. При этом увеличивается содержание железа в агломерате. Однако окалина должна быть определённой крупности, что создает трудности в ее использовании.

Таким образом, применение большинства способов интенсификации процесса термообработки шихтовых материалов ограничивается либо не существенным увеличением производительности, либо ухудшением качества агломерата, либо существенными затратами на внедрение. Рассмотренные способы должны внедрять с учетом экономической целесообразности производства. Основной показатель, характеризующий экономическую эффективность производственного процесса — себестоимость производимого продукта (требуемого качества). Себестоимость агломератов изменяется в широких пределах. В отдельных случаях окончательное заключение о целесообразности тех или иных мероприятий на аглофабрике может дать изменение себестоимости чугуна в доменном цехе.

Следует отметить, что интенсивность протекания тепловых процессов в высокотемпературной зоне агломерируемого материала зависит от

количества поступающего в слой воздуха. Последнее зависит от его газодинамического сопротивления, т. е. от структуры слоя сыпучего материала.

## 1.2. Влияние газодинамических характеристик слоя на тепловой режим обработки сыпучего материала

Производительность конвейерных машин практически линейно зависит от скорости фильтрации газа через слой [72, 73], значение которой тесно связано с начальной газопроницаемостью шихты. Как правило, более высокой начальной газопроницаемости шихты соответствует и более высокая газопроницаемость спекаемого слоя [74]. Поэтому при формировании слоя шихты на агломерационной машине, являющегося одним из завершающих этапов подготовки железорудных материалов к спеканию, возможно активно воздействовать на ход процесса термообработки. На этом этапе, прежде всего, необходимо воздействовать на физико-механическую и химическую неоднородности потока шихты при формировании слоя, являющиеся следствием сегрегации компонентов шихты по крупности, плотности и химическому составу. Эта задача приобретает особую актуальность в настоящее время, когда основным железосодержащим компонентом агломерационной шихты является концентрат глубокого обогащения, содержащий до 90 % фракции класса -0,05 мм.

Таким образом, увеличение газопроницаемости слоя сыпучего материала является одним из путей повышения удельной производительности процесса окускования. Скорость фильтрации воздуха зависит от параметров слоя и величины разрежения под колосниковой решеткой. Поэтому с переходом на новую технологию - спекание

агломерационной шихты в высоком слое - на некоторых аглофабриках для увеличения производительности агломашин произведена реконструкция эксгаустеров и использован резерв мощности их электродвигателей. Однако повышение вакуума связано с увеличением расхода электроэнергии на одну тонну агломерата и увеличением прососов воздуха, а уплотнение агломашин требует значительных капитальных затрат [75].

Возрастание разрежения воздуха также ухудшает газодинамические свойства слоя агломерационной шихты, так как прочность гранул сыпучего материала недостаточна, чтобы противостоять повышенным нагрузкам. Поэтому в настоящее время основное внимание уделяется исследованиям, направленным на повышение газопроницаемости слоя шихты путем улучшения качества подготовки железорудного сырья к окускованию [76].

Увеличить газопроницаемость можно механическими методами (создание искусственных вертикальных каналов в слое шихты) и применением в процессе подготовки шихты различного рода связующих добавок, улучшающих ее комкуемость. Однако механические методы не обеспечивают получение равномерного пористого слоя, в результате чего основная масса воздуха просасывается через вертикальные каналы с повышенной газопроницаемостью и не участвует в процессе спекания шихты. Применение связующих добавок сдерживается их дороговизной [77].

Специалистами Западно-Сибирского металлургического комбината проведено исследование газодинамического режима слоя шихты высотой 400 - 600 мм. Анализ результатов исследований показал, что повышение высоты спекаемого слоя с 400 до 600 мм приводит к необходимости повышения содержания твердого топлива в шихте, т. к. в области низких скоростей фильтрации воздуха температурно-тепловой уровень процесса растет и количество расплава увеличивается, и при содержании топлива на уровне 3,5% для слоя высотой 400 мм количество расплава превышает

оптимальное [78]. Это вызывает рост газодинамического сопротивления и, как следствие, снижение скорости фильтрации.

Улучшению газодинамических и теплотехнических характеристик слоя шихты в значительной степени отвечает послойная укладка железорудного материала, при которой элементарные слои существенно отличаются по фракционному и вещественному составам. Однако двухслойную загрузку шихты применяют только на мощных агломашинах АКМ-312. Опыт работы агломашины с двухслойной загрузкой шихты показал, что этот способ формирования слоя, наряду с положительными, имеет и отрицательные качества. В лабораторных опытах [16, 79] с использованием шихты, соответствующей условиям Новолипецкого металлургического комбината (НЛМК) установлен рост газодинамического сопротивления слоя шихты при ее двухслойной загрузке. Однако при сравнении одно- и двухслойной загрузки шихты выявлено, что удельное газодинамическое сопротивление нижней трети слоя шихты в 1,8 раза превышает сопротивление средней трети слоя и в 4 раза - верхней; средний перепад давлений газа в нижнем слое спекаемой шихты составляет до 70 % от общего перепада давления; содержание фракции -5 мм в агломерате увеличилось от 3,6 до 3,8 %, т. е. снизилась прочность.

Для повышения удельной производительности агломашины специалисты завода Chiba японской фирмы Kawasaki Steel Corp. разработали и внедрили устройства для выравнивания поверхности постели. Это позволило стабилизировать газопроницаемость и увеличить высоту спекаемого слоя до 660 мм, уменьшить расход постели от 135 до 80 кг/т агломерата, а также снизить колебания температуры отходящих газов [80]. В результате производительность агломашины повысилась от 1,3 до 1,8 т/(м<sup>2</sup>·ч).

В работах [81, 82, 83] отмечается увеличение газопроницаемости слоя в связи с улучшением сегрегации и повышением главного показателя структуры слоя шихты – его порозности.

Порозность (пустотность) слоя зависит от гранулометрического состава, прочности гранул сырой шихты, способа укладки шихты на агломерационную машину.

Оригинальные и редкие лабораторные опыты по исследованию изменений насыпной плотности несегрегированной шихты при ее укладке в слое разной высоты (240; 500; 800 мм) и переувлажнении в условиях перемещения по слою тепловой волны показали следующие результаты [22]: увеличение высоты слоя сопровождается снижением порозности слоя шихты, в слое высотой 500 мм порозность вблизи колосниковой решетки меньше, чем в верхних горизонтах слоя, на 9,4 %, а в слое высотой 800 мм – на 12,5 %.

Увеличение насыпной плотности сверху вниз по высоте слоя происходит под влиянием динамических и статических нагрузок, переувлажнения шихты в процессе продвижения теплового фронта и составляет, в среднем, 13,6; 18,4 и 18,9 % для слоев высотой, соответственно, 240; 500 и 800 мм. В зоне переувлажнения увеличение насыпной плотности шихты может достигать для указанных слоев, соответственно: в верхних горизонтах – 11,0; 13,1; 13,5 %, а в нижних – 16,2; 23,3 и 24,7 %.

Примерно пятая-шестая часть общей усадки слоя происходит вследствие переувлажнения шихты, когда мокрые гранулы размягчаются, теряют форму, разрушаются, и их более мелкие фрагменты проваливаются в пустоты между отдельными структурами слоя. Около 80 % и более увеличения насыпной плотности принадлежат процессу уплотнения слоя шихты вследствие динамических нагрузок и статического давления, а также тех изменений структуры слоя, которые обусловлены исходными

прочностью гранул, гранулометрическим составом шихты и, соответственно, порозностью слоя.

Исследователи [86], учитывая средние величины изменений насыпной плотности по высоте слоя (в том числе из-за уминки шихты), получили экспериментальную форму расчета порозности слоя на любом его горизонте:

$$\varepsilon_i = 1 - \frac{1 - \varepsilon_H}{0,88 - \beta h_i}, \quad (1.1)$$

где:  $\beta$  - степень усадки слоя с деформацией его структур, принята в исходном значении 0,080 - 0,095 (0,088 ед.);  $h_i$  - расстояние от верха слоя до соответствующего горизонта в слое, м;  $\varepsilon_H$  - начальная порозность.

Представляется неправильным вывод авторов статьи [74] о том, что качественные изменения структуры при формировании и переувлажнении высокого слоя шихты не получают развития в слоях меньшей высоты (в их случае - 240 мм). Изменения структуры в низких слоях естественным образом происходят, но в меньшей мере, о чем свидетельствуют приведенные в [87] схожие качественные характеристики изменений структуры слоев разной высоты.

По исследованиям Г.В. Коршикова [79, 82], исходная порозность загруженного на агломашину сыпучего слоя зависит, прежде всего, от количественного соотношения фракций, которые в наибольшей мере отличаются своими размерами. Так потеря напора газа в слое пропорциональна содержанию в шихте мелких классов -0,5 мм. Увеличение массовой доли этой фракции от 8 до 24 % сопровождается увеличением значения потери напора  $\Delta P$  от 10 до 40 кПа. На такое же значение растет потеря напора при уменьшении среднегармонического диаметра гранул и частиц шихты от 4,50 до 3,25 мм. Загрузочные устройства, как известно, влияют на величину порозности слоя, но в меньшей степени, чем исходный

гранулометрический состав шихты. Иными словами, основа газопроницаемой структуры слоя создается на стадии качественного окомкования шихты.

Важнейшей характеристикой процесса спекания является газодинамическое сопротивление слоя, зависящее в основном от скорости движения газа в слое и высоты слоя. Исходная газопроницаемость холодного слоя проявляет себя и в агломерируемом слое. При исходной высокой порозности (газопроницаемости) слоя чаще всего оказывается меньшим и его газодинамическое сопротивление в процессе спекания. Однако, по некоторым данным [88, 89], не всегда увеличение порозности слоя гарантирует уменьшение потерь напора газа в слое, хотя в приведенной ниже формуле расчета газодинамики слоя величина порозности фигурирует в третьей степени.

В определяющей степени потеря напора в слое зависит от скорости и режима движения газа, характеризуемого коэффициентом газодинамического сопротивления в соответствии с уравнением Эргана [90] или более известным уравнением Дарси-Вейсбаха [91, 92]:

$$\Delta p = \psi \cdot \frac{H \rho_2 \cdot \omega^2 (1 - \varepsilon)}{2 d_{\text{экв.}} \cdot \varepsilon^3}, \quad (1.2)$$

где:  $\Delta p$  - газодинамическое сопротивление слоя, кПа;  $\psi$  - коэффициент газодинамического сопротивления слоя, зависящий от режима движения газа, характеризуемого числом Re;  $\rho_2$  - плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $\omega$  - скорость продуктов сгорания, м/с;  $d_{\text{экв.}}$  - эквивалентный диаметр каналов, м;  $\varepsilon$  - порозность.

Роль структуры слоя, формируемой с помощью загрузочного устройства (ЗУ) агломашины, заключается в обеспечении его нужной газопроницаемости и важнейших показателей процесса. В практике

модернизации ЗУ агломашин многое делается с целью повышения газопроницаемости слоя шихты.

В частности, на аглофабриках Японии используют устройства (поддерживающие магниты, опорные решетки спекательных тележек), снижающие давление верхней части слоя на нижнюю. В сочетании с другими способами модернизации ЗУ магнитная или механическая „поддержка” слоя позволяет увеличить газопроницаемость и за счет этого производительность процесса на 9 – 10 %, при одновременном увеличении высоты слоя от 560 до 608 мм [84, 85].

Газопроницаемость спекаемого слоя можно существенно улучшить, если при разгрузке шихты на конвейерную машину обеспечить увеличение соотношения наибольших и наименьших частиц сверху вниз [93]. В [94] определены количественные возможности интенсификации процесса спекания и выравнивания теплового режима термообработки шихты, за счет перераспределения частиц шихты по высоте слоя, т.е. благодаря усилению сегрегационных процессов в слое сыпучего материала подготовленного к тепловой обработке. Для агломерационной шихты за счет сегрегации можно добиться увеличения газопроницаемости на 20% [16].

### 1.3. Управление сегрегацией с позиции выравнивания теплового режима спекания сыпучего материала

О влиянии сегрегации на ход процесса термообработки сыпучего материала и его качество существует два мнения. В большинстве работ [3, 16, 79, 93, 94] утверждается, что сегрегация шихты при загрузке на конвейерную машину является полезной и обеспечивает повышение газопроницаемости слоя, в среднем, на 15%.



Одним из преимуществ сегрегации авторы работ [95, 96] считают образование постели из крупных гранул. Однако при этом не учитывается возникновение неоднородности слоя шихты по вещественному и гранулометрическому составам [97]. Ряд авторов [98], считает, что сегрегация полезна только до определенной величины, выше которой она оказывает вредное действие.

Вывод о положительном влиянии сегрегации обосновывается рациональным распределением топлива по высоте слоя. Положительное влияние на распределение теплоты в слое оказывает сегрегация материала по химическому составу при загрузке на конвейерную машину с увеличением содержания топлива в верху слоя [99-102].

В других работах [15, 95, 98, 103, 104], преобладает мнение, что сегрегация оказывает отрицательное воздействие на стабильность свойств агломерата, увеличивая химическую неоднородность по высоте слоя, а скопление большого количества мелких фракций (-3 мм) в верхних горизонтах ведет к повышению газодинамического сопротивления загружаемого материала.

В ряде случаев сегрегация шихты по крупности в слое является основной причиной снижения качества агломерата [97, 98]. Установлено, что уменьшая сегрегацию, возможно повысить однородность и улучшить металлургические свойства агломерата по высоте слоя.

В [94] авторы пришли к выводу, что сегрегация желательна при отсутствии комбинированного нагрева шихты, так как приводит к выравниванию теплового режима процесса спекания. При комбинированном нагреве, когда расход топлива снижается на 10%, его перераспределение приводит к недостатку тепла в нижних горизонтах слоя. Отсутствие общих выводов делает дальнейшие исследования процесса сегрегации важными и актуальными.

Изучение этого вопроса в настоящее время, в основном, ограничено экспериментальными исследованиями [29, 30, 56, 71, 99]. Установлено, что распределение крупных фракций (5-12 мм) по высоте слоя очень неравномерно, тогда как сегрегация более мелких (-5 мм) незначительна. Для выравнивания температуры зоны горения и получения качественного агломерата содержание топлива в верхней половине слоя должно составлять 4 – 4,3%, уменьшаясь до 2,8 – 3,0% в нижней [101].

В ряде работ [98-100] отмечено, что существует сегрегация не только по высоте слоя, но и по ширине спекательных тележек. Проведена сравнительная оценка сегрегации при загрузке материала барабанным и вибрационным питателями. Если в первом случае распределение углерода по высоте слоя было примерно одинаковым, то во втором – его содержание в верхней половине составило 5,21%, в нижней – 2,55%. Это позволило существенно снизить расход твердого топлива в шихту и улучшить технико-экономические показатели агломерационного процесса.

Экспериментальные исследования [98, 101] показали, что газопроницаемость слоя значительно повышается при установке загрузочного лотка под углом, равным или близким углу естественного откоса материала. В производственных условиях физико-механические свойства материала непрерывно изменяются [105], что вызывает необходимость управления углом наклона загрузочного лотка.

В [92] выявлены некоторые закономерности, сопровождающие сегрегацию шихты по высоте слоя, и определено ее влияние на газодинамические характеристики шихты разной крупности, установлена функциональная связь между степенью сегрегации, скоростью фильтрации воздуха через слои шихты и содержанием в ней различных фракций. Это позволило дать примерную количественную оценку режимам загрузки шихты на ряде агломерационных фабрик, а также найти для некоторых из них рациональные методы загрузки. Согласно результатам их

эксплуатации, нахождение и реализация рациональных способов загрузки шихты на аглоленту может дать до 5 – 40% прироста скорости фильтрации воздуха через слой. В связи с этим, правильная организация загрузки спекательных тележек является значительным резервом повышения производительности агломерационных машин.

Определению коэффициента сегрегации материала посвящены работы многих ученых [93-95]. Представляет интерес математическая модель сегрегации сыпучего материала, построенная на основе распределения Вейбулла [106].

$$F(d) = f - \exp \left[ -\chi \left( \frac{d}{\bar{d}} \right)^m \right], \quad (1.3)$$

где:  $\bar{d}$  - средневзвешенный размер кусков сыпучего материала, м;  $\chi, m$  - эмпирические коэффициенты, зависящие от степени неоднородности материала.

Модель позволяет оценивать изменения сегрегации материала по откосу при различном гранулометрическом составе. Ряд коэффициентов определяется экспериментально, что снижает возможность ее использования.

Для оценки сегрегации агломерационной шихты по высоте слоя при известном распределении фракций предложен коэффициент сегрегации, определяемый по формуле [95],

$$K_c^\phi = 1 - \frac{\sum_{ij} \frac{|C_{ij}^{u\phi} - C_{ij}^\phi|}{C_i}}{\sum_{ij} \frac{|C_{ij}^{u\phi} - C_i/n|}{C_i}}, \quad (1.4)$$

где:  $C_{ij}^{ид}$ ,  $C_{ij}^{\Phi}$  - содержание  $i$ -й фракции на  $j$ -м горизонте слоя соответственно при идеальной и фактической сегрегации, %;  $C_i$  - содержание  $i$ -й фракции в исходной шихте, %;  $n$  - количество горизонтов в слое.

Используя полученное уравнение, можно определить оптимальные условия распределения различных фракций по высоте слоя. В данном случае предложен условный показатель сегрегации полидисперсного материала по высоте слоя, который не отражает физических основ механизма его формирования.

Хотя в большинстве из рассмотренных работ достаточно подробно исследованы отдельные закономерности сегрегации шихты при загрузке на аглоленту, до настоящего времени отсутствуют общий теоретический подход и математические модели, способные количественно охарактеризовать распределение фракций полидисперсного материала в формирующемся слое и тем самым создать предпосылки для качественного управления процессом.

В связи с этим, для разработки эффективной системы загрузки шихты на аглоленту актуальной задачей является теоретический анализ и экспериментальное изучение процесса формирования слоя.

В настоящее время на большинстве агломерационных машин заданная сегрегация шихтовых материалов достигается при их ссыпании с наклонного лотка на аглоленту [5]. При загрузке шихты на спекательные тележки происходит разделение ее на фракции. Более крупные частицы скатываются к основанию формирующегося слоя, мелкие сосредотачиваются в верхней его части. В связи с тем, что химический состав различных по крупности частиц неодинаков, мелкие фракции содержат больше топлива, известняка и концентрата, чем крупные, которые в основном состоят из руды и возврата. Сосредоточение твердого топлива в верхней части спекаемого слоя способствует выравниванию температуры по его высоте, а результатом

сегрегации является рост газопроницаемости массы материала на аглоленте [107].

Исследованиями на агломашинах, оборудованных барабанными питателями, установлено, что при загрузке шихты наклонным лотком степень сегрегации материалов по крупности и содержанию топлива находится в прямой зависимости от высоты ссыпания и угла наклона загрузочной плоскости [101]. Разность в сегрегации крупной фракции (+7 мм) между верхним и нижним слоями колеблется в пределах 5 – 34%, а топлива – 0,4 – 2,1%.

Зависимость сегрегации гранул шихты и топлива от угла наклона загрузочного лотка не линейна с экстремумом при угле наклона 45 – 46 град [108], который соответствует максимальному перераспределению гранул по высоте слоя. В этом случае наиболее сегрегируют гранулы, имеющие существенное значение для перераспределения топлива (– 3 мм) и защиты колосниковой решетки от перегрева (+7 мм). Реализация полученных результатов позволила перейти на спекание шихты в слое высотой 350 – 360 мм и снизить расход топлива на 0,6 – 0,7 кг/т агломерата только за счет улучшения сегрегации шихты.

При загрузке барабанным питателем, материал поступает на загрузочный лоток достаточно плотным потоком, толщиной до 100 мм что существенно уменьшает его сегрегацию. Наиболее благоприятные условия для нее создаются при загрузке на аглоленту, когда каждая частица может двигаться самостоятельно, при минимальном механическом взаимодействии с соседними. Частично подобный режим обеспечивается при загрузке вибрационным питателем [109]. В этом случае содержание фракции +6 мм, в нижней части спекаемого слоя, по сравнению с верхней, увеличивается с 5,5% до 61,3%, а содержание фракции – 3 мм уменьшается в 5,5 раз.

В [110] сделан вывод о необходимости увеличения естественной сегрегации шихты, при ее загрузке устройством барабанный питатель-лоток и предложено дополнительно разделять материал по крупности воздушным потоком в момент формирования слоя. Применение воздушных классификаторов материалов при их загрузке на аглоленту позволило перераспределить топливо по высоте слоя в сторону увеличения его содержания в верхнем горизонте на 0,4%, а в нижнем - уменьшить на 1,8% (абс.), повысить порозность слоя и увеличить производительность агломашины. Средневзвешенный диаметр гранул шихты верхнего слоя уменьшился с 2,04 мм до 1,79 мм по сравнению с обычной загрузкой, а в нижнем слое увеличился с 6,81 мм до 7,67 мм.

В то же время следует отметить значительную сложность промышленной реализации предлагаемого способа управления сегрегацией и существенное увеличение выноса пылевидных фракций в окружающую атмосферу.

Из анализа вышеизложенного можно сделать вывод, что одним из наиболее эффективных путей выравнивания теплового режима термообработки шихты, улучшения качества окускованного материала и интенсификации процесса окускования, является оптимизация распределения фракций, и, соответственно, твердого топлива в окомкованной шихте по высоте слоя на спекательных тележках конвейерной машины. Последнее обеспечит улучшение использования ее химической и гранулометрической неоднородности, снижение расхода твердого топлива и рост производительности.

#### 1.4. Методы интенсификации обжига стационарного слоя железорудных окатышей

Промышленные окатыши получают путем из высокотемпературной обработки в обжиговых агрегатах. В настоящее время используют три типа агрегатов: шахтные печи, конвейерные машины и комбинированные установки [1].

Описанные способы обжига окатышей хотя и конкурируют между собой, но не являются взаимоисключающими. Считается, что конвейерные машины следует использовать для обжига окатышей из концентратов окисленных руд, шахтные печи – для концентратов из магнетитовых руд, комбинированные установки – для гематитовых материалов, а также для некоторых специальных процессов, требующих для обжига большого количества теплоты.

В развитие процессов окускования разрабатывают новые процессы. Известен гибридный процесс получения окускованных железорудных материалов, сочетающий в себе элементы агломерации, производство окатышей и частичную металлизацию [113]. Проплавка металлизированных окатышей в США, Японии, Канаде, странах СНГ показала, что на каждые 10 % металлизации экономия кокса составляет 5 – 7%.

Практика показала, что металлизация окатышей является дорогостоящим процессом. Поэтому в мировой практике степень металлизации окатышей не превышает 10%.

На подавляющем большинстве горно-обогатительных комбинатов Украины для обжига окатышей используется обжиговая машина конвейерного типа, которая по своему устройству аналогична широко распространенным агломерационным лентам, но приспособлена для работы при более высоких температурах [111].

Обжиг окатышей является сложным процессом, в ходе которого окатыши претерпевают химические, физико-химические, кристаллохимические и другие превращения. Эти превращения имеют место при различных температурах, проходят с различными скоростями и не однозначно влияют на упрочнение. Имеет смысл разделить эти процессы на две группы: протекающие при нагреве слоя до температуры обжига и происходящие во время выдержки при максимальной температуре. Процессы, имеющие место при охлаждении окатышей, играют второстепенную роль [112].

Обжиг и упрочнение окатышей являются частным, хотя и усложненным случаем спекания тонкодисперсных материалов. Увеличение прочности в процессе обжига окатышей происходит в результате образования и роста контактов между частицами и уменьшения пористости. Однако при спекании многокомпонентных систем, к которым относятся окатыши, в твердой фазе весьма трудно получить плотное изделие за ограниченное время обжига. Образование жидкой фазы существенно интенсифицирует процесс за счет постепенного растворения в ней мелких частиц и осаждения избытка вещества на поверхности крупных частиц и их дальнейшего роста. В отличие от процесса агломерации, при обжиге окатышей развитие жидких фаз необходимо ограничить, чтобы не допустить спекание окатышей в гроздь [1].

Многочисленные теоретические и экспериментальные работы [1, 6, 113-115], показывают, что кинетика обжига окатышей во многом определяется свойствами железорудных концентратов, качеством сырых окатышей, но главным образом зависит от температурно-временных условий обжига.

В [114, 116] было высказано предположение, что завершенность процессов обжига, а следовательно, и формирование качества обожженных



окатышей могут быть охарактеризованы интегральным температурно-временным показателем:

$$\sum t_{\tau} = \int_0^{\tau_k} [t(\tau) - t_0] d\tau, \quad (1.5)$$

где:  $\tau_k$  - продолжительность обжига при температурах выше температуры начала твердофазного спекания  $t_0$ , с;  $t(\tau)$  - изменение температуры материала во времени, °C/с.

Экспериментальные и промышленные исследования на обжиговых машинах показали взаимосвязь этого параметра с показателями транспортной прочности при восстановительно-тепловой обработке окатышей. Данные приведенные в [117], свидетельствуют о том, что для концентратов различных месторождений существует эффективная величина  $(\sum t_{\tau})_{эф.}$ , достижение которой позволяет получить прочность окатышей, соответствующую техническим условиям.

Учитывая, что изменение температуры окатышей зависит от интенсивности подачи тепла в слой и времени тепловой обработки, можно выбрать наиболее рациональный способ подвода теплоты в слой и рациональную тепловую схему обжига, которая должна находиться в соответствии с особенностями кинетики упрочнения окатышей.

При проектировании обжиговых конвейерных машин и анализе их тепловых схем работы активно применяется математическое моделирование. Известен ряд молей направленных на изучение кинетики процессов термоупрочнения железорудных окатышей [117, 118, 121, 122, 125]. Однако не все они достаточно универсальны, учитывают особенности процессов обжига и просты в использовании.

Так в приведенной в [117] двумерной схеме расчета нагрева окатышей с использованием уравнений теплообмена в слое при перекрестном движении газа и материала, предполагается, что все теплофизические свойства газа и материала слоя, а также скорость фильтрации остаются постоянными, взятыми при средней температуре. Однако в условиях реального процесса обжига эти свойства изменяются. Коэффициент теплоотдачи в слое, прежде всего определяется скоростью фильтрации газа, которая зависит от перепада давления на границах слоя и определяется мощностью тягодутьевых средств и в общем случае является функцией времени. Кроме того, возможны любые начальные и граничные условия, характерные для технологического процесса.

В [124] предложены математические модели теплообмена и газопроницаемости [119, 120] для управления процессом производства окатышей. Данная модель получена с использованием теории подобия, что позволяет авторам за 1–2 итерации осуществлять параметрическую идентификацию процесса обжига. Однако, по утверждению авторов, для реализации системы управления на обжиговой машине требуется более 280 аналоговых сигналов с датчиков, а также информация из заводской лаборатории и большой объем постоянной справочной информации, что существенно усложняет использование модели на существующих обжиговых и агломерационных машинах без их предварительной реконструкции.

Интенсификации процессов термоупрочнения железорудных окатышей посвящены работы ряда исследователей, некоторые из предлагаемых методов рассмотрены ниже.

#### 1.4.1. Увеличение скорости фильтрации и высоты слоя.

Интенсификации теплообмена в слое окатышей можно добиться за счет увеличения скорости движения теплоносителя, которая зависит от высоты

слоя и мощности тягодутьевых средств. Результаты расчетно-аналитических исследований [119, 120], показали, что при всех величинах разрежения в вакуум-камерах высокотемпературных зон существует оптимальная по производительности высота слоя окатышей. Так при разрежении в вакуум-камерах высокотемпературных зон порядка 4,5 кПа, оптимальная высота сырых окатышей составляет 0,45-0,48 м, а вместе с «постелью» 0,5-0,55 м.

Повышение разрежения в вакуум-камерах позволяет значительно интенсифицировать процессы теплообмена в слое окатышей. При этом увеличивается оптимальная высота слоя окатышей и удельная производительность обжиговой машины. Несмотря на увеличение расхода теплоносителя, рост производительности сопровождается снижением удельного расхода топлива.

Внедрение режима обжига окатышей в высоком слое на Центральном ГОК [111], позволило повысить производительность машин за счет увеличения выхода годной продукции на 3,4% и снизить расход условного топлива на 1 т годных окатышей на 5,2%.

Результаты расчетов показателей работы конвейерной машины в зависимости от высоты слоя, представленные в [117], показывают, что наблюдается экстремальный характер изменения производительности с повышением высоты слоя окатышей, а также непрерывное снижение удельного расхода теплоты, что связано с регенерацией теплоты в нижних горизонтах слоя.

Экстремальный характер изменения производительности обжиговой машины с ростом высоты слоя окатышей связан с тем, что при увеличении высоты слоя повышается аэродинамическое сопротивление слоя. В результате этого начинает падать скорость фильтрации, и, соответственно, интенсивность теплообмена в слое, время нагрева окатышей до заданных технологических температур начинает увеличиваться. Таким образом,

снижение удельных тепловых затрат требует оптимального выбора высоты слоя в зависимости от мощности тягодутьевых средств.

#### 1.4.2. Выбор температурного режима обжига

Тягодутьевые устройства, которыми в настоящее время оборудованы обжиговые машины, не позволяют создавать разрежение в вакуум-камерах более 4,0-4,5 кПа и использовать резервы повышения производства окатышей, кроющиеся в кинетических особенностях окускования концентратов [114, 117, 119, 120, 126].

Интенсифицировать нагрев окатышей можно не только за счет увеличения мощности тягодутьевых устройств, но и путем изменения теплового режима работы горна, в частности повышением температуры теплоносителя в зоне подогрева до максимальных температур обжига [123, 127].

Расчетный анализ изменения удельной производительности и удельного расхода топлива в зависимости от высоты слоя и температуры газа в зоне подогрева и зоне обжига показал [117], что при ограниченной мощности тягодутьевых средств, эффективным методом увеличения производительности установок является повышение температуры газов в зоне подогрева. Однако повышение температуры теплоносителя в зоне обжига снижает прирост производительности при оптимальной высоте слоя. Это связано с закономерностями теплообмена и аэродинамики при фильтрации газов через слой зернистых материалов.

В зоне подогрева холодный слой окатышей активно воспринимает теплоту потока газов. Увеличение разности температур между материалом и газом за счет повышения температуры последнего способствует интенсификации теплообмена, но и не приводит к существенному росту аэродинамического сопротивления слоя. В зоне обжига материал имеет уже

достаточно высокую температуру, особенно на верхних горизонтах. Интенсивность теплоотдачи за счет температурного напора здесь значительно ниже, чем в зоне подогрева. Повышение температуры теплоносителя вызывает увеличение относительного сопротивления слоя и при постоянных мощностях тягодутьевых средств ведет к снижению расхода теплоносителя, обуславливающего скорости нагрева слоя окатышей в целом.

В результате, рациональный тепловой режим работы обжиговых машин, обеспечивающий максимальную производительность, возможен при организации интенсивного нагрева в благоприятных аэродинамических условиях. Этого возможно достичь за счет повышения температуры теплоносителя в зоне подогрева и некоторого ее снижения в зоне обжига [1].

Следует отметить, что мероприятие, предложенное выше, с увеличением температуры в зоне подогрева, может повлечь за собой растрескивание кондиционных окатышей с уменьшением выхода годных фракций.

#### 1.4.3. Сжигание газа в слое окатышей

Для повышения интенсивности тепло- и массообмена в процессах упрочняющего обжига железорудных окатышей разработан метод обжига при сжигании газа непосредственно в слое материала [1, 117, 128, 129].

Указанный способ обжига осуществляется в следующей последовательности. Сушку и подогрев слоя окатышей ведут как при обычном способе, обжиг окатышей верхнего горизонта при температуре 1200-1300° С на глубину 75-100 мм ведут просасыванием продуктами факельного сжигания газа в горновом пространстве. После этого в слой подают холодную бедную газо-воздушную смесь, которая проходя через нагретый металл, подогревается до температуры воспламенения. В результате начинается устойчивый процесс горения газа в слое, в общем

случае сопровождающийся движением зоны горения, составляющей незначительную часть от общей высоты слоя. Продукты горения газо-воздушной смеси проходят через нижележащие слои окатышей и подогревают их.

По мере нагрева окатышей до температуры, при которой происходит воспламенение газо-воздушной смеси, процесс горения распространяется ниже, что обеспечивает равномерный нагрев окатышей до заданной технологической температуры по всей высоте слоя.

Приведенный способ обжига железорудных окатышей в связи со сложностью реализации и повышенной угрозой взрывоопасности газо-воздушной смеси, подаваемой в слой, не нашел широкого применения в промышленности.

#### 1.4.4. Рециркуляция схемы газопотоков обжиговой машины

Удельная производительность и удельный расход топлива на 1 т годных окатышей зависят от схемы газопотоков, определяющей характер использования теплоты, регенерируемой слоем. Экономичность схемы термической обработки окатышей можно повысить за счет сокращения потерь теплоты с уходящими газами, составляющими 23,2 %, что представляет более половины теплоты от горения топлива. Вовлечение этой теплоты в процесс путем рециркуляции позволит сэкономить топливо [117, 130, 131].

В настоящее время в зоне рекуперации в качестве теплоносителя используется нагретый воздух с температурой 800-900° С, поступающий перетоком из первой части зоны охлаждения [111]. Это способствует интенсификации теплообмена в нижних горизонтах и увеличению скорости движения фронта максимальных температур в результате повышения скорости фильтрации теплоносителя до 0,6 – 0,7 м/с.

Высокотемпературный воздух из первой части зоны охлаждения под действием перепада давлений в горне обжиговой машины самопроизвольным перетоком поступает в зону рекуперации, а также по футерованному коллектору в зоны обжига и подогрева в качестве вторичного воздуха, подаваемого в топливосжигающие устройства. В качестве первичного воздуха используется воздух с температурой не более  $375^{\circ}\text{C}$ . отбираемый из второй части зоны охлаждения.

Известно [1], что повышение температуры переточного воздуха и его доли в общем количестве воздуха, идущем на горение, способствует снижению расхода топлива. Для повышения температуры воздуха, выходящего из первой части зоны охлаждения, и обеспечения допустимых скоростей охлаждения окатышей до  $800^{\circ}\text{C}$  в качестве теплоносителя должны подаваться газы с температурой  $150-200^{\circ}\text{C}$ . Таким образом, схема газопотоков современных обжиговых машин имеет высокую степень рециркуляции газопотоков.

Результаты расчетных, экспериментальных исследований и практика работы обжиговых машин [116, 123, 127, 132] показали, что даже в условиях оптимальных параметров теплоносителя, высоты слоя окатышей и размеров зон обжиговой машины при обычном способе обжига из-за перекрестной схемы теплообмена, невозможно полностью устранить неравномерность нагрева слоя по всей высоте. Недостаточный максимум температуры и ограниченная продолжительность выдержки не обеспечивают полного завершения процессов термоупрочнения окатышей нижних горизонтов. Поэтому окатыши этой части слоя имеют худшие качественные показатели.

В результате анализа приведенных выше результатов исследований, можно сделать вывод, что в работах не уделяется достаточного внимания вопросам загрузки материала на конвейерную машину с целью выравнивания температурно-временного режима их обработки.

Исходя из того, что поступление тепловой энергии по высоте слоя является не равномерным и для обжига окатышей различного размера требуется различное количество теплоты, актуальными становятся исследования по определению количества энергии необходимой для обжига окатыша заданного размера и изучения возможностей дифференцируемой укладки окатышей в слой.

### 1.5. Снижение вредных выбросов при горении топлива

Агломерационное производство является одним из основных источников загрязнения воздушного бассейна. Для агломерационных фабрик Украины характерны специфические особенности технологических процессов, которые создают нежелательные предпосылки для образования больших масс пылегазовых выбросов. Совершенствование технологических процессов в агломерации может обеспечить достижение двух важнейших целей, имеющих прямое влияние на количество вредных выбросов в окружающую среду [135]:

- радикальное сокращение потребления твердого топлива на процесс спекания агломерационной шихты и ограничение условий образования и распространения пылегазовых выбросов агломерации;

- создание в доменном производстве благоприятных технологических условий (путем кардинального улучшения качества агломерата) для внедрения, в основном, коксосберегающих процессов выплавки чугуна.

Сжигание углерода топлива в спекаемом слое всегда сопровождается большими выбросами  $CO$  (обычно составляют 25–30 кг/т агломерата). Существенное влияние на концентрацию  $CO$  в отходящем из слоя газе могут оказывать [139]:



- концентрация горючего углерода топлива ( $C_m$ ) в шихте;
- средняя крупность топлива, содержание в нем классов крупности менее 0,5 мм и более 3 мм;
- скорость фильтрации газов и содержание в них свободного кислорода;
- гранулометрический состав спекаемой шихты;
- степень развития вторичных реакций восстановления  $CO_2$  и догорания  $CO$ .

Самым мощным фактором кардинального сокращения выбросов  $CO$  является уменьшение расхода твердого топлива на процесс спекания: чем меньше сжигается топлива, тем меньше образуется продуктов горения, удаляемых в атмосферу.

Диоксид серы является главным сернистым и вторым по массе газовым выбросом после монооксида углерода. Этот оксид серы образуется в результате: взаимодействия сульфидов железа ( $FeS$  и  $FeS_2$ ) с кислородом просасываемого газа и кислородом высших окислов железа; окисления органической серы топлива в зоне горения; диссоциации сульфатных соединений  $CaSO_4$  и  $BaSO_4$  при температурах более  $1100^\circ C$ . Способствуют процессам газификации сульфидной серы (образования из сульфидов  $SO_2$ ): пониженный расход топлива на спекание, достаточная измельченность частиц шихты, повышенное содержание кислорода в газовой фазе.

Разложение сульфатов лучше протекает в условиях повышенных температур, нейтральной или восстановительной газовой среды, умеренного количества жидких фаз. Основную массу серы вносит в агломерационную шихту твердое топливо — коксовая мелочь и антрацитовый штыб. Смесь этих топлив в соотношении 50:50 может содержать 1,4–1,5% серы органических соединений и 0,6–0,7% серы сульфидов железа и сульфатов [135].

Ниже рассмотрены некоторые подходы совершенствования технологии агломерации на Украине и из мирового опыта с целью сокращения пылегазовых выбросов.

Известно [138], что существенное влияние на концентрацию  $CO$  в отходящем из слоя газе может оказывать крупность топлива, содержание в нем классов менее 0,5 мм и более 3 мм. Увеличение содержания в топливе мелкой фракции менее 0,5 мм всегда оказывает вредное влияние на экологические показатели, так как существенно возрастают объемы потребления топлива и количество выбросов токсичных газов, в частности  $CO$ .

Интересны результаты, полученные японскими исследователями [51, 88]: топливо узкого диапазона крупности 1-2 мм обеспечивает максимальную температуру в зоне горения ( $1400^\circ C$  в сравнении с  $1250^\circ C$  при сжигании топлива крупностью 5-6 мм) и позволяет на 20,2 % снизить удельное потребление топлива.

В исследованиях, выполненных национальной металлургической академией Украины (г. Днепропетровск) [140], установлено, что по мере возрастания крупности топлива от 0,5 до 3,5 мм отношение объемов  $CO:CO_2$  в отходящих газах снижается за счет увеличения полноты сжигания углерода. Полное изъятие из состава топлива класса крупности менее 0,5 мм позволяет снизить расход топлива на 15,2 %, а концентрацию  $CO$  в газе уменьшить на 17,6 %. Одновременно уменьшаются объемы выбросов иных вредных газов ( $SO_2$ ,  $NO_x$  и др.), связанных своим образованием также с расходом топлива.

Степень развития реакций косвенного восстановления оксидов железа также оказывает влияние на количество выбросов и зависит от удельного расхода топлива на процесс и вида минералов железорудной части шихты. Диссоциация карбонатов шихты ( $CaCO_3$ ,  $MgCO_3$ ,  $MnCO_3$ ,  $FeCO_3$ ) вносит дополнительные объемы  $CO_2$  в состав газа и изменяет величину отношения

$CO:CO_2$ . Результаты опытных спеканий шихты разной основности [137], показывают, что увеличение расхода известняка в шихту от 0 до 15–20 % приводит к снижению отношения  $CO:CO_2$  в газе от 0,45 до 0,09–0,16. Обедненный по содержанию  $CO$  газ не способствует развитию реакций косвенного восстановления оксидов железа и образованию дополнительных объемов  $CO_2$ .

Существует технологическая целесообразность измельчения агломерационной извести до крупности 3–0 мм (при подаче извести непосредственно в поток шихты на аглофабриках) или до 12–0 мм (при ее подаче в концентраты, влажные пыли, шламы на складах). Измельчение позволяет резко повысить эффективность применения извести, уменьшить на 10–20 % и более ее расход и, что особенно важно, уменьшить общую потребность в твердом топливе на агломерацию в основном за счет использования технологии высокослойного спекания шихты.

Таким образом, на основе мирового опыта, основными направлениями ресурсо-экологического совершенствования технологического процесса агломерации можно считать следующие:

- подготовка шихтовых материалов к агломерации с использованием современного или усовершенствованного оборудования для загрузки;
- усреднение, подогрев шихты;
- реализация рациональной загрузки шихты с общим сокращением потребления топлива;
- спекание шихты в высоком и супер высоком слое.

Расчеты показывают [135, 139], что указанное совершенствование технологии, ориентировочно, позволит снизить более чем на 40 % колебания массовой доли железа в агломерате, и в результате, уменьшить расход твердого топлива в агломерации на 5–7 % и кокса в доменной плавке на 7–8 %. Экологические последствия такой экономии выражаются в уменьшении примерно на 6 % выбросов токсичных газов на аглофабриках и возможном

сокращении в масштабах предприятий страны вредного, в экологическом отношении производства, кокса на 1,5-1,7 млн. т/год.

## 1.6. Выводы по разделу 1

1. Проведен анализ современных направлений совершенствования процессов окускования сыпучих материалов. Интенсификация теплообменных процессов, повышение производительности процессов окускования на конвейерных машинах в настоящее время, с учетом повышающейся цены на энергоносители, дополняются особыми требованиями по экономичности, стабилизации качества продукта по высоте слоя и минимизации образования вредных выбросов при горении топлива.

2. Преобладающее влияние на качественные показатели агломерата оказывает структура подготовленного к спеканию слоя сыпучего материала, характеризующая его газодинамику, и закономерности распределения по его высоте топлива и флюсов. Последнее обуславливает интенсивность экзо- и эндотермических реакций, протекающих в слое и тепловой режим процесса окускования.

3. Газопроницаемость спекаемого слоя можно существенно улучшить, если при разгрузке шихты на конвейерную машину обеспечить увеличение соотношения наибольших и наименьших частиц сверху вниз. Благодаря усилению сегрегационных процессов в слое сыпучего материала подготовленного к тепловой обработке можно добиться увеличения газопроницаемости на 20%.

4. Одним из наиболее эффективных путей выравнивания теплового режима термообработки шихты, улучшения качества окускованного материала и интенсификации процесса окускования, является оптимизация

распределения фракций, и, соответственно, твердого топлива в окомкованной шихте по высоте слоя на спекательных тележках конвейерной машины. Последнее обеспечит улучшение использования ее химической и гранулометрической неоднородности, снижение расхода твердого топлива и рост производительности.

5. Анализ научно-технической информации позволил сделать вывод, что в работах не уделяется достаточного внимания вопросам загрузки сырых окатышей на конвейерную машину с целью выравнивания температурно-временного режима их обработки. Исходя из того, что поступление тепловой энергии по высоте слоя является не равномерным, и для обжига окатышей различного размера требуется различное количество теплоты, актуальными становятся исследования по определению количества энергии необходимой для обжига окатыша заданного размера и изучения возможностей дифференцируемой укладки окатышей в слой.

6. Перспективным направлением снижения вредных выбросов в атмосферу является реализация рациональной загрузки сыпучих материалов с использованием усовершенствованного оборудования с общим сокращением потребления топлива на процесс термообработки.

Основное содержание 1 раздела опубликовано в работах [169, 231, 242, 249, 252, 258].

## РАЗДЕЛ 2

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА В СТАЦИОНАРНЫХ СЛОЯХ СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА

#### 2.1. Структурные характеристики стационарного зернистого слоя

Термическая обработка сыпучего материала, характерная для агломерационного производства и процесса обжига железорудных окатышей, осуществляется с принудительным движением газов через слой, который представлен на рис. 2.1. Поток, просасываемый через структуру зернистого материала, оказывает на него силовое воздействие, равное гидравлическому сопротивлению слоя и определяет интенсивность тепло- и массообменных процессов, протекающих в последнем.

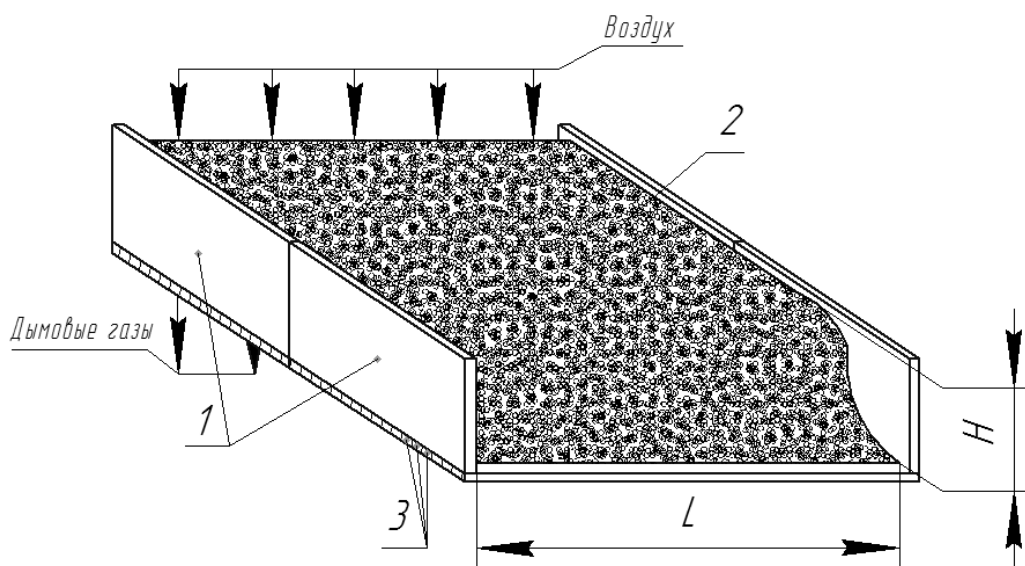


Рис. 2.1. Слой сыпучего материала подготовленного к спеканию (обжигу)  
1- спекательные тележки (паллеты); 2- зернистый материал; 3 – колосниковая решетка;  
 $L, H$  – ширина и высота слоя сыпучего материала, соответственно.

Скорость и характер движения газов в наибольшей степени зависят от таких свойств зернистого материала, как: крупность, форма и взаимное расположение частиц, а также объем, форма и размер порового пространства [141,142].

Процессы теплообмена в слое в значительной степени зависят от следующих свойств сыпучих материалов: теплоемкость, теплопроводность, порозность и крупность частиц, составляющих их массу, и влияют на скорость перемещения тепловой волны в его объеме [143].

Таким образом, анализ структурных характеристик зернистого слоя, является необходимым условием для изучения газодинамических особенностей и тепловых процессов, протекающих в массе сыпучего материала.

Слой железорудных окатышей, либо шихтовых материалов, подготовленных к тепловой обработке, представляет собой систему со сложными геометрическими характеристиками. Детальное описание последних, предусматривает указание формы и общего количества элементов  $N$  в единице объема, размеров  $d_i$  и взаимного расположения частиц. Указанные характеристики определяют размер и характер просветов между частицами, структуру поровых каналов, по которым движутся, протекающие через слой, продукты горения.

Для практического применения, столь детальное описание структуры слоя сыпучего материала крайне сложно и в нем нет необходимости. В условиях реального технологического процесса, число частиц слоя на паллете конвейерной машины весьма велико и вероятность их укладки в каком-либо определенном порядке относительно направления движения, при загрузке без предварительного рассеивания, крайне мала. Таким образом, зернистый слой целесообразно рассматривать как однородную изотропную среду с некоторыми усредненными обобщенными характеристиками.

В качестве указанных характеристик, для описания внутренней структуры сыпучего материала, воспользуемся понятием порозности  $\varepsilon$  ( $\text{м}^3/\text{м}^3$ ) и удельной поверхности слоя  $a$  ( $\text{м}^2/\text{м}^3$ ) [2]:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{нас}}{\rho_T}. \quad (2.1)$$

где:  $\rho_T$  - плотность частиц твердой фазы,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\rho_{нас}$  - насыпная плотность,  $\rho_{нас} = (1 - \varepsilon)\rho_T$ ,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

$$a = a_0(1 - \varepsilon), \quad (2.2)$$

где:  $a_0 = S_{II} / V$ ;  $S_{II}$  - площадь поверхности частицы,  $\text{м}^2$ ;  $V$  - объем частицы,  $\text{м}^3$ .

Для технологического процесса обжига железорудных окатышей, зернистый слой, при использовании роликового укладчика, отсеивающего мелкие фракции окатышей, состоит из одинаковых или близких по размерам частиц – монодисперсный слой. Геометрические характеристики подобных слоев близки по характеристикам к слою, составленному из шаров одинакового диаметра. Характер упаковки частиц зависит от свойств материала. Приняв окатыши как трудносжимаемые частицы, будем считать, что возможные контакты между ними будут точечными. Число контактов  $M$ , зависит от укладки частиц, но не превышает  $M_{\max} = 12$  при наиболее плотной регулярной укладке.

При заполнении тележки конвейерной машины монодисперсными частицами возможна их регулярная укладка или хаотичная засыпка с возможной последующей утряской. Последнее определяет как средние значения порозности слоя  $\varepsilon$ , так и число контактов частиц с соседями  $M$ .



Возможные типы регулярных упаковок подробно исследовали в [144]. Так, для наиболее рыхлой кубической укладки, рис. 2.2(а), число  $M = 6$  (4 соседа в горизонтальной плоскости и по одному сверху и снизу), расстояние между параллельными плоскостями, проходящими через центры шаров равно  $d$ . Порозность при таком типе укладки составляет  $\varepsilon = 0,476$ .

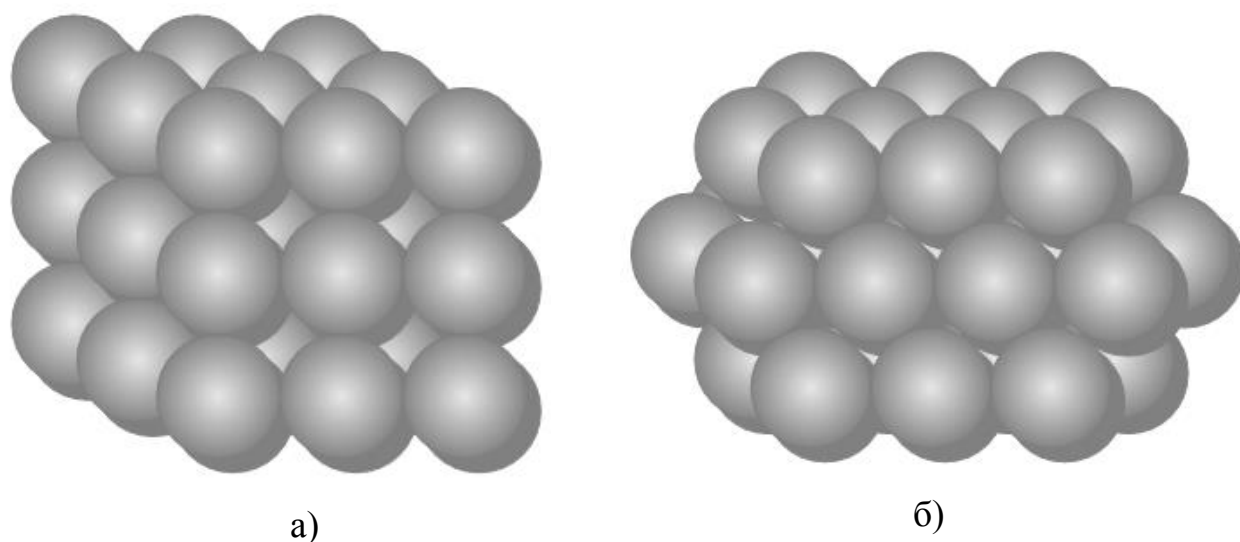


Рис. 2.2. Типы регулярных упаковок частиц: а – кубическая; б – гексагональная.

Максимально плотная - гексагональная упаковка, рис. 2.2(б), обеспечивает число контактов  $M = 12$  (6 соседей в вершинах правильного шестиугольника в горизонтальной плоскости и по три сверху и снизу в промежутках между шарами этой плоскости), расстояние между соседними плоскостями  $0,707d$ , порозность  $\varepsilon = 0,2595$ .

При формировании структуры слоя сыпучих материалов возможны и другие упорядоченные укладки с промежуточными значениями  $\varepsilon$  и четными  $M = 8, 10, 12$ . Комбинированные расположения соседних плоскостей дают упорядоченные упаковки с промежуточными, нечетными значениями  $M = 5, 7, 9$  и 11.

При беспорядочной загрузке частиц на паллеты конвейерной машины, образуются, как правило, случайные группировки с различными значениями  $\varepsilon$ ,  $M$  и со средней порозностью  $\bar{\varepsilon} = 0,38 \div 0,39$ . Укладка частиц с последующей вибрацией слоя, обеспечивает более плотную упаковку с  $\bar{\varepsilon} = 0,33 \div 0,36$  [7].

В условиях агломерационного передела, слой сыпучего материала формируется из шарообразных частиц различного размера – полидисперсный слой. Элементы последнего имеют довольно широкий интервал линейных размеров  $d_i$ . Таким образом, если полидисперсный слой состоит из частиц с размерами  $d_i = \sqrt[3]{6V_i / \pi}$ , а относительное содержание частиц каждого размера обозначим через:

$$\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_i, \dots, \Phi_n, \text{ где } \sum_{i=1}^N \Phi = 100. \quad (2.3)$$

Средний диаметр частиц слоя определится из выражения:

$$d_{cp} = \sum_{i=1}^N d_i \Phi_i. \quad (2.4)$$

В полидисперсных слоях мелкие зерна могут располагаться в промежутках между крупными и, таким образом, снижать общую порозность слоя. Так, при кубической укладке частиц шарообразной формы диаметром  $d$ , промежутки между ними можно заполнить частицами диаметром  $d_1 = d(\sqrt{3} - 1) = 0,732d$ . При этом, общая порозность слоя снизится с 0,476 до 0,271. В поры между частицами этих двух размеров можно уложить еще более мелкие частички радиусом  $d_2 < d_1 < d$  и т.д. Таким образом, при

регулярной укладке слоя из частиц шести различных диаметров можно получить порозность 0,039.

В реальных условиях загрузки вероятность того, что слой с частицами различных размеров, при плавном изменении их диаметров, будет иметь пониженную порозность крайне мала и значение  $\varepsilon$  у смеси со значительным диапазоном фракционного состава частиц, как правило того же порядка ( $\varepsilon = 0,35 \div 0,45$ ), что и у монодисперсных слоев [145].

В зависимости от типа регулярной укладки частиц, будет изменяться просвет в плоскостях, рис. 2.3, перпендикулярных потоку продуктов горения, что окажет влияние на газодинамику слоя сыпучего материала.

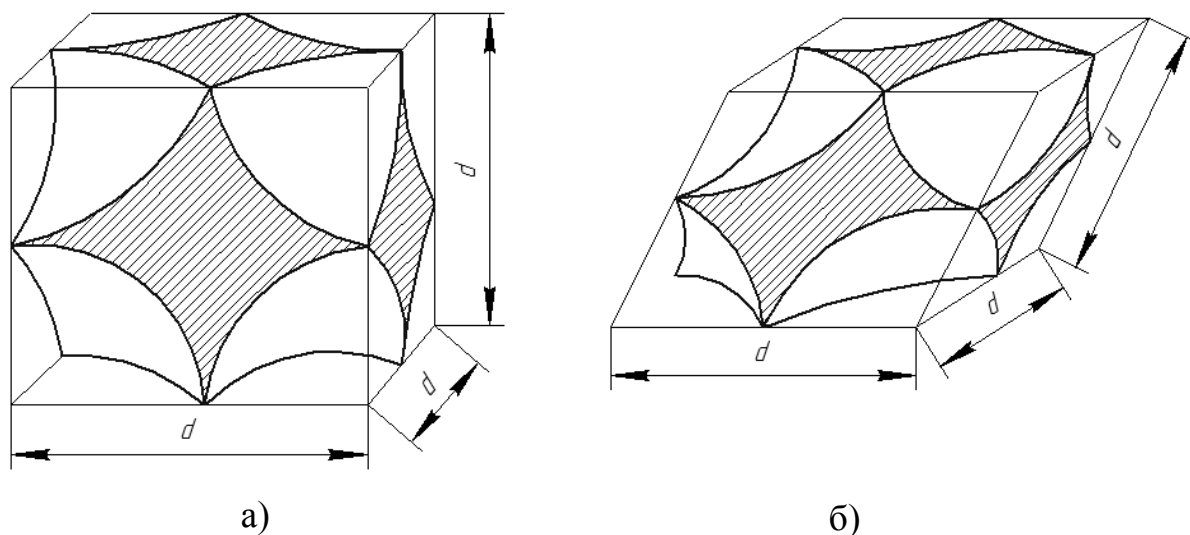


Рис. 2.3. Вид пористого пространства при: а – кубической укладке; б – гексагональной укладке.

В непосредственной близости от контакта между шарообразными частицами образуется капиллярная щель, в которой конденсируются пары. Вблизи этих контактов образуются так называемые «застойные зоны» протекающего потока, замедляющие процесс теплообмена с частицами материала. С увеличением  $M$  количество этих зон возрастает.

Поступающий в зернистый слой поток газа наталкивается на своем пути на частицы слоя и обтекает их. В результате, отдельные струи газа будут постоянно отклоняться в ту или иную сторону от основного направления потока. Это удлинение истинного пути продуктов сгорания внутри зернистого слоя определяется его извилистостью и характеризует общее газодинамическое сопротивление слоя материала.

В зависимости от того, преобладают ли в сыпучем материале размеры крупных, средних или мелких частиц и пор, примем их классификацию как крупно-, средне- и мелкозернистые или как крупно-, средне- и мелкопористые.

Следует отметить существенное влияние размеров пор и частиц на теплофизические характеристики сыпучего материала. Основой тому является несколько физических причин [146]:

1. Чем меньше размер пор, тем меньше коэффициент теплопроводности содержащегося в них воздуха, а следовательно, меньше и эффективный коэффициент теплопроводности слоя. При большем размере пор и той же общей пористости коэффициент теплопроводности материала будет выше;

2. Чем меньше частицы, составляющие структуру зернистого материала, тем меньше его теплопроводность при прочих равных условиях. Последнее объясняется тем, что измельченное тело обладает уменьшенными порами;

3. Контактная доля теплопередачи уменьшается при дроблении материала в связи с возрастанием общей пористости слоя.

Таким образом, можно сделать вывод, что структура слоя сыпучего материала в значительной степени влияет на порозность слоя, а так же на его теплофизические характеристики и газодинамику, что следует учитывать при математическом описании тепловых процессов в моно- и полидисперсных слоях материалов подготовленных к тепловой обработке.

## 2.2. Тепловые процессы в слое монодисперсных материалов

Общий методологический подход к описанию тепловых процессов, протекающих в слое сыпучего материала, сформирован и представлен в работах Э.М. Гольдфарба «Теплотехника металлургических процессов» [147], Б.И. Китаева и др. «Тепло- и массообмен в плотном слое» [117], В.Г. Лисиенко и др. «Теплофизика металлургических процессов» [148]. Последующее обобщение и развитие исследований теплотехнических особенностей слоевых процессов получило в работах Ю.А. Фролова.

При описании теплофизических процессов, протекающих в слоях сыпучих материалов, применяют ряд допущений, стремясь достичь при этом сохранения в модели агломерируемого слоя наиболее важных характеристик и особенностей процесса, таких как: физико-химические характеристики сырья и топлива, фракционный состав исходного материала, степень сегрегации классов крупности материала, характеризующей структуру слоя подготовленного к тепловой обработке и т.д.

Указанная задача существенно усложняется при переходе к оценке локальных характеристик теплообмена. Знание последних становится наиболее актуальным на современном этапе развития металлургических процессов. Определение локальных характеристик теплообмена, позволяет проводить более детальную оценку протекания процесса в целом, обоснованно решать задачи по определению количества выделяемой и поглощаемой теплоты при химических реакциях и фазовых переходах, анализировать равномерность нагрева слоя, учесть требования технологии с целью устранения теплотехнических проблем процесса.

Закономерности протекания тепловых процессов в слое монодисперсных материалов, характерны для обжига железорудных

окатышей на конвейерных машинах. Общую схему теплообмена в таком слое представим на рис. 2.4.

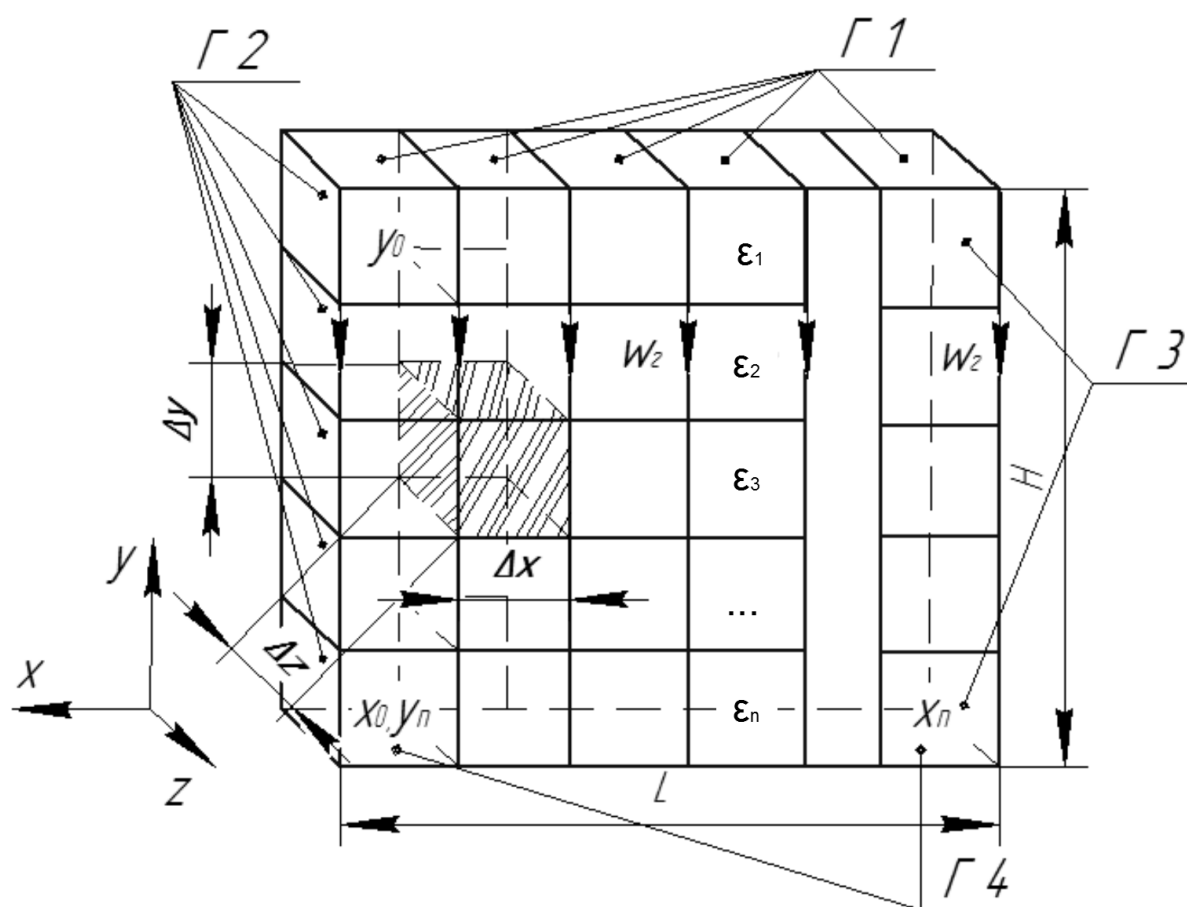


Рис. 2.4. Схема теплообмена в пористом монодисперсном слое

Физическую модель процесса представим следующим образом: через слой монодисперсного сыпучего материала с порозностью  $\varepsilon_1 = \varepsilon_n = const$ , имеющего высоту  $H$  и температуру  $T_m$ , движется газ, температура которого на входе в слой равна  $T_2$ , а скорость газового потока характеризуется величиной  $\omega_2$ .

Примем слой сыпучего материала на паллете конвейерной машины как стационарный, градиент температур в котором направлен по оси ( $y$ ). Для соблюдения технологических требований необходимо обеспечить определенный уровень температур по высоте и ширине паллеты ( $x, y$ ). Так

как рассматривается квазистационарный процесс обжига и движение слоя на теплопередачу вдоль оси движения ( $z$ ) не учитываем, осуществлен переход к двумерной модели.

В основу математической модели агломерируемого слоя положено представление о частицах сыпучего материала как о термически тонких телах. Это позволило рассматривать элементарный объем слоя как сплошное тело, в объёме которого попеременно действуют источники и стоки теплоты. Массивность частиц материала, при этом, учитывалась путём введения поправки в расчёте объёмного коэффициента теплоотдачи [21].

В постановке примем следующие допущения: тепловой поток от газа к гранулам в любой точке слоя пропорционален разности температур между поверхностью частиц и газом; коэффициент теплоотдачи от газа к гранулам постоянен для всей поверхности частицы.

Согласно теплового баланса, теплота  $Q_1$ , подведенная к некоторому элементу слоя, равняется теплоте  $Q$ , поглощаемой последним:

$$dQ_1 = dQ. \quad (2.5)$$

Для вывода дифференциального уравнения теплопроводности выделим в слое элементарный объем  $V$  со сторонами  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ , рис. 2.4. Грани указанного объема расположены параллельно соответствующим координатным осям.

Согласно закону сохранения энергии, количество теплоты  $Q_1$ , введенное в элементарный объем извне за время  $t$  посредством теплопроводности, представляет собой [149,150]:

$$dQ_1 = dq dx dt; \quad (2.6)$$

где:  $q$  - вектор плотности теплового потока, Вт/м.

Учитывая, что теплота в единичном объеме распространяется по нормали к изометрическим поверхностям, количество теплоты, подведенное теплопроводностью к рассматриваемому объему, по трем координатным осям будет равно:

$$dQ_1 = - \left( \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) dx dy dz dt; \quad (2.7)$$

где:  $q_x, q_y, q_z$  - количество теплоты, поступающее в объем по соответствующим граням, Вт/м<sup>2</sup>.

Теплота, подведенная к объему при рассмотрении изобарного процесса, уйдет на изменение энтальпии материала, заключенного в этом объеме за счет теплопроводности и конвекции газа, соприкасающегося с частицами в слое материала. Учитывая, что направление движения продуктов горения происходит только по оси  $y$ , можем записать:

$$dQ = c_{pm} \rho_{нас} \left[ \frac{\partial T_m}{\partial t} + \omega_z \frac{\partial T_z}{\partial y} \right] dx dy dz dt; \quad (2.8)$$

где:  $c_{pm}$  - изобарная теплоемкость материала, Дж/(кг·К);  $\rho_{нас}$  - насыпная плотность слоя материала, кг/м<sup>3</sup>,  $T_m(x, y, z, t)$  - температура материала, К.

Подставив (2.7), (2.8) в (2.5) получим:

$$c_{pm} \rho_{нас} \left[ \frac{\partial T_m}{\partial t} + \omega_z \frac{\partial T_z}{\partial y} \right] = - \left( \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right). \quad (2.9)$$

Учитывая, что теплообмен между частицами осуществляется по закону Фурье:  $q = -\lambda(\partial T / \partial x)$ , уравнение (2.9), с учетом замены вектора плотности теплового потока, примет вид:



$$c_{pm} \rho_{нас} \left[ \frac{\partial T_m}{\partial t} + \omega_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} \right] = \left[ \frac{\partial T_m}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T_m}{\partial x} \right) + \frac{\partial T_m}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T_m}{\partial y} \right) + \frac{\partial T_m}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T_m}{\partial z} \right) \right]; \quad (2.10)$$

где:  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

Исходя из того, что слой монодисперсного материала состоит из частиц одинакового размера  $d = const$ , то можем пренебречь влиянием крупности частиц на коэффициент теплопроводности  $\lambda(d) = const$ . Беря во внимание результаты экспериментов А.У. Франчука, представленных в [146], в которых приведено исследования изменения коэффициента теплопроводности в зависимости от формы частиц и типа их укладки, можно судить о существенном влиянии влажности материала  $W$  на его теплопроводность, рис. 2.5.

Следует отметить, что теплофизические свойства материала так же меняются при изменении его температуры, таким образом, в (2.10) коэффициент теплопроводности представим как функцию температуры и влажности материала  $\lambda = f(T, W)$ .

Теплоемкость и плотность материала, в свою очередь, так же находятся в функциональной зависимости от температуры  $c = f(T)$ ,  $\rho = f(T)$ .

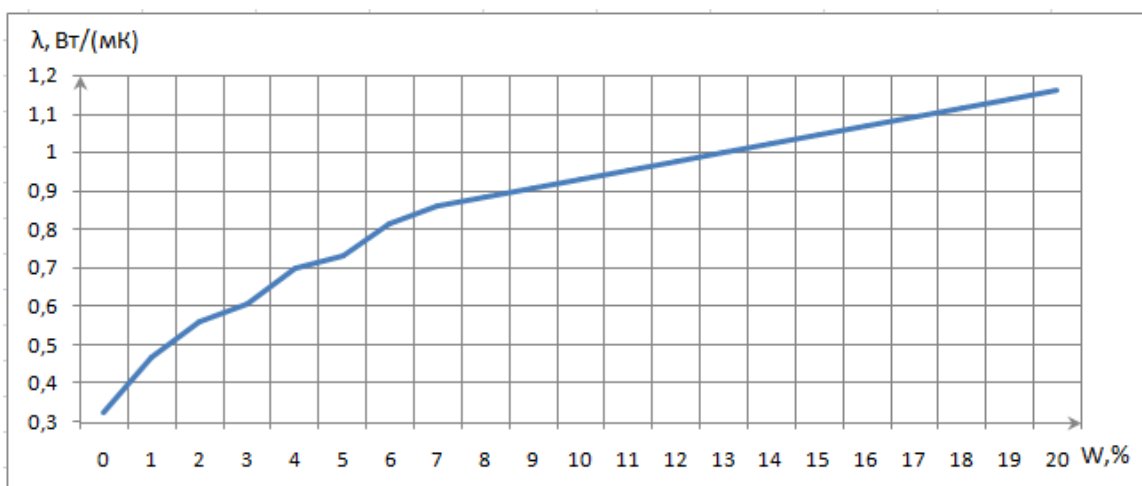


Рис. 2.5. Зависимость коэффициента теплопроводности сыпучего материала, состоящего из шарообразных частиц, от его влагосодержания [146].

Приняв, что насыпная плотность слоя, состоящего из отдельных частиц материала с плотностью  $\rho_m$ , равна  $\rho_{нас} = \rho_m(1 - \varepsilon)$ , уравнение (2.10) запишется в виде:

$$c_{pm}(T)\rho_m(T)(1 - \varepsilon)\left[\frac{\partial T_m}{\partial t} + \omega_z \frac{\partial T_z}{\partial y}\right] = \left[\frac{\partial T_m}{\partial x}\left(\lambda(T, W)\frac{\partial T_m}{\partial x}\right) + \frac{\partial T_m}{\partial y}\left(\lambda(T, W)\frac{\partial T_m}{\partial y}\right) + \frac{\partial T_m}{\partial z}\left(\lambda(T, W)\frac{\partial T_m}{\partial z}\right)\right]. \quad (2.11)$$

Таким образом, (2.11) является дифференциальным уравнением теплопроводности для слоя монодисперсного материала. Учитывая, что в слое сыпучего материала происходит конвективный теплообмен между потоками газа и поверхностью частиц, уравнение (2.11) необходимо дополнить дифференциальным уравнением теплообмена в слое.

Примем, что продукты горения проходя через указанный объем слоя  $V$ , за бесконечно малый промежуток времени передает материалу часть тепла  $Q_2$ , количество которого, согласно закону Ньютона-Рихмана, будет равно:

$$dQ_2 = \alpha_v(T_z - T_m)dxdydzdt; \quad (2.12)$$

где:  $\alpha_v$  - объемный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>3</sup>·К);  $T_z$  - температура газа, К,  $T_m$  - температура материала, К.

Количество теплоты, полученное материалом от газа влечет за собой изменение температуры последнего. Исходя из движения газового потока по координате  $y$ , количество теплоты переданной газом  $Q_3$  равно:

$$dQ_3 = -c_2 \rho_2 \varepsilon \frac{\partial T_2}{\partial t} - c_2 \rho_2 \omega_2 \frac{\partial T_2}{\partial y}; \quad (2.13)$$

где:  $c_2$  - теплоемкость газа, кДж/(кг·К);  $\rho_2$  - плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $\omega_2$  - скорость газового потока, м/с,  $\varepsilon$  - порозность слоя, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

Приравняв уравнения (2.12) и (2.13), получим:

$$\alpha_v (T_2 - T_m) = -c_2 \rho_2 \varepsilon \frac{\partial T_2}{\partial t} - c_2 \rho_2 \omega_2 \frac{\partial T_2}{\partial y}. \quad (2.14)$$

Уравнения (2.11) и (2.14) описывают изменение температуры слоя в процессе его тепловой обработки. Однако, учитывая, что структура слоя существенно влияет на его гидравлическое сопротивление, и как следствие на интенсивность процессов теплообмена в последнем, указанные уравнения следует дополнить уравнением, учитывающим изменение скорости фильтрации продуктов горения по высоте слоя – уравнением газодинамики.

2.2.1. Уравнение газодинамического сопротивления при описании тепловых процессов, протекающих в зернистом слое.

Изучению вопроса по определению гидравлического сопротивления зернистых слоев посвящен перечень работ, обзор которых представлен в следующих монографиях [2, 29, 141-143 и др.]. Следует отметить, что результаты представленные авторами существенно разнятся между собой, что свидетельствует о недостатках методики обобщения экспериментальных данных, а так же о наличии параметров, принимающих различные значения в отдельных работах.

Мелкозернистые стационарные слои с высокой удельной поверхностью имеют ряд особенностей, которые формируют неравномерность потока. К ним относятся неравномерная укладка зерен на паллеты, прибортовые эффекты, напряженное состояние слоя. Помимо этого, в неподвижном слое существуют постоянные контакты между частицами. Последнее приводит к спеканию зерен, при протекании высокотемпературных процессов, стимулирующих диффузию в твердой фазе. В районе каждого контакта возникает застойная зона с малоподвижной средой. В результате любой стационарный слой материала характеризуется некоторой непроточной зоной, не только снижающей общий уровень процессов переноса, но вызывающий их существенную неравномерность.

Сложность обобщения экспериментальных данных обусловлена тем, что кроме порозности слоя на потери давления существенное влияние оказывает коэффициент гидравлического сопротивления  $\psi_{сл}$ . Последний обычно определяют для слоя, состоящего из шарообразных частиц. При этом  $\psi_{сл}$  чаще всего представляют в зависимости от критерия Рейнольдса. В общем случае, когда потери давления в слое складываются из ламинарной и турбулентной составляющих, коэффициент сопротивления описывают уравнением вида [141]:

$$\psi_{сл} = \frac{b}{Re^n} + \frac{a}{Re}; \quad (2.15)$$

где:  $a, b$  - эмпирические коэффициенты.

Первый член правой части уравнения (2.15) представляет собой турбулентную составляющую, а второй ламинарную.

Для слоя зернистых материалов в отличие от идеального слоя, состоящего из гладких труб (каналов), характерен постепенный переход от ламинарного течения к турбулентному. Переходная область охватывает

широкий диапазон значений критерия Рейнольдса – от 10 до  $10^3$ . Вместе с тем с физической точки зрения модель, состоящая из совокупности шаров, представляется более естественной, если учесть, что согласно теореме импульсов полное сопротивление слоя представляет сумму сопротивлений всех шаров.

Приведенная в [142] зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса для железорудных окатышей, хорошо согласуется с экспериментальными данными других авторов:

$$\psi_{cl} = \frac{3300}{Re}. \quad (2.16)$$

Однако указанная зависимость пригодна для слоев с узким диапазоном порозности  $\varepsilon = 0,45 - 0,50 \text{ м}^3/\text{м}^3$ . Гранулометрический состав железорудных окатышей в реальных условиях представлен более широким диапазоном фракций и, как следствие, газопроницаемость слоя будет ниже. В процессе термообработки окатышей наблюдается их растрескивание, раздавливание в нижней части слоя в результате переувлажнения, оплавление и другие нарушения исходного состояния, что обуславливает резкое увеличение гидравлического сопротивления слоя. Коэффициент сопротивления слоя и потери напора в нем в зоне обжига, в результате усадки слоя, в зоне сушки конвейерной машины, вследствие образования зоны переувлажнения, увеличиваются более чем в 3 раза.

Исходя из результатов исследований, представленных в [142], слой, состоящий из кусковых тел неправильной формы, при одинаковой порозности  $\varepsilon$ , будет иметь существенно больший коэффициент сопротивления. Так, при  $\varepsilon = 0,3$  и  $Re = 170-2000$  для сыпучего монодисперсного слоя состоящего из сферических тел  $\psi_{cl}$  изменяется от 140 до 75, для сыпучего слоя из тел неправильной формы  $\psi_{cl}$  - от 350 до 270.

При агломерации, движение газа в слое ограничивается ламинарной и переходной областями. Последнее определяет большее влияние критерия Рейнольдса на коэффициент гидравлического сопротивления слоя, чем при обжиге окатышей. Однако существенные трудности идентификации исходного гранулометрического состава агломерационной шихты; сегрегация частиц при их загрузке на паллеты; появление зон в слое после воспламенения твердого топлива, в результате чего образуется область переувлажнения (в нижних частях слоя), область разрушения комочков шихты (в результате ее подсушивания), область жидкой фазы (в зоне горения); зависимость структуры готового агломерата от крупности и количества топлива, а так же свойств исходных материалов существенно осложняет получение достоверных опытных данных по определению коэффициента гидравлического сопротивления слоя и их обобщение.

Для учета неопределенности размера частиц окомкованной шихты при различной влажности, требуемая величина которой непостоянна для разной шихты, автором [3], предложена формула для определения коэффициента гидравлического сопротивления слоя в следующем виде:

$$\frac{\psi_{cl}}{d_g} = C \left( \frac{Re}{d_g} \right)^{-n}; \quad (2.17)$$

где:  $d_g$  - эквивалентный диаметр гранул, м;  $C, n$  - эмпирические коэффициенты.

Для использования приведенной формулы, необходимо определить значение эквивалентного диаметра гранул, что затрудняет ее использование. Так же, как указывалось выше, значения коэффициента сопротивления определяется в большей мере не эквивалентным диаметром частиц, а условиями движения газа в слое.

Способ определения коэффициента гидравлического сопротивления отдельных зон слоя, предложенный Коротичем В.И. [2], исключает нахождение величины эквивалентного диаметра кусков или каналов, и связан с экспериментальным определением указанного коэффициента. Для описания потерь давления в отдельной зоне и слое в целом, может быть использована формула, являющаяся интерпретацией формулы Дарси-Вейсбаха:

$$\Delta P = \psi_{сл} \omega_2^2 \rho_2 \frac{h}{r_3} (1 + \beta T); \quad (2.18)$$

где:  $\omega_2$  - скорость движения просасываемых через слой газов, м/с;  $\rho_2$  - плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $h$  - высота слоя, м;  $r_3$  - радиус эквивалентного канала, м;  $\beta$  - коэффициент объемного расширения газа,  $K^{-1}$ ;  $T$  - температура газа. К.

Для расчета потерь давления газов в слое для конкретных условий необходимо определить значение коэффициента гидравлического сопротивления. Причем для каждой из отдельных зон агломерируемого слоя его величина будет отличаться. Последнее обуславливает необходимость выполнения замеров опытным путем непосредственно в потоке на конвейерной машине, либо в разработке методики его расчета с учетом изменения гранулометрического состава зернистого материала.

Экспериментальное определение газодинамических характеристик слоя сыпучего материала будет рассмотрено в 5 разделе настоящей диссертации.

Уравнения (2.11) и (2.14) с учетом теплообмена в слое между продуктами сгорания и материалом, а также уравнения характеризующего изменение скорости фильтрации продуктов горения по высоте слоя (2.18) могут быть объединены в систему уравнений, позволяющей описать тепловые процессы, протекающие в слое монодисперсного материала. Таким образом, имеем следующую систему уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned}
& c_{pm}(T)\rho_m(T)(1-\varepsilon)\left[\frac{\partial T_m}{\partial t} + \omega_z \frac{\partial T_z}{\partial y}\right] = \\
& = \left[ \frac{\partial T_m}{\partial x} \left( \lambda(T,W) \frac{\partial T_m}{\partial x} \right) + \frac{\partial T_m}{\partial y} \left( \lambda(T,W) \frac{\partial T_m}{\partial y} \right) + \frac{\partial T_m}{\partial z} \left( \lambda(T,W) \frac{\partial T_m}{\partial z} \right) \right] + q_z(y); \\
& \alpha_v(T_z - T_m) = -c_z \rho_z \varepsilon \frac{\partial T_z}{\partial t} - c_z \rho_z \omega_z \frac{\partial T_z}{\partial y}; \\
& \frac{dP}{dy} = \psi_{cl} \omega_z^2 \rho_z \frac{y}{r_s^2} (1 + \beta T).
\end{aligned} \right. \quad 2.19)$$

где:  $q_z(y)$  - мощность эффективного источника теплоты (зажигательного горна, продуктов сгорания) по высоте слоя, Вт/м;

Исходя из того, что в реальных технологических условиях на слой монодисперсного материала, находящегося на конвейерной машине, сверху действует источник постоянной температуры, а по бокам и снизу слой контактирует с внешней средой посредством конвективного теплообмена, начальные и граничные условия запишутся в следующем виде:

$$\text{Н.У. } t_0 = 0, T_m(x, y, z) = T_0, T_z(x, y, z) = T_0, \Delta P(y) = \Delta P(t_0).$$

$$\text{Г.У.: } y = y_0; T_m|_{\Gamma_1} = T_z, t > 0,$$

$$x = x_0; \lambda_m(T, W) \frac{\partial T_m}{\partial x} \Big|_{\Gamma_2} = \alpha_F (T_m(x, y, z) - T_{o.c.}), t > 0,$$

$$x = x_n; -\lambda_m(T, W) \frac{\partial T_m}{\partial x} \Big|_{\Gamma_3} = \alpha_F (T_m(x, y, z) - T_{o.c.}), t > 0,$$

$$y = y_n; \lambda_m(T, W) \frac{\partial T_m}{\partial y} \Big|_{\Gamma_4} = \alpha_F (T_m(x, y, z) - T_{o.c.}), t > 0,$$

$$z_0 - z_n = 1.$$

Система уравнений (2.19), дополненная начальными и граничными условиями, определяет общую математическую формулировку



рассматриваемой задачи. Приведенные уравнения описывают распределение температуры в слое монодисперсного материала, характерном для слоя железорудных окатышей, что позволит использовать (2.19) в исследованиях тепловых процессов протекающих в обжигаемом материале.

### 2.3. Тепловые процессы в слое полидисперсных материалов

Математическое описание тепловых процессов, протекающих в слое сыпучих полидисперсных материалов, усложняется необходимостью учета дополнительных локальных характеристик теплообмена. Ключевое влияние на структуру слоя будет иметь фракционный состав сыпучего материала, который в свою очередь, будет определять порозность  $\varepsilon$ , сформированного на паллете конвейерной машины слоя.

При рассмотрении тепловых процессов, протекающих в полидисперсном материале следует учитывать, что порозность не является постоянной величиной по высоте слоя  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n \neq const$ , рис. 2.4. Значение  $\varepsilon$  слоя, как было рассмотрено выше, зависит от способа укладки материала. При хаотичной загрузке наблюдается более плотная упаковка частиц с обеспечением пониженной порозности  $\varepsilon = 0,25 \div 0,33$ , что скажется на газодинамике слоя [145].

Теоретически разделение классов крупности – сегрегация частиц полидисперсного материала, позволит сформировать отдельные горизонты слоя из частиц близкого фракционного состава, тем самым снизить заполняемость порового пространства частицами мелких фракций. Последнее, в свою очередь, позволит достичь значений порозности близких к условиям использования монодисперсного материала с  $\varepsilon = 0,39 \div 0,47$ .

Структура сформированного слоя, его порозность, оказывает существенное влияние на теплопроводность [145]. Тепловой поток в значительной мере проходит последовательно через отдельные гранулы слоя и промежутки газа между ними. Предложено множество теоретических и экспериментальных зависимостей, определяющих коэффициент теплопроводности как функцию структуры слоя и теплопроводности обеих фаз сыпучего материала. Обзор работ в этой области дан в монографии Чудновского А.Ф. [146]. Приведенные здесь обобщенные зависимости для определения теплопроводности слоя сыпучего материала, представляют слой как некоторую геометрически регулярную модель из элементов различного размера с разными законами их контактирования. Здесь же отмечено, что такие факторы теплообмена как контактная теплопроводность и конвекция возрастают по мере увеличения пор и размера частиц. Однако каждый из этих факторов имеет различное влияние на величину эффективного коэффициента теплопроводности в зависимости от плотности и температуры материала.

Для определения коэффициента теплопроводности воспользуемся формулой, предложенной Шулейкиным В.В. [146]:

$$\lambda = 0,22 \left[ 0,85 \cdot \lg \frac{d}{0,06} + 0,1(d - 0,06) + 5,92\gamma + 0,72\gamma^2 + 1 \right]; \quad (2.20)$$

где:  $d$  - размер гранулы, мм;  $\gamma$  - объемный вес материала, кг/м<sup>3</sup>.

Приведенная формула рекомендуется для широкого класса материалов с  $\gamma = 400 \div 1800$  кг/м<sup>3</sup>. Расчетные зависимости коэффициента теплопроводности сыпучего материала от размера частиц и объемного веса, представлены на рис. 2.6.

Представленные кривые располагаются в строго определенном порядке, высшее расположение кривой, и соответственно, большие значения

коэффициента теплопроводности характеризуют материал с большим размером частиц.

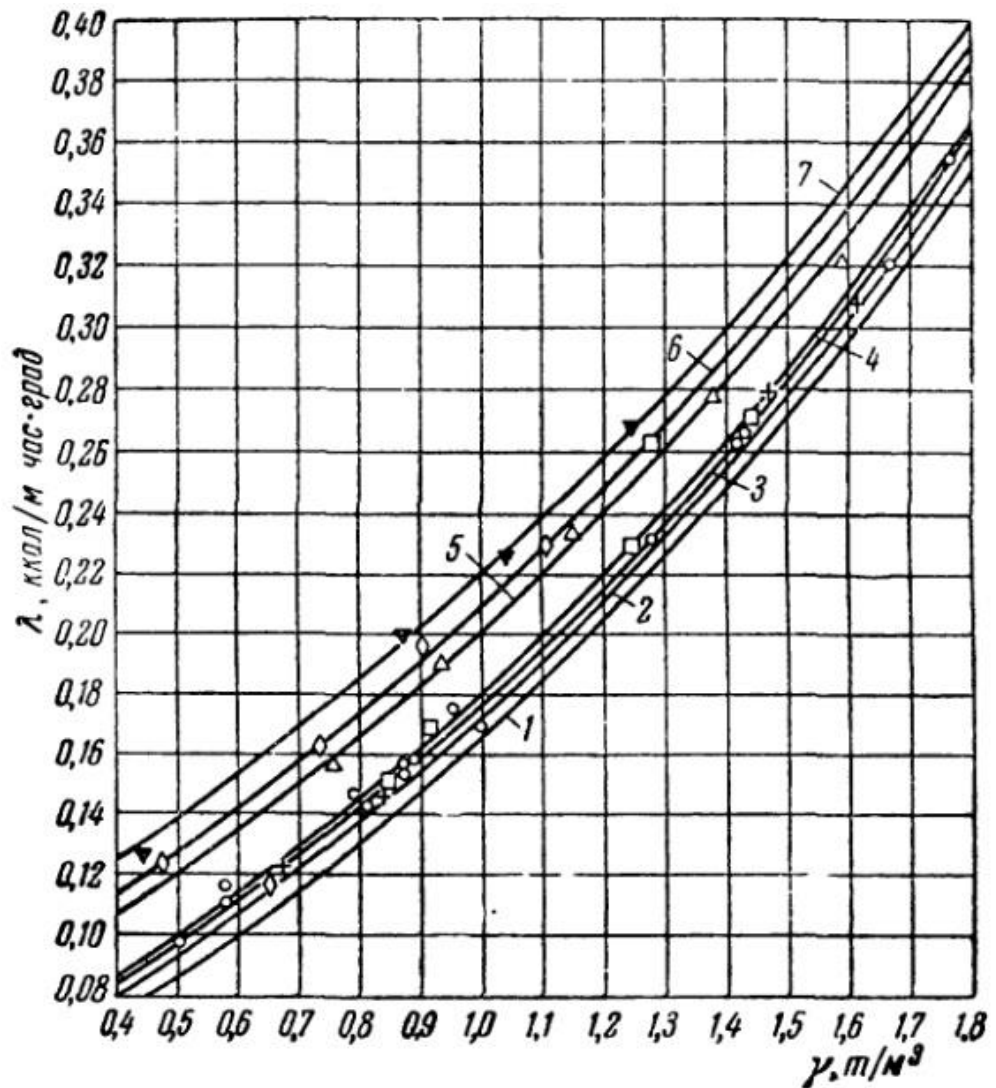


Рис. 2.6. Зависимость коэффициента теплопроводности сыпучего материала от размера частиц и насыпной плотности [146].

1 – мелкозернистые материалы; 2-7 – материалы с предельной крупностью зерен соответственно 0-1,2 мм, 0-5 мм, 0-20 мм, 0,6-20 мм, 1,2-20 мм, 2,5-20 мм.

С учетом влияния размера частиц сыпучего материала на коэффициент теплопроводности, система уравнений (2.19) примет вид:

$$\left\{ \begin{aligned} & c_{pm}(T)\rho_m(T)(1-\varepsilon)\left[\frac{\partial T_m}{\partial t} + \omega_2 \frac{\partial T_2}{\partial y}\right] = \\ & = \left[ \frac{\partial T_m}{\partial x} \left( \lambda(T, W, d) \frac{\partial T_m}{\partial x} \right) + \frac{\partial T_m}{\partial y} \left( \lambda(T, W, d) \frac{\partial T_m}{\partial y} \right) + \frac{\partial T_m}{\partial z} \left( \lambda(T, W, d) \frac{\partial T_m}{\partial z} \right) \right] + q_2(y); \\ & \alpha_v(T_2 - T_m) = -c_2 \rho_2 \varepsilon \frac{\partial T_2}{\partial t} - c_2 \rho_2 \omega_2 \frac{\partial T_2}{\partial y}; \\ & \frac{dP}{dy} = \psi_{cl} \omega_2^2 \rho_2 \frac{y}{r_3^2} (1 + \beta T). \end{aligned} \right. \quad (2.21)$$

С целью определения значений коэффициента теплопроводности в зависимости от влияния физической величины, в системе уравнений (2.21) произведем замену переменной  $\lambda(T, W, d)$  на средневзвешенное значение коэффициента теплопроводности  $\lambda_\Sigma$ , которое определяется следующим образом:

$$\lambda_\Sigma = \sum_{i=1}^n \lambda_i r_i; \quad (2.22)$$

где:  $\lambda_i$  - значение коэффициента теплопроводности в зависимости от физической величины  $(T, W, d)$ , Вт/(м·К);  $r_i$  - степень влияния физической величины на  $\lambda_i$ , доли.

С целью определения численного значения коэффициента  $r_i$  произведена обработка опытных данных [146,150], представленных в табл. 2.1. Диапазон изменения экспериментальных данных был сужен применительно к реальным характеристикам сырьевых материалов  $W(6 \div 12)\%$ ,  $d(0,14 \div 0,917)$ , мм и тепловому режиму работы конвейерных машин  $T(20 \div 1200)$ , °С.

Таблица 2.1

**Зависимость коэффициента теплопроводности от величин ( $W, d, T$ )**

№	1	2	3	4	5	6	7
$\lambda(W)$ , Вт/(м·К)	0,8141	0,86062	0,88388	0,90714	0,9304	0,95366	0,97692
W, %	6	7	8	9	10	11	12
$\lambda(d)$ , Вт/(м·К)	0,29307	0,30586	0,32447	0,33959	0,35471	0,36983	0,40472
d, мм	0,14	0,25	1,84	3,15	5,83	7,21	9,17
$\lambda(T)$ , Вт/(м·К)	0,283	0,315	0,325	0,36	0,47	0,72	0,98
T, °С	20	200	400	600	800	1000	1200

В результате установлено интервал варьирования степени влияния указанных физических величин на коэффициент теплопроводности, который составил:  $r_i(W) = 0,58 \div 0,41$ ,  $r_i(d) = 0,22 \div 0,17$ ,  $r_i(T) = 0,2 \div 0,42$ .

$$r_i(W) = \frac{\eta(W)}{\eta_{\Sigma}}; \quad r_i(d) = \frac{\eta(d)}{\eta_{\Sigma}}; \quad r_i(T) = \frac{\eta(T)}{\eta_{\Sigma}};$$

где:  $\eta(W)$ ,  $\eta(d)$ ,  $\eta(T)$  - диапазон изменения коэффициента теплопроводности от соответствующей физической величины, Вт/(м·К);  $\eta_{\Sigma}$  - величина суммарного воздействия физических величин на коэффициент теплопроводности зернистого слоя, Вт/(м·К).

Температурное поле в процессе тепловой обработки плотного слоя сыпучих материалов во многом зависит от величины коэффициента теплоотдачи, определяющего интенсивность развития тепловых явлений. При описании граничных условий для полидисперсного слоя следует учитывать тот факт, что коэффициент теплоотдачи не является постоянным

$\alpha_F \neq const$ , и изменяется по высоте и ширине слоя. Последнее вытекает из зависимости [151]:

$$\alpha_V = \alpha_F \frac{6(1-f)}{d_m} \cdot \frac{1}{m}; \quad (2.23)$$

где:  $f$  - площадь грани единичного объема слоя, м<sup>2</sup>;  $d_m$  - диаметр частицы, м;  $m = 1 + Bi \cdot (k_3 - 1 / k_3 \cdot k_2)$  - поправка на массивность частиц [20, 21];  $Bi$  - критерий Био;  $k_2$  - коэффициент усреднения плотности теплового потока по сечению тела;  $k_3$  - коэффициент усреднения среднemasсовой температуры по сечению тела.

Для расчета коэффициента теплоотдачи, входящего в состав системы (2.21), для частиц сферической или близкой к ней формы использованы формулы Тимофеева В.Н., имеющие вид:

$$\begin{aligned} Nu &= 0,61 Re^{0,67} (npu - Re > 200); \\ Nu &= 0,106 Re (npu - Re \leq 200). \end{aligned} \quad (2.24)$$

где:  $Nu = \alpha_F \cdot d_m / \lambda_2$ ;  $Re = \omega_2 \cdot d_m / \nu_i$ ;  $\alpha_F = \alpha_V / F$ ;  $F = 6(1-f) / d_m$ ;  $w_2$  - скорость движения продуктов сгорания, м/с;  $d_m$  - средний диаметр частиц материала, м;  $\nu_i$  - коэффициент кинематической вязкости газа;  $\lambda_2$  - коэффициент теплопроводности газа.

На основании экспериментальных данных по определению среднего диаметра сыпучего железорудного и бокситового материала с учетом использования загрузочных узлов различной конструкции, приведенных в разделах 3 и 4, рис. 3.14. 4.1, установлены закономерности изменения объемного коэффициента теплоотдачи для слоев железорудной и бокситовой шихты подготовленной к тепловой обработке, рис. 2.7,2.8.

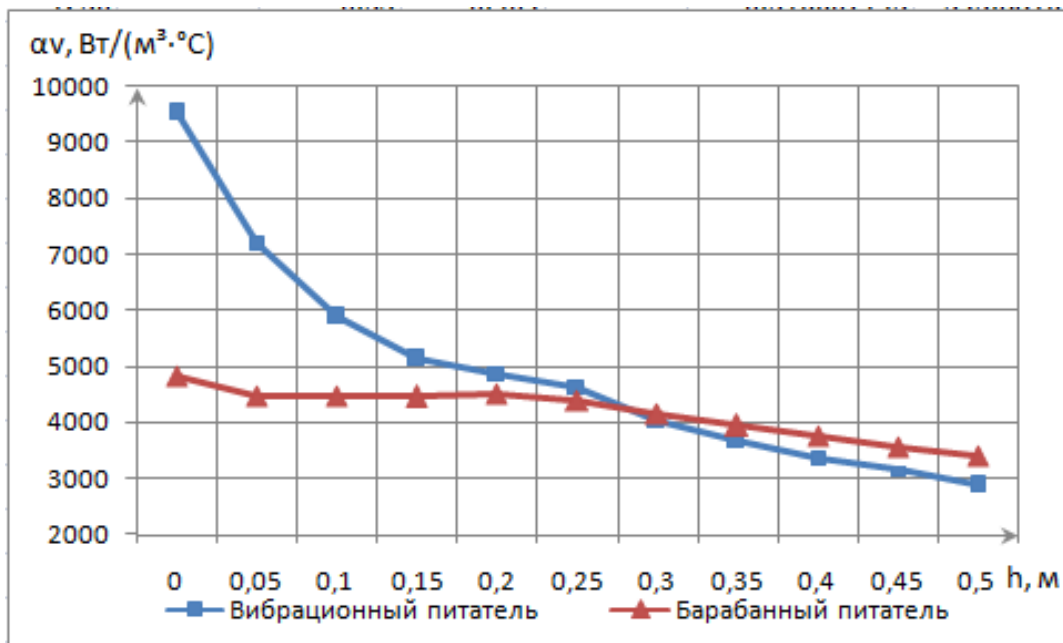


Рис. 2.7. – Изменение значения  $\alpha_v$  по высоте слоя железорудной шихты, крупность частиц  $d_{cp}=0,5 \dots 8$ , мм

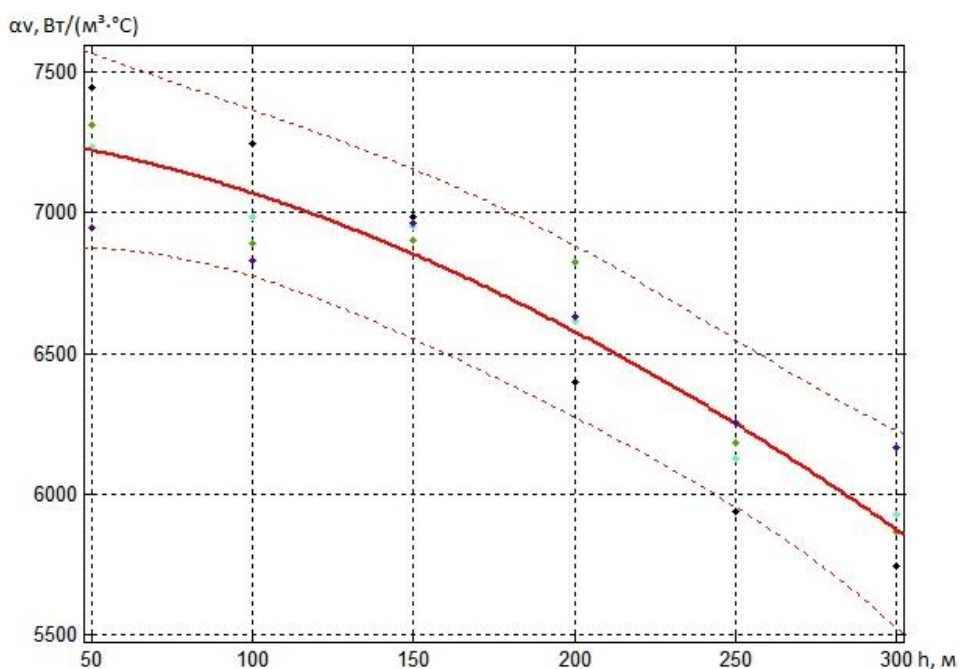


Рис. 2.8. – Изменение значения  $\alpha_v$  по высоте слоя бокситовой шихты при загрузке барабанным питателем, крупность частиц  $d_{cp}=5 \dots 8,5$ , мм

Представленные результаты свидетельствуют о значительном влиянии степени разделения классов крупности сыпучего материала, обусловленной типом загрузочной системы, что необходимо учитывать при моделировании

тепловых процессов, протекающих в слое. Наблюдается существенная неравномерность величины коэффициента теплоотдачи для верхних и нижних горизонтов слоя при использовании для загрузки вибрационного питателя. Диапазон изменения  $\alpha_v$  в этом случае находится в пределах  $2800 \div 9500$  Вт/(м<sup>3</sup>·°С). При использовании барабанного питателя наблюдается монотонное снижение величины коэффициента, для случая агломерации железорудного материала диапазон и изменения  $\alpha_v$  составил  $3300 \div 4800$  Вт/(м<sup>3</sup>·°С), а бокситов  $5900 \div 7200$  Вт/(м<sup>3</sup>·°С).

Таким образом, граничные условия, при неизменных начальных условиях, для рассматриваемого полидисперсного слоя запишутся в следующем виде:

$$\Gamma.У.: y = y_0; T_m|_{\Gamma_1} = T_e, t > 0,$$

$$x = x_0; \lambda_{\Sigma} \frac{\partial T_m}{\partial x} \Big|_{\Gamma_2} = \alpha_{F1} (T_m(x, y, z) - T_{o.c.}), t > 0,$$

$$x = x_n; -\lambda_{\Sigma} \frac{\partial T_m}{\partial x} \Big|_{\Gamma_3} = \alpha_{F2} (T_m(x, y, z) - T_{o.c.}), t > 0,$$

$$y = y_n; \lambda_{\Sigma} \frac{\partial T_m}{\partial y} \Big|_{\Gamma_4} = \alpha_{F3} (T_m(x, y, z) - T_{o.c.}), t > 0,$$

$$z_0 - z_n = 1.$$

Представленные граничные условия, в совокупности с системой уравнений (2.21), характеризуют математическую постановку задачи для полидисперсного слоя без внутренних источников энергии. Указанная система уравнений может быть использована для изучения тепловых процессов в слое агломерируемого материала при условии учета в математическом описании внутренних источников теплоты, характеризующих сгорание твердого топлива в слое шихты.



## 2.4. Комбинированный нагрев слоя сыпучих материалов с учетом внутренних источников энергии

При рассмотрении тепловых процессов, протекающих внутри нагреваемого сыпучего материала, необходимо учитывать процессы, так называемого, сложного теплообмена. При этом могут одновременно происходить перенос тепла излучением, конвекцией, теплопроводностью, а так же тепловыделение (поглощение) теплоты внутри зоны.

Особенно характерным для теплофизики металлургических процессов, является наличие тепловыделения наряду с поглощением теплоты в зонах, что связано с наличием, так называемых, внутренних источников энергии.

Таким образом, закон сохранения энергии положенный в основу вывода дифференциального уравнения теплопроводности (2.11) будет сформулирован следующим образом: количество теплоты  $dQ_1$ , введенное в элементарный объем, рис. 2.9, извне за время  $dt$  вследствие теплопроводности, а так же от внутренних источников  $dQ_2$ , равно изменению энтальпии вещества, содержащегося в этом объеме  $dQ$ :

$$dQ_1 + dQ_2 = dQ. \quad (2.25)$$

Примем количество теплоты, выделяемое внутренними источниками в единице объема слоя в единицу времени, через  $q_v$  (Вт/м<sup>3</sup>). В результате:

$$dQ_2 = q_v dx dy dz dt. \quad (2.26)$$

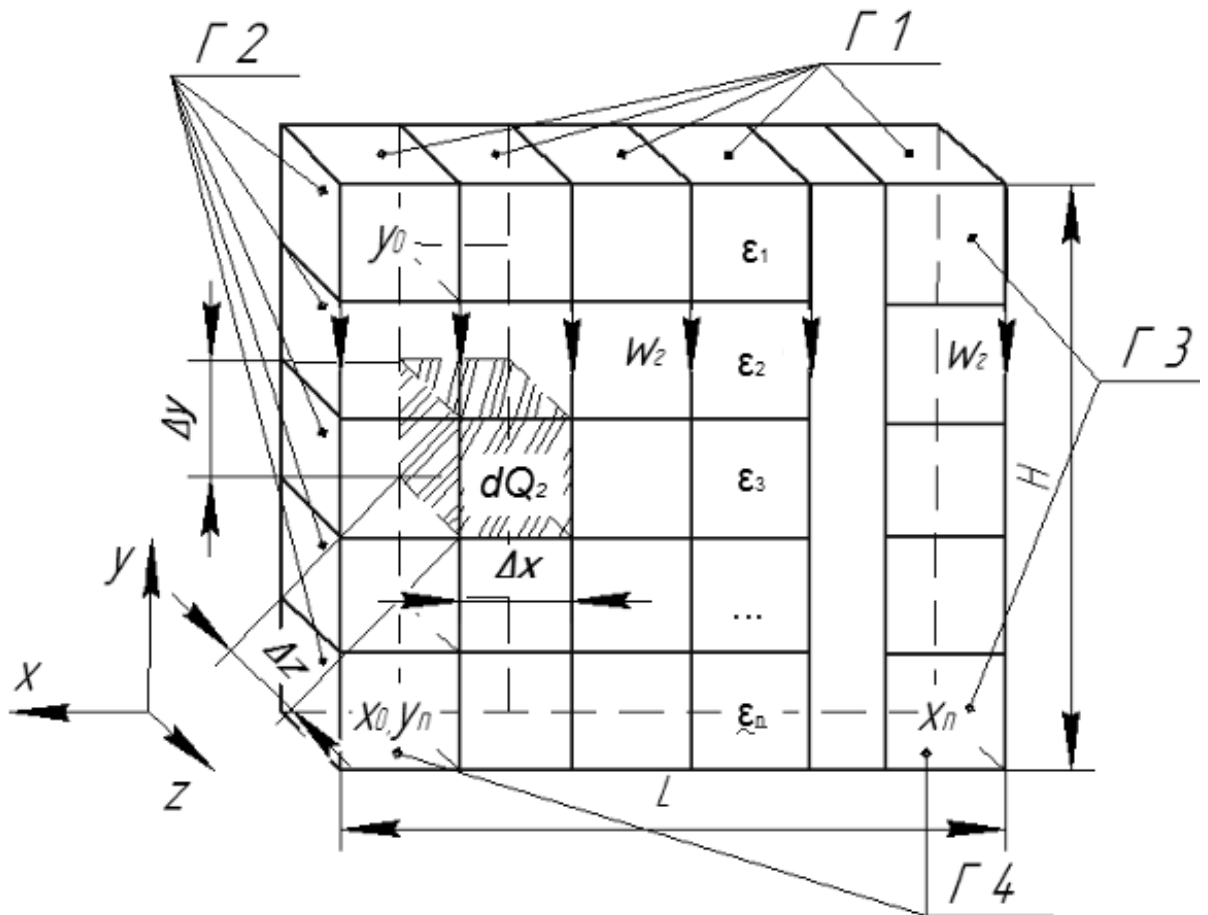


Рис. 2.9. Схема теплообмена в пористом слое при комбинированном нагреве

Таким образом, система уравнений (2.21) примет вид:

$$\left\{ \begin{aligned} & c_{pm}(T) \rho_m(T) (1 - \varepsilon) \left[ \frac{\partial T_m}{\partial t} + \omega_z \frac{\partial T_z}{\partial y} \right] = \\ & = \left[ \frac{\partial T_m}{\partial x} \left( \lambda_z \frac{\partial T_m}{\partial x} \right) + \frac{\partial T_m}{\partial y} \left( \lambda_z \frac{\partial T_m}{\partial y} \right) + \frac{\partial T_m}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial T_m}{\partial z} \right) \right] + q_v(x, y, z, t); \\ & \alpha_v (T_z - T_m) = -c_z \rho_z \varepsilon \frac{\partial T_z}{\partial t} - c_z \rho_z \omega_z \frac{\partial T_z}{\partial y}; \\ & \frac{dP}{dy} = \psi_{cl} \omega_z^2 \rho_z \frac{y}{r_s^2} (1 + \beta T). \end{aligned} \right. \quad (2.27)$$

Приведенная система уравнений характерна для процесса спекания полидисперсной шихты с добавлением твердого топлива. Мощность

внутренних источников теплоты, входящая в состав первого уравнения системы  $q_V(x, y, z, t)$ , зависит от процессов, протекающих в слое материала, находящегося на паллете конвейерной машины (теплоты горения твердого топлива, теплоты протекания различных химических реакций, связанных как с поглощением, так и выделением теплоты, протеканием фазовых переходов сопровождающихся плавлением либо кристаллизацией материала).

Количественную оценку мощности внутренних источников можно дать путем составления элементарных тепловых балансов для единичных объемов, составляющих слой сыпучего материала, что детально рассмотрено в разделах 3 и 4 настоящей диссертации. В общем виде мощность внутренних источников теплоты в элементарном объеме представим следующим образом:

$$q_V = \frac{Qm\varepsilon}{V\rho_m t}; \quad (2.28)$$

где:  $Q$  - теплота, выделяющаяся в элементарном объеме слоя, определяемая из теплового баланса, учитывающая теплообмен между газом и материалом, экзо- и эндотермические реакции при тепловой обработке, кДж;  $m$  - масса единичного объема, кг;  $V$  - объем единичного объема, м<sup>3</sup>;  $\rho_m$  - плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $t$  - время тепловой обработки, с.

Для случая обжига железорудных окатышей уравнение (2.11), входящее в состав системы (2.19), примет вид:

$$\begin{aligned} & c_{pm}(T)\rho_{нас}(T)(1-\varepsilon)\left[\frac{\partial T_m}{\partial t} + \omega_z \frac{\partial T_z}{\partial y}\right] = \\ & = \left[\frac{\partial T_m}{\partial x}\left(\lambda(T,W)\frac{\partial T_m}{\partial x}\right) + \frac{\partial T_m}{\partial y}\left(\lambda(T,W)\frac{\partial T_m}{\partial y}\right) + \frac{\partial T_m}{\partial z}\left(\lambda(T,W)\frac{\partial T_m}{\partial z}\right)\right] + q_V(x, y, z, t). \end{aligned}$$

Мощность источников теплоты, входящая в состав уравнения, будет определяться, в большей мере температурой теплоносителя, поступающего в слой сыпучего материала, так как этот технологический процесс протекает без использования твердого топлива, интенсивность экзо- и эндотермических реакций, протекающих в слое обжигаемых окатышей, незначительна и составляет до 7% от общего теплового баланса элементарного объема.

Технологические решения, направленные на применение пылевидной коксовой мелочи в процессе обжига окатышей путем ее накатывания на поверхность гранул, не получили широкого распространения по причине значительного уноса дорогостоящего топлива мелкой фракции с поверхности «напудренных» окатышей, потоком продуктов горения.

Математическая формулировка задачи, представленная системой уравнений (2.27) с учетом мощности внутренних источников энергии, характеризующих сгорание твердого топлива в слое материала, позволяет подойти к вопросу расчета распределения температуры в слое агломерируемого материала. Этапы реализации численного решения указанной задачи, приведены ниже.

## 2.5. Решение задачи распределения температуры в единичном объеме агломерационного слоя

Текущий уровень развития вычислительной техники дает возможность исследователю решать с помощью ЭВМ прикладные задачи широкого класса. Однако эксперимент, по-прежнему, является решающим критерием оценки правильности того или иного решения. Возможности анализа физических процессов путем использования численных методов, предоставляемые современными программными продуктами таковы, что

позволяют получать решения с высокой степенью согласуемости с экспериментальными данными.

К числу эффективных методов решения задач математической физики относится метод конечных элементов (МКЭ). За счет своих особенностей (однородности формы конечных элементов, большого числа нулевых элементов глобальной матрицы и др.) данный метод является легко реализуемым на ЭВМ. В настоящее время абсолютное большинство программных пакетов, предлагаемых различными разработчиками специализированного программного обеспечения для инженерных расчетов, в том числе и широко известный пакет Ansys, в качестве математического аппарата использует именно МКЭ [152-155].

Для решения задачи по определению распределения температуры в единичном объеме  $P$  слоя агломерационной шихты, рассмотрим схематический срез спекаемого слоя на паллете агломашины, представленный на рис. 2.10.

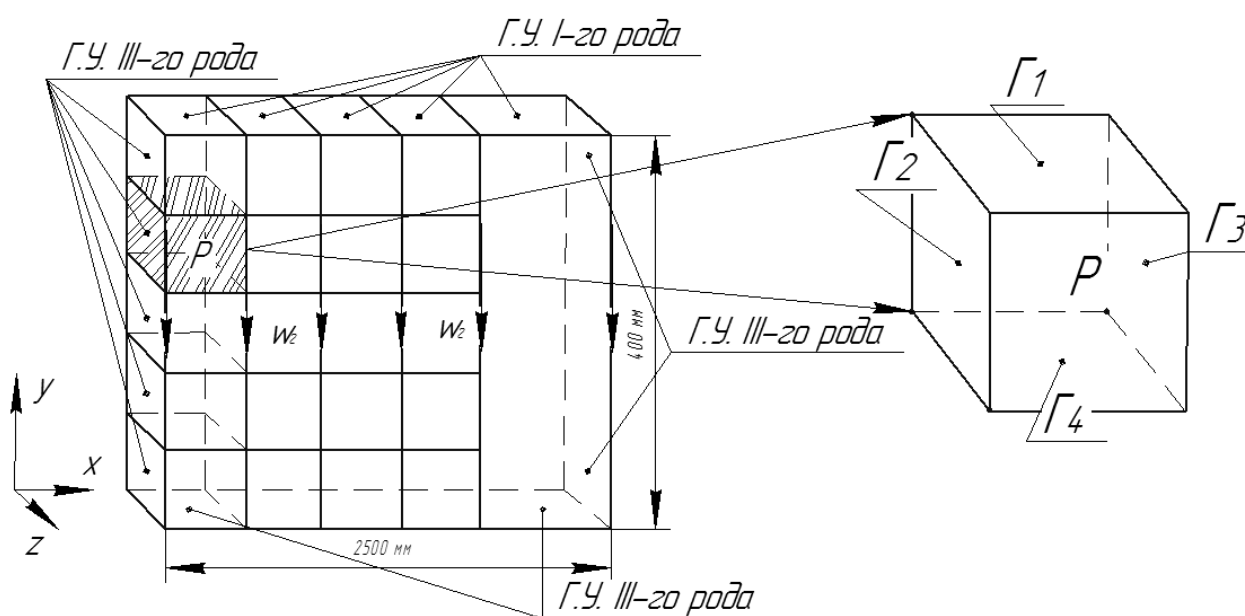


Рис. 2.10. Расчетная схема разбиения агломерируемого слоя шихты

Приведенная схема характерна для стандартного слоя шихты высотой 400 мм, находящегося на спекательной тележке шириной 2500 мм.

Сформулируем математическую постановку задачи теплопроводности. Имеем слой материала заданной плотности, разбитый по ширине и высоте на единичные объемы (области). Сверху действует источник с постоянной температурой, по бокам и внизу слой контактирует с внешней средой посредством конвективного теплообмена. Объемная плотность распределения внутренних источников теплоты, представленных в виде распределенного в слое топлива, выражается как функция координат с распределением  $Q(x, y, z, t)$ .

Математическая постановка задачи включает систему уравнений (2.27) с внутренними источниками тепла, начальные и граничные условия:

$$\text{Н.У. } t_0 = 0, T_m(x, y, z) = T_0, T_z(x, y, z) = T_0, \Delta P(y) = \Delta P(t_0). \quad (2.29)$$

$$\text{Г.У.: } y = y_0; T_m|_{\Gamma_1} = T_z, t > 0,$$

$$x = x_0; \lambda_\Sigma \frac{\partial T_m}{\partial x} \Big|_{\Gamma_2} = \alpha_{F1} (T_m(x, y, z) - T_{o.c.}), t > 0,$$

$$x = x_n; -\lambda_\Sigma \frac{\partial T_m}{\partial x} \Big|_{\Gamma_3} = \alpha_{F2} (T_m(x, y, z) - T_{o.c.}), t > 0, \quad (2.30)$$

$$y = y_n; \lambda_\Sigma \frac{\partial T_m}{\partial y} \Big|_{\Gamma_4} = \alpha_{F3} (T_m(x, y, z) - T_{o.c.}), t > 0,$$

$$z_0 - z_n = 1.$$

Для аппроксимации функции  $T_m$  в нумерованных узлах области  $P$  с границами  $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4$  выберем систему базисных функций  $N_m, m = \overline{1, M}$  с помощью которых построим приближенное решение:

$$T_m \approx \bar{T} = \sum_{m=1}^M T_m N_m. \quad (2.31)$$

В трехмерном случае в качестве конечных элементов можно использовать тетраэдры рис. 2.11, с нумерованными узлами в вершинах  $i, j, k, l$ . Если расчетная область разбита на тетраэдры, то базисные функции, ассоциируемые с каждым нумерованным узлом конечного элемента  $P^g$  формируются в виде линейных функций переменных  $x, y, z$ , удовлетворяющих условиям равенства единицы в узлах, для которых они определены, и нулю в остальных узлах.

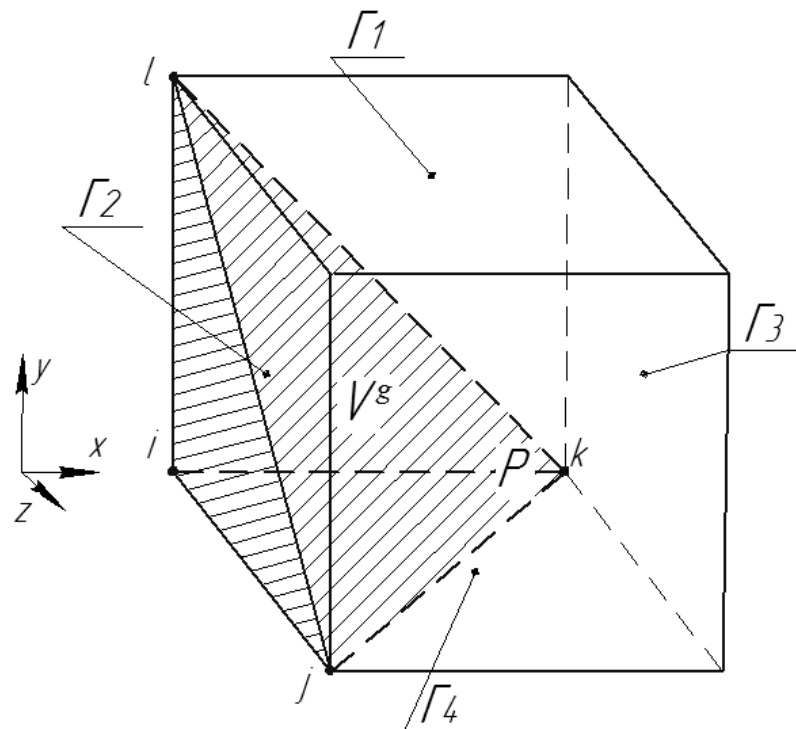


Рисунок 2.11. Разбивка единичной, расчетной области на конечные элементы.

Для узла  $i$  базисная функция примет вид:

$$N_i^g(x, y, z) = a_i^g + b_i^g x + c_i^g y + d_i^g z .$$

Базисные функции в узлах  $j, k, l$  определяются аналогично [154, 156-158]. Таким образом, формируется система линейных, алгебраических уравнений для определения коэффициентов  $a_i^g, b_i^g, c_i^g, d_i^g$  базисных функций  $N_i^g(x, y, z)$ :

$$a_i^g = \frac{\Delta_a^g}{6V^g}; b_i^g = \frac{\Delta_b^g}{6V^g}; c_i^g = \frac{\Delta_c^g}{6V^g}; d_i^g = \frac{\Delta_d^g}{6V^g},$$

где  $V^g$  - объем конечного элемента (тетраэдра), м<sup>3</sup>.

$$V^g = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} 1 & x_i & y_i & z_i \\ 1 & x_j & y_j & z_j \\ 1 & x_k & y_k & z_k \\ 1 & x_l & y_l & z_l \end{bmatrix}; \Delta_a^g = \begin{bmatrix} x_j & y_j & z_j \\ x_k & y_k & z_k \\ x_l & y_l & z_l \end{bmatrix};$$

$$\Delta_b^g = - \begin{bmatrix} 1 & y_j & z_j \\ 1 & y_k & z_k \\ 1 & y_l & z_l \end{bmatrix}; \Delta_c^g = - \begin{bmatrix} 1 & x_j & z_j \\ 1 & x_k & z_k \\ 1 & x_l & z_l \end{bmatrix}; \Delta_d^g = - \begin{bmatrix} 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \\ 1 & x_l & y_l \end{bmatrix}.$$

Вектор базисных функций для элемента задается как  $N = [N_i, N_j, N_k, N_l]$ . Если узловые значения искомой функции  $T_m, m = i, j, k, l$  станут известными, то значения функции  $T(x, y, z)$  во внутренних точках элемента  $P^g$  определяются с помощью функции элемента:

$$\bar{T}^g = T_i^g N_i^g + T_j^g N_j^g + T_k^g N_k^g + T_l^g N_l^g. \quad (2.32)$$

Если подставить приближенное решение (2.32) в (2.31) то результатом будет не тождественный ноль, а некоторая функциональная невязка  $G_P(x, y, z)$  по расчетной области  $P$  и невязка  $G_L(x, y, z)$  по границе  $\Gamma$ :

$$G_P(x, y, z) = \rho c \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} - \left( \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} \lambda \left( \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} \right) + \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} \lambda \left( \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} \right) + \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \lambda \left( \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \right) \right) - Q(x, y, z, t), \quad (2.33)$$

$$G_L(x, y, z) = \lambda \frac{\partial \bar{T}}{\partial n} \Big|_{\Gamma}$$



Согласно метода взвешенных невязок [155], необходимо обеспечение ортогональности функциональных невязок и специальным образом подобранных весовых функций  $W_S(x, y, z), S = \overline{1, M}$  для невязки  $G_P(x, y, z)$  и  $\overline{W}_S(x, y, z), S = \overline{1, M}$  - для невязки  $G_L(x, y, z)$ . Для непрерывных функций  $G_P(x, y, z)$  и  $G_L(x, y, z)$  это означает равенство нулю суммы тройного и криволинейного интегралов соответственно по области и границе:

$$(G_P, W_S) + (G_L, \overline{W}_S) = \iiint_P \left[ \rho c \frac{\partial \overline{T}}{\partial t} - \left( \frac{\partial \overline{T}}{\partial x} \lambda \left( \frac{\partial \overline{T}}{\partial x} \right) + \frac{\partial \overline{T}}{\partial y} \lambda \left( \frac{\partial \overline{T}}{\partial y} \right) + \frac{\partial \overline{T}}{\partial z} \lambda \left( \frac{\partial \overline{T}}{\partial z} \right) \right) - Q(x, y, z, t) \right] \cdot W_S(x, y, z) dx dy dz + \int_L \left[ \lambda \frac{\partial \overline{T}}{\partial n} \Big|_r \right] \cdot \overline{W}_S d\Gamma = 0, \quad S = \overline{1, M}; \quad (234)$$

где:  $W_S(x, y, z)$  - весовые функции для внутренних узлов расчетной области  $S = \overline{1, M}$ ,  $\overline{W}_S(x, y, z)$  - весовые функции для граничных узлов расчетной области.

В соответствии с методом взвешенных невязок Галеркина, весовые функции равны базисным:  $W_S = N_S$ ,  $\overline{W}_S = \overline{N}_S$ . Таким образом, подставляя (2.34) в (2.31) и используя к полученному выражению первую формулу Грина, получаем формулировку конечно-элементного метода Галеркина:

$$\sum_{m=1}^M T_m \left[ \int_V \rho c \frac{\partial \overline{T}}{\partial t} N_S N_m dV + \int_V \left( \frac{\partial N_S}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial N_m}{\partial x} \right) + \frac{\partial N_S}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial N_m}{\partial y} \right) + \frac{\partial N_S}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial N_m}{\partial z} \right) \right) dV \right] = \int_V Q(x, y, z, t) N_S dV, \quad S = \overline{1, M}.$$

Представленная выше система является неоднородной системой линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), которую можно представить в матричной форме:

$$[R] \cdot [T] = [F]; \quad (2.35)$$

где:  $R$  - глобальная матрица теплопроводности,  $T$  - вектор-столбец состоящий из температур в узлах элементов,  $F$  - глобальный вектор тепловой нагрузки.

Для конечного элемента  $g$  система уравнений МКЭ запишется в виде:

$$[r^g] \cdot [t^g] = [\varphi^g]; \quad (2.36)$$

где:  $r^g$  - локальная матрица теплопроводности:

$$r^g = \begin{bmatrix} r_{ii} & r_{ij} & r_{ik} & r_{il} \\ r_{ji} & r_{jj} & r_{jk} & r_{jl} \\ r_{ki} & r_{kj} & r_{kk} & r_{kl} \\ r_{li} & r_{lj} & r_{lk} & r_{ll} \end{bmatrix};$$

$\varphi^g$  – локальный вектор тепловой нагрузки:

$$\varphi^g = \begin{bmatrix} \varphi_i \\ \varphi_j \\ \varphi_k \\ \varphi_l \end{bmatrix}.$$

При использовании конечного элемента  $g$ , представленного тетраэдром, рис. 2.12, когда на всех гранях присутствует конвективный теплообмен и объемное тепловыделение, локальный вектор тепловой нагрузки  $\varphi^g$  запишется в виде, представленном ниже:

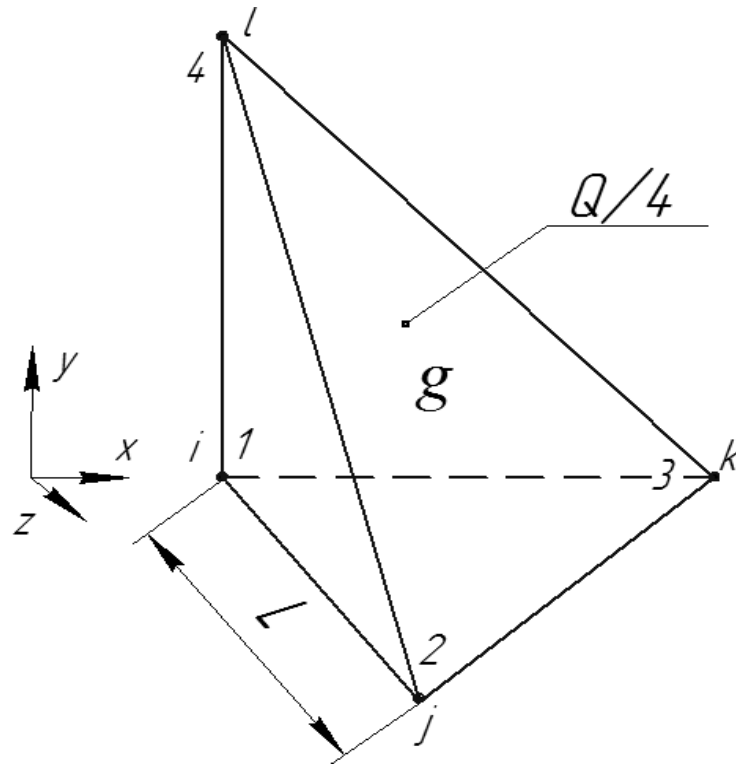


Рисунок 2.12. Конечный элемент  $g$  тетраэдральной формы.

$$\begin{aligned}
 \varphi^g = & \frac{Q}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} + \frac{T_{ij} \alpha_{ij} L_{ij}}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{T_{ik} \alpha_{ik} L_{ik}}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{T_{il} \alpha_{il} L_{il}}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \\
 & + \frac{T_{jk} \alpha_{jk} L_{jk}}{2} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{T_{kl} \alpha_{kl} L_{kl}}{2} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} + \frac{T_{li} \alpha_{li} L_{li}}{2} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}.
 \end{aligned} \tag{2.37}$$

Локальную матрицу теплопроводности для конечного элемента  $g$ , при наличии на каждой грани конвективного теплообмена, запишем следующим образом:

$$\begin{aligned}
r^g = & \lambda_x V^g \begin{bmatrix} a_{ii} & a_{ji} & a_{ki} & a_{li} \\ a_{ij} & a_{jj} & a_{kj} & a_{lj} \\ a_{ik} & a_{jk} & a_{kk} & a_{lk} \\ a_{il} & a_{jl} & a_{kl} & a_{ll} \end{bmatrix} + \lambda_y V^g \begin{bmatrix} b_{ii} & b_{ji} & b_{ki} & b_{li} \\ b_{ij} & b_{jj} & b_{kj} & b_{lj} \\ b_{ik} & b_{jk} & b_{kk} & b_{lk} \\ b_{il} & b_{jl} & b_{kl} & b_{ll} \end{bmatrix} + \lambda_z V^g \begin{bmatrix} c_{ii} & c_{ji} & c_{ki} & c_{li} \\ c_{ij} & c_{jj} & c_{kj} & c_{lj} \\ c_{ik} & c_{jk} & c_{kk} & c_{lk} \\ c_{il} & c_{jl} & c_{kl} & c_{ll} \end{bmatrix} + \\
& + \frac{\alpha_{ij} L_{ij}}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \frac{\alpha_{ik} L_{ik}}{6} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \frac{\alpha_{il} L_{il}}{6} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} + \\
& + \frac{\alpha_{jk} L_{jk}}{6} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \frac{\alpha_{kl} L_{kl}}{6} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 2 \end{bmatrix} + \frac{\alpha_{li} L_{li}}{6} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 2 \end{bmatrix}.
\end{aligned} \tag{2.38}$$

Значения температуры в узлах конечного элемента получим из выражения:

$$[T^g] = [r^g]^{-1} \cdot [\varphi^g]. \tag{2.39}$$

Для построения глобальных матриц  $R, T, F$  необходимо локальным номерам узлов  $i, j, k, l$  каждого элемента  $g$  поставить в соответствие глобальные номера узлов  $m$ ,  $m = \overline{1, M}$ . Расширенные таким образом матрицы складываются, и в результате ансамблирования получаем глобальные матрицы. Поставляя последние в формулу (2.35), рассчитываем распределение температуры в рассматриваемом единичном объеме  $P$  расчетной области.

Проверка представленных выше математических выкладок, проводилась путем сравнения расчетов распределения температуры в единичном объеме слоя  $P$ , проведенных вручную с использованием программы MathLab с результатами моделирования в программном пакете

Ansys при грубом качестве сетки для конечного элемента того же размера и с теми же граничными условиями.

Рассчитанное значение температуры на поверхности элемента в пакете Ansys составило 362,8133 °С, расчет по вышеизложенной методике показал температуру в 366 °С, таким образом ошибка расчета составила  $\sigma = 0,87, \%$ . Приведенные данные численного моделирования показывают, что при решении методом МКЭ, используемого в том числе, в качестве математического аппарата в системе Ansys, задач конвективного теплообмена с заданными граничными условиями можно достигнуть хорошего соответствия численного и теоретического расчета.

Приведенная методика позволяет создать модель всего агломерируемого слоя с наложенными на него граничными условиями, что позволит произвести расчет распределения температуры в слое агломерируемого материала.

2.6. Синтез модели теплового режима процесса спекания полидисперсной агломерационной шихты.

На сегодняшний день основным источником сырья для доменного производства является агломерат железной руды. Следует отметить, что общемировая потребность в стали растет из года в год. С целью обеспечения конкурентоспособности выпускаемой отечественными металлургическими предприятиями продукции, на фоне общего подорожания энергетических ресурсов, необходимо детальное изучение и совершенствование теплового режима процесса производства агломерата. Последнее позволит изучить закономерности и факторы, влияющие на распределение химических компонентов и топлива по высоте пирога, проанализировать температурный

режим агломерации отдельных горизонтов спекаемой шихты и разработать рекомендации, направленные на повышение энергоэффективности агломерационного процесса.

В последнее время широкое распространение при изучении физических объектов и тепловых процессов, протекающих в них, получило конечно-элементное моделирование [154-156, 158, 159]. Современный уровень развития компьютерной техники, а так же численно-аналитических методов решения инженерных задач позволяет реализовать наиболее точную картину ввода и последующего перераспределения теплоты при агломерации в трехмерной модели, разработанной на основе экспериментальных и расчетных данных. Для расчета используется метод конечных элементов (МКЭ) [160], реализованный в программно-методическом комплексе ANSYS.

Для построения расчетной области с учетом граничных условий используем схему, представленную на рис. 2.10. Будем рассматривать вертикальный срез слоя агломерационной шихты с размерами 2500x400x100 мм, находящейся на паллете. Указанные размеры спекательных тележек приняты для условий агломерационного производства аглофабрики МК «Запорожсталь». Слой шихты, в свою очередь, разбит на единичные объемы, размером 100x100x100 мм, рис. 2.13.

Выбор указанных размеров единичного объема, обусловлен опытом спекания агломерационных шихт в лабораторных спекательных чашах и гильзах, размер основания которых составлял не менее 100 мм. Последнее вызвано необходимостью соблюдения условий загрузки пробы сыпучего материала, максимально приближенных к условиям производства с целью обеспечения сегрегации крупных фракций сыпучего материала в основание формирующегося слоя.

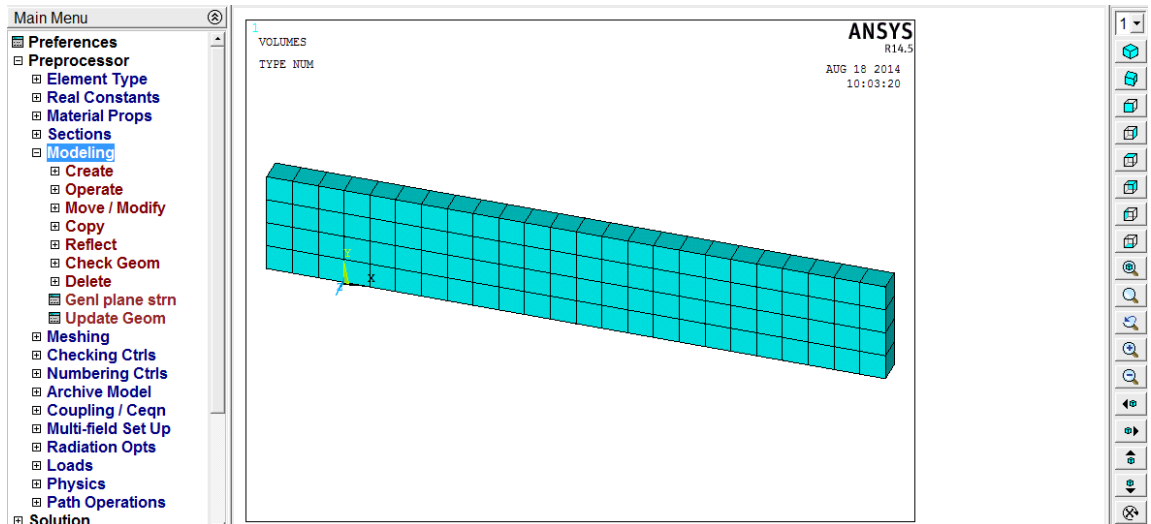


Рис. 2.13. Расчетная область модели

Каждый из указанных единичных объемов разобьем на конечные элементы (КЭ). При решении объемной тепловой задачи воспользуемся восьмиузловым трехмерным конечным элементом SOLID 70. Данный элемент позволяет принимать нагрузку в виде теплового потока. Решением является множество узловых данных, состоящее из температуры по всему объему исследуемого слоя.

Практическая реализация МКЭ тесно связана с проблемой построения расчетной сетки в области или на ее границе. Известно [157], что плоская область всегда может быть разбита на подобласти треугольной формы, причем, так, что треугольники не будут накладываться друг на друга. С другой стороны поверхность любого объемного тела может быть аппроксимирована набором плоских фигур. Таким образом, задача построения на поверхности сетки треугольных элементов (триангуляция поверхности) может быть сведена к задаче триангуляции плоской области.

В настоящее время разработаны эффективные и надежные алгоритмы триангуляции областей [161], имеющих сложную геометрию (острые углы, вогнутости и т.п.). В связи с этим применение указанного подхода к построению триангуляции на поверхности объемного тела гарантирует получение желаемого результата – сетки конечных элементов.

Таким образом, при использовании указанного КЭ в расчетной области построена сетка из 564 тыс. ячеек тетраэдральной формы, рис. 2.14.

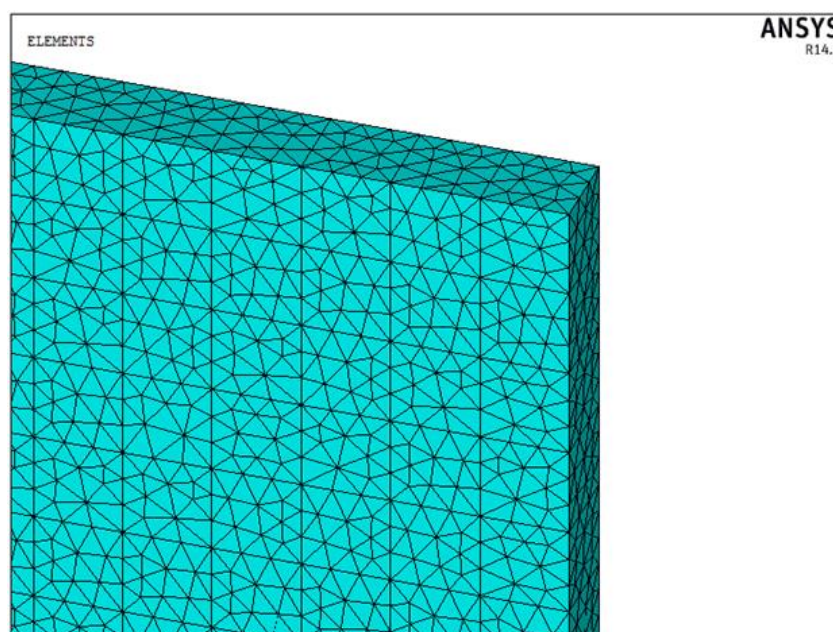


Рис. 2.14. Конечно-элементная сетка.

Для осуществления расчетов указывались свойства материала, такие как плотность, коэффициент теплопроводности, удельную теплоемкость и т.д. На основании представленных в [162] теплофизических характеристик агломерационных шихт аглофабрики «Запорожсталь», получены зависимости теплоемкости и теплопроводности от температуры, рис. 2.15.

Математическую зависимость удельной теплоемкости и коэффициента теплопроводности от температуры выразим в виде степенных полиномов:

$$c(T) = 0,000145T^2 + 0,003147T + 0,9591;$$

$$\lambda(T) = 0,0000785T^2 - 0,00039T + 0,3253.$$



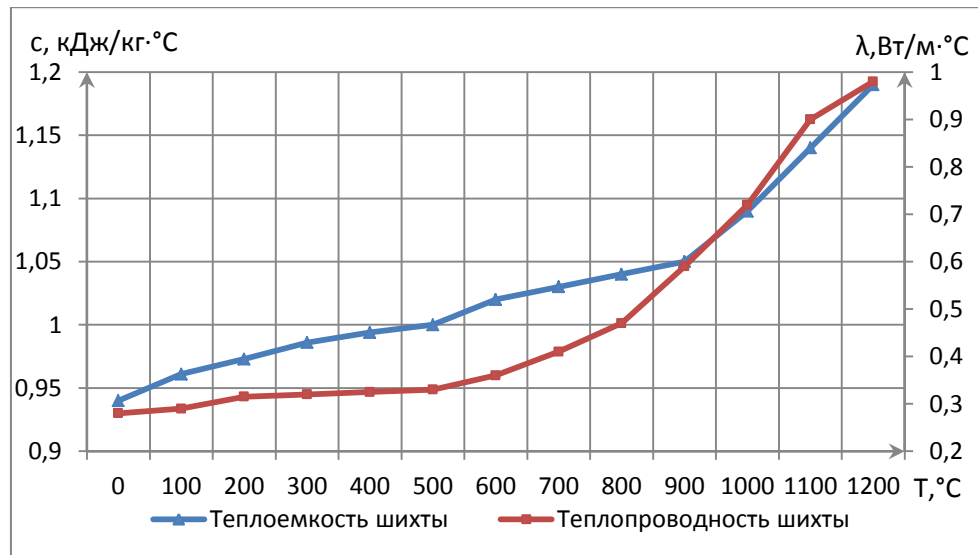


Рис. 2.15. Зависимость  $\lambda$  и  $c$  шихты от температуры.

Граничные условия, накладываемые на расчетную область модели представляют собой Г.У. I-го и III-го рода, рис 2.10. Мощность внутренних источников энергии (HEAT GENERATOR), обуславливающую сгорание частичек твердого топлива в слое шихты, примем, для условий данной задачи, постоянной величиной, с учетом отсутствия сегрегации углерода по высоте слоя. Исходя из результатов расчетов теплового баланса спекания агломерационной шихты, представленного в [163], определим приближенное количество теплоты, выделяемое в единичном объеме рассматриваемого слоя, за счет горения топлива и протекания химических реакций.

Учитывая, что на спекание 100 кг агломерата приходится в среднем 261 тыс. кДж теплоты, а масса единичного объема шихты размером 100x100x100 мм, с плотностью материала  $\rho_m = 3600$  кг/м<sup>3</sup> и порозностью слоя  $\varepsilon = 0,42$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> составляет 1,98 кг, примем количество теплоты выделяемой в элементарном объеме за счет горения твердого топлива и теплоты химических реакций, равной  $Q = 5167,8$  кДж.

Скорость просасывания газов на входе в слой, для условий данной задачи, примем равной  $\omega_2 = 0,28$  м/с.

Результаты вычислений распределения температуры по слоям спекаемой шихты представлены на рис.2.16.

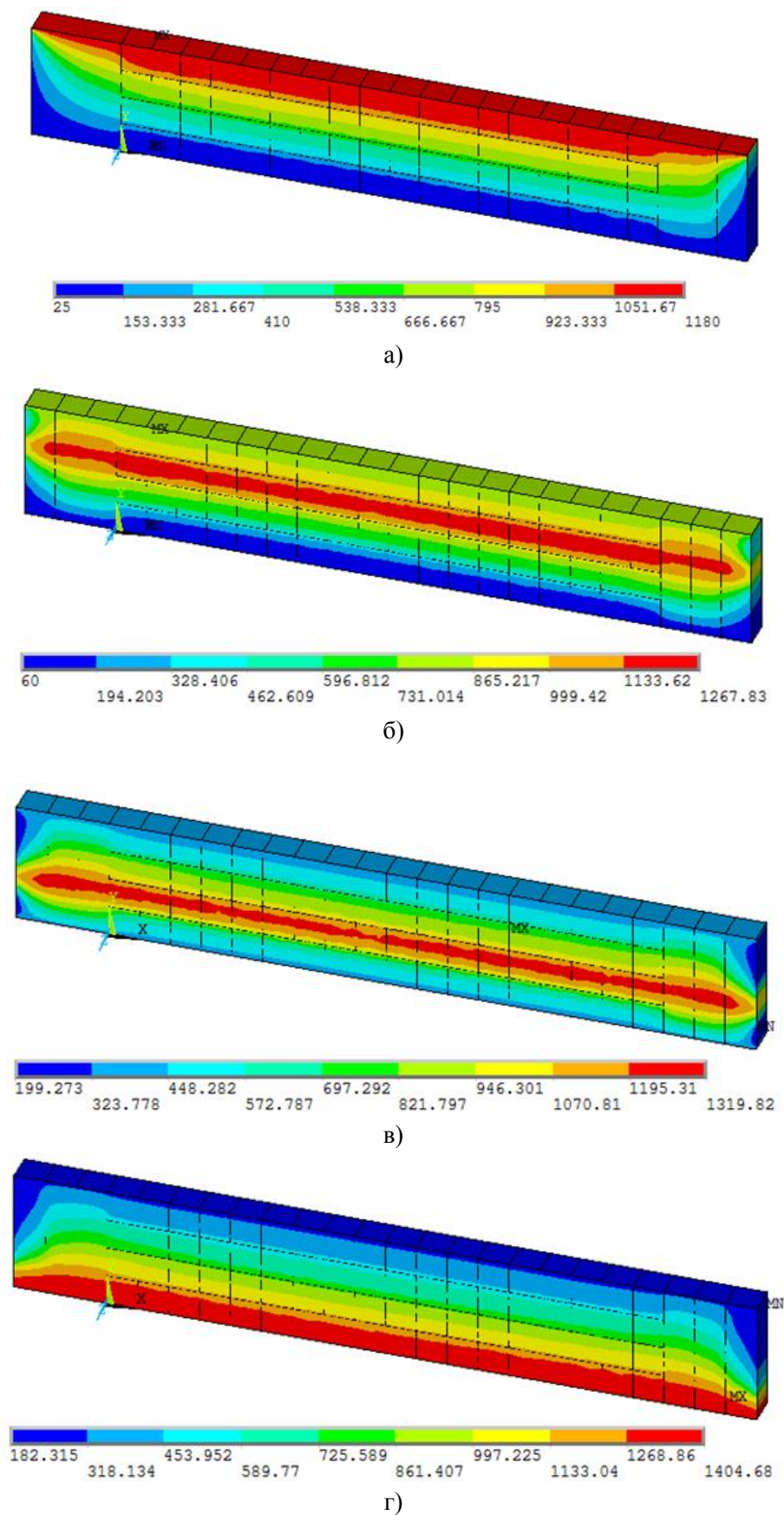


Рис. 2.16. Распределение температур в слое спекаемой шихты  
 а – горизонт 1; б – горизонт 2; в – горизонт 3; г – горизонт 4.

Расчеты, полученные с использованием двумерной конечно-элементной модели, достаточно хорошо согласуются с результатами лабораторных спеканий представленных на рис. 2.17.

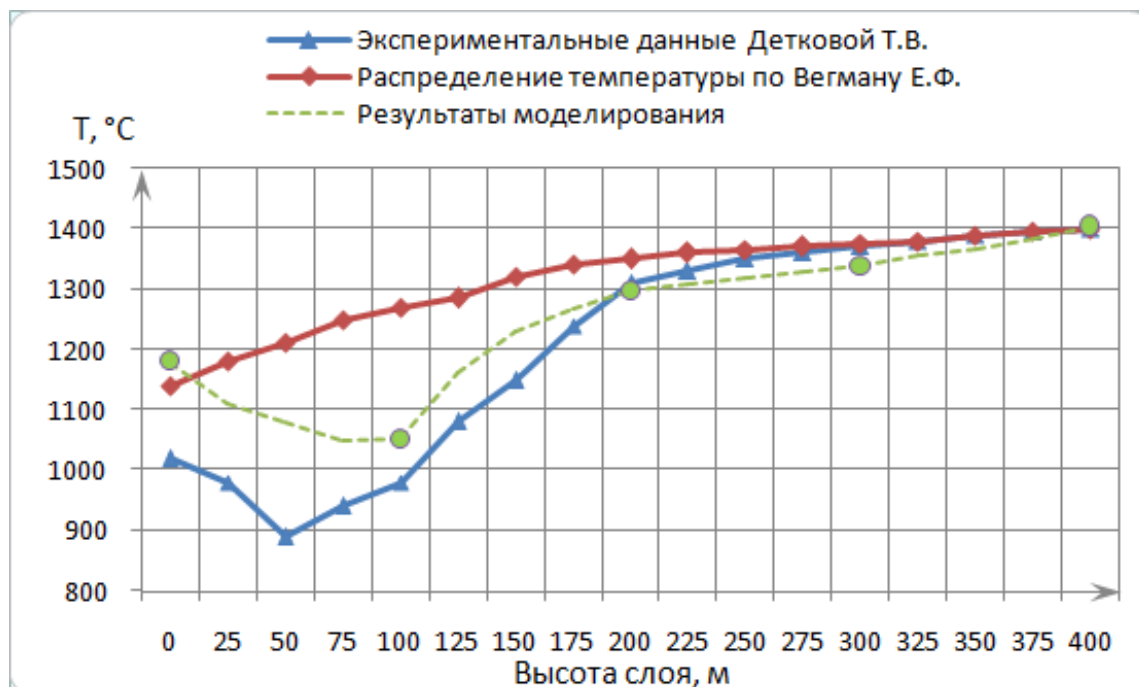


Рис. 2.17. Распределение температур по высоте спекаемого слоя

Из представленного на рис. 2.16. распределения температур, четко прослеживается характерный тепловой режим спекания шихты при отсутствии сегрегации топлива по высоте слоя. Проверка математической модели на адекватность проводилась по методике [164] путем сравнения результатов моделирования с результатами лабораторных спеканий без сегрегации топлива по высоте слоя, полученными Детковой Т.В. [165]. Погрешность модели составила порядка 18...20%, что подтверждает возможность ее использования в вычислительных исследованиях тепловых режимов агломерационного процесса. Результаты данных полученных Вегманом Е.Ф. при проведении менее точного промышленного эксперимента [163] так же свидетельствуют о высокой сходимости результатов эксперимента и моделирования.

При спекании агломерата по высоте слоя происходят взаимосвязанные процессы минералообразования в твердых фазах, образования жидких фаз, а также пропитки жидкими фазами твердых частиц и химическое взаимодействие с ними. Важным результатом процесса взаимодействия твердых оксидов  $CaO$ ,  $SiO_2$ ,  $Fe_2O_3$  и др., является подготовка к образованию жидких фаз. Появление последних происходит в зоне горения, их количество и вязкость определяют степень пропитки остальной массы шихты и зависят от температуры зоны горения и длительности периода существования жидких фаз. Высокие температуры в зоне горения обеспечивают степень восстановления и диссоциации гематита с образованием 10÷15 %  $FeO$ . При низких температурах структура полученного агломерата в основном представлена гематитом и кварцем. В результате наибольшее количество фаялита, железокальциевых оливинов, образующихся в твердой фазе, попадает в конечную структуру агломерата, не проходя через жидкое состояние. В этом виде они не могут играть роль связки, что определяет низкую прочность агломерата [262].

Известно [8], что равномерность распределения температуры по высоте слоя благоприятно сказывается на качестве агломерата. Выравнивание температур, обеспечивающее повышение абсолютных значений температуры в верхней части слоя, позволяют здесь расширить высокотемпературную зону, снизить скорость охлаждения агломерата, что обуславливает развитие кристаллизации отдельных минералов и уменьшении количества стекла, тем самым повышая прочность спека.

Таким образом, наряду с актуальностью проблемы стабилизации температуры зоны горения по высоте слоя, важной является задача определения температурного диапазона спекания шихты, обеспечивающего получение прочного, мелкопористого, легковосстановимого агломерата.

Для определения указанного диапазона температур проведена серия экспериментов по спеканию агломерационной шихты в чаше при различных

температурах. Спекательная чаша, выполненная в виде усеченной пирамиды, заполнялась окомкованной шихтой влажностью 8,5%, содержание твердого топлива составляло 3,6%, высота слоя 500 мм. Зажигание слоя производилось газовой горелкой, температура зажигания регулировалась изменением расхода природного газа и контролировалась лазерным пирометром на поверхности шихты. Температура зоны горения измерялась термопарой ТХА, заложенной на глубине 50 мм в слое материала.

Процесс зажигания с заданной температурой проводился до тех пор, пока температура регистрируемая термопарой не сравнивалась с температурой зажигания. Затем горелка отключалась, а просасывание воздуха через слой продолжалось на протяжении 1 минуты. После охлаждения пирога агломерата, его верхняя часть 50-60 мм отделялась и разделялась на две части. Одна, большая часть пробы, проверялась на механическую прочность в лабораторном барабане согласно ДСТУ 3200-95. Вторая часть пробы подвергалась химическому анализу. Результаты экспериментов представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2

### Влияние температуры спекания на качественные показатели спека

Тз, °С	Химический состав, %									R, %	БП, %	
	Fe	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>мет</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO		-0,5 мм	+ 5 мм
1140	57,0	47,7	21,67	2,74	11,8	13,6	0,88	1,24	0,23	26,4	11,9	47,3
1206	56,7	47,6	13,44	10,3	11,9	13,9	0,83	1,28	0,22	39,8	9,25	66,7
1254	58,6	38,1	7,1	26,9	12,4	14,8	0,88	1,28	0,21	62,9	7,1	68,4
1302	60,4	30,6	4,74	33,6	12,7	15,4	0,9	1,27	0,2	68,7	5,8	73,1
1351	60,7	28,3	3,57	34,1	12,6	15,6	0,96	1,27	0,23	68,2	6,6	69,2
1404	58,6	11,5	3,51	26,9	12,9	15,9	0,98	1,3	0,32	51,1	9,1	67,7
1452	57,9	9,4	3,42	22,9	12,91	15,9	0,99	1,32	0,3	43,64	9,8	62,8

Восстановимость агломерата  $R$  оценивали по потере массы образца согласно ГОСТ 17212-84. Для чего агломерат крупностью  $1\div 3$  мм подвергали восстановлению в токе водорода при температуре  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Исходя из результатов экспериментов, наилучшей восстановительной способностью обладают агломераты спеченные в температурном интервале  $1250\div 1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ , рис. 2.17. Образцы имели пористую структуру без видимого переоплавления материала.

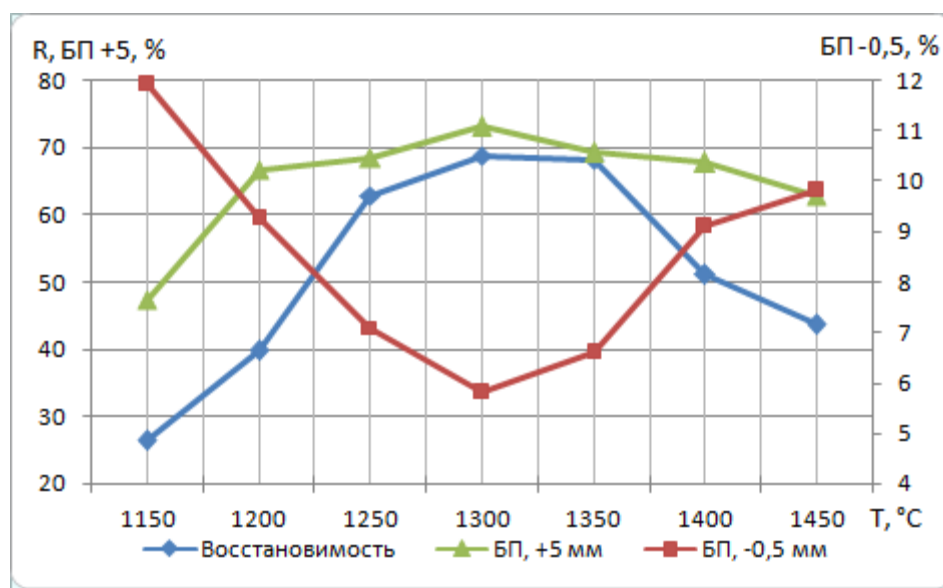


Рис. 2.17. Влияние температуры спекания на качественные характеристики агломерата.

Результаты барабанных испытаний проб агломерата позволили установить экстремальную зависимость прочности спека от температуры. Последнее обусловлено тем, что шихта в зоне горения частично или полностью расплавляется, а твердые частицы обволакиваются жидкой фазой, которая появляется при оплавлении легкоплавких эвтектических смесей фаялита  $2FeO \cdot SiO_2$  и ферритов кальция  $CaO \cdot Fe_2O_3$ . Также возможно образование железокальциевых алюмосиликатов  $FeO \cdot SiO_2 \cdot CaO \cdot Al_2O_3$ . Чрезмерное развитие жидкой фазы приводит к получению переоплавленного агломерата, ее недостаток ведет к низкому качеству спекания, т.к. не все частицы шихты смачиваются и цементируются.

Таким образом установлено, что в диапазоне температур  $1140 \div 1250$  °С, рис. 2.18 а, не получает достаточного развития жидкая фаза и агломерат не спекается в прочную пористую структуру. При температурах выше  $1350$  °С, рис. 2.18 в, материал переоплавляется, в связке агломерата увеличивается содержание железистого стекла, которое является хрупким компонентом минералогического состава агломерата и способствует уменьшению прочности его кусков.

Микроструктура образцов проплавленного агломерата представлена на рис. 2.18.

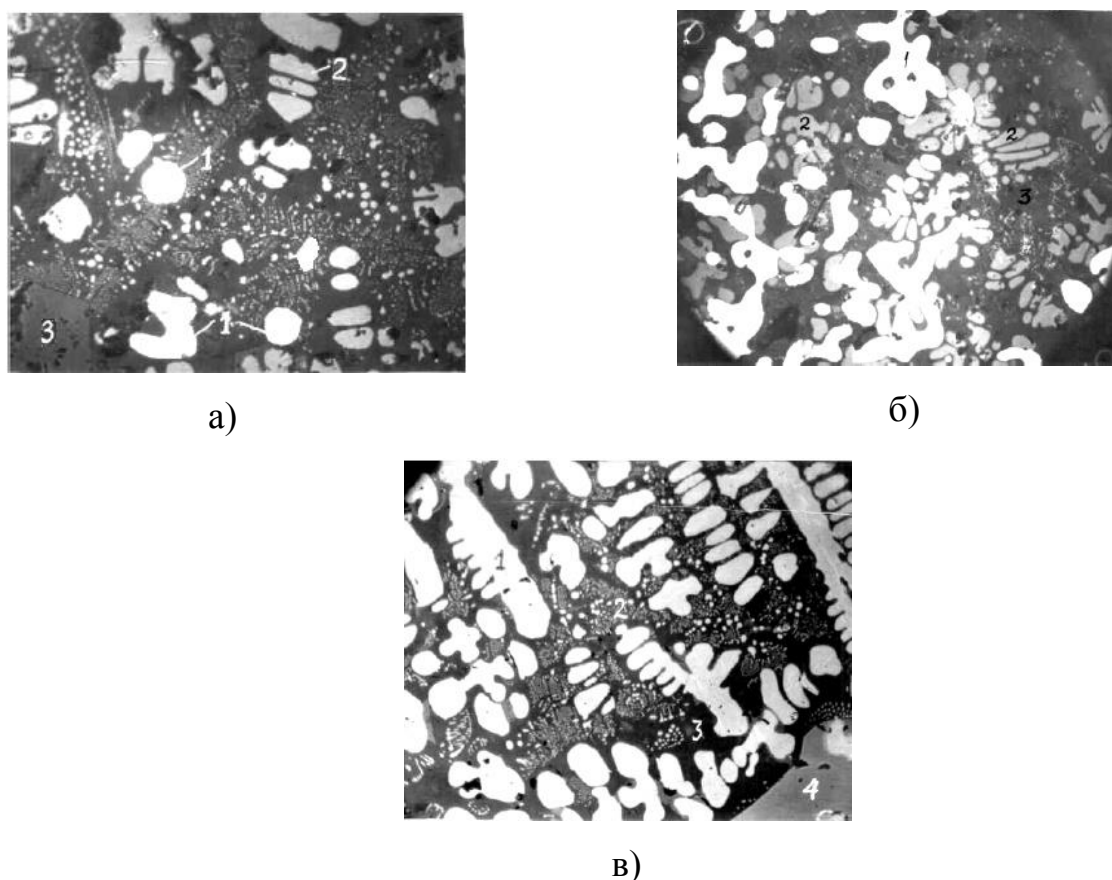


Рис. 2.18. Участки микрошлифов агломерата  $\times 600$ .

а) –  $T = 1206$  °С, б) –  $T = 1302$  °С, в) –  $T = 1452$  °С. 1- железо; 2 – дендриты вюстита; 3 – силикатная масса; 4 - шпинель.

Анализ теплового режима процесса спекания агломерата позволяет сделать вывод, что для агломерационной шихты есть оптимальная

температура зоны горения 1250-1350 °С, при которой образуется мелкопористый, легковосстановимый агломерат с достаточной прочностью.

Тепловые процессы, протекающие в слое полидисперсных шихтовых материалов при их агломерации в производственных условиях, характеризуются значительным перепадом температур зоны горения 1100-1500 °С для верха и основания слоя соответственно. В начальный период агломерации наблюдается недостаточный приход тепла, вследствие слабой регенерации последнего, температура в зоне горения низка, а скорость охлаждения расплава велика. В результате расплав агломерата застывает в виде аморфного хрупкого стекла, которое не выдерживает перегрузки, тем самым обуславливая значительное образование возврата и, как следствие, низкую производительность агломерационной машины.

Иная картина наблюдается в слоях шихты, прилегающих к колосниковой решетке. Здесь, кроме теплоты сгорания коксовой мелочи, присутствует регенерированное тепло вышележащих слоев. В итоге получается избыток теплоты, и температура достигает максимальных значений. Излишне высокие температуры зоны горения, превышающие 1350 °С приводят к переоплавлению агломерата, имеющего монолитную структуру с малой прочностью и обладающего пониженной восстановимостью.

Температура зоны горения зависит от закономерностей распределения твердого топлива и химических компонентов по высоте слоя, и непосредственно влияет на производительность процесса. Известно, что перераспределения твердого топлива и химических компонентов по высоте слоя можно добиться за счет сегрегации шихтовых материалов, что возможно за счет использования загрузочных устройств модифицированной конструкции.

Исходя из указанного выше, можно сделать вывод, что реализация направленной сегрегации с целью формирования необходимой структуры



слоя полидисперсной шихты, для обеспечения стабилизации температуры зоны горения, и как следствие, улучшения качественных показателей агломерата, является актуальным и перспективным направлением исследований.

Ключевой проблемой на современном уровне развития процессов обогащения железорудных концентратов является обеспечение требуемой температурно-временной обработки окатышей с целью устранения их растрескивания и своевременного окончания процессов термоупрочнения в процессе обжига. Известно, что время необходимой тепловой обработки окатышей зависит от их размера, а продолжительность контакта частиц с теплоносителем зависит от глубины их расположения в слое.

Таким образом, исследование тепловых процессов, протекающих в гранулах окатышей и слое в целом, в зависимости от их размера, анализ способов формирования слоя монодисперсного сыпучего материала с целью обеспечения полного завершения процессов термоупрочнения окатышей по высоте слоя, является актуальной научной и практической задачей.

Исходя из вышеизложенного, основной целью дальнейших исследований на базе разработанной выше модели, является установление функциональных зависимостей сегрегации химических компонентов и топлива по высоте слоя, обуславливающих мощность внутренних источников энергии в каждом единичном объеме. Последнее позволит сформулировать рекомендации к условиям формирования слоя сыпучего материала с целью обеспечения в каждом горизонте слоя температуры, являющейся оптимальной для рассматриваемых производств агломерата и железорудных окатышей.

## 2.7. Выводы к разделу 2

1. Проведен анализ возможных структур слоя сыпучего материала, подготовленного к тепловой обработке. Структура последнего определяется типом укладки шарообразных частиц и характеризуется порозностью слоя.

Тип упаковки частиц в слой влияет на структуру поровых каналов, по которым движутся, протекающие через слой, продукты горения и определяет газодинамические характеристики слоя сыпучего материала. Вид укладки влияет на количество контактов между частицами  $M$ , вблизи которых образуются «застойные» зоны, протекающего потока, замедляющие процесс теплообмена с зернами материала.

2. Реализовано математическое описание тепловых процессов в стационарном слое монодисперсного материала. Установлено, что порозность по высоте слоя  $\varepsilon_1 = \varepsilon_n = const$ , а с учетом того, что слой состоит из гранул одинакового размера, не учитывается влияние крупности частиц на коэффициент теплопроводности  $\lambda(d) = const$ , и на коэффициент теплоотдачи от газа к гранулам, который будет неизменным по высоте и ширине слоя. В рассматриваемых условиях монодисперсного материала коэффициент теплопроводности принят как функция температуры и влажности материала  $\lambda = f(T, W)$ .

3. Предложено математическое описание тепловых процессов в слое полидисперсных материалов. Установлено, что для данного случая  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n \neq const$ . При описании граничных условий коэффициент теплоотдачи не является постоянным  $\alpha_v \neq const$  и изменяется по высоте и ширине в зависимости от диаметра частиц составляющих слой. Структура слоя сыпучего материала оказывает существенное влияние на теплопроводность. Таким образом, для полидисперсных материалов,

принято, что коэффициент теплопроводности является функцией трех переменных  $\lambda = f(T, W, d)$ .

4. Для расчета значений коэффициента теплопроводности предложено использование его средневзвешенного значения  $\lambda_{\Sigma}$ . На базе опытных данных установлен интервал варьирования степени влияния  $r_i$  указанных физических величин на коэффициент теплопроводности, который составил:  $r_i(W) = 0,58 \div 0,41$ ,  $r_i(d) = 0,22 \div 0,17$ ,  $r_i(T) = 0,2 \div 0,42$ .

5. На основании экспериментальных данных установлено значительное влияние степени разделения классов крупности сыпучего материала, что обусловлено типом загрузочной системы, на неравномерность величины коэффициента теплоотдачи для верхних и нижних горизонтов. При использовании для загрузки железорудного материала вибрационного питателя коэффициент  $\alpha_v$  изменяется по функции близкой к экспоненциальной в пределах  $2800 \div 9500$  Вт/(м<sup>3</sup>·°С). При использовании барабанного питателя наблюдается монотонное снижение величины коэффициента, для случая агломерации железорудного материала диапазон изменения  $\alpha_v$  составил  $3300 \div 4800$  Вт/(м<sup>3</sup>·°С), а бокситов  $5900 \div 7200$  Вт/(м<sup>3</sup>·°С).

6. Приведено математическое описание комбинированного нагрева слоя сыпучих материалов, с учетом тепловыделения и поглощения теплоты в зонах, что связано с наличием внутренних источников энергии. Предложена зависимость, для расчета мощности внутренних источников теплоты в единичном объеме, которая позволяет определить количество выделяемой и поглощаемой теплоты в единичном элементе слоя, в зависимости от содержания в нем твердого топлива, протекания различных химических реакций и фазовых переходов, сопровождающихся плавлением либо кристаллизацией расплава.

7. Разработана численная конечно-элементная модель теплового режима процесса спекания, позволяющая рассчитать распределение температуры по высоте агломерационного слоя. Проведен анализ адекватности модели, что подтверждает возможность ее использования для вычислительных исследований тепловых процессов, протекающих в слое сыпучих материалов. Полученные результаты расчетных исследований хорошо согласуются с экспериментальными данными других исследователей.

8. Анализ теплового режима процесса спекания агломерата позволил сделать вывод, что для агломерационной шихты есть оптимальная температура зоны горения 1250-1350°C, при которой образуется мелкопористый, легковосстановимый агломерат с достаточной прочностью. Стабилизации температуры зоны горения в указанном диапазоне, возможно добиться при обеспечении требуемой сегрегации топлива и химических компонентов шихты по высоте слоя, путем применения загрузочных устройств сыпучего материала модифицированной конструкции.

Основное содержание 2 раздела опубликовано в работах [160, 166, 167, 169, 259].

### РАЗДЕЛ 3

## ИССЛЕДОВАНИЕ СЕГРЕГАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В СЛОЕ ПОЛИДИСПЕРСНОЙ ШИХТЫ И ИХ ВЛИЯНИЯ НА ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ АГЛОМЕРАЦИИ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО МАТЕРИАЛА

Агломерационный процесс является основным источником сырья для доменного производства, от качества получаемого агломерата зависит дальнейшая себестоимость производимой металлургической продукции. Загрузка шихты на агломерационную ленту, является одним из основных технологических процессов, определяющих получение качественного агломерата. Понимание закономерностей распределения гранул шихты по высоте слоя, возможность моделирования и дальнейшего управления рассматриваемым процессом позволит повысить качество получаемого агломерата.

### 3.1. Идентификация гранулометрического состава агломерационной шихты, подготовленной к спеканию

Гранулометрический состав промышленного сырья характеризуется распределением частиц материала, его сегрегацией по классам крупности, то есть по размеру, который оценивается по величине так называемого эквивалентного диаметра. Определение гранулометрического состава материала осуществляют при помощи ситового анализа, который заключается в просеивании пробы материала через ряд сит с выделением надрешеточного продукта на каждом сите. Для увеличения достоверности ситового анализа, выполняют несколько рассевов проб материала,

отобранных из разных точек исследуемой массы. Такие пробы называют частичными. Общую или усредненную пробу, которая характеризует гранулометрический состав всей массы материала, рассчитывают путем усреднения данных частичных проб.

Таким образом, процесс определения гранулометрического состава полидисперсных материалов требует больших затрат времени, что исключает возможность оперативного использования полученных данных в системе управления процессом загрузки. Поэтому актуальной является разработка математических моделей, позволяющих рассчитывать гранулометрический состав материала на основе некоторой имеющейся информации.

При автоматическом анализе фракционного состава сыпучих материалов в производственных условиях обычно контролируют средний диаметр частиц материала [170-172]. Его связь с содержанием отдельных фракций сыпучей массы характеризуется следующим уравнением:

$$d_{cp} = \sum_{i=1}^n d_i \Phi_i; \quad (3.1)$$

где:  $d_i$  - средний диаметр частиц  $i$ -й фракции материала, мм;  $\Phi_i$  - содержание  $i$ -й фракции в массе сыпучего материала, %;  $n$  – количество фракций.

Одно и то же значение  $d_{cp}$  может быть получено при различных функциях распределения частиц полидисперсного материала. Как показывают результаты ряда работ [173-177], нет общих закономерностей в распределении сыпучего материала по размерам составляющих его частиц. В каждом конкретном случае такая закономерность определяется свойствами сыпучих материалов, а так же условиями их дробления, усреднения и классификации.

Для описания закономерностей распределения сыпучих материалов используют различные эмпирические уравнения, которые не отражают природу разделения материала на фракции, а позволяют лишь получить формулу, приблизительно оценивающую гранулометрический состав сыпучей массы [177]. Поэтому представляет интерес теоретическое исследование механизма разделения полидисперсного материала в процессе его ситового анализа.

На основе материального баланса составляющих сыпучую массу фракций, можно записать:

$$\sum_{i=1}^n d_i \Phi_i = d_{cp} \Phi_{\Sigma}; \quad (3.2)$$

где:  $\Phi_{\Sigma}$  - объем пробы исследуемого материала  $\Phi_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \Phi_i$ , %.

Обозначим общее количество материала как  $\Phi_{cp0}$ , средний диаметр частиц как  $d_{cp0}$ , процесс рассева материала схематически представлен ниже на рис. 3.1.

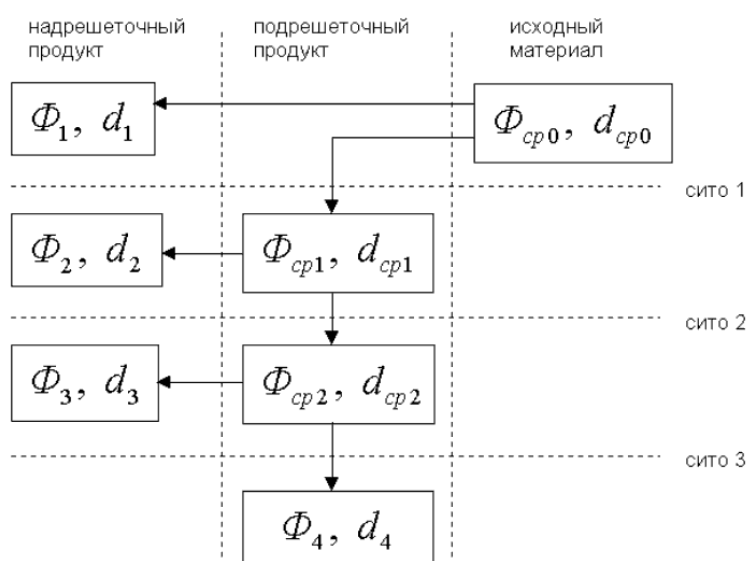


Рис. 3.1. Схема рассева полидисперсного материала на четыре фракции

С целью исследования указанного механизма разделения зернистой массы проведены эксперименты с использованием ситового анализа для условий аглофабрики комбината «Запорожсталь». Экспериментально полученное содержание фракций в агломерационной шихте для условий комбината приведено в табл. 3.1-3.3.

Таблица 3.1

**Фракционный состав шихты на агломашине №2**

Место отбора	Горизонт слоя, м	Фракционный состав шихты, %					Средний диаметр, мм
		+10	+8-10	+5-8	+3-5	-3	
Правая сторона	0,1	3,77	1,89	8,14	17,57	68,63	3,74
	0,2	4,26	6,04	15,81	20,43	52,96	4,16
	0,3	5,08	3,88	15,84	21,61	53,59	4,59
	0,4	19,56	7,25	17,28	16,46	39,45	5,37
Середина слоя	0,1	3,52	1,32	10,28	30,54	54,33	3,61
	0,2	5,96	4,09	16,99	33,99	39,00	4,34
	0,3	8,18	4,73	19,34	29,46	38,29	4,72
	0,4	12,02	9,92	23,52	23,12	31,42	5,35
Левая сторона	0,1	2,69	1,79	10,27	23,61	61,63	4,63
	0,2	7,05	3,48	16,99	24,38	48,09	4,49
	0,3	6,19	4,67	19,09	24,63	45,41	5,09
	0,4	13,04	7,84	20,64	22,04	36,44	6,24

Как показали результаты анализа экспериментально полученных данных, в процессе формирования слоя полидисперсного сыпучего материала на агломерационной ленте величины ударных и истирающих нагрузок на отдельные частицы незначительны, поэтому при загрузке шихты на паллеты изменение ее фракционного состава не наблюдается.



Таблица 3.2

**Фракционный состав шихты на агломашине №4**

Место отбора	Горизонт слоя, м	Фракционный состав шихты, %					Средний диаметр, мм
		+10	+8-10	+5-8	+3-5	-3	
Правая сторона	0,1	8,69	3,4	12,97	24,17	50,77	2,76
	0,2	9,44	5,56	16,77	24,18	44,02	3,47
	0,3	12,78	6,06	18,64	25,00	37,52	3,56
	0,4	22,40	8,48	17,68	18,17	33,21	4,39
Середина слоя	0,1	4,46	3,72	15,28	27,70	48,83	3,83
	0,2	12,04	5,90	15,84	23,65	42,57	4,95
	0,3	14,01	7,17	19,88	20,12	38,82	5,42
	0,4	21,3	8,18	18,13	18,39	33,99	5,55
Левая сторона	0,1	14,22	5,74	19,23	21,26	39,18	3,24
	0,2	10,94	6,25	23,04	17,49	42,28	3,82
	0,3	15,94	7,61	23,36	20,44	31,74	3,95
	0,4	33,65	8,57	18,03	14,60	25,13	4,78

Таблица 3.3

**Фракционный состав шихты на агломашине №5**

Место отбора	Горизонт слоя, м	Фракционный состав шихты, %					Средний диаметр, мм
		+10	+8-10	+5-8	+3-5	-3	
Правая сторона	0,1	3,26	2,92	9,88	21,38	62,69	3,03
	0,2	3,73	2,87	8,99	24,28	60,15	3,09
	0,3	4,98	3,15	14,20	25,32	52,35	3,5
	0,4	17,16	7,46	18,97	20,67	36,26	4,99
Середина слоя	0,1	2,68	2,13	10,60	25,04	59,57	3,04
	0,2	1,70	1,61	10,98	27,59	58,14	3,00
	0,3	3,33	3,93	16,08	24,96	51,72	3,5
	0,4	12,89	10,00	20,39	19,72	37,01	4,83
Левая сторона	0,1	3,55	2,19	10,81	30,68	52,78	3,27
	0,2	3,53	3,89	18,94	36,36	37,30	3,95
	0,3	9,98	7,45	22,19	27,14	33,26	4,69
	0,4	31,57	11,2	17,84	21,70	17,69	6,46

Согласно балансу фракционного состава поступающего на аглоленту сыпучего материала, условные средние диаметры, составляющие его массу,

должны быть равны. Фракционный состав материала, поступающего в загрузочный узел агломашины, можно описать следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_n = \Phi_\Sigma \\ d_1\Phi_1 + d_2\Phi_2 + \dots + d_n\Phi_n = d_{cp}\Phi_\Sigma \end{cases} \quad (3.3)$$

В процессе загрузки шихты на спекательные тележки происходят структурные изменения фракционного состава материала в результате его частичного разрушения. После моделирования структурных изменений система уравнений (3.3) примет вид:

$$\begin{cases} \Phi'_1 + \Phi'_2 + \dots + \Phi'_n = \Phi'_\Sigma \\ d_1\Phi'_1 + d_2\Phi'_2 + \dots + d_n\Phi'_n = d_{cp}\Phi'_\Sigma \end{cases}; \quad (3.4)$$

где:  $\Phi'_i$  - содержание  $i$ -й фракции в сыпучем материале после структурных изменений, %.

Факторы, не учтенные при расчете структуры сформированного слоя, вызовут появление погрешности моделирования  $\Delta\Phi_i = \Phi_i + \Phi'_i$ . Знак и величина  $\Delta\Phi_i$  характеризуют изменение закономерности распределения  $i$ -й фракции по высоте формирующегося слоя. Принимая, что изменение количества  $i$ -й фракции по высоте слоя материала имеет монотонный характер, можем рассчитать реальные значения  $\Phi_i$ .

Задача определения фракционного состава может быть решена аналитически только для двухкомпонентной смеси. Исходные данные для расчета параметров 2-х зонного слоя имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
\Phi_{11} + \Phi_{12} &= \Phi_1, \\
\Phi_{21} + \Phi_{22} &= \Phi_2, \\
\Phi_{11} + \Phi_{21} &= \Phi_{1\Sigma}, \\
\Phi_{12} + \Phi_{22} &= \Phi_{2\Sigma}, \\
d_1\Phi_{11} + d_2\Phi_{21} &= d_{cp1}\Phi_{1\Sigma}, \\
d_1\Phi_{12} + d_2\Phi_{22} &= d_{cp2}\Phi_{2\Sigma};
\end{aligned}
\tag{3.5}$$

где:  $\Phi_{11}$  - содержание 1-й фракции в 1-й зоне, %;  $\Phi_{21}$  - содержание 1-й фракции во 2-й зоне, %;  $\Phi_{12}$  - содержание 2-й фракции в 1-й зоне, %;  $\Phi_{22}$  - содержание 2-й фракции во 2-й зоне, %;  $\Phi_1, \Phi_2$  - фракционный состав соответствующей зоны, %;  $\Phi_{1\Sigma}, \Phi_{2\Sigma}$  - суммарное содержание соответствующей фракции, %;  $d_i$  - диаметр материала в  $i$ -й зоне, мм  $d_{cpi}$  - средний диаметр материала в  $i$ -й зоне, мм.

Исходным условием формирования слоя полидисперсного материала под действием гравитационных сил является  $d_{cp1} < d_{cp2}$ . Условие равенства суммы средних диаметров частиц шихты на заданных горизонтах слоя и  $d_{cp\Sigma}$  для всей сыпучей массы составит:

$$d_{cp1}\Phi_{1\Sigma} + d_{cp2}\Phi_{2\Sigma} = d_{cp\Sigma}\Phi_{\Sigma}.\tag{3.6}$$

Принимая, что  $\Phi_{1\Sigma} = \Phi_{2\Sigma} = \Phi_{\Sigma} / 2$ , получаем  $d_{cp1} + d_{cp2} = 2d_{cp\Sigma}$ .

Проанализировав указанные соотношения, получаем следующие ситуации, характерные для реальных условий формирования слоя полидисперсного материала:

1.  $d_{cp1} = d_{cp2} = d_{cp\Sigma}$  – сегрегация отсутствует;
2.  $d_{cp1} + d_{cp2} < 2d_{cp\Sigma}$  – пониженная сегрегация;
3.  $d_{cp1} + d_{cp2} > 2d_{cp\Sigma}$  – повышенная сегрегация.

Значения  $d''_{cpi}$  необходимые для поиска реальных условий сегрегации выбираются на основе сравнения результатов расчетов  $d'_{cp\Sigma}$  и исходных данных  $d_{cp\Sigma}$ . Для случая  $d_{cp\Sigma} > d'_{cp\Sigma}$ , необходимо уменьшить величину  $d'_{cp2}$  и увеличить  $d'_{cp1}$  по сравнению с расчетными значениями. Когда  $d_{cp\Sigma} < d'_{cp\Sigma}$ , следует увеличить  $d'_{cp2}$  и уменьшить  $d'_{cp1}$ .

Скорректированные значения  $d''_{cpi}$  выбираются с учетом условий:

$$\begin{aligned} d'_{cp1} + d'_{cp2} &= 2d_{cp\Sigma}, \\ d_1 &< d'_{cp1} < d_{cp\Sigma}, \\ d_2 &> d'_{cp2} > d_{cp\Sigma}. \end{aligned} \quad (3.7)$$

Далее производим для каждой зоны на основе выбранных значений  $d''_{cp1}$  и  $d''_{cp2}$  проверку их соответствия исходным данным на основе зависимостей:

$$\begin{cases} \Phi'_{11} + \Phi'_{21} = \Phi_{1\Sigma} \\ d_1 \Phi'_{11} + d_2 \Phi'_{21} = d''_{cp1} \Phi_{1\Sigma} \end{cases} \quad (3.8)$$

Из (3.8) определяем значения  $\Phi'_{11}$  и  $\Phi'_{21}$ :

$$\Phi'_{11} = \Phi_{1\Sigma} - \Phi'_{21}. \quad (3.9)$$

Отсюда

$$d_1 (\Phi_{1\Sigma} - \Phi'_{21}) + d_2 \Phi'_{21} = d''_{cp1} \Phi_{1\Sigma}. \quad (3.10)$$

Таким образом

$$\Phi'_{21} = \frac{\Phi_{1\Sigma} (d''_{cp1} - d_1)}{d_2 - d_1}. \quad (3.11)$$

Для второго подслоя значения  $\Phi'_{ij}$  определяются таким же образом:

$$\Phi'_{12} = \Phi_{2\Sigma} - \Phi'_{22}, \quad (3.12)$$

$$\Phi'_{22} = \frac{\Phi_{2\Sigma} (d''_{cp2} - d_1)}{d_2 - d_1}. \quad (3.13)$$

Рассчитав значения  $\Phi_{ij}$ , производим проверку правильности выбранных значений  $d''_{cp1}$  и  $d''_{cp2}$ . При их адекватности исходным данным сумма отдельных фракций в слое будет соответствовать их содержанию в исходном материале.

$$\begin{cases} \Phi'_{11} + \Phi'_{12} = \Phi_1, \\ \Phi'_{21} + \Phi'_{22} = \Phi_2, \\ \Phi_1 + \Phi_2 = \Phi_\Sigma. \end{cases} \quad (3.14)$$

В случае невыполнения указанного условия, необходимо изменить значения  $d''_{cp1}$  и  $d''_{cp2}$  в заданном направлении и повторно выполнить расчет и проверку их адекватности. Указанная последовательность действий позволяет в пошаговом режиме расчета определить значения  $\Phi'_{11}, \Phi'_{12}, \Phi'_{21}, \Phi'_{22}$ , соответствующие исходным характеристикам сыпучего материала.

Следующим этапом расчетов, является определение средних диаметров фракций шихты отдельных горизонтов сыпучей массы внутри каждой из зон слоя. Исходя из (3.8) запишем:

$$d_1 \Phi'_{11} = d_{cp1} \Phi_{1\Sigma} - d_2 \Phi'_{21}. \quad (3.15)$$

Принимая, что

$$d_{cp1} = \frac{d_1 + d_2}{2}. \quad (3.16)$$

Тогда

$$d_2 = 2d_{cp1} - d_1. \quad (3.17)$$

После преобразований (3.15) запишем в виде:

$$d_1 = \frac{d_{cp1} \Phi_{1\Sigma} - 2d_{cp1} \Phi_{21}}{\Phi'_{11} - \Phi'_{21}}. \quad (3.18)$$

Значения  $d_2$  находятся из уравнения (3.17). Аналогично рассчитываются средние диаметры фракций 2-й зоны слоя. В результате расчетным путем определяется закономерность распределения  $d_{cpi}$  по высоте слоя, соответствующее реальным условиям его формирования.

На рис. 3.2, 3.3 приведены результаты экспериментальных исследований и моделирования сегрегации классов крупности шихты в слое высотой 0,4 м, при загрузке материала вибрационным либо барабанным питателем.

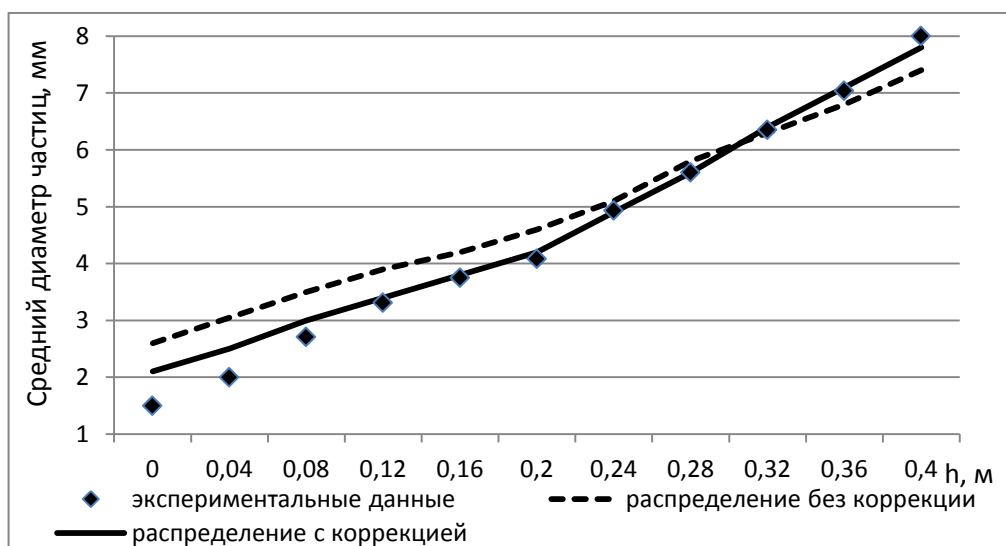


Рис. 3.2. Распределение среднего диаметра частиц по высоте слоя на агломашине №4 при загрузке вибрационным питателем

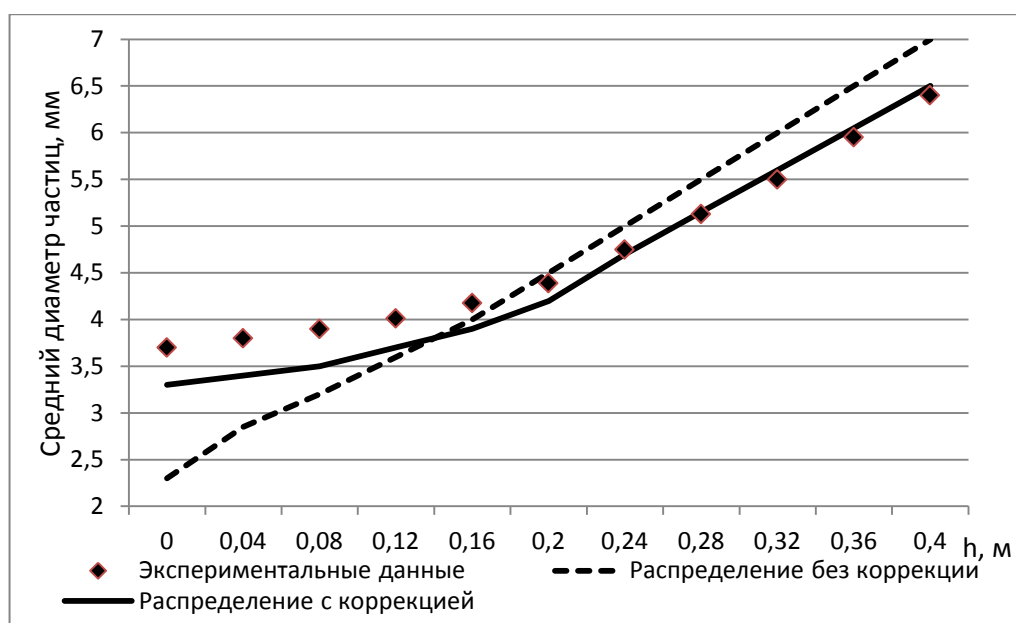


Рис. 3.3. Распределение среднего диаметра частиц по высоте слоя на агломашине №2 при загрузке барабанным питателем.

Среднеквадратическое отклонение результатов моделирования от экспериментальных исследований составило: 4,2466 и 0,7661 для загрузки вибрационным питателем без применения коррекции и с коррекцией соответственно, а так же 4,6752 и 0,7207 для условий загрузки барабанным питателем. Полученные результаты показывают, что введение коррекции, учитывающей влияние физико-механических свойств сыпучего материала, позволяет существенно повысить точность расчета распределения гранулометрического состава агломерационной шихты по горизонтам слоя.

Предложенная методика расчета грансостава шихты обладает достаточной точностью и может быть использована в системе управления процессом загрузки агломашины с целью обеспечения необходимой сегрегации шихты по высоте слоя на аглоленте, что, в свою очередь, создает предпосылки для обеспечения требуемого распределения топлива и химических компонентов, с целью выравнивания теплового режима спекания и повышения качества получаемого агломерата.

### 3.2. Исследование влияния гранулометрического состава агломерационной шихты на распределение топлива и химических компонентов в слое материала

Основным сырьем для производства чугуна является агломерат железной руды [178]. Себестоимость производства последнего на отечественных аглофабриках постоянно растет, на фоне демпинга цен металлургическими предприятиями Азиатского региона. Данное состояние вопроса обуславливает необходимость дальнейшего исследования агломерационного производства с целью изучения механизмов формирования слоя шихты, сегрегации химических компонентов, теплофизических процессов происходящих в спекаемом агломерате, что направлено на повышение производительности и энергоэффективности процесса.

С целью прогнозирования химического состава каждого из горизонтов и совершенствования процесса формирования структуры слоя агломерационной шихты, с заданным распределением физико-химических компонентов по его высоте, проведены исследования химсостава фракций загружаемого материала.

В спекательном отделении аглофабрики металлургического комбината «Запорожсталь» используются загрузочные узлы агломашин типа: вибрационный питатель – загрузочный лоток, барабанный питатель – загрузочный лоток.

В процессе экспериментов, которые проводились на агломашинах № 2, 4, 5, оборудованных различными типами загрузочных устройств, анализировалась сегрегация по высоте и ширине слоя агломерационной ленты. Для этого на спекательные тележки устанавливался пробоотборник, размером 0,4x0,2x0,5 м, который проходя под загрузочным лотком



заполнялся шихтой (масса каждой пробы составляла не менее 20 кг). Затем аглолента останавливалась, пробоотборник извлекался, и находящаяся в нем сыпучая масса разделялась по высоте на слои 0,1 м каждый. Далее полученные пробы полидисперсного материала рассеивались по фракциям. Совместно с химлабораторией цеха каждая из фракций была исследована с целью изучения ее химического состава, результаты приведены в табл. 3.1.

Перед использованием, экспериментальные данные обрабатывались, с целью устранения возможной ошибки измерений, таким образом, отсеяны из них те, которые не соответствуют критерию однородности результатов эксперимента. Для обработки использован критерий Кохрена, таким образом, из результатов анализа химического состава аглошихты исключены значения для каждой из серий опытов, относительно которых не выполняется условие:

$$G_i > G_{\text{табл}}, \quad (3.19)$$

где:  $G_i$  - расчетное значение критерия Кохрена для  $i$ -й фракции;  $G_{\text{табл}}$  - табличное значение критерия Кохрена для 5% уровня значимости,  $G_{\text{табл}} = 0,967$  [179].

Значения  $G_i$  рассчитаны по формуле:

$$G_i = \frac{S_i}{\sum_{i=1}^m S_i}, \quad (3.20)$$

где:  $S_i$  - дисперсия  $i$ -й группы,  $m$  – количество групп.

Значения  $S_i$  определяется следующим образом:

Табл. 3.1.

## Химический состав фракции агломерационной шихты

	Фракции, мм	$SiO_2$	$Al_2O_3$	$CaO$	$MgO$	$FeO$	$Fe_2O_3$	$S$	Потери	$P$	$MnO$	$C$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Опыт №1	10 >	8,60	0,55	14,20	1,42	13,50	49,29	0,123	10,442	0,015	0,07	1,79
	10-8	8,65	0,45	13,20	1,12	13,80	49,68	0,127	10,008	0,015	0,07	2,88
	8-5	7,50	0,55	14,80	1,26	13,60	47,68	0,165	10,699	0,016	0,07	3,11
	5-3	7,55	0,60	12,90	1,12	14,50	50,39	0,161	9,593	0,016	0,06	3,66
	3-1	7,60	0,70	11,90	1,22	15,50	47,42	0,190	11,003	0,017	0,07	4,35
	<1	7,60	0,55	13,60	1,12	16,60	46,83	0,209	8,983	0,018	0,07	4,42
	Опыт №2	10 >	9,25	0,55	12,20	0,64	11,75	55,73	0,114	8,292	0,014	0,08
10-8		9,50	0,70	11,30	1,18	12,80	53,73	0,150	7,244	0,016	0,08	3,30
8-5		7,40	0,55	13,70	1,22	12,80	51,37	0,155	9,849	0,016	0,08	2,86
5-3		7,75	0,55	12,40	1,22	14,40	50,51	0,169	9,895	0,016	0,07	3,02
3-1		7,50	0,60	12,40	1,20	14,80	48,56	0,201	10,891	0,018	0,06	3,77
<1		7,75	0,50	11,20	1,20	17,00	48,32	0,222	9,789	0,019	0,08	3,92
Опыт №3		10 >	8,30	0,55	13,30	1,00	13,60	50,75	0,157	9,887	0,016	0,06
	10-8	7,50	0,50	13,10	1,40	14,20	47,86	0,191	10,623	0,016	0,07	4,54
	8-5	7,55	0,70	14,40	1,22	15,20	47,60	0,178	8,924	0,018	0,06	4,15
	5-3	7,90	0,70	12,60	1,24	16,40	48,78	0,180	8,423	0,017	0,07	3,69
	3-1	7,80	0,50	10,70	1,18	15,90	48,33	0,184	11,199	0,017	0,07	4,12
	<1	7,05	0,60	11,30	1,12	17,90	50,04	0,207	8,694	0,019	0,07	3,00

$$S_i = \frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2}{n - m}, \quad (3.21)$$

где:  $n$  – количество экспериментов;  $x_i$  – значение параметра в  $i$ -м эксперименте;  $\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}$ .

Вычисленные значения критерия Кохрена для каждого из химических компонентов аглошихты представлены в табл. 3.2-3.3, те из них, которые не отвечают условию (3.19) выделены жирным шрифтом. Для этих значений с целью устранения ошибки измерений, проведены дополнительные замеры, а так же произведено усреднение данных, результаты корректировки которых, для некоторых химических компонентов, приведены на рис. 3.4-3.5.

Установлено, что некоторые составляющие шихты, такие как  $MgO, Fe_2O_3, Al_2O_3$  достаточно равномерно распределены по фракциям, содержание  $SiO_2$  монотонно снижается с уменьшением размера фракции, концентрация  $C, S, FeO$  напротив, с уменьшением размера фракции возрастает. Закономерность распределения  $CaO$  имеет экстремальный характер, с максимальным содержанием компонента во фракции со средним диаметром 6,5 мм.

Описанные выше исследования позволили получить, с использованием программного обеспечения MathLab, зависимости содержания химических компонентов от гранулометрического состава материала:

$$SiO_2 = -0,0026d_i^3 + 0,058d_i^2 - 0,25d_i + 7,79;$$

$$C = -0,0013d_i^4 + 0,032d_i^3 - 0,23d_i^2 + 0,36d_i + 4,3;$$

$$CaO = 0,0042d_i^4 - 0,1d_i^3 + 0,77d_i^2 - 1,41d_i + 11,91;$$

$$MgO = -0,0057d_i^2 + 0,063d_i + 1,08;$$

$$S = -0,00015d_i^3 + 0,00294d_i^2 - 0,02256d_i + 0,222;$$

Таблица 3.2.

**Расчетное значение критерия Кохрена для компонентов шихты**

Фракция, мм	<i>SiO<sub>2</sub></i> , %			C, %			<i>CaO</i> , %			<i>MgO</i> , %		
	Опыт1	Опыт2	Опыт3	Опыт1	Опыт2	Опыт3	Опыт1	Опыт2	Опыт3	Опыт1	Опыт2	Опыт3
10>	8,60	<b>9,25</b>	8,3	1,79	1,38	<b>2,38</b>	14,2	<b>12,2</b>	13,3	<b>1,42</b>	0,64	1
10-8	8,65	9,5	<b>7,5</b>	2,88	3,3	<b>4,54</b>	13,2	<b>11,3</b>	13,1	1,12	1,18	<b>1,4</b>
8-5	7,50	<b>7,4</b>	7,55	3,11	<b>2,86</b>	4,15	14,8	<b>13,7</b>	14,4	<b>1,26</b>	1,22	1,22
5-3	<b>7,55</b>	7,75	7,9	3,66	3,02	<b>3,69</b>	<b>12,9</b>	12,4	12,6	<b>1,12</b>	1,22	1,24
3-1	7,60	7,5	<b>7,8</b>	4,35	<b>3,77</b>	4,12	11,9	12,4	<b>10,7</b>	<b>1,22</b>	1,2	<b>1,18</b>
<1	7,60	7,75	<b>7,05</b>	4,42	3,92	<b>3</b>	<b>13,6</b>	11,2	11,3	1,12	<b>1,2</b>	1,12
<i>G<sub>i</sub></i>	0,058	<b>1,206</b>	0,736	0,014	0,874	<b>1,112</b>	0,931	<b>1,064</b>	0,004	<b>1,050</b>	0,948	0,003
	0,010	0,896	<b>1,094</b>	0,645	0,100	<b>1,254</b>	0,389	<b>1,330</b>	0,281	0,591	0,131	<b>1,278</b>
	0,048	<b>1,190</b>	0,762	0,025	<b>1,145</b>	0,830	0,806	<b>1,161</b>	0,032	<b>1,333</b>	0,333	0,333
	<b>1,090</b>	0,009	0,901	0,202	0,485	<b>1,313</b>	<b>1,123</b>	0,860	0,018	<b>1,301</b>	0,172	0,527
	0,048	0,762	<b>1,190</b>	0,855	<b>1,127</b>	0,019	0,071	0,705	<b>1,224</b>	<b>1,000</b>	0,000	<b>1,000</b>
	0,131	0,591	<b>1,278</b>	0,790	0,038	<b>1,173</b>	<b>1,332</b>	0,377	0,292	0,333	<b>1,333</b>	0,333

Таблица 3.3.

## Расчетное значение критерия Кохрена для компонентов шихты

Фракция, мм	S, %			FeO, %			Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %			Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %		
	Опыт1	Опыт2	Опыт3	Опыт1	Опыт2	Опыт3	Опыт1	Опыт2	Опыт3	Опыт1	Опыт2	Опыт3
10>	0,123	0,114	<b>0,157</b>	13,5	<b>11,75</b>	13,6	49,29	<b>55,73</b>	50,75	0,55	0,55	0,55
10-8	0,127	0,15	<b>0,191</b>	13,8	<b>12,8</b>	14,2	49,68	<b>53,73</b>	47,86	0,45	<b>0,7</b>	0,5
8-5	0,165	0,155	<b>0,178</b>	13,6	12,8	<b>15,2</b>	47,68	<b>51,37</b>	47,6	0,55	0,55	<b>0,7</b>
5-3	0,161	0,169	<b>0,18</b>	14,5	14,4	<b>16,4</b>	50,39	50,51	<b>48,78</b>	0,6	0,55	<b>0,7</b>
3-1	0,19	<b>0,201</b>	0,184	15,5	<b>14,8</b>	15,9	<b>47,42</b>	48,56	48,33	<b>0,7</b>	0,6	<b>0,5</b>
<1	0,209	<b>0,222</b>	0,207	16,6	17	<b>17,9</b>	46,83	48,32	<b>50,04</b>	0,55	<b>0,5</b>	<b>0,6</b>
G <sub>i</sub>	0,15	0,584	<b>1,21</b>	0,279	<b>1,30</b>	0,390	0,60	<b>1,271</b>	0,21	0,000	0,00	0,000
	0,800	0,034	<b>1,166</b>	0,077	<b>1,231</b>	0,692	0,061	<b>1,211</b>	0,728	0,571	<b>1,286</b>	0,143
	0,008	0,910	<b>1,083</b>	0,048	0,762	<b>1,190</b>	0,312	<b>1,333</b>	0,355	0,333	0,333	<b>1,333</b>
	0,890	0,011	<b>1,099</b>	0,283	0,386	<b>1,331</b>	0,264	0,407	<b>1,328</b>	0,048	0,762	<b>1,190</b>
	0,037	<b>1,172</b>	0,791	0,032	<b>1,161</b>	0,806	<b>1,285</b>	0,574	0,141	<b>1,000</b>	0,000	<b>1,000</b>
	0,203	<b>1,313</b>	0,484	0,724	0,063	<b>1,213</b>	0,951	0,002	<b>1,047</b>	0,000	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>

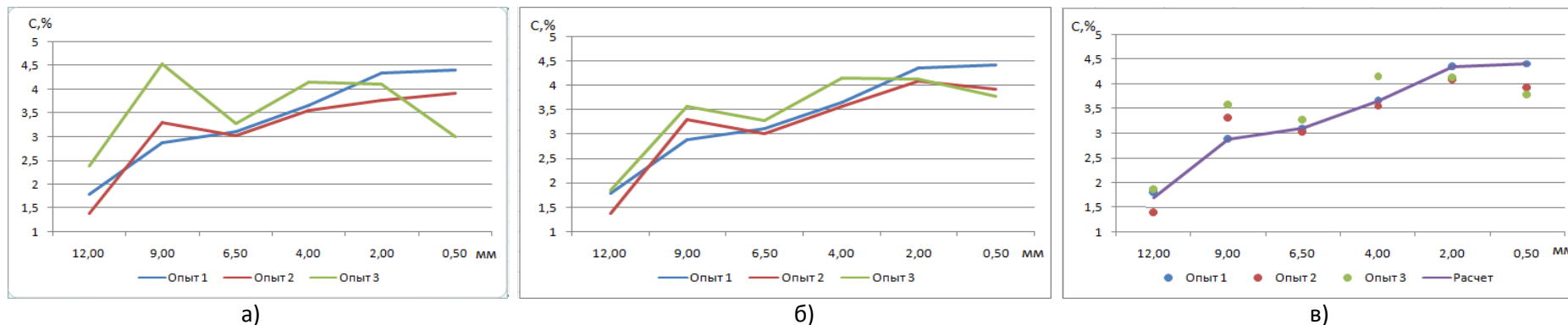


Рис. 3.4. Содержание углерода в отдельных фракциях шихты (а – до корректировки, б – после корректировки, в - расчет)

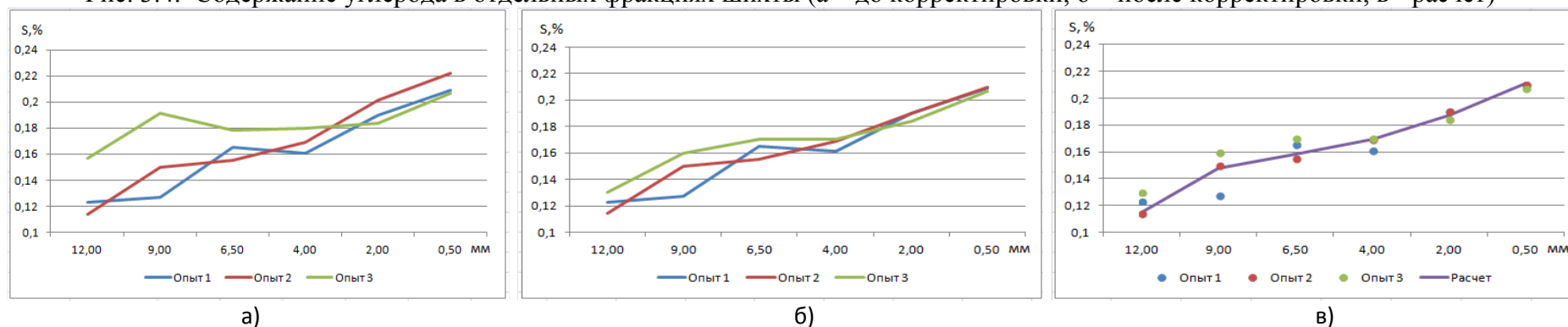


Рис. 3.5. Содержание серы в отдельных фракциях шихты (а – до корректировки, б – после корректировки, в - расчет)

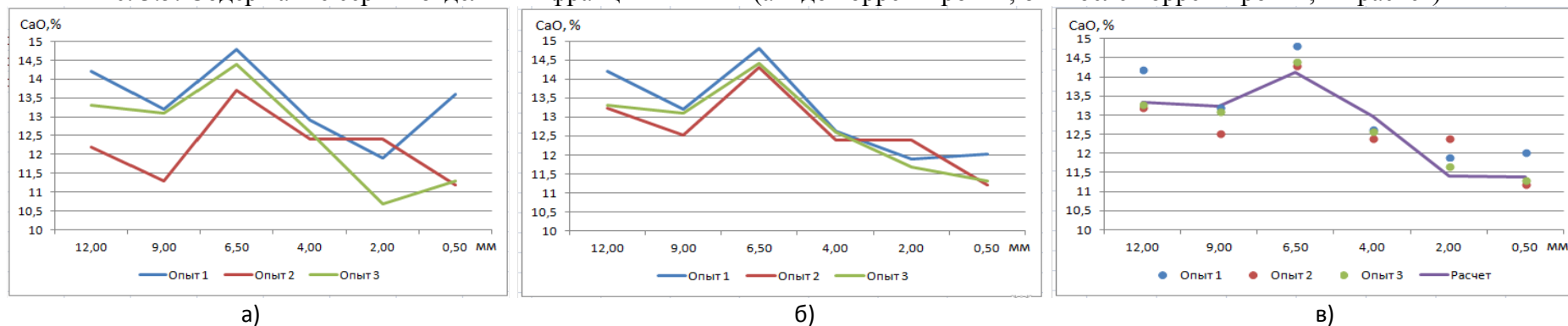


Рис. 3.6. Содержание  $CaO$  в отдельных фракциях шихты (а – до корректировки, б – после корректировки, в - расчет)

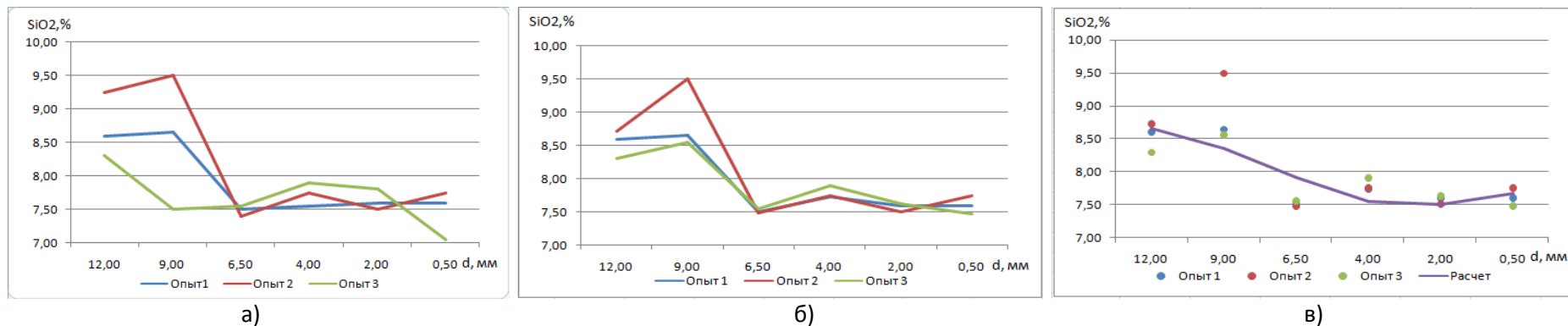


Рис. 3.7. Содержание  $SiO_2$  в отдельных фракциях шихты (а – до корректировки, б – после корректировки, в - расчет)

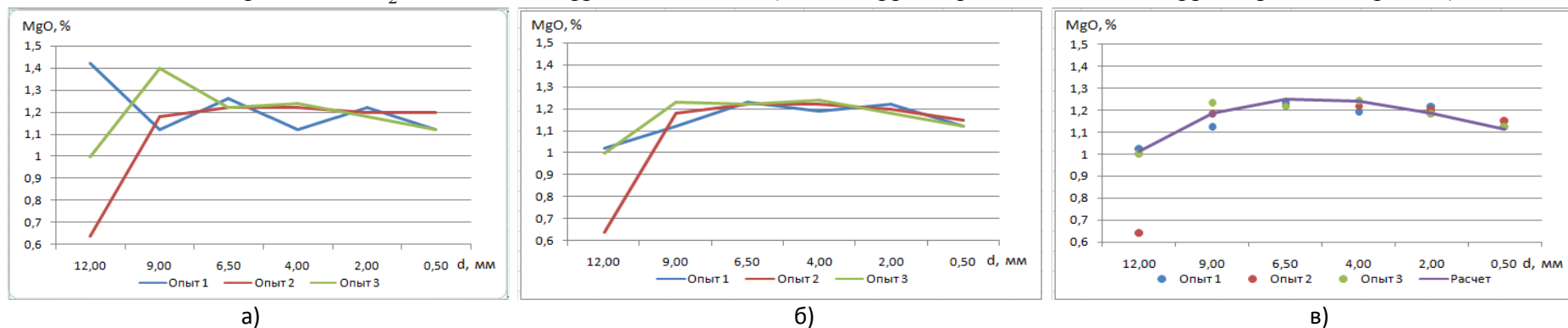


Рис. 3.8. Содержание  $MgO$  в отдельных фракциях шихты (а – до корректировки, б – после корректировки, в - расчет)

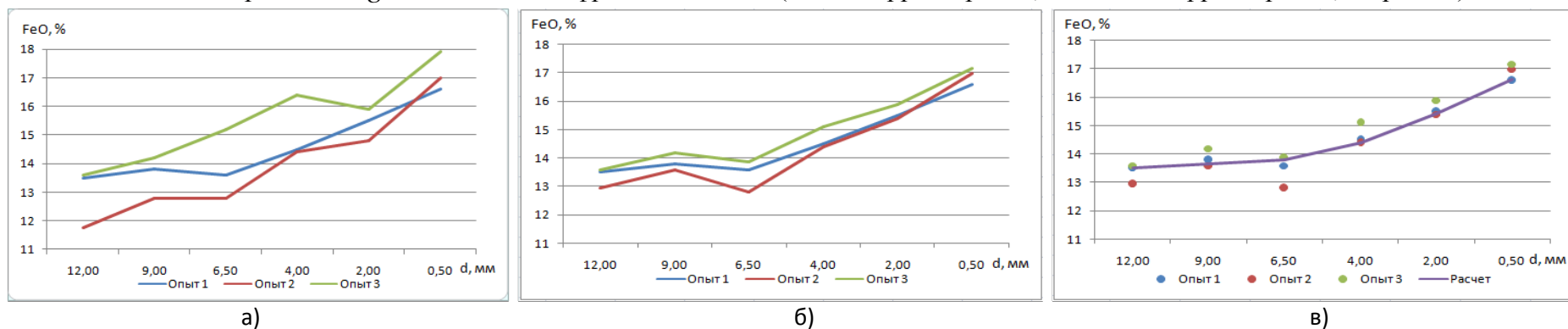


Рис. 3.8. Содержание  $FeO$  в отдельных фракциях шихты (а – до корректировки, б – после корректировки, в - расчет)

$$FeO = -0,0037d_i^3 + 0,11d_i^2 - 1,05d_i + 17,14;$$

$$Fe_2O_3 = -0,0039d_i^5 + 0,11d_i^4 - 1,11d_i^3 + 4,29d_i^2 - 5,18d_i + 48,48;$$

$$Al_2O_3 = 0,00046d_i^2 - 0,016d_i + 0,63.$$

Значения среднеквадратических отклонений экспериментальных данных и расчетных зависимостей находятся в диапазоне:  $\sigma = 0,14...0,31$ .

Полученные функциональные зависимости содержания химических компонентов в различных фракциях агломерационной шихты для условий комбината «Запорожсталь», обуславливают возможность управления процессом формирования структуры слоя загружаемого на паллеты материала, с целью обеспечения оптимального распределения топлива и физико-химических компонентов по высоте и ширине слоя. Последнее позволит улучшить тепловой режим процесса спекания и качество получаемого спека.

3.3. Определение количества тепловой энергии, выделяемой в слое полидисперсной шихты в зависимости от сегрегации топлива и химических компонентов по высоте слоя

Агломерация является тепловым процессом подготовки железорудного сырья к металлургическому переделу, в котором сочетаются потребление дорогостоящего твердого и газообразного топлива. Спекание материала сопровождается процессами нагрева и плавления шихты, горения топлива, разложения гидратов и карбонатов, окисления и восстановления окислов, которые протекают в небольшой по высоте части слоя – зоне горения, которая непрерывно перемещается в направлении колосниковой решетки.



Нагрев шихты в каждом элементарном слое происходит как за счет теплопередачи от вышележащих слоев, так и за счет теплоты, выделяющейся при горении частиц твердого топлива и экзотермических реакций в рассматриваемом единичном объеме слоя. Теплота, аккумулированная в этом объеме, расходуется на нагрев и оплавление частичек шихты, а так же на протекание эндотермических реакций (разложение карбонатов и гидратов, восстановление окислов и др.).

Вопросу изучения теплового режима агломерации было посвящено ряд работ. Наиболее распространенным методом для определения количества теплоты, выделяемой либо поглощаемой в рассматриваемом горизонте слоя, является метод зональных тепловых балансов, предложенный Вендеборном Г. Б. [180]. Дальнейшее развитие указанный метод получил в работах Шурхала В. А., Сигова А. А., Братчикова С. Г., Вегмана Е. Ф. [2, 8]. При математическом описании теплофизической модели процесса в основу принимались уравнения теплового баланса (сохранения энергии) и различных видов теплопередачи. В указанных работах, а так же в [6] рассматриваемый слой агломерата разбивался послойно на отдельные горизонты, для каждого из которых составлялись системы уравнений.

Учитывая, что отечественное развитие агломерационного процесса движется в направлении увеличения высоты спекаемого слоя, применение указанного метода влечет за собой составление десятков систем уравнений, что затрудняет его практическое применение. Так же недостатком представленных математических моделей, можно считать отсутствие в описании процесса, сегрегации топлива и компонентов шихты по высоте и ширине паллеты, что встречается и в более поздних работах [181], последнее является основным фактором, влияющим на тепловой режим процесса спекания.

В настоящее время, учитывая постоянное подорожание энергетических ресурсов, проблема оптимизации агломерационного процесса, с целью

сокращение объемов потребления твердого топлива и повышения производительности агломашин, становится крайне актуальной.

Представленные выше исследования химического состава агломерационной шихты комбината МК «Запорожсталь» и полученные зависимости содержания топлива и химических компонентов в грануле от среднего диаметра частицы шихты [182], позволяют подойти к вопросу определения количества внутренней выделяемой и поглощаемой энергии в единичном, расчетном объеме слоя шихты, в зависимости от  $d_{cp}$  [183, 184].

Для решения поставленной задачи использован метод зональных тепловых балансов, для определения тепловыделения в элементарном объеме материала, представляющего собой элементарный расчетный элемент модели [160], базирующейся на методе конечных элементов.

Агломерация протекает с непрерывным выделением и поглощением больших объемов тепловой энергии. Рассмотрим процессы, составляющие приходную и расходную части тепловой энергии, выделяемой в элементарном объеме  $P$  некоторого элементарного слоя, представленного на рис. 3.9.

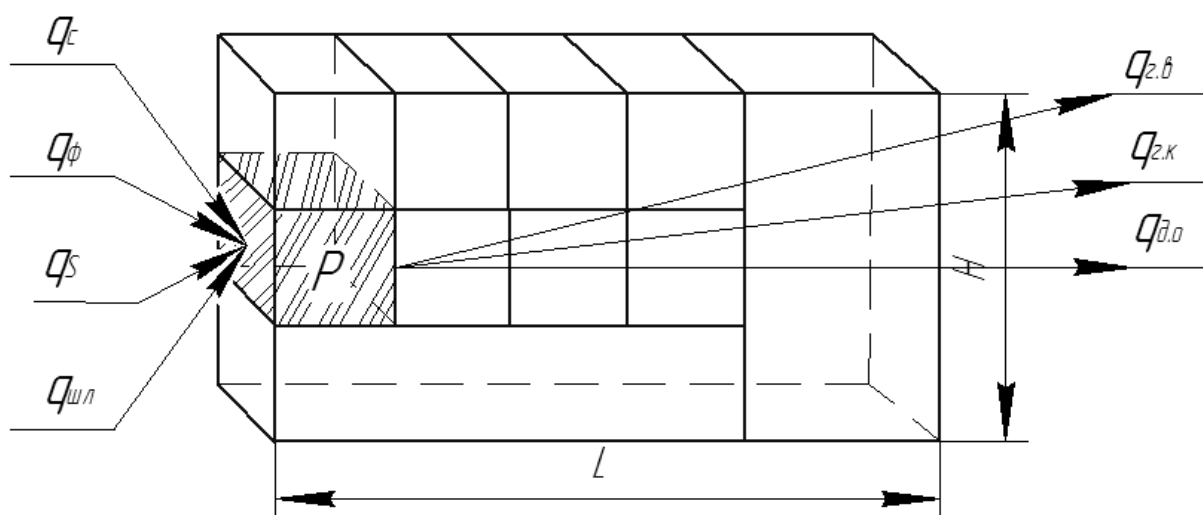


Рис. 3.9. Элементарный расчетный объем агломерационного слоя

Основную часть теплоты, поступающей в рассматриваемый объем, вносит теплота горения коксовой мелочи. По данным [2, 8] примерно 80 % углерода топлива шихты сгорает до  $CO_2$  и до 20 % до  $CO$ . Таким образом, количество теплоты выделяющейся в результате горения топлива определим из выражения:

$$q_c = V \rho_{ш} (a_{co} c_{ш} q_{co} + a_{co2} c_{ш} q_{co2}) (1 - \varepsilon), \quad (3.22)$$

где:  $V$  – объем расчетного элемента,  $m^3$ ;  $\rho_{ш}$  – плотность шихты,  $kg/m^3$ ;  $a_{co}, a_{co2}$  – доля углерода сгорающего до  $CO$  и  $CO_2$ , %;  $c_{ш}$  – концентрация углерода в шихте, %;  $q_{co}, q_{co2}$  – теплота сгорания углерода до  $CO$  и  $CO_2$  соответственно 9210  $kJ/kg$ , 32815  $kJ/kg$ ;  $\varepsilon$  – порозность слоя, %.

При агломерации железорудных материалов протекают экзотермические реакции образования силикатов (фаялит, оливины и др.), что составляет до 2% от общего прихода теплоты. По данным Е.Ф. Вегмана [163] и Ж. Мишарда [185], при спекании офлюсованных шихт, содержащих флюсообразующие ( $CaO, SiO_2, Al_2O_3$ ), приход теплоты от химических реакций составляет в среднем:

$$q_{\phi} = 170, \text{кДж} / \text{кг}.$$

Приход тепла от окисления серы составит [171]:

$$q_s = 133,48, \text{кДж} / \text{кг}. \quad (3.23)$$

При образовании известкового оливина, двухкальциевого силиката и ферритов кальция выделяется теплота. По данным Е. Ф. Вегмана и Ж. Мишара, теплоту шлакообразования можно принять равной:

$$q_{\text{исп}} = 3260, \text{кДж} / 100 \cdot \text{кг}. \quad (3.24)$$

К расходным статьям, связанным с поглощением теплоты из элементарного объема шихты, можно отнести теплоту на испарение гигроскопической влаги, которую рассчитаем по уравнению:

$$q_{2.в.} = Wc_w(t_{\text{исп}} - t_{\text{ш}}) + WQ_{\text{исп}}, \quad (3.25)$$

где:  $W$  – количество влаги в шихте, кг;  $c_w$  – теплоемкость воды, кДж/(кг·°C);  $t_{\text{исп}}$  – температура испарения воды, °C;  $t_{\text{ш}}$  – температура шихты, °C;  $Q_{\text{исп}}$  – теплота испарения воды (2284 кДж/кг).

Для расчета теплоты на диссоциацию гидратов и карбонатов используем данные табл. 3.4. [86] и уравнение:

$$q_{2.к.} = \sum a_{\text{карб}_i} \frac{-\Delta H_i}{\mu_{\text{карб}_i}} + \sum a_{\text{гидр}_i} \frac{-\Delta H_i}{\mu_{\text{гидр}_i}} = \sum a_{\text{карб}_i} Q_{\text{карб}_i} + \sum a_{\text{гидр}_i} Q_{\text{гидр}_i}, \quad (3.26)$$

где:  $a_{\text{карб}_i}, a_{\text{гидр}_i}$  – содержание соответствующего гидрата и карбоната, кг;  $\Delta H_i$  – теплота образования соответствующего гидрата и карбоната кДж/(кг·моль);  $\mu_{\text{карб}_i}, \mu_{\text{гидр}_i}$  – молекулярная масса карбоната, гидрата, кг·моль;  $Q_{\text{карб}_i}, Q_{\text{гидр}_i}$  – теплота образования карбоната гидрата, кДж/кг.

Для расчета расхода теплоты на диссоциацию  $Fe_2O_3$  воспользуемся уравнением (3.27):

Таблица 3.4.

**Тепловые эффекты диссоциации некоторых карбонатов, гидратов**

Карбонат	$CaCO_3$	$MgCO_3$	$MnCO_3$	$FeCO_3$	
$\Delta H_i$ , МДж/(кг·моль)	177,8	117,5	116,6	88,0	
$Q_{карб_i}$ , кДж/кг	1778	1395	1015	758	
Гидрат	$Ca^{2+}$	$Mg^{2+}$	$MnO_4^-$	$Al^{3+}$	$OH^-$
$\Delta H_i$ , кДж/(кг·моль)	1569	1887	247	4548	339

$$q_{д.о.} = a_{жс} (\Delta H_2 - \Delta H_1), \quad (3.27)$$

где:  $a_{жс}$  – общее содержание железа в спекаемом объеме шихты, кг;  $\Delta H_1, \Delta H_2$  – изменение энтальпий при уменьшении степени окисленности железа соответственно до  $Fe_2O_3$  и  $FeO$ .

Значения  $\Delta H_1, \Delta H_2$  определены из номограмм [8] степени окисленности железа и соответствующих изменений энтальпий. Диапазон изменения последних варьировался в пределах 100-200 кДж/кг.

Результаты расчетов количества теплоты выделяемой и поглощаемой в единичном объеме шихты  $P$ , а так же количество теплоты, вносимой топливом и химкомпонентами, в зависимости от расположения расчетного элемента по высоте слоя представлены на рис. 3.11–3.13. Зависимости получены для условий МК «Запорожсталь», агломашин № 2,4, загрузка которых осуществляется вибрационным ВП и барабанным БП питателями соответственно.

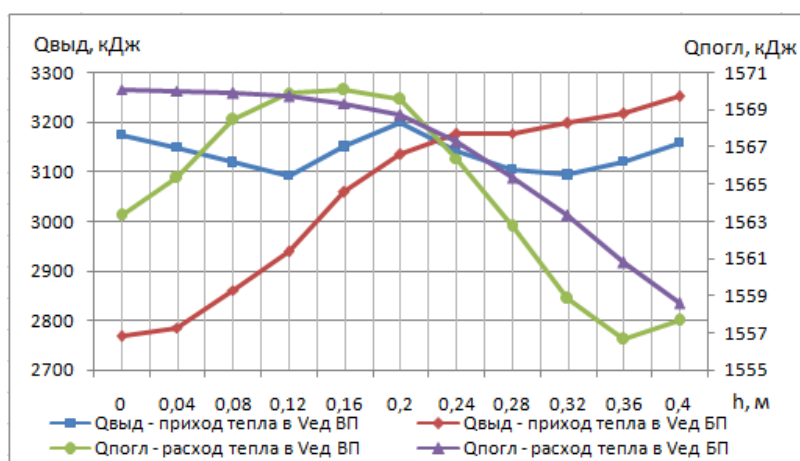


Рис. 3.11. Суммарное количество теплоты, выделяемой и поглощаемой в единичном объеме при использовании различных типов питателей.

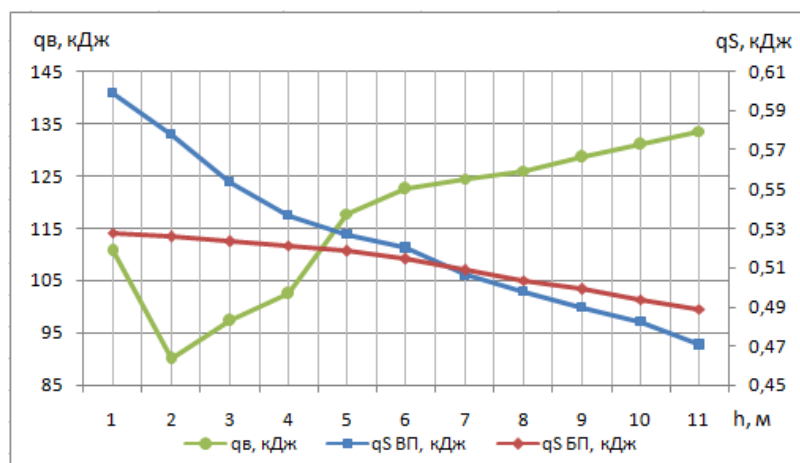


Рис. 3.12. Количество теплоты вносимой горением серы и продуктами сгорания в элементарном объеме при использовании различных типов питателей.

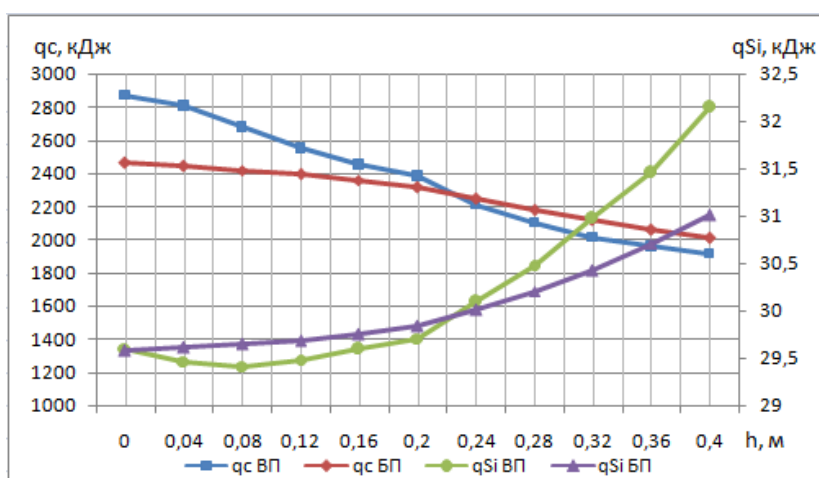


Рис. 3.13. Количество теплоты вносимой горением топлива и образованием силикатов в элементарном объеме при использовании различных типов питателей.

Зная зависимость содержания топлива и химических компонентов шихты от  $d_{cp}$  гранулы [182], можно рассчитать объем выделяемой и поглощаемой энергии в единичном объеме  $P$  рассматриваемого горизонта спекаемого слоя:

$$Q_{\text{выд\_ВП}} = -0,13d_{cp}^5 + 3,76d_{cp}^4 - 40,5d_{cp}^3 + 202,6d_{cp}^2 - 469,4d_{cp} + 3850;$$

$$Q_{\text{погл\_ВП}} = 0,07d_{cp}^4 - 0,98d_{cp}^3 + 3,37d_{cp}^2 - 0,94d_{cp} + 1557;$$

$$Q_{\text{выд\_БП}} = -0,6d_{cp}^5 + 16,99d_{cp}^4 - 179,7d_{cp}^3 + 863,9d_{cp}^2 - 1728d_{cp} + 4263;$$

$$Q_{\text{погл\_БП}} = 0,019d_{cp}^4 - 0,33d_{cp}^3 + 1,55d_{cp}^2 - 2,96d_{cp} + 1572.$$

Изменение среднего диаметра частиц шихты по высоте паллет агломерационных машин № 2, 4 представлено на рис. 3.14.

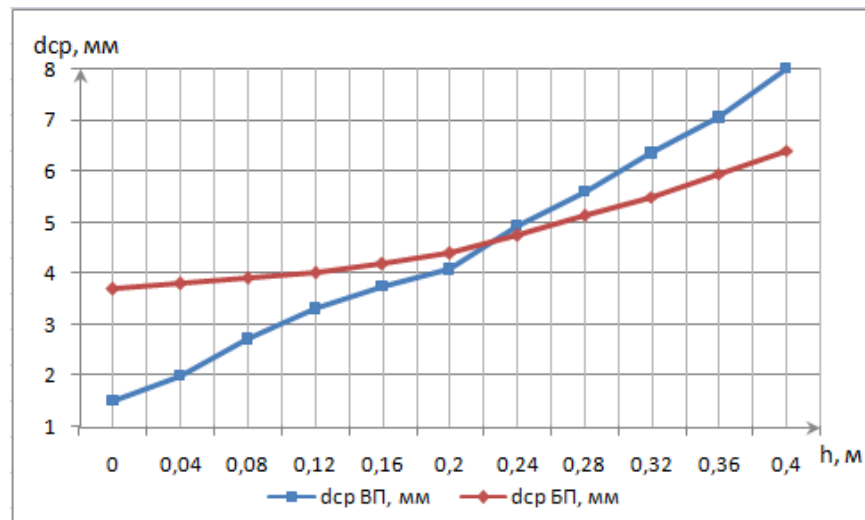


Рис. 3.14. Закономерность изменения  $d_{cp}$  по высоте паллет машин № 2,4.

Из рис. 3.14 видно, что применение для загрузки шихты на аглоленту вибрационных питателей ослабляет связи между отдельными частицами в потоке, что в свою очередь, позволяет добиться интенсификации сегрегационных процессов. Последнее обуславливает возможность

управления распределением классов крупности материала и как следствие, распределением топлива и химкомпонентов по высоте слоя [188].

Представленные исследования свидетельствуют о том, что порядка 75-80% теплоты, поступающей в элементарный объем зоны горения, выделяется за счет горения дорогостоящего твердого топлива (коксовой мелочи). Агломерационный процесс в отечественной металлургии характеризуется значительными потерями мелких фракций коксика в результате его уноса продуктами горения в процессе спекания шихты.

Таким образом, актуальной становится задача исследования процесса подготовки твердого топлива с целью сокращения образования пылеватых классов и соответственно снижения объемов его потребления.

#### 3.4. Совершенствование подготовки твердого топлива к тепловой обработке агломерационной шихты

Основным источником энергии агломерационного процесса, является теплота горения твердого топлива, в качестве которого выступает коксовая мелочь или антрацитовый штыб. Подготовка топлива к использованию в агломерационном процессе заключается в его измельчении до требуемого фракционного состава в дробильно-измельчительных установках.

Применяемые за рубежом для дробления топлива молотковые дробилки и стержневые мельницы отличаются нестабильностью показателей измельчения топлива и повышенными удельными затратами энергии. Практика измельчения топлива в отечественном агломерационном процессе связана, в основном, с четырехвалковыми дробилками с более низким, на 18-20%, содержанием вредных мелких классов, чем у вышеуказанных дробильных машин.



Следует отметить, что для валковых агрегатов так же присуще вредное переизмельчение топлива. Таким образом, исследование механизмов дробления материала в агрегате с целью оптимизации его работы является актуальной научной и практической задачей.

Температура зоны горения в значительной степени зависит от крупности используемого топлива. При одинаковых условиях горения кондиционный коксик крупностью 0,5-3,0 мм дает более высокую температуру в небольшом временном интервале, по сравнению с фракцией 3,0-5,0 мм, которая имеет меньшую контактную поверхность, вследствие чего, окислительные процессы идут медленнее, с меньшим выделением теплоты. Таким образом, крупные частицы топлива догорают в агломерируемом слое шихты в зоне кристаллизации расплава, растягивая высокотемпературную область и увеличивая механический недожог топлива, а так же потери теплоты с агломератом [189].

При увеличении крупности топлива, увеличивается высота зоны горения, время взаимодействия руды с горящими частицами топлива и степень восстановления рудного вещества. В настоящее время считается, что при дроблении топлива необходимо обеспечить минимальное образование фракции  $< 0,5$  мм, поскольку снижение содержания этой фракции на 1% приводит к экономии твердого топлива на 0,5 % [190, 191].

Исследования эффективности применения при спекании руд коксовых отходов, антрацита и других углей различного гранулометрического состава [192, 193], показали, что наибольшая теплота сгорания углерода топлива в слое достигается в случае использования топлива крупностью 0,5-3 мм, рис. 3.15.

Данные, приведенные в [194], свидетельствуют о том, что агломерация шихты, не содержащей мелкой фракции топлива 0-0,5 мм, обеспечивает более высокую (на 100-140° С) температуру в слое, позволяет увеличить на

10-17% выход годного, повысить удельную производительность на 10-30%, за счет увеличения скорости спекания.



Рис. 3.15. Эффективная теплота сгорания фракций топлива [31]

По данным японских исследователей [195], снижение диапазона крупности твердого топлива до 1-2 мм, в сравнении с более крупным топливом, обеспечило на одной из аглофабрик уменьшение расхода твердого топлива с 57,9 до 46,2 кг/т (на 20%).

Газодинамика слоя агломерационной шихты существенно зависит от крупности топлива. При увеличении размера частиц топлива от 0-0,5 мм до 0,5-3,0 мм, исходная газопроницаемость повышается с 0,36 до 0,54 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>с [196]. Кроме того, пылеватые фракции 0-0,5 мм, характеризуются значительными потерями (до 20%), в результате их уноса продуктами сгорания из нижележащих горизонтов.

Одной из основных характеристик процесса горения топлива является состав газа. При спекании офлюсованного агломерата содержание в отходящих газах CO<sub>2</sub> составляет 17-20 %, CO - 3-5 %, а соотношение CO<sub>2</sub>/CO - в пределах 4,5-6,5 [197]. Наличие в пробах газа, взятых вблизи колосниковой решетки, кислорода в количестве 2-12 % свидетельствует о неполном его использовании при агломерации.

Между интенсивностью горения и составом газов в зоне горения имеется связь. Интенсивность горения увеличивается вследствие более

тонкого измельчения коксика. При этом, благодаря тому, что с увеличением степени измельчения топлива возрастает температура горения и одновременно уменьшается высота зоны горения, наблюдается понижение содержания  $CO$  в газах, отходящих из зоны горения.

Анализ исследований влияния крупности твердого топлива на процесс агломерации, позволил сделать вывод о необходимости стабилизации крупности топлива в диапазоне 0,5-3,0 мм, при снижении содержания крупных и пылеватых фракций. Применяемые на отечественных аглофабриках четырехвалковые дробилки, являются более эффективными, чем зарубежные аналоги, но характеризуются наличием вредного переизмельчения топлива.

Таким образом, для оптимизации подготовки твердого топлива и интенсификации выхода кондиционной фракции необходимо: исследовать физику процесса дробления в четырехвалковой дробилке; проанализировать эффективность существующей схемы дробления топлива; разработать методику расчета производительности дробилки; исследовать влияние крупности дробленого топлива на время его выгорания.

Процесс дробления твердого топлива в четырехвалковой дробилке может быть представлен схемой, приведенной на рис. 3.16.

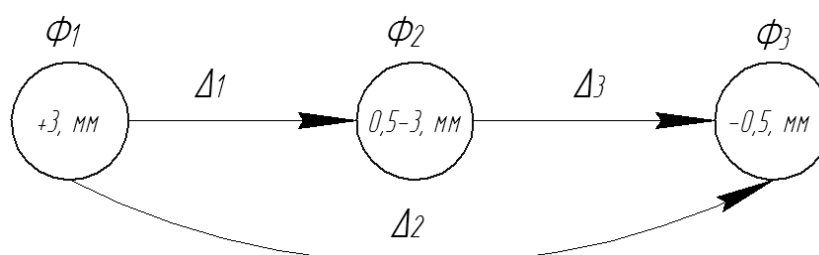


Рис. 3.16. Механизм дробления материала в четырехвалковой дробилке.

Механизм процесса измельчения можно описать следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \Phi_1' - \Phi_1'' = (\Delta_2 + \Delta_3)t_d; \\ \Phi_2'' - \Phi_2' = (\Delta_1 - \Delta_3)t_d; \\ \Phi_3'' - \Phi_3' = (\Delta_1 - \Delta_2)t_d. \end{cases} \quad (3.28)$$

где:  $\Phi_i'$  - содержание  $i$ -й фракции в исходном материале, %;  $\Phi_i''$  - содержание  $i$ -й фракции в дробленом материале, %;  $t_d$  - время дробления, с;  $\Delta_i$  - интенсивность измельчения  $i$ -й фракции, %/с.

При исследовании механизма процессов в дробильном агрегате принято, что дробление осуществляется в результате сдавливающих  $\xi_1, \xi_2$  (+3,0; 0,5-3,0 мм) и истирающих  $\xi_3$  (0-0,5 мм) воздействий на сыпучую массу. Исходя из того, что  $\xi_3$  является основным источником образования некондиционных пылеватых фракций, с целью обеспечения условия (3.29), долю этих воздействий в процессе дробления необходимо свести к минимуму. Последнее, возможно осуществить путем изменения схемы подготовки топлива и его дробления в валковом агрегате.

$$\begin{cases} \Phi_1(+3,0\text{мм}) \longrightarrow \min \\ \Phi_2(0,5 - 3,0\text{мм}) \longrightarrow \max . \\ \Phi_3(0 - 0,5\text{мм}) \longrightarrow \min \end{cases} \quad (3.29)$$

Для условий аглофабрики МК «Запорожсталь» в исходном коксике содержание кондиционной фракции (0,5-3,0 мм) достигает 40%, что объясняется использованием отсева коксика доменного производства. Существующая схема дробления рис. 3.17, обуславливает наличие вредного переизмельчения топлива и увеличения доли истирающих нагрузок при дроблении.

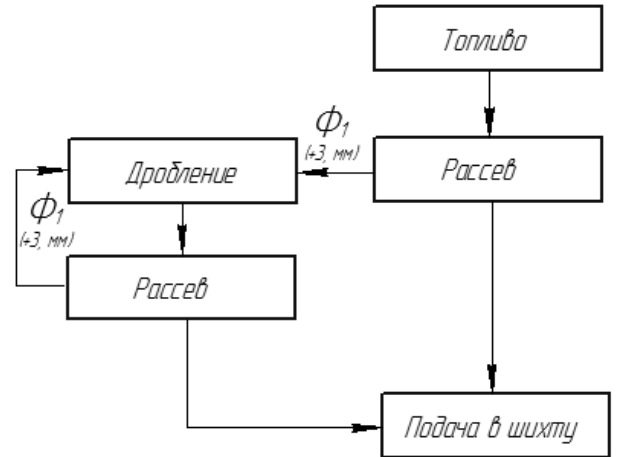
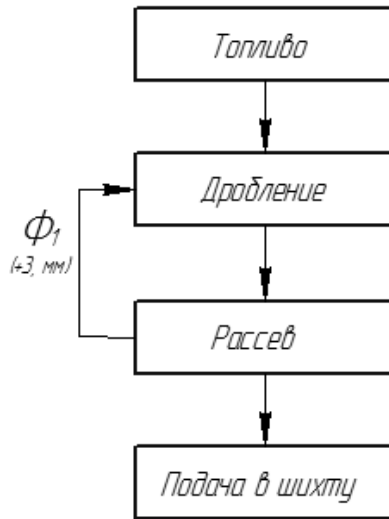


Рис. 3.17. Существующая схема дробления      Рис. 3.18. Предлагаемая схема измельчения

Снижение доли  $\xi_3$  и ее влияния на дробление топлива можно достичь при использовании предложенной автором настоящей диссертации, схемы измельчения, рис. 3.18. Предварительный рассев топлива перед дроблением исключит переизмельчение кондиционной и мелкой фракции, а так же увеличит долю сдавливающих нагрузок  $\xi_1, \xi_2$  при измельчении.

Известно, что фракционный состав дробленного топлива в значительной степени зависит от производительности дробильно-измельчительного агрегата. С целью определения оптимальной производительности четырехвалковой дробилки, для обеспечения условия (3.29), проведены серии опытов по дроблению коксика и антрацитового штыба. Первая серия опытов проводилась при фиксированном грансоставе исходного сырья, производительность дробилки изменялась в диапазоне 10-20 т/ч, за счет изменения количества подаваемого питателем материала. Зазор между первой парой валков составлял 10 мм, между второй 3 мм. Результаты опытов приведены в табл. 3.5.

Таблица 3.5.

**Влияние производительности дробилки на фракционный  
состав топлива.**

Производительность Q, т/ч	Исходный коквик	Содержание фракции, %		
		+ 3,0, мм	0,5-3,0, мм	0-0,5, мм
10		56,6	31,4	12
15		8	57,2	34,8
20		11,5	58,7	29,8
		15,5	50,5	34
Q, т/ч	Исходный штыб	+ 3,0, мм	0,5-3,0, мм	0-0,5, мм
		36,3	51,4	12,3
10		8,7	75	16,3
15		9,5	75,3	15,2
20		13,5	68,3	18,2

Для определения производительности дробилки, обеспечивающей наибольшую интенсивность выхода кондиционной фракции, систему уравнений (3.28) представим в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\Phi_1' - \Phi_1''}{t_\delta} = \Delta_2 + \Delta_3 \\ \Delta_1 - \frac{\Phi_2'' - \Phi_2'}{t_\delta} = \Delta_3 \\ \Delta_1 - \frac{\Phi_3'' - \Phi_3'}{t_\delta} = \Delta_2 \end{array} \right. \quad (3.30)$$

Решение системы (3.30) позволило получить результаты, представленные на рис. 3.19, 3.20. Из кривых видно, что максимальная интенсивность выхода кондиционной фракции (0,5-3,0 мм) обеспечивается при производительности  $Q = 15$  т/ч.

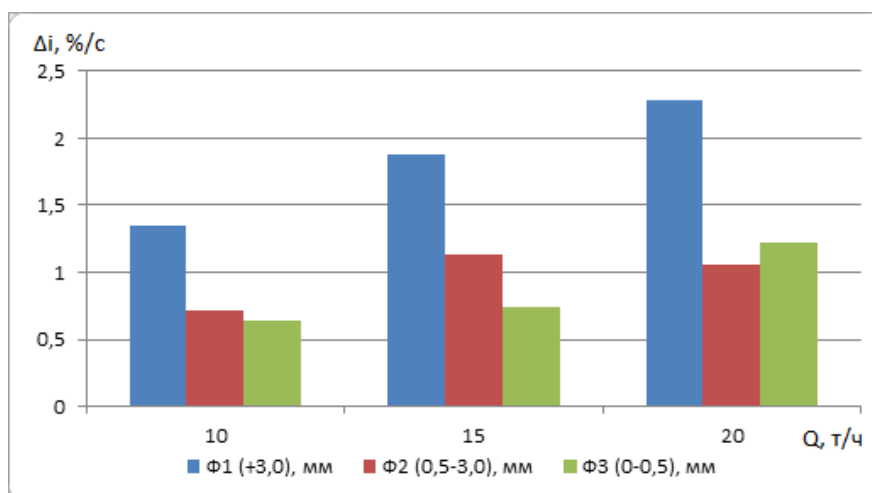


Рис. 3.19. Интенсивность измельчения фракций коксика

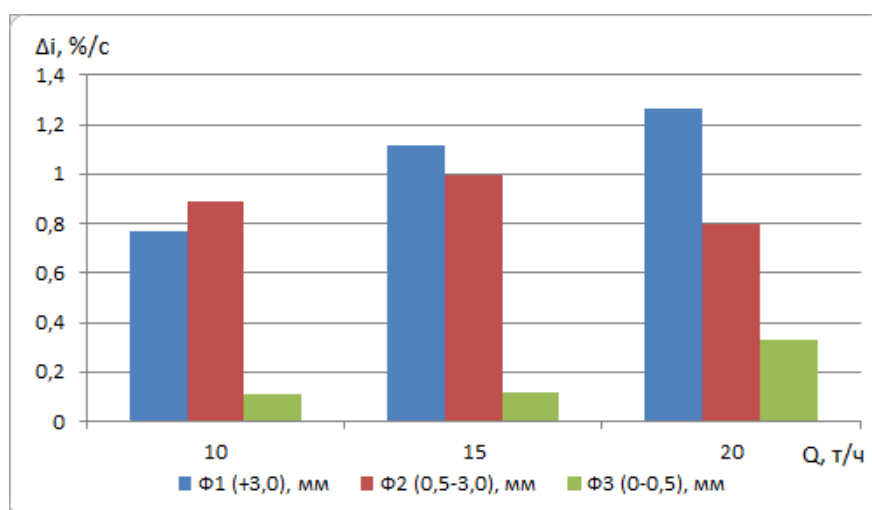


Рис. 3.20. Интенсивность измельчения фракций штыба

Во второй серии опытов изменялась и производительность и фракционный состав исходного топлива, подаваемого в дробилку. Результаты опытов с изменением фракционного состава твердого топлива после измельчения в валковом агрегате представлены в табл. 3.6-3.7.

Таблица 3.6.

**Фракционный состав исходного и дробленого коксика**

Коксик		Содержание фракции до дробления, %			Содержание фракции после дробления, %		
№ опыта	Q, т/ч	Ф1 (+ 3,0)	Ф2 (0,5-3,0)	Ф3 (0-0,5)	Ф1 (+ 3,0)	Ф2 (0,5-3,0)	Ф3 (0-0,5)
1	10	59,77	20,49	19,74	26,41	36,66	36,93
2	12	58,18	25,57	16,25	48,12	23,18	28,7
3	14	59,4	27	13,6	35,3	52	13,7
4	16	63,69	23,74	12,64	37,44	36,36	26,2
5	18	73,47	18,95	7,58	40,96	33,58	25,46
6	20	88,56	5,09	6,35	76,43	11,94	11,63

Таблица 3.7

**Фракционный состав исходного и дробленого штыба**

Штыб		Содержание фракции до дробления, %			Содержание фракции после дробления, %		
№ опыта	Q, т/ч	Ф1 (+ 3,0)	Ф2 (0,5-3,0)	Ф3 (0-0,5)	Ф1 (+ 3,0)	Ф2 (0,5-3,0)	Ф3 (0-0,5)
1	10	36	42	22	23,5	49,5	27
2	12	39	43	18	27,5	53,5	19
3	14	35	46	19	33	45	22
4	16	38	42	20	38	41	21
5	18	37,5	43,25	19,25	30,55	47,55	21,9
6	20	95,45	2,05	2,5	91,1	5,5	3,4



Исходя из графиков, представленных на рис. 3.21 видно, что вторая серия опытов позволила уточнить значение оптимальной производительности дробилки при дроблении коксика, которая составляет  $Q = 14$  т/ч и обеспечивает максимальный выход кондиционной фракции. Интенсивность выхода фракции (0,5-3,0 мм), рис 3.22, при этой производительности так же максимальна.

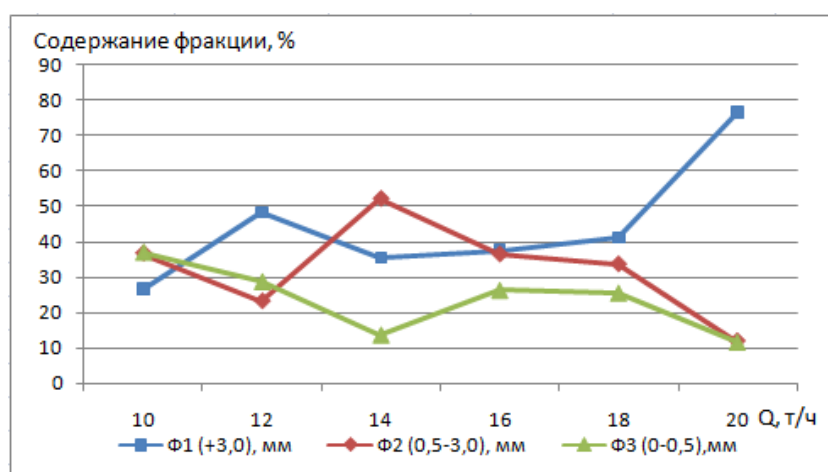


Рис. 3.21. Зависимость фракционного состава коксика от производительности

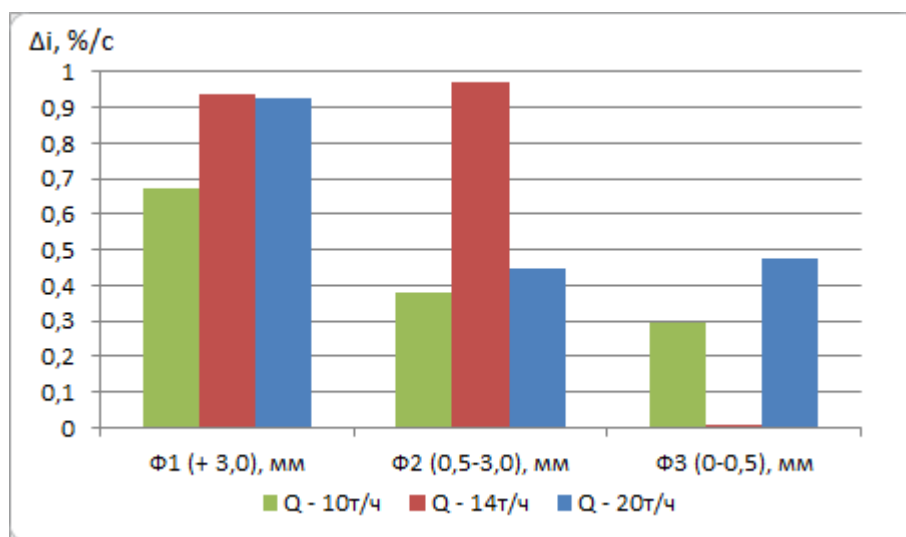


Рис. 3.22. Интенсивность измельчения фракций коксика от производительности

В случае дробления антрацитового штыба, оптимальная производительность четырехвалковой дробилки составит  $Q = 12$  т/ч,

рис. 3.23. Интенсивность измельчения кондиционной фракции при этой производительности достигает максимальных значений, рис. 3.24.

Анализ полученных результатов показывает, что при стабильном режиме дробления, спектр крупности дробленного топлива зависит от его природных свойств. Так, по результатам первой серии опытов, при близком гранулометрическом составе исходных материалов минимальное содержание пылеватых фракций (0-0,5 мм) в дробленном коксике в два раза больше чем в штыбе.

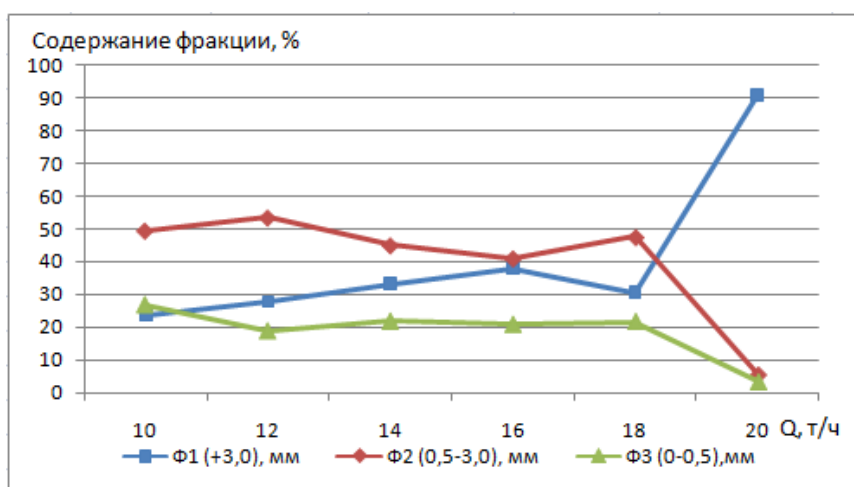


Рис. 3.23. Зависимость фракционного состава штыба от производительности дробилки

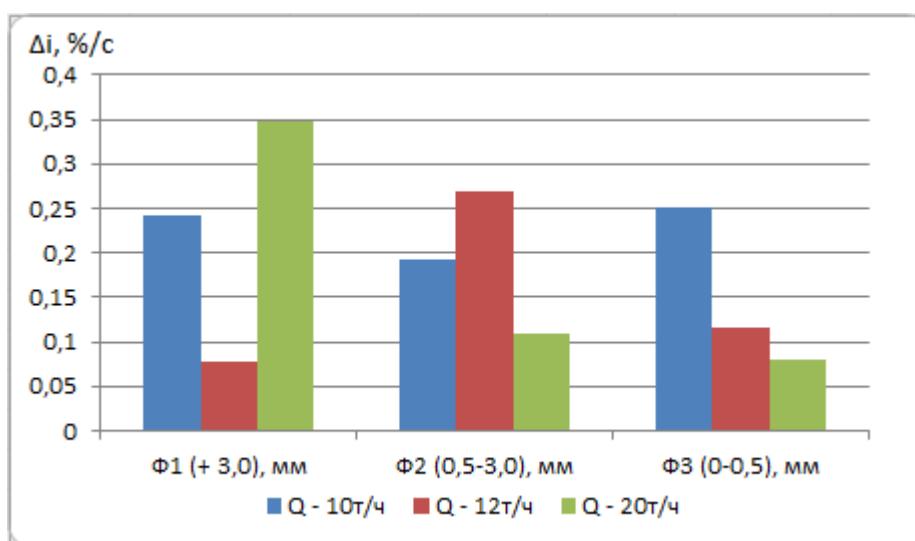


Рис. 3.24. Интенсивность измельчения фракций штыба от производительности дробилки

Анализ результатов расчета  $\Delta_i$  показывает, что при снижении производительности агрегата уплотняется структура материала, что вызывает пропорциональное снижение интенсивности его дробления под действием сдвливающих нагрузок. Это явление можно объяснить снижением подвижности отдельных частиц и их более плотном примыкании друг к другу, что усиливает влияние истирающих нагрузок, и, как следствие, увеличивает выход пылеватых фракций – 0,5 мм.

Исходя из того, что температура зоны горения и ее высота зависят от крупности топлива, а последнее, в свою очередь, характеризует длительность его горения, в работе проведены исследования по установлению времени выгорания кондиционной фракции твердого топлива.

Экспериментальные данные Карабасова Ю.С. [53] по кинетике выгорания частиц топлива различного размера, позволили установить закон изменения скорости выгорания  $K_s$ , который имеет следующий вид:

$$K_s = -\rho \frac{dr}{dt}, \quad (3.31)$$

где:  $\rho$  - плотность топлива, кг/м<sup>3</sup>;  $r$  - размер частицы топлива, м;  $t$  - время горения, с.

Допуская, что в общем виде закон изменения скорости выгорания от диаметра частицы имеет вид [53]:

$$K_s = \frac{A}{d^m}. \quad (3.32)$$

где:

$$A = \frac{\rho}{2} \frac{1}{m+1} (d_0^{m+1} - d^{m+1}) \frac{1}{t}, \quad (3.33)$$

$A$  - эмпирическая константа,  $\text{кг}/\text{м}^3\text{с}$ ;  $m$  - коэффициент, зависящий от диаметра частицы топлива (при  $d > 10$  мм,  $m \approx 0,5$ ; при  $d < 5$  мм,  $m \approx 1$ ).

Зная размер и плотность частицы топлива, может быть рассчитано время ее полного сгорания:

$$t = \frac{M}{K_s}, \quad (3.34)$$

где:  $M$  - масса частицы топлива, кг.

Влияние размера частицы на время ее выгорания представлено на рис. 3.25. Из полученных результатов видно, что среднее время выгорания частицы коксовой мелочи кондиционного размера составляет 48-52 с, а антрацитового штыба 72-76 с.

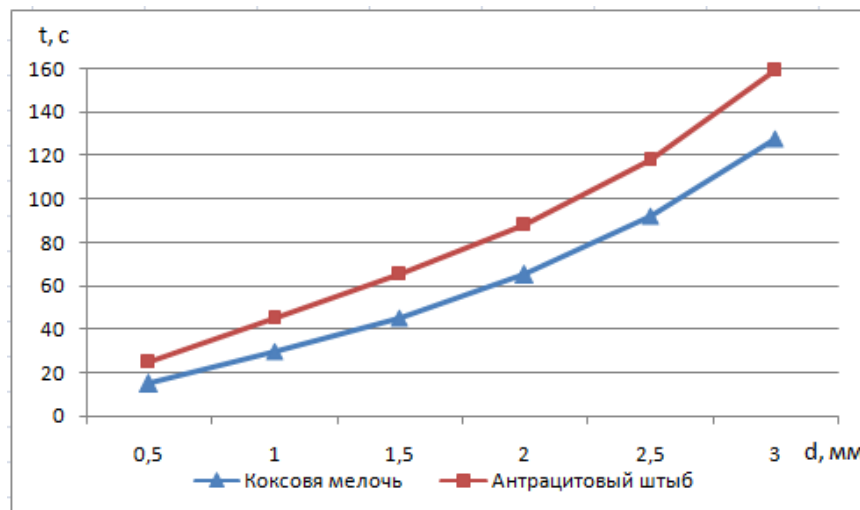


Рис. 3.25. Зависимость времени выгорания частицы топлива от ее размера.

Последнее свидетельствует о более низкой реакционной способности и интенсивности выделения теплоты частицей штыба в сравнении с коксиком, что предопределяет температурный уровень процесса спекания и время пребывания единичных объемов шихты в зоне высоких температур.

Проведенные исследования по оптимизации режимов работы четырехвалковой дробилки при измельчении коксовой мелочи и антрацитового штыба свидетельствуют о том, что природные свойства топлива существенно влияют на выход кондиционной фракции при стабильном режиме дробления. Максимальный выход кондиционной фракции при дроблении коксика обеспечивается при производительности 14 т/ч, а штыба 12 т/ч.

Исследования механизма дробления в валковом агрегате, позволили сделать вывод о необходимости изменения схемы дробления топлива с его предварительным рассевом, с целью снижения влияния истирающих нагрузок на измельчаемый материал.

Установлено влияние крупности дробленного топлива на время его выгорания, что обуславливает температурный режим процесса спекания шихты. Полученные выше результаты позволяют вплотную подойти к вопросу оптимизации теплового режима процесса спекания аглошихты на полученной модели [166], учитывающей внутреннее тепловыделение в единичном объеме, а так же установления закономерностей формирования структуры слоя полидисперсной шихты, с целью рационального распределения топлива и химкомпонентов по высоте агломерируемого слоя.

3.5. Определение оптимального распределения твердого топлива в слое загружаемой железорудной шихты для выравнивания теплового режима агломерационного процесса.

Интенсивная эксплуатация в течении длительного времени отечественных агломерационных фабрик без капитальной, отвечающей современным требованиям к шихтовым условиям и техническому

оснащению реконструкции, привела к износу и серьезному отставанию по техническому уровню процесса и оборудования от зарубежных аналогов.

Мероприятия, направленные на повышение производительности аглофабрик, работающих на шихте с высоким содержанием концентратов, ориентировались на повышение высоты спекаемого слоя. Это позволило, в некоторой степени, снизить расход твердого топлива, однако последнее часто влекло за собой некоторое снижение производительности агломашин при неизменном содержании мелочи в агломерате.

Высокий выход мелочи при грохочении спека, вызван неудовлетворительной подготовкой шихты, нарушениями при ее укладке на паллеты агломашин, что влечет за собой отсутствие либо недостаточную сегрегацию материала по высоте слоя, тем самым обуславливая неравномерность теплового режима по сечению пирога. Полученный в результате недостаток в верхних и переизбыток тепла в нижних горизонтах значительно снижают производительность агломашин.

Вопрос определения оптимального распределения топлива по высоте и ширине слоя особую актуальность получил в настоящее время, учитывая постоянное подорожание энергоресурсов. Таким образом, решение указанной задачи позволяет достичь постоянства максимальной температуры в зоне горения при ее перемещении по высоте слоя спекаемой шихты, и как следствие, стабилизировать свойства агломерата по горизонтам спека.

При исследовании технологических процессов широкое распространение получили методы численного моделирования. Однако далеко не все известные модели являются достаточно точными, адекватными и удобными для проведения исследований, направленных на оптимизацию теплового режима рассматриваемого процесса.

Вопросам исследования и моделирования тепловых процессов посвящены работы А. А. Сигова [8], Е. Ф. Вегмана [163] и др., в которых при разработке модели использовался метод зональных тепловых балансов.

Применение данного метода предусматривает составление для каждого элементарного слоя системы уравнений с последующим их решением. Однако тенденция к увеличению высоты спекаемого материала обуславливает наличие большого числа элементарных слоев, что приводит к необходимости расчета десятков систем уравнений, тем самым затрудняя практическое применение метода.

В работе [198] представлен развернутый анализ современных подходов к моделированию, базирующихся на применении специального программного обеспечения для реализации численных и имитационных моделей агломерационного процесса.

Так в [199] математическая модель представляет собой зависимость  $Y = f(U, V, Z)$  :  $U$  – вектор управляющих воздействий;  $V$  – вектор контролируемых возмущений;  $Z$  – вектор неконтролируемых возмущений;  $Y$  – выходной вектор объекта. Вид данной функции при описании процесса спекания зависит от времени и имеет существенные ограничения на переменные. При описании функционирования системы со сложной внутренней структурой, аналитическое описание, предложенное Цаплиным А.И., становится практически невозможным при обеспечении достаточной точности модели.

Модель, предложенная Калашниковым С. Н. [200], базируется на методах формально-математического описания физико-химических явлений и реализации вычислительного эксперимента. Автором указана необходимость создания гибких и универсальных технологий математического моделирования, позволяющих решать различные научные и практические задачи.

В работе [201] представлена комплексная математическая модель, отвечающая требованиям адекватности реальным теплофизическим и физико-химическим процессам, протекающим в слое при обжиге железорудных окатышей. Разработанная модель рассматривает обжиговый

агрегат в целом и затрагивает лишь некоторые особенности процесса спекания. Использование данной модели целесообразно лишь для решения технологических задач.

Математические модели в работах [181, 202] построены по блочному принципу. Все рассматриваемые процессы сгруппированы в подсистемы и базируются на методах статической термодинамики. Предложенная структурная схема процесса спекания построена на основе общей схемы технологического объекта исследования и является наиболее полной из всех существующих. Приведенная блочная схема модели не позволяет совместить результаты расчетов подмоделей, тем самым затрудняя проверку ее адекватности.

Стоит добавить, что к существенному недостатку приведенных моделей относится отсутствие анализа сегрегационных процессов, протекающих в загружаемом материале, что обуславливает закономерности распределения топлива и химкомпонентов по высоте слоя шихты. Таким образом, разработка адекватной тепловой модели процесса агломерации для решения задач оптимизации режима спекания, является актуальной научной и практической задачей.

Во втором разделе настоящей диссертации представлена модель теплового режима процесса спекания агломерационной шихты, базирующаяся на методе конечных элементов, расчетная схема которой приведена на рис. 2.8. Для проведения моделирования спекания слоя шихты для условий агломашины №1 МК «Запорожсталь», являющейся наиболее современной конвейерной машиной комбината, указанная модель модифицирована с учетом технических характеристик и технологических особенностей агрегата.



Таким образом, имеем слой высотой 500 мм, находящийся на паллете шириной 2500 мм, температура зажигания слоя горном составляет 1180-1240°C, разряжение в вакуум-камерах 850-950 мм вод.ст., расход твердого топлива на спекание 3,6-3,8%.

Моделирование теплового режима аглопроцесса осуществлялось наложением соответствующих начальных (2.28) и граничных условий (2.29) и заданием мощности внутренних источников энергии [203, 204].

При моделировании распределение топлива по высоте слоя принималось равномерным, без учета сегрегации. Расчетная температура зоны горения по горизонтам слоя, полученная в результате моделирования представлена в табл. 3.8.

Проведение натурного эксперимента, с целью подтверждения адекватности разработанной модели, было реализовано на «Опытной установке аглоцеха для спекания агломерата» МК «Запорожсталь», схема которой представлена на рис. 3.26, а внешний вид на рис. 3.27.

Таблица 3.8.

**Температура зоны горения по горизонтам спекаемой шихты**

Номер горизонта	Температура зоны горения, °С			
	Моделирование	Эксперимент 1	Эксперимент 2	Эксперимент 3
1	1180	1206	1202	1209
2	1267	1291	1280	1272
3	1319	1320	1316	1321
4	1384	1390	1364	1344
5	1408	1426	1412	1395

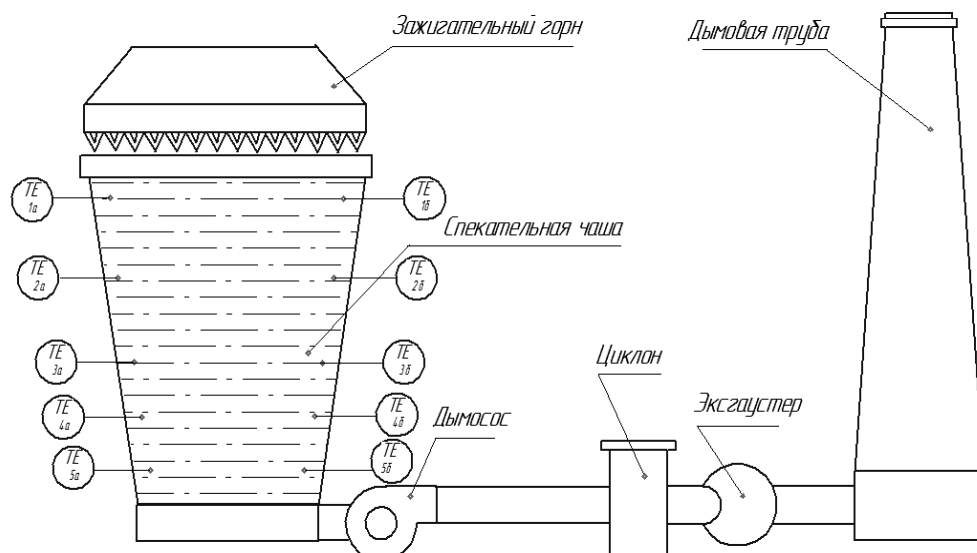


Рис. 3.26. Схема опытной установки для спекания агломерата

Спекание проводилось для слоя шихты высотой 500 мм. Распределение топлива по высоте обеспечивалось равномерным и его содержание в загружаемой шихте колебалось в диапазоне 3,6 – 3,4 %. Температура зажигания 1200–1240 °С.

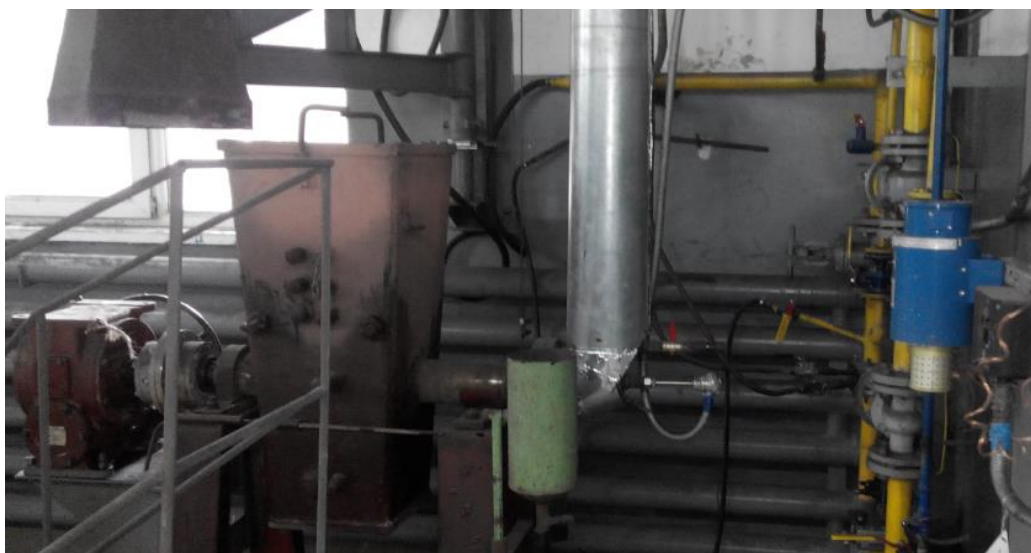


Рис. 3. 27. Внешний вид спекательной установки

Натурный эксперимент состоял из серии трех опытных спеканий, температура зоны горения определялась по пяти горизонтам, путем

установки десяти термопар, как показано на рис. 3.27. Результаты экспериментов сведены в табл. 3.8.

Проверку адекватности имитационной модели натурному эксперименту реализуем на основе сопоставления дисперсии воспроизводимости среднего значения функции отклика и дисперсии адекватности.

В статистике разработан критерий для проверки гипотезы об адекватности модели, который называется F-критерием Фишера, последний определяется из формулы [164]:

$$F = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} \leq F_{кр}, \quad (3.37)$$

где  $\sigma_1^2$  – остаточная дисперсия или дисперсия адекватности;  $\sigma_2^2$  – дисперсия воспроизводимости.

Дисперсию воспроизводимости найдем из:

$$\sigma_2^2 = \frac{\sigma_2}{\nu_2}, \quad (3.28)$$

где:  $\sigma_2 = \sum_{j=1}^N (y_{ij} - \bar{y}_i)$ ;  $\nu_2 = N(\nu + 1)$ ;  $\nu_2$  – число степеней свободы;  $N$  общее число экспериментов;  $\nu$  – число параллельных измерений в экспериментальных точках.

В случае  $\nu_2 = n - 1$  получим:

$$\sigma_2^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n y_{ij}, \quad (3.29)$$

где:  $n$  - число параллельных измерений в любой точке вне плана (при отсутствии возможности проведения  $v$  параллельных измерений в каждой точке плана).

Оценка дисперсий адекватности при точках плана эксперимента  $N > m$  характеризует отклонение между результатами наблюдений и значениями, формируемыми по функции отклика:

$$\sigma_1^2 = \frac{1}{N - m_{i-1}} (\bar{y}_i - y_i'), N > m, \quad (3.30)$$

где:  $\bar{y}_i$  - среднее значение результатов наблюдений в  $i$ -й точке плана;  
 $y_i'$  - значение отклика в той же точке, рассчитанное на модели;  $m$  - число оцениваемых параметров.

Количество степеней свободы дисперсий адекватности  $\nu_1 = N - m$ . При насыщенном планировании нет степеней свободы и сумма отклонений равна нулю.

Проверка адекватности сводится к проверке гипотезы об однородности оценки дисперсии воспроизводимости со своим числом степеней свободы и оценки дисперсии адекватности. Проверка осуществляется по критерию Фишера, при условии, что вычисленное значение критерия меньше критического  $F_{кр}$ , то нет основания для сомнения в адекватности модели.

Проверка адекватности, тепловой модели процесса агломерации, разработанной на базе метода конечных элементов, путем сравнения данных промышленного эксперимента проведенного на «Опытной установке аглоцефа для спекания агломерата», с результатами имитационного моделирования, подтвердила адекватность модели. По результатам эксперимента получены акт и протокол проверки адекватности модели на МК «Запорожсталь».

Анализ данных имитационного моделирования и результатов натурального эксперимента показали, что погрешность моделирования составляет порядка 12...14%, последнее свидетельствует о возможности использования указанной модели для проведения численных экспериментов с целью оптимизации теплового режима процесса спекания.

Для определения оптимального распределения твердого топлива по высоте и ширине паллеты,  $C_{\%} = f(h) \rightarrow \min$ , с целью обеспечения постоянства максимальной температуры зоны горения  $T_{з.г.} \rightarrow const$ , на расчетную область модели реализованной в программном продукте ANSYS, накладывались соответствующие граничные условия (3.36), и задавалась мощность внутренних источников энергии:

$$q_V = \frac{Qm\varepsilon}{V\rho_m t}; \quad (3.31)$$

где:  $Q$  - теплота, выделяющаяся в элементарном объеме слоя, определяемая из теплового баланса, кДж;  $m$  - масса единичного объема, кг;  $V$  - объем единичного объема, м<sup>3</sup>;  $\rho_m$  - плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $t$  - время тепловой обработки, с.

Из представленных во второй главе результатов известно, что температура в зоне горения для получения мелкопористого, легковосстановимого офлюсованного агломерата должна находиться в диапазоне 1250-1350°C. В результате решения обратной задачи по стабилизации высокотемпературной зоны горения, установлен неравномерный характер распределения задаваемой мощности, выделяемой в единичном объеме, как по ширине, так и по высоте пирога, имеющий существенное увеличение в прибортовых зонах и постепенное снижение от верхних к нижним горизонтам спека. Последнее свидетельствует о

значительных потерях теплоты через стенки паллеты и с уходящими газами через неплотности и повышенную порозность слоя шихты в прибортовых зонах, а также о существенном уровне аккумуляции тепловой энергии.

Расчетная температура зоны горения по горизонтам слоя представлена на рис. 3.28.

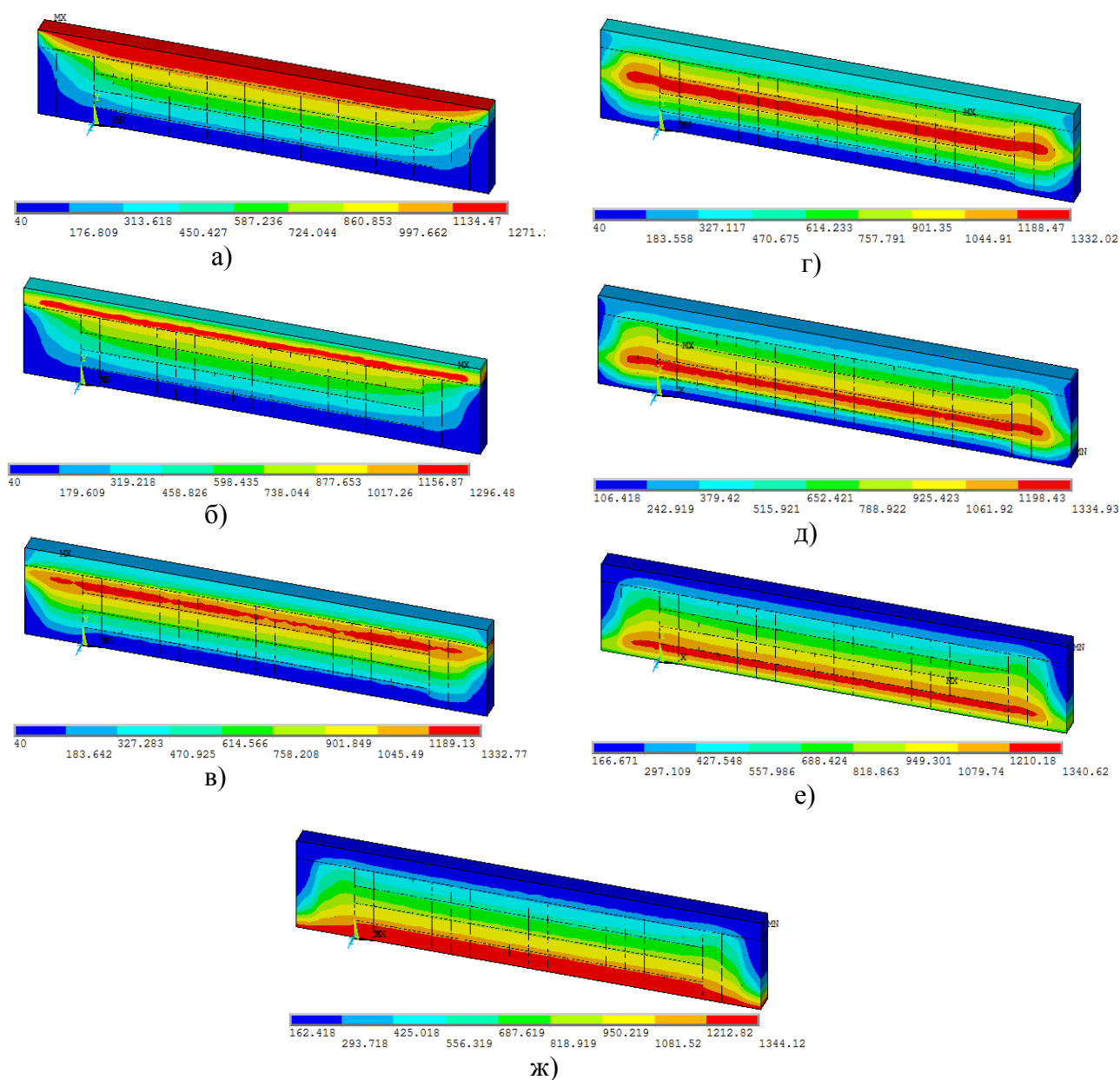


Рис.3.28. Расчетное значение максимальной температуры зоны горения по горизонтам: а – горизонт 1, б – горизонт 2, в – горизонт 3, г – горизонт 4, д – горизонт 5, е – горизонт 6, ж – горизонт 7.

Из полученных результатов видно, что по горизонтам слоя удалось достичь постоянства максимальной температуры в диапазоне 1270-1340°C, что позволит исключить переоплавление нижних и недопек верхних слоев спекаемой шихты, и тем самым повысить выход годного. Получив требуемое распределение температур по горизонтам, и зная мощность внутренних источников в каждом элементарном объеме слоя, в обратном порядке решалась задача по определению оптимального распределения топлива по высоте и ширине паллеты, с учетом тепловых эффектов и аккумуляции тепла в спеке.

Так как мощность внутренних источников энергии при моделировании задается в кВт, найдем количество теплоты, выделяемой в элементарном объеме слоя. Для этого необходимо установить время, в течении которого в указанном объеме происходит горение частицы топлива. Учитывая, что время горения частицы зависит от ее размера, проведено исследование по установлению среднего диаметра частиц топлива, подаваемого в спекательное отделение для условий МК «Запорожсталь», табл. 3.9.

Для определения времени горения частицы коксовой мелочи известного размера, использованы представленные выше результаты исследований Карабасова Ю.С., которые позволили установить время выгорания зерен коксовой мелочи для условий аглофабрики предприятия в диапазоне 48-52 с.

Учитывая, что достижение необходимой температуры зоны горения в каждом элементарном слое происходит не только за счет тепла выделяющегося при горении твердого топлива, но и благодаря экзотермическим реакциям и аккумуляции тепла вышележащими горизонтами, было установлено, на базе результатов полученных в [188], процентное соотношение теплоты вносимой каждой составляющей в общий приход тепла в рассматриваемый единичный объем по высоте слоя шихты.

Таблица 3.9.

**Фракционный состав топлива для условий МК «Запорожсталь».**

	Фракции, мм							
	+10	10-8	8-5	5-3	3-1	1-0,5	-0,5	
№ пробы	Коксик до дробления, %							dcp, мм
1	15	12	20	16	17	13	7	5,3585
2	37,47	5,71	8,71	7,86	10	10,49	19,74	6,268045
3	14,13	11,65	18,44	14,05	14,38	11,13	16,25	4,994775
4	53,64	4,96	7,87	7	8,75	10,2	7,58	7,98399
5	30,06	8,58	13,76	11,22	12,53	11,21	12,64	6,151295
6	19,07	3,76	6,35	4,47	3,83	1,26	6,35	3,3458
								<b>5,683734</b>
№ пробы	Коксик после дробления, %							dcp, мм
1	0	0,3	6	28	30	22	13,7	2,4831
2	0	0	6,18	20,23	20,58	16,08	36,93	1,95504
3	9,92	9,39	16,06	12,7	12,8	10,38	28,7	2,07101
4	1,52	2,32	16,97	20,14	18,2	15,38	25,46	2,95628
5	2,86	3	11,3	20,27	20,4	15,96	26,2	2,86615
6	4,76	4,38	6,03	6,25	7,18	4,76	9,63	1,84679
								<b>2,363062</b>

Установлено, что суммарная теплота экзотермических реакций, горения серы, шлакообразования, теплота вносимая воздухом не превышает 7-8% от общего количества теплоты поступающей в единичный объем. Теплота, вносимая шихтой, учитывая коэффициент аккумуляции тепловой энергии  $\vartheta = (0,01 \div 0,5)$  [188], изменяется в широком диапазоне по высоте слоя. Результаты вычисления количества теплоты выделяющейся в каждом горизонте слоя за счет горения твердого топлива  $q_c$  и аккумуляции тепла шихтой  $q_{ш}$ , при использовании вибрационного либо барабанного питателя для загрузки шихты, представлены на рис. 3.29.



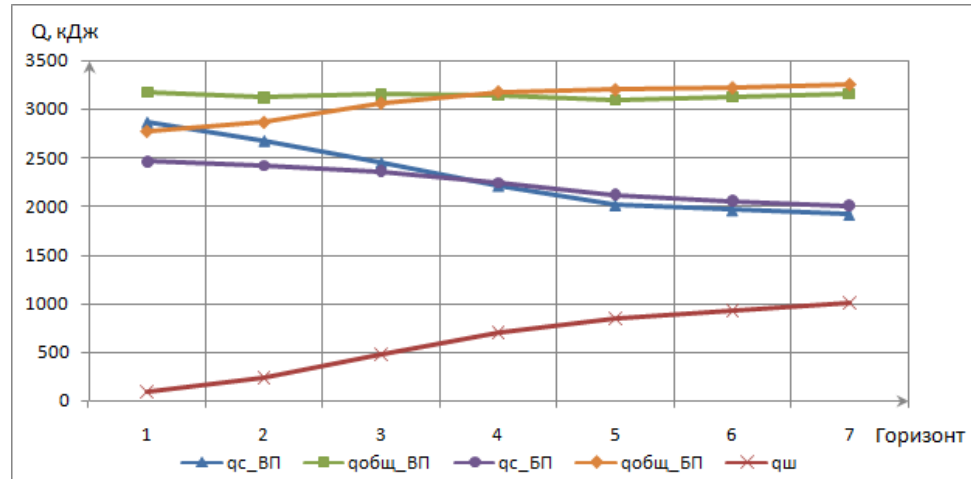


Рис. 3.29. Количество теплоты поступающей в каждый горизонт слоя

Для нахождения содержания твердого топлива в каждом из расчетных элементарных объемов предложена формула:

$$c_{ш} = \frac{q_c}{a_{co}q_{co} + a_{co2}q_{co2}}, \quad (3.32)$$

где:  $c_{ш}$  - содержание твердого топлива в шихте, кг;  $a_{co}, a_{co2}$  - доля углерода сгорающего до  $CO$  и  $CO_2$ , доли;  $q_{co}, q_{co2}$  - теплота сгорания углерода до  $CO$  и  $CO_2$  соответственно, кДж/кг.

Процентное содержание углерода по высоте и ширине слоя определим из формулы:

$$c_{\%} = \frac{c_{ш} \cdot 100\%}{V \rho_{ш} (1 - \varepsilon)}, \quad (3.33)$$

где:  $V$  - объем элементарного объема (конечного элемента),  $m^3$ ;  $\rho_{ш}$  - плотность шихты,  $kg/m^3$ ;  $\varepsilon$  - порозность слоя, %.

Таким образом, оптимальное распределение твердого топлива по высоте и ширине паллеты, обеспечивающее стабилизацию максимальной температуры в зоне горения, представлено на рис. 3.30.

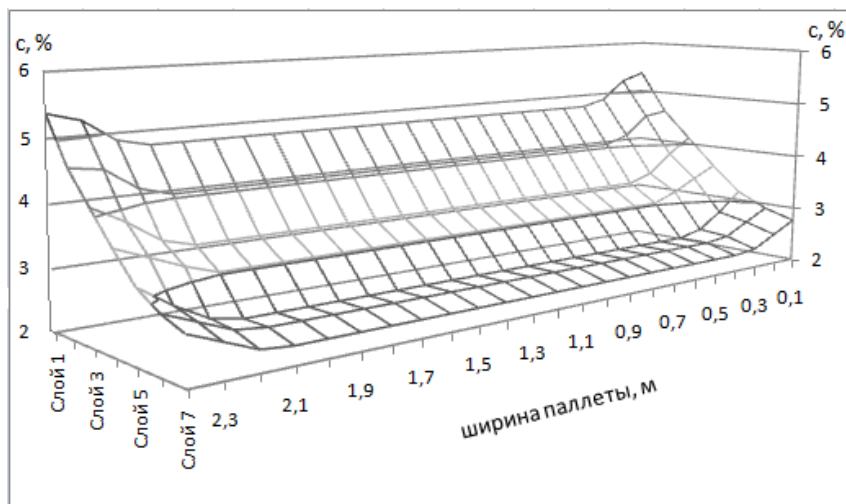


Рис. 3.30. Оптимальное распределение твердого топлива по высоте и ширине паллеты.

Суммарное содержание топлива в шихте по результатам расчетов составило 3,29% по сравнению с 3,6-3,8% используемыми в настоящий момент на аглофабрике МК «Запорожсталь». Существующее на комбинате и оптимальное распределение топлива по горизонтам слоя при использовании различных типов питателей представлено на рис. 3.31.

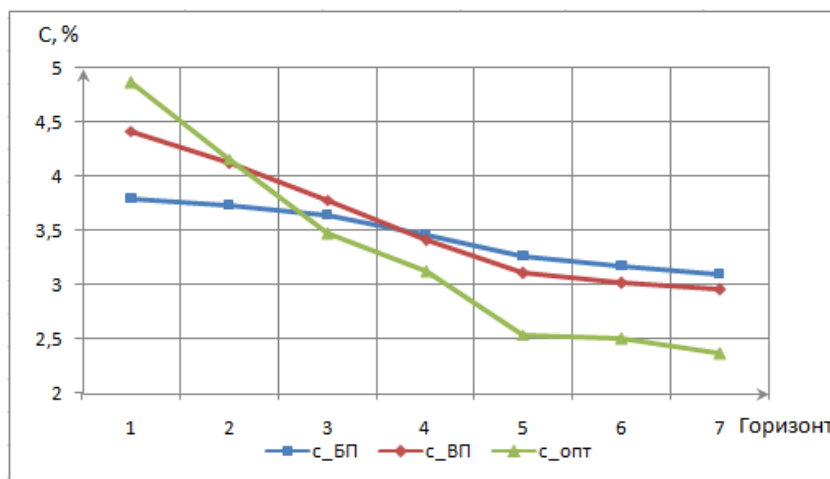


Рис. 3.31. Существующее и оптимальное распределение топлива по горизонтам.

Исходя из кривых, представленных на рис. 3.31. видно, что применение загрузочного устройства с вибрационным питателем ВП обеспечивает наиболее близкое к оптимальному распределение топлива по слоям.

Зная необходимое распределение топлива, можно рассчитать требуемое распределение грансостава частиц шихты по высоте паллеты. Путем обратного преобразования функциональной зависимости - концентрации топлива от гранулометрического состава шихты  $C = f(d_{cp})$ , полученной в [182], выведена зависимость, позволяющая с достаточной точностью определить требуемый грансостав частиц шихты по высоте слоя:

$$d_{cp} = -1,419 \cdot C^{1.563} + 17,41, \quad (3.34)$$

где:  $d_{cp}$  - средний диаметр частиц фракции, мм.

Расчетное значение требуемого гранулометрического состава по горизонтам представлено на рис. 3.32.

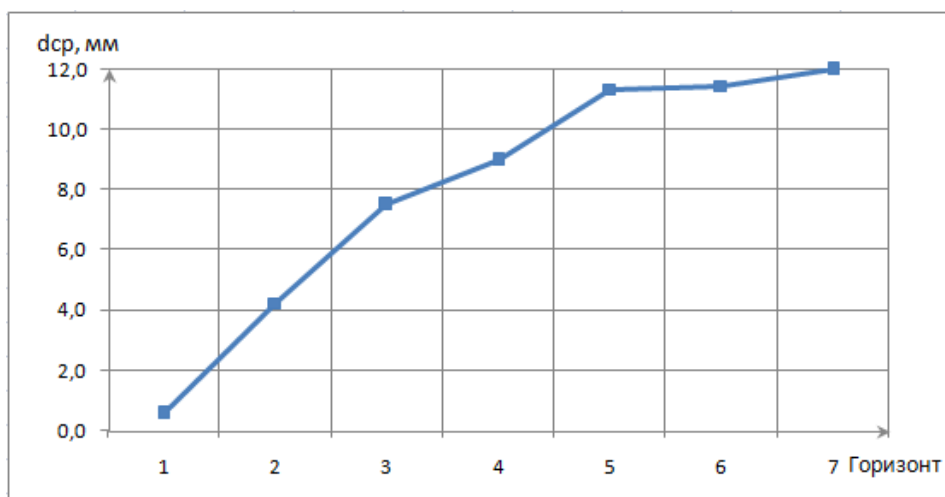


Рис. 3.32. Расчетное значение требуемого гранулометрического состава шихты по горизонтам слоя

Полученная зависимость требуемого распределения гранулометрического состава шихтовых материалов по высоте слоя,

позволяет приблизиться к вопросу управления сегрегацией классов крупности агломерационной шихты на аглоленте, при различных условиях загрузки, с целью обеспечения необходимого распределения топлива, и как следствие, выравнивая температур по горизонтам слоя.

### 3.6. Определение сегрегации фракций шихты, требуемой для стабилизации теплового режима спекания

Исследование теплового режима процесса спекания агломерируемого материала на математической модели теплового режима агломерации, позволило установить оптимальное распределение твердого топлива и рассчитать необходимое изменение среднего диаметра частиц шихты по высоте паллеты. Однако, полученное значение среднего диаметра частиц материала на указанном горизонте, может соответствовать различным комбинациям концентраций отдельных фракций, составляющих сыпучую массу загружаемой шихты.

Оценка фракционного состава шихты осуществляется с помощью ситового анализа и является процессом крайне затруднительным и растянутым во времени. Последнее исключает возможность в динамике идентифицировать фракционный состав материала, загруженного на паллеты агломашины.

В настоящий момент существует большое количество работ, посвященных вопросу определения крупности и фракционного состава материалов. В работах [205–207] масса сыпучего материала представлена как совокупность частиц, близких к сферической форме, движущихся по поверхности загрузочного лотка и откоосу слоя под действием гравитационных сил. Согласно приведенной схеме загрузки шихты на

паллеты, происходит ее разделение по фракциям, в результате концентрации мелких частиц в верхних горизонтах и скатыванию крупных фракций к основанию слоя. Авторами приведены зависимости, характеризующие распределение частиц сыпучего материала по высоте формирующегося слоя при их свободном качении.

Модели разделения полидисперсного материала, построенные на основе распределения Вейбула [208, 209], позволяют оценивать изменение среднего диаметра по откосу слоя материала при известном его составе. Неоднозначность связи среднего диаметра частиц материала с его фракционным составом, необходимость экспериментального определения ряда коэффициентов, затрудняет использование приведенных моделей для реальных условий производства.

Численную оценку сегрегации аглошихты по высоте слоя при известном распределении фракций можно реализовать с помощью коэффициента сегрегации [210–212]. Предложенный в работах показатель сегрегации полидисперсного материала по высоте слоя не отражает физических основ механизма его формирования, и не может быть использован для моделирования процесса.

Представленные в работах [213, 214] решения, позволяют контролировать гранулометрический состав материала в потоке шихты и не дают возможности анализа распределения фракций по высоте слоя после загрузки материала. Таким образом, разработка методики, позволяющей в динамике рассчитывать фракционный состав горизонтов слоя, является актуальной научной задачей.

Учитывая, что в производственных условиях обычно контролируют средний диаметр частиц сыпучего материала, а общее содержание материала и средний диаметр частиц каждой фракции известен, можно решить задачу идентификации фракционного состава полидисперсной шихты по результатам измерения среднего диаметра частиц, составляющих ее массу.

Описание фракционного состава полидисперсного материала представим в виде системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \Phi_4 + \Phi_5 &= \Phi_\Sigma \\ d_1\Phi_1 + d_2\Phi_2 + d_3\Phi_3 + d_4\Phi_4 + d_5\Phi_5 &= d_{cp}\Phi_\Sigma \end{aligned} \right\}, \quad (3.35)$$

где:  $\Phi_i$  - содержание  $i$ -й фракции в материале, %;  $\Phi_\Sigma$  - общее содержание материала, %;  $d_i$  - средний диаметр частиц  $i$ -й фракции, мм;  $d_{cp}$  - средний диаметр частиц материала, мм.

Для решения (3.35) осуществим переход к системе уравнений с двумя неизвестными, путем группировки фракций:

$$\Phi_{25} = \Phi_2 + \Phi_3 + \Phi_4 + \Phi_5. \quad (3.36)$$

Таким образом,  $d_{cp}$  группы частиц фракции  $\Phi_{25}$  равен:

$$d_{25} = \frac{d_2\Phi_2 + d_3\Phi_3 + d_4\Phi_4 + d_5\Phi_5}{\Phi_2 + \Phi_3 + \Phi_4 + \Phi_5}. \quad (3.37)$$

В результате система (3.35) примет вид:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_1 + \Phi_{25} &= \Phi_\Sigma \\ d_1\Phi_1 + d_{25}\Phi_{25} &= d_{cp}\Phi_\Sigma \end{aligned} \right\}. \quad (3.38)$$

Решим эту систему относительно  $\Phi_1$ :

$$\Phi_1 = \Phi_\Sigma \frac{d_{cp} - d_{25}}{d_1 - d_{25}}. \quad (3.39)$$

Определив содержание  $\Phi_1$  в материале, найдем значение  $\Phi_2$ , путем осуществления замены:

$$\Phi_{35} = \Phi_3 + \Phi_4 + \Phi_5. \quad (3.40)$$

Средний диаметр группы частиц фракций  $\Phi_{35}$  равен:

$$d_{35} = \frac{d_3\Phi_3 + d_4\Phi_4 + d_5\Phi_5}{\Phi_3 + \Phi_4 + \Phi_5}. \quad (3.41)$$

Система уравнений (3.35) примет вид:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_{35} &= \Phi_{\Sigma} \\ d_1\Phi_1 + d_2\Phi_2 + d_{35}\Phi_{35} &= d_{cp}\Phi_{\Sigma} \end{aligned} \right\}, \quad (3.42)$$

отсюда  $\Phi_2$  будет равно:

$$\Phi_2 = \frac{\Phi_{\Sigma}(d_{cp} - d_{35}) - \Phi_1(d_1 - d_{35})}{d_2 - d_{35}}. \quad (3.43)$$

Зная содержание фракций  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , аналогично найдем значения  $\Phi_3$ ,  $\Phi_4$ :

$$\Phi_3 = \frac{\Phi_{\Sigma}(d_{cp} - d_{45}) - \Phi_1(d_1 - d_{45}) - \Phi_2(d_2 - d_{45})}{d_3 - d_{45}}, \quad (3.44)$$

$$\Phi_4 = \frac{\Phi_{\Sigma}(d_{cp} - d_5) - \Phi_1(d_1 - d_5) - \Phi_2(d_2 - d_5) - \Phi_3(d_3 - d_5)}{d_4 - d_5}. \quad (3.45)$$

Содержание фракции  $\Phi_5$  составит:

$$\Phi_5 = \Phi_\Sigma - \sum_{i=1}^n \Phi_i. \quad (3.46)$$

При числе фракций  $n$  содержание искомой фракции  $i \in [1, n-1]$  может быть получено из выражения:

$$\Phi_i = \frac{\Phi_\Sigma (d_{cp} - d_{(i+1)n}) - \sum_{m=1}^{i-1} \Phi_m (d_1 - d_{35})}{d_i - d_{(i+1)n}}. \quad (3.47)$$

Разработанная методика позволяет рассчитать фракционный состав полидисперсной шихты при наличии информации об общем количестве материала, среднем диаметре частиц фракций, среднем диаметре частиц всех фракций и среднем диаметре групп фракций.

Определение средних диаметров групп фракций обуславливает необходимость наличия информации о закономерностях распределения сыпучего материала по размерам составляющих его частиц. В результате анализа работ [209, 211, 212] установлено, что не существует общих закономерностей данного распределения, т.е. для каждого конкретного предприятия эта закономерность будет индивидуальной и определяться свойствами сыпучих материалов, условиями их подготовки и загрузки на паллеты.

Тем не менее, следует отметить, что закономерности распределения сыпучих материалов по фракциям для конкретного производства достаточно стабильны.

Для определения средних диаметров групп фракций используем коэффициент  $D_{ij}$ , характеризующий распределение среднего диаметра группы фракций по высоте загружаемого слоя.



$$D_{ij} = \frac{d_{ij} - d_i}{d_j - d_i}, \quad (3.48)$$

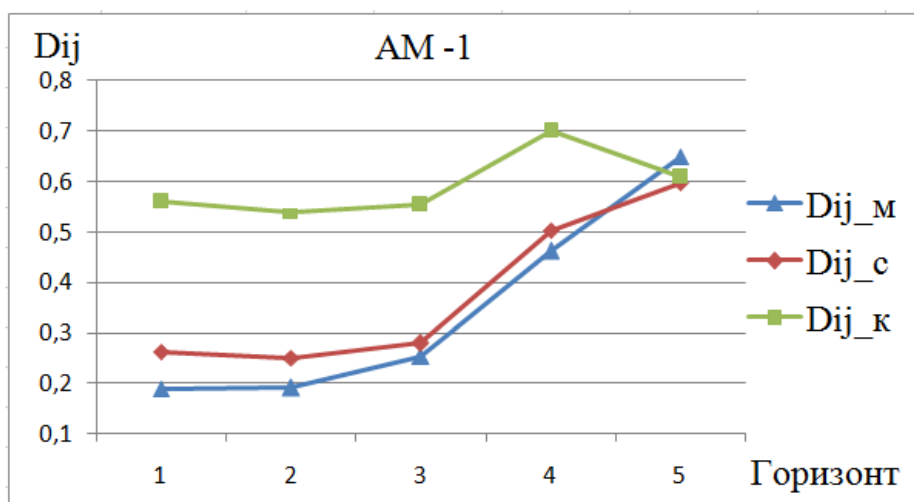
где:  $d_{ij}$  - средний диаметр группы фракций, мм;  $d_i$  - средний диаметр фракции  $\Phi_{i-1}$ , мм;  $d_j$  - средний диаметр самой крупной фракции сыпучего материала, мм.

Диапазон возможных значений  $D_{ij}$  в общем случае будет составлять  $D_{ij} \in [0;1]$ . Значение среднего диаметра групп фракций  $d_{ij}$ , находящегося в диапазоне  $d_i \leq d_{ij} \leq d_j$  при известном  $D_{ij}$  можно рассчитать по формуле:

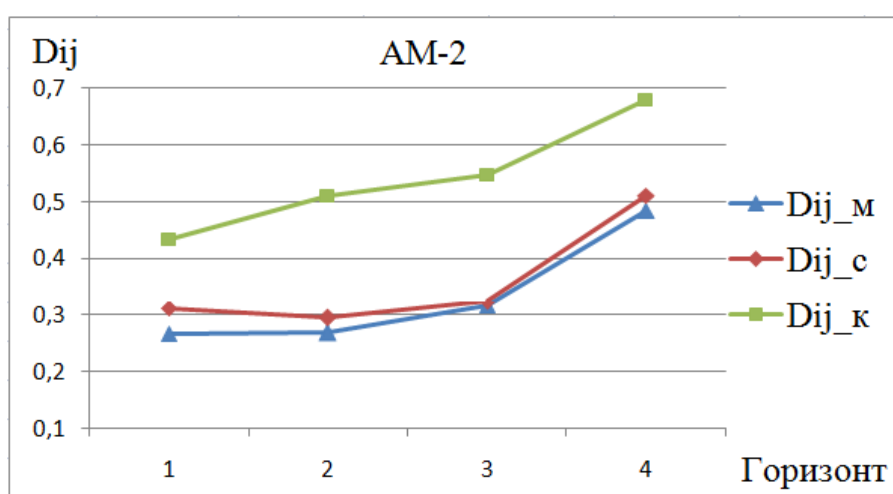
$$d_{ij} = d_i + D_{ij}(d_j - d_i) \quad . \quad (3.49)$$

С целью определения коэффициента  $D_{ij}$  по высоте загружаемого материала, проведен анализ фракционного состава агломерационной шихты для условий аглофабрики МК «Запорожсталь». Произведены три серии отбора проб по трем зонам аглоленты, ее левой, центральной и правой частям, для агломашин №1, 2, 4.

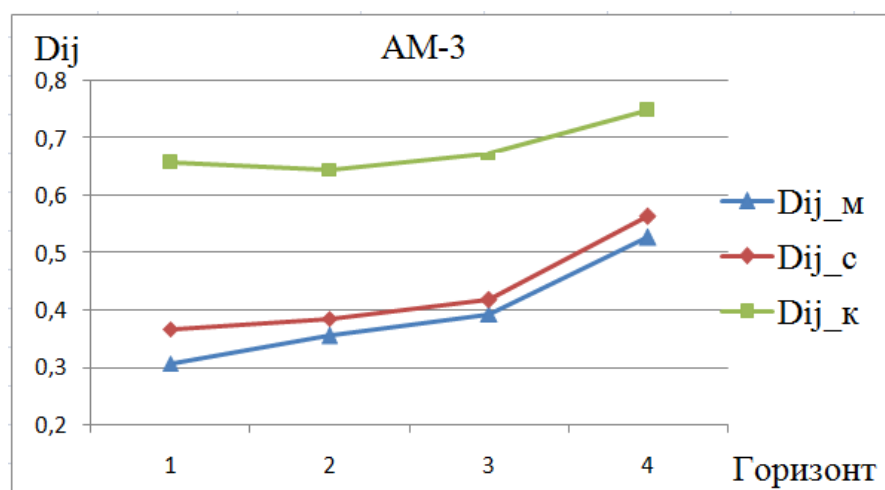
Зная средний диаметр частиц каждой из фракций, и рассчитав по результатам рассева средний диаметр групп фракций, получены значения коэффициента  $D_{ij}$  для мелких  $\Phi(-3)$ , средних  $\Phi(3-5, 5-8)$  и крупных  $\Phi(8-10, +10)$ , мм фракций  $D_{ij\_м}$ ,  $D_{ij\_с}$ ,  $D_{ij\_к}$  соответственно. Зависимости, характеризующие изменение коэффициента  $D_{ij}$  по горизонтам загружаемого материала, для агломашин №1, 2, 4 представлены на рис. 3.33, а, б, в.



а)



б)



в)

Рис. 3.33. Изменение коэффициента  $D_{ij}$  по горизонтам загружаемого материала:  
 а - агломашина №1 б - агломашина №2; в - агломашина №4 МК «Запорожсталь»

Таким образом, зная средние диаметры частиц  $i$ -х фракций  $d_i$ , и суммарное содержание материала  $\Phi_{\Sigma}$ , получив изменение коэффициента характеризующего распределение среднего диаметра групп фракций по высоте слоя, можно рассчитать фракционный состав подготовленной к спеканию шихты. Некоторые результаты расчетов содержания фракций для условий комбината «Запорожсталь» приведены в табл. 3.10-3.12.

Таблица 3.10.

**Фракционный состав шихты правая сторона агломашины №1**

АМ1 правая ст.	Фракция, мм				
	Ф1(-3)	Ф2(3-5)	Ф3(8-5)	Ф4(10-8)	Ф5(+10)
Горизонт/di, мм	2	4	6,5	9	12
	Эксперимент, %				
1	62,685	21,26	9,86	2,9285	3,2675
2	60,145	24,275	8,9875	2,865	3,7275
3	52,35	25,32	14,195	3,15	4,985
4	36,255	20,665	18,97	7,46	16,65
5	15,28	7,24	19,085	24,32	34,03
	Расчет, %				
1	60,05884	24,66281	10,01354	2,323867	2,940949
2	58,35819	25,37161	10,83674	2,506465	2,926993
3	53,67374	23,07059	14,68907	3,83018	4,736426
4	39,32153	18,07964	17,02247	7,703025	17,87334
5	15,08308	8,552701	18,41945	22,75435	35,19042
F табл.	F расч.				
230,2	54,80566	6,03221	8,76728	74,01165	143,625

Адекватность предложенной методики для расчета фракционного состава материала проверена с использованием критерия Фишера для проверки гипотезы об адекватности моделей (F-критерий). Значения табличного и расчетного критерия Фишера представлены в табл. 3.10–3.12 и свидетельствуют о хорошей сходимости результатов рассеивов и расчетов фракционного состава шихты.

Таблица 3.11.

**Фракционный состав шихты середина агломашины №2**

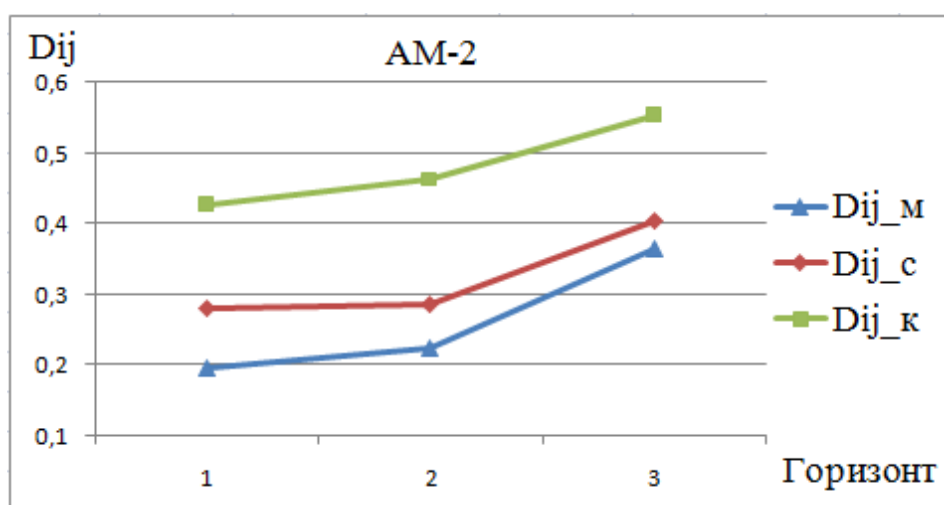
	Фракция, мм				
АМ2 середина	Ф1(-3)	Ф2(3-5)	Ф3(8-5)	Ф4(10-8)	Ф5(+10)
Горизонт/di, мм	2	4	6,5	9	12
	Эксперимент, %				
1	45,59485	27,19757	11,76706	12,69376	2,746758
2	41,60445	32,2157	16,7411	4,542728	4,896014
3	37,69874	28,35239	20,18599	6,573114	7,18976
4	30,62667	20,27	19,68333	9,326667	20,09333
	Расчет, %				
1	45,81916	26,8099	15,03992	6,979605	5,35141
2	46,7527	25,5602	16,57352	5,437126	5,676446
3	41,51478	23,80486	19,76609	6,74957	8,164705
4	32,65539	18,23182	18,74441	9,720745	20,64763
Ф табл.	Ф расч.				
224,6	1,899458	0,842609	3,154852	0,798504	15,661

Таблица 3.12.

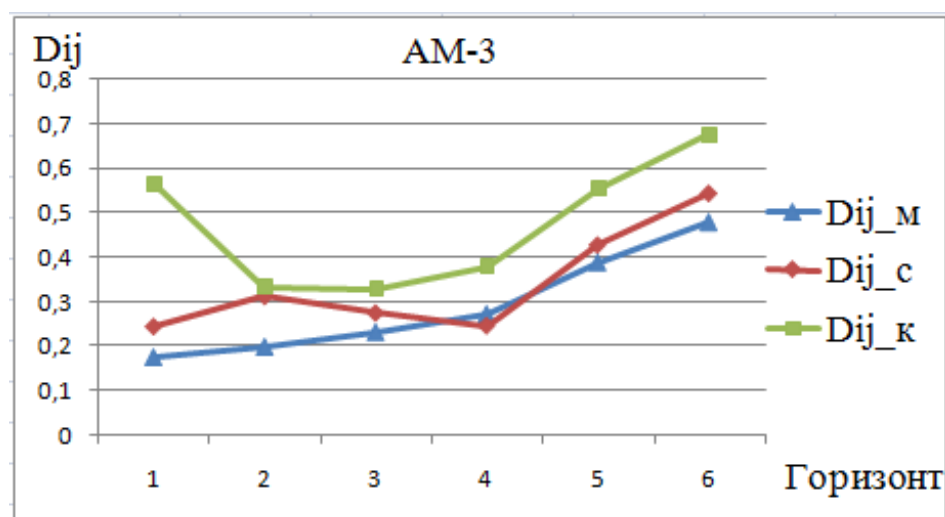
**Фракционный состав шихты левая сторона агломашины №4**

	Фракция, мм				
АМ4 левая ст.	Ф1(-3)	Ф2(3-5)	Ф3(8-5)	Ф4(10-8)	Ф5(+10)
Горизонт/di, мм	2	4	6,5	9	12
	Эксперимент, %				
1	48,7878	27,67417	15,26575	3,809778	4,462502
2	42,56525	23,64921	15,84281	5,903137	12,0396
3	38,81925	20,12134	19,87799	7,170478	14,01093
4	33,98553	18,40939	18,12606	8,179727	21,29929
	Расчет, %				
1	56,14789	20,03173	13,06583	3,689171	7,065379
2	42,13104	22,2278	18,63118	6,028922	10,98106
3	37,71782	21,54199	20,04232	6,752258	13,94561
4	37,46806	15,45068	16,34281	7,730503	23,00795
Фтабл.	Фрасч.				
224,6	1,15731	0,479312	0,670997	18,44839	8,892604

Исходя из данных лабораторных исследований фракционного состава агломерационной шихты в условиях Алчевского металлургического комбината [22], рассчитаем значения коэффициента  $D_{ij}$  и фракционный состав материала. Изменение значения коэффициента характеризующего распределение среднего диаметра групп фракций по высоте слоя  $D_{ij}$  для условий АМ 2,3, работающих на высоте слоя 0,33 и 0,35 м соответственно, представлено на рис. 3.34, а, б.



а)



б)

Рис. 3.34. Изменение коэффициента  $D_{ij}$  по горизонтам загружаемого материала:

а – агломашина № 2; б – агломашина № 3 Алчевского МК

Распределение фракционного состава шихты, полученное в лабораторных условиях путем отсева проб и расчетным путем, представлено в табл. 3.13.

Таблица 3.13.

**Фракционный состав для условий агломашины №2 Алчевского МК**

АМ -2						
Горизонт	Фракции, %					
-	Ф6(10)	Ф5(10-7)	Ф4(7-5)	Ф3(5-3)	Ф2(3-1)	Ф1(1-0)
	Эксперимент					
верх	1,4	2,4	8,4	12,6	58,6	16,8
середина	3,6	5,8	16,9	17,2	43	13,5
низ	14	11	18,8	16,4	32,7	7,1
	Расчет					
	Ф6(10)	Ф5(10-7)	Ф4(7-5)	Ф3(5-3)	Ф2(3-1)	Ф1(1-0)
верх	1,3	2,2	8,2	17,1	50,5	20,7
середина	3,6	5,3	15,5	21,3	41,1	13,2
низ	12,9	10,5	18,6	21,2	31,7	5,1

Как видно из результатов расчетов, разработанную методику идентификации фракционного состава материала можно считать универсальной, пригодной для использования в условиях аглофабрик различных предприятий.

Таким образом, на основе исследования теплового режима процесса спекания агломерата, и полученной зависимости требуемого изменения  $d_{cp}$  шихты по горизонтам [203], представленной на рис. 3.32, можно рассчитать необходимое распределение фракционного состава аглошихты, которое обеспечит равномерный тепловой режим процесса спекания. Последнее обусловлено оптимальным распределением твердого топлива и химических компонентов по высоте сыпучей массы на паллетах.

Результаты расчета требуемого распределения фракционного состава шихты подготовленной к спеканию для условий АМ №1 МК «Запорожсталь» представлено в табл. 3.14.

Таблица 3.14.

**Требуемое распределение фракционного состава шихты для условий  
АМ №1 МК «Запорожсталь»**

Горизонт	1	2	3	4	5	6	7
Φ1(-1),%	88,9958	72,2801	41,1725	16,3300	3,69352	1,39184	0,18503
Φ2(1-3),%	5,97108	15,1510	29,0470	33,3138	27,0558	15,8555	4,93589
Φ3(3-5),%	2,14718	5,41466	11,9766	17,5003	19,2465	16,8736	12,6078
Φ4(5-7),%	1,83712	4,63353	11,0750	18,4511	23,3890	22,5216	15,2250
Φ5(7-9),%	0,31494	0,71698	1,81371	3,68147	6,45329	9,97999	14,6613
Φ6(9-11),%	0,33893	0,79885	2,08706	4,36544	7,86914	12,4905	18,7995
Φ7(+11),%	0,39485	1,00480	2,82781	6,35764	12,2926	20,8867	33,5852

Процентное содержание каждой фракции по горизонтам представлено на рис. 3.35.

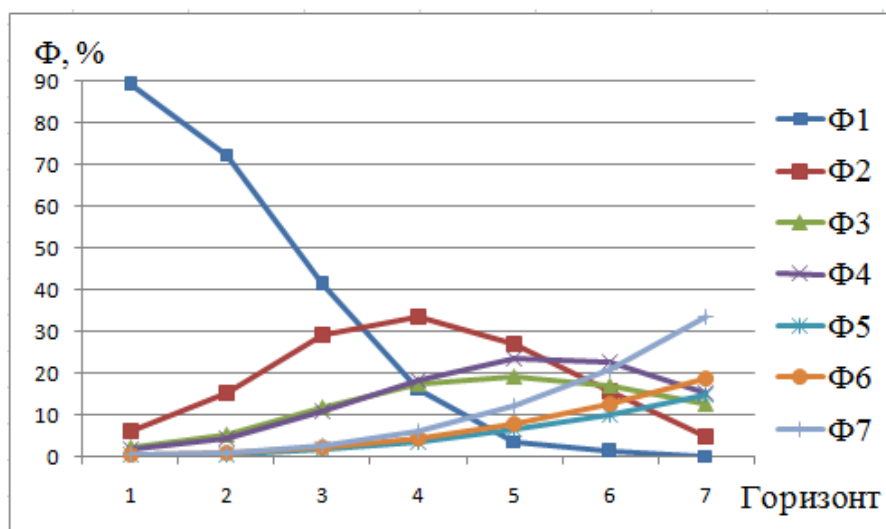


Рис. 3.35. Требуемое распределение фракционного состава шихты для условий АМ №1 МК «Запорожсталь»

Таким образом, представленная методика идентификации гранулометрического состава подготовленной к спеканию шихты [215], позволила установить зависимости необходимого распределения фракций сыпучего материала по горизонтам слоя. Полученные зависимости характеризуют требуемую сегрегацию фракций сыпучего полидисперсного материала, в результате чего, в верхней части слоя будет сосредоточено

требуемое количество мелких фракций, являющихся основным носителем твердого топлива, тем самым устраняя недостаток тепла в этих горизонтах. В свою очередь снижение топлива в нижних слоях, за счет концентрации там крупных фракций, устранит переоплавление агломерата.

Полученные результаты создают предпосылки к выбору типа и расчету характеристик загрузочного устройства агломашины, с целью обеспечения максимально близкого к расчетному распределению фракций подготовленной к спеканию шихты.

Последнее позволит решить задачу стабилизации теплового режима спекания агломерата и повысить энергоэффективность процесса, что подтверждено результатами математического моделирования и лабораторными спеканиями на опытной установке аглофабрики МК «Запорожсталь».

### 3.7. Выводы к разделу 3

1. С целью исследования механизма разделения классов крупности полидисперсной шихты проведены эксперименты с использованием ситового анализа для условий аглофабрики комбината «Запорожсталь». На базе результатов опытов разработана методика расчета грансостава шихты, обладающая достаточной точностью для использования в системе управления процессом загрузки агломашины с целью обеспечения необходимой сегрегации шихты по высоте слоя на аглоленте.

2. Получены функциональные зависимости содержания химических компонентов от гранулометрического состава агломерационной шихты для условий комбината «Запорожсталь», что обуславливает возможность управления процессом формирования структуры слоя загружаемого на



паллеты материала, с целью обеспечения оптимального распределения топлива и физико-химических компонентов по высоте и ширине слоя.

3. На основании данных, полученных при изучении химического состава шихтовых материалов подготовленных к тепловой обработке, получены зависимости, позволяющие определить количество выделяемой и поглощаемой тепловой энергии в единичном объеме спекаемой шихты по высоте слоя от среднего диаметра частиц, в результате горения твердого топлива и протекающих в нем экзо- и эндотермических реакций.

4. Изучен механизм дробления и предложена методика расчета производительности дробилки. Проведены исследования по рационализации режимов работы четырехвалковой дробилки при измельчении коксовой мелочи и антрацитового штыба. Установлено, что природные свойства топлива существенно влияют на выход кондиционной фракции при стабильном режиме дробления. Максимальный выход кондиционной фракции при дроблении коксика обеспечивается при производительности 14 т/ч, а штыба 12 т/ч.

Исследования механизма дробления в валковом агрегате, позволили сделать вывод о необходимости изменения схемы дробления топлива с его предварительным рассевом, с целью снижения влияния истирающих нагрузок на измельчаемый материал.

Установлено влияние крупности дробленого топлива на время его выгорания, составляющее для кондиционной фракции коксика 48-52с, что обуславливает температурный режим процесса спекания шихты.

5. Проведено моделирование процесса производства офлюсованного агломерата для условий агломашины №1 МК «Запорожсталь», на базе модифицированной конечно-элементной модели, адекватность которой подтверждена соответствующим актом. Достигнуто необходимое значение максимальной температуры зоны горения в требуемом диапазоне 1270-1340°С по горизонтам спека.

6. Осуществлен переход от мощности внутренних источников энергии, к количеству теплоты выделяемой в единичном объеме слоя. Установлено процентное и количественное соотношение теплоты вносимой каждой из составляющих в общем приходе тепла, и сделан расчет оптимального содержания твердого топлива по высоте и ширине слоя с учетом аккумуляции теплоты вышележащими горизонтами агломерата.

Результаты моделирования позволили сделать вывод о возможности дальнейшего снижения содержания топлива в шихте при условии соблюдения требуемой концентрации коксовой мелочи по горизонтам, что возможно при усилении сегрегации классов крупности загружаемого материала по высоте паллеты. Получено расчетное сокращение содержания коксика в шихте с 3,6-3,8% до 3,29%, при сохранении качественных показателей процесса спекания.

7. Разработана методика, позволяющая в непрерывном режиме реального времени оценивать распределение фракционного состава шихты по горизонтам слоя подготовленной к спеканию. Проверено адекватность предложенной методики для условий аглофабрик различных предприятий.

Получено требуемое распределение фракций полидисперсной агломерационной шихты, обеспечивающее стабилизацию теплового режима процесса спекания. В результате, в верхней части слоя сосредотачивается требуемое количество мелких фракций, являющихся основным носителем твердого топлива, тем самым устраняя недостаток тепла в этих горизонтах. В свою очередь снижение топлива в нижних слоях, за счет концентрации там крупных фракций, устраняет переоплавление агломерата.

Полученные результаты создают предпосылки к выбору типа и расчету характеристик грузочного устройства агломашин, с целью обеспечения максимально близкого к расчетному распределению фракций подготовленной к спеканию шихты.

Основное содержание 3 раздела опубликовано в следующих работах: [182, 183, 184, 188, 203, 204, 215].

## РАЗДЕЛ 4

### СТАБИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ТЕРМООБРАБОТКИ СЛОЕВ БОКСИТОВОЙ ШИХТЫ И ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ

4.1. Тепловые процессы в агломерируемом слое бокситов в зависимости от сегрегации топлива и химкомпонентов по высоте

Процесс агломерации, имеющий своей целью получение окускованного продукта, возник и получил широкое распространение применительно к железным рудам. Однако, на агломерационных машинах, помимо железорудных материалов, спекаются бокситы. Полученный агломерат используется для последующего производства нормального электрокорунда электрическим способом. В Украине единственным предприятием производящим электрокорунд является Запорожский абразивный комбинат.

Основной целью агломерации бокситов, наряду с окускованием, является удаление гигроскопической и гидратной влаги, разложение карбонатов, удаление летучих и т.д. Работа электропечей на агломератах позволяет сократить расход электроэнергии и организовать рациональный технологический процесс.

Особую группу сырья, куда входят гидралгилитовые и диаспоровые бокситы, составляют материалы, содержащие значительное количество (до 30-35%) гигроскопической и гидратной влаги, которую при спекании необходимо удалить из шихты. Последнее обуславливает особенность агломерации этих материалов, что выражается в низкой удельной производительности аглоустановки и высоком, превышающим в 3-4 раза, по сравнению со спеканием железорудной шихты, расходе твердого топлива.

Рост цен на энергоносители, высокий выход мелочи при агломерации бокситов, обуславливают необходимость исследования сегрегационных и теплофизических процессов, протекающих в слое спекаемого агломерата с целью повышения его энергоэффективности.

Вопросу агломерации бокситов посвящено значительно меньше публикаций [216-218], чем окускованию железорудного сырья. Однако, подходы, направленные на повышение производительности этих процессов, схожи.

Высокий выход мелочи при грохочении спека, вызван неудовлетворительной подготовкой шихты, нарушениями при ее укладке на паллеты агломашины [22, 195, 64, 219], что влечет за собой отсутствие либо недостаточную сегрегацию материала по высоте слоя, тем самым обуславливая неравномерность температурного поля по сечению пирога. Полученный в результате недостаток в верхних и переизбыток тепла в нижних горизонтах значительно снижают производительность агломашины по годному.

Исходя из того, что сегрегация классов крупности материала существенным образом влияет на химсостав горизонтов загружаемого материала [182], и как следствие на тепловой режим процесса спекания [203], вопрос прогнозирования физико-химического состава шихты по горизонтам слоя является актуальным.

Температура зоны горения в каждом элементарном слое зависит от передачи теплоты вышележащими слоями, а так же от теплоты, выделяющейся при горении частиц твердого топлива и экзо- и эндотермических реакций в единичном объеме спекаемого материала [117]. Определение влияния фракционного и химического состава материала на количество тепловыделения единичного объема горизонта слоя, является важной научной задачей.

В спекательном отделении аглофабрики ПАО «Запорожский абразивный комбинат» загрузка шихты ведется барабанным питателем без использования отражательного листа либо загрузочных лотков. Для анализа и совершенствования процесса формирования слоя шихты с заданным распределением физико-химических компонентов проведены экспериментальные исследования по определению фракционного состава горизонтов материала, подготовленного к спеканию.

В результате проведено три серии опытов по отбору проб шихты. Забор проб производился механическим пробоотборником, высотой 300 мм, который устанавливался под поток загружаемого материала. После заполнения, пробоотборник извлекался, слой делился на участки, высотой 50 мм, которые аккуратно срезались и рассеивались на ситах. Результаты экспериментов приведены в табл. 4.1.-4.3.

Таблица 4.1.

**Фракционный состав шихты для условий ЗАК.**

Опыт - 1							
h, мм	Ф (-3)	Ф(3-5)	Ф(5-8)	Ф(8-12)	Ф(+12)	Σ, %	d <sub>cp</sub> , мм
0-50	25,8	20,1	24,3	18,1	11,7	100	6,043
50-100	23,6	18,9	26,2	17,9	13,4	100	6,278
100-150	25,1	17,6	26,3	18,2	12,8	100	6,21
150-200	19	18,1	26,8	21,4	14,7	100	6,7285
200-250	13,3	16,4	27,2	28,1	15	100	7,3085
250-300	10,7	19,3	24,3	28,4	17,3	100	7,5145

Таблица 4.2.

**Фракционный состав шихты для условий ЗАК.**

Опыт - 2							
h, мм	Ф (-3)	Ф(3-5)	Ф(5-8)	Ф(8-12)	Ф(+12)	Σ, %	d <sub>cp</sub> , мм
0-50	28,6	22,3	24,8	13,1	11,2	100	5,643
50-100	24,4	19	25,7	18,1	12,8	100	6,2065
100-150	25,2	16,9	25,8	18,4	13,7	100	6,2835
150-200	21,8	17,8	26,3	21,4	12,7	100	6,476
200-250	12,7	15,9	27	28,3	16,1	100	7,424
250-300	9,2	17,5	21,1	29,2	23,5	100,5	8,026866

Таблица 4.3.

**Фракционный состав шихты для условий ЗАК.**

Опыт - 3							
h, мм	Ф (-3)	Ф(3-5)	Ф(5-8)	Ф(8-12)	Ф(+12)	Σ, %	d <sub>cp</sub> , мм
0-50	31,2	23,8	20,3	12,8	11,9	100	5,507
50-100	27,2	22,1	23,8	15,9	11	100	5,804
100-150	25,5	17,4	26,1	18,7	12,3	100	6,1825
150-200	18,8	15,1	26	21,4	18,7	100	7,0535
200-250	11,3	12,4	28,2	27,2	20,9	100	7,831
250-300	10,7	12	20,6	32,4	24,3	100	8,257

Изменение  $d_{cp}$  шихты для действующих условий загрузки материала представлено на рис. 4.1.

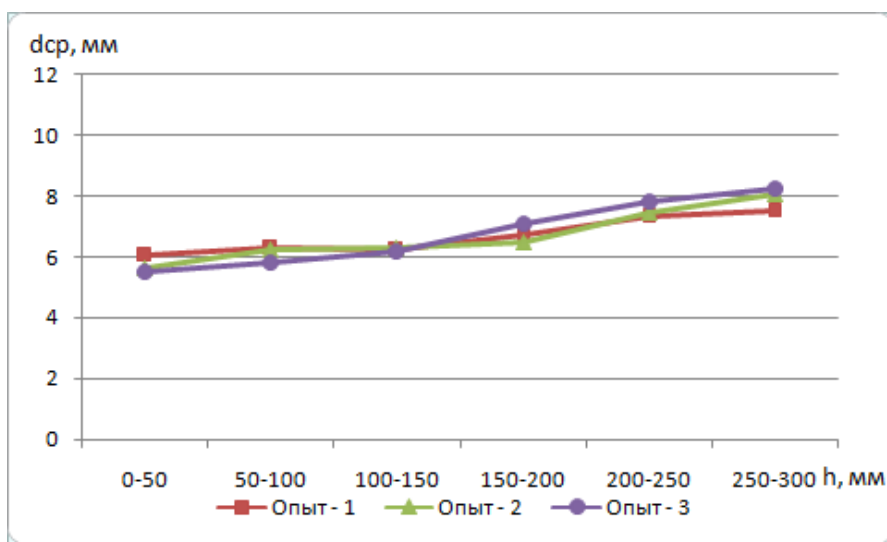


Рис. 4.1. Изменение  $d_{cp}$  шихты по высоте слоя.

Из рис. 4.1 видно, что используемый узел загрузки в виде барабанного питателя не обеспечивает необходимого [203] разделения классов крупности материала по высоте слоя. Последнее может быть причиной, существующей для данного производства, проблемы неравномерного теплового режима спекания, температура зоны горения изменяется в диапазоне 1230-1500°C для верхнего и нижнего горизонтов соответствующего слоя, таким образом перепад температур составляет  $\Delta=270^\circ\text{C}$ . Последнее является причиной высокого выхода мелочи в первом случае, а также перегрева и быстрого выхода из строя колосников спекательных тележек во втором.

Из-за отсутствия отечественных бокситов с высоким кальциевым модулем для выплавки нормального электрокорунда, применяют импортные бокситы месторождений Греции, Гвинеи, Боснии и Герцеговины, химический состав которых приведен в табл. 4.4.

Топливом для спекания бокситового агломерата в настоящее время является малозольный антрацит, гранулометрический состав которого представлен в табл. 4.5.

Таблица 4.4.

**Химический состав импортных бокситов**

Страна	Месторождение	Массовая доля. %							
		$Al_2O_3$	$SiO_2$	$Fe_2O_3$	$TiO_2$	$CaO$	п.п.п.	$M_{SiO_2}$	$M_{CaO}$
Греция	Парнас	58,1	2,9	24,25	2,55	0,3	11,9	20	194
		56,9	2,8	25,3	2,9	0,27	11,8	20,3	211
	Хеликон	56,8	3,1	25,4	2,8	0,22	11,7	18,3	258
		55,7	2,4	27,8	2,6	0,18	11,3	23,2	306
Босния и Герцеговина	Крушево	47,2	4,6	22,4	3,4	0,32	22,1	10,3	148
		45,1	5,1	23,9	2,9	0,29	22,7	8,8	156
	Власеница	53,8	3,7	28	2,6	0,11	11,8	14,5	489
		53,1	4,5	28,5	2,5	0,08	11,3	11,8	664
Гвинея	Дебеле	48,5	3,15	21,8	2,9	0,05	23,1	15,4	970
		47	2,55	23,3	2,8	0,05	24,3	18,4	940

Таблица 4.5.

**Гранулометрический состав топлива.**

Топливо	$d_{сита}$ , мм	Содержание фракции, %						$d_{ср}$ , мм	$d_{ср}$ , мм
		6-5, мм	5-3,5, мм	3,5-2, мм	2-1, мм	1-0,5, мм	0,5-0, мм		
Антрацит	6	5,5	23,9	23,9	16,7	10,8	19,2	2,2355	1,860167
	5	-	25,3	25,3	17,7	11,4	20,3	2,04625	
	3,5	-	-	33,8	23,7	15,3	27,2	1,29875	



В качестве добавок при производстве бокситового агломерата используются шлифовальные материалы электрокорунда нормального разных номеров зернистости, не имеющих сбыва и выполняющих роль обогатителя. Химический состав обогащающих добавок шихты приведен в табл. 4.6.

Таблица 4.6.

**Химический состав шлифзерна в составе добавок.**

Материал	Содержание компонента, %				
	$Al_2O_3$	$SiO_2$	$CaO$	$Fe_2O_3$	$TiO_2$
Ш.М. ЭН	93,5-94,5	0,8-1	0,6-0,8	0,5-1,2	2,8-3,2

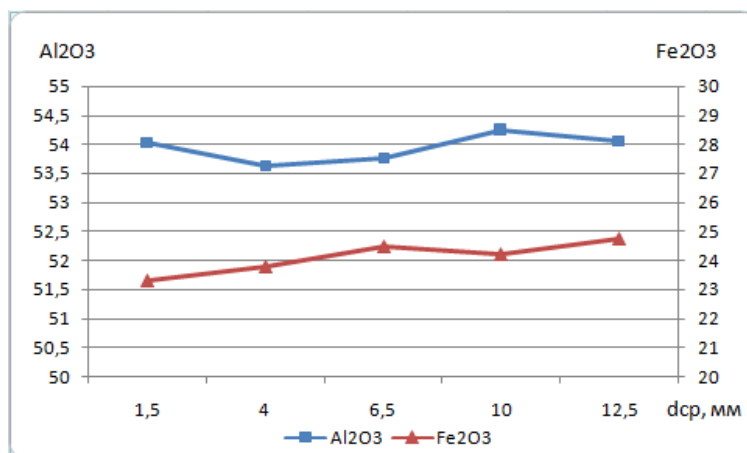
Для анализа распределения твердого топлива и химических компонентов по высоте слоя, совместно со спектральной лабораторией комбината, каждая из фракций материала исследовалась на химсостав. Результаты экспериментов сведены в табл. 4.7.

В результате обработки полученных результатов, сделан вывод, что компоненты  $Al_2O_3$  и  $CaO$  равномерно распределены во всех фракциях, концентрация  $Fe_2O_3$  и  $SiO_2$  монотонно возрастает по мере увеличения  $d_{cp}$ . Содержание  $TiO_2$  имеет минимум при  $d_{cp}=1,5$  мм, а концентрация твердого топлива уменьшается по мере роста  $d_{cp}$  гранулы. Функциональные зависимости содержания химкомпонентов в различных фракциях бокситовой шихты для условий ПАО «Запорожский абразивный комбинат» представлены на рис. 4.2.

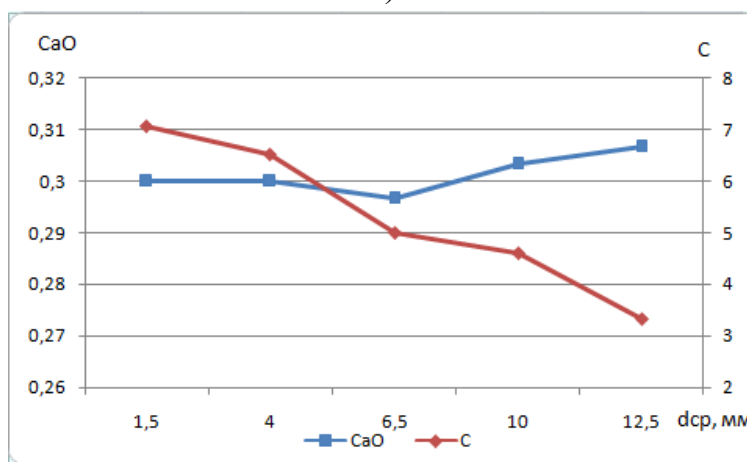
Таблица 4.7.

## Химический состав фракций бокситовой шихты

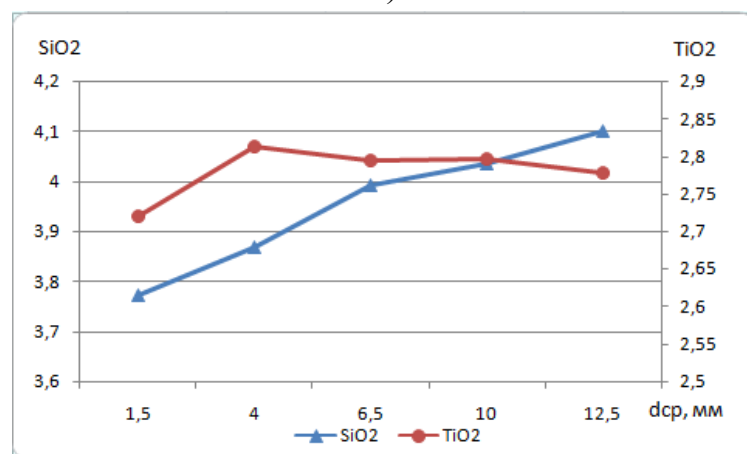
Опыт - 1									
Фракции, мм	$d_{cp}$ , мм	$Al_2O_3$	$SiO_2$	$Fe_2O_3$	$TiO_2$	$CaO$	П.П.П.	C	$\Sigma$ , %
-3	1,5	56,2	3,98	21,8	2,88	0,31	7,63	7,2	100
3-5	4	55,3	4,02	22,3	2,72	0,3	9,16	6,2	100
5-8	6,5	54,1	4,23	24,2	2,9	0,3	9,17	5,1	100
8-12	10	56,4	4,51	23,9	2,76	0,32	7,31	4,8	100
+12	12,5	55,8	4,64	25,5	2,83	0,32	7,51	3,4	100
Опыт - 2									
-3	1,5	52,1	3,64	25,1	2,68	0,3	9,08	7,1	100
3-5	4	51,8	3,86	25,7	2,9	0,3	8,84	6,6	100
5-8	6,5	52,6	4	25,5	2,8	0,3	9,9	4,9	100
8-12	10	52,8	3,94	26,1	2,88	0,31	9,37	4,6	100
+12	12,5	52,3	4,02	26,2	2,8	0,3	11,18	3,2	100
Опыт - 3									
-3	1,5	53,8	3,7	23	2,6	0,29	9,71	6,9	100
3-5	4	53,8	3,72	23,3	2,82	0,3	9,36	6,7	100
5-8	6,5	54,6	3,74	23,8	2,68	0,29	9,89	5	100
8-12	10	53,5	3,65	22,7	2,75	0,28	12,72	4,4	100
+12	12,5	54,1	3,64	22,5	2,7	0,3	13,36	3,4	100



а)



б)



в)

Рис. 4.2. – Содержание компонентов шихты в зависимости от  $d_{cp}$ : а – содержание  $Al_2O_3, Fe_2O_3$ ; б – содержание  $CaO, C$ ; в – содержание  $SiO_2, TiO_2$ .

Учитывая, что температура зоны горения слоя шихты зависит от распределения топлива и ее компонентов по высоте паллеты, поставлена

задача определения количества выделяемой и поглощаемой энергии в единичном, расчетном объеме слоя шихты в зависимости от  $d_{cp}$ .

Технологический процесс агломерации бокситов сопровождается непрерывным выделением и поглощением значительных объемов тепловой энергии. Процессы, входящие в состав приходной и расходной частей тепловой энергии, выделяющейся в элементарном объеме  $P$  спекаемого слоя, представлены на рис. 4.3.

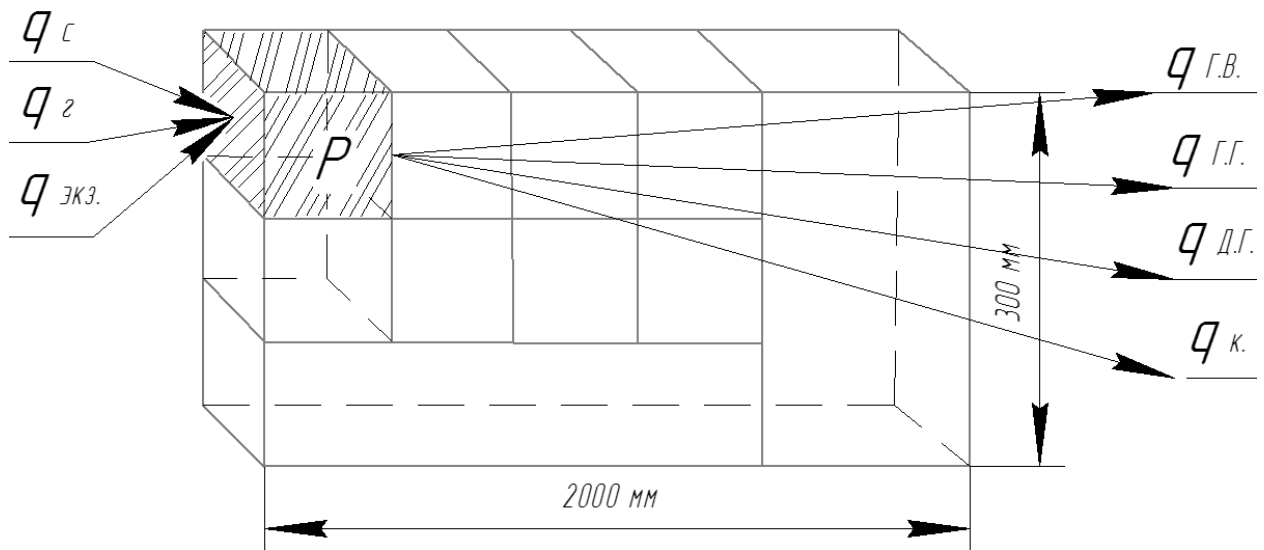


Рис. 4.3. – Элементарный расчетный объем агломерируемого слоя.

Основным источником тепловой энергии выделяемой в элементарном объеме, является теплота сгорания твердого топлива. Пользуясь формулой, представленной в [188], определим количество теплоты, выделяющейся в результате горения коксовой мелочи:

$$q_c = V \rho_{ш} (a_{co} c_m q_{co} + a_{co2} c_m q_{co2}) (1 - \varepsilon), \quad (4.1)$$

где:  $V$  – объем расчетного элемента,  $m^3$ ;  $\rho_{ш}$  – плотность шихты,  $kg/m^3$ ;  $a_{co}, a_{co2}$  – доля углерода, сгорающего до  $CO$  и  $CO_2$ , %;  $c_m$  – концентрация углерода

в шихте, %;  $q_{co}, q_{co2}$  – теплота сгорания углерода до  $CO$  и  $CO_2$  соответственно 9210 кДж/кг, 32815 кДж/кг;  $\varepsilon$  – порозность слоя, %.

Теплоту экзотермических реакций образования двухкальциевого силиката и оксида титана в расчетном объеме агломерируемого материала рассчитаем по уравнению:

$$q_{эжз} = a_{к.с} \Delta H_{к.с} + a_{о.т.} \Delta H_{о.т.}, \quad (4.2)$$

где:  $a_{к.с}, a_{о.т.}$  - содержание двухкальциевого силиката и оксида титана, кг;  $\Delta H_{к.с}, \Delta H_{о.т.}$  - теплота на разложение двухкальциевого силиката и оксида титана соответственно, кДж/кг.

Для единичных объемов, составляющих верхний горизонт спекаемого материала, необходимо учесть теплоту зажигания горном:

$$q_2 = \frac{q_{зажиг}}{S_{\Pi}}, \quad (4.3)$$

где:  $q_{зажиг}$  - количество теплоты, получаемой слоем при прохождении под зажигательным горном.

К расходным статьям, связанным с поглощением тепла из элементарного объема шихты, отнесем теплоту на испарение гигроскопической влаги:

$$q_{Г.В.} = Wc_w (t_{уcn} - t_{и}) + WQ_{уcn}, \quad (4.4)$$

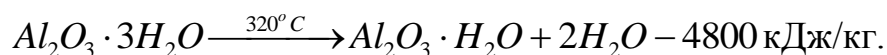
где:  $W$  – количество влаги в шихте, кг;  $c_w$  – теплоемкость воды, кДж/(кг·°C);  $t_{исп}$  – температура испарения воды, °C;  $t_{ш}$  – температура шихты, °C;  $Q_{исп}$  – теплота испарения воды (2284 кДж/кг).

Теплоту на разложение гиббсита, дегитратацию бемита и диаспора, при условии, что соотношение гидралгилитовых и диаспоровых бокситов для условий ЗАК составляет 1:2 соответственно, рассчитаем следующим образом:

$$q_{д.г.} = a_2 \Delta H_2 + a_{б.д.} \Delta H_{б.д.}, \quad (4.5)$$

где:  $a_2$ ,  $a_{б.д.}$  - содержание гиббсита и бемита с диаспором соответственно, кг;  $\Delta H_2$ ,  $\Delta H_{б.д.}$  - теплота на разложение гиббсита и бемита с диаспором, кДж/кг.

Дегитратация гиббсита проходит по реакции:



Дегитратация бемита и диаспора:



Теплота на разложение гидрогематита:

$$q_{г.г.} = a_{г.г.} \Delta H_{г.г.}. \quad (4.6)$$

В бокситах содержится определенное количество каолинита, разложение которого происходит с поглощением тепловой энергии:

$$q_{к.} = a_{к.} \Delta H_{к.}. \quad (4.7)$$

Разложение проходит по реакции:



Результаты расчетов количество теплоты, выделяющейся и поглощаемой в элементарном объеме  $P$ , за счет горения твердого топлива и химических реакций, протекающих в слое в зависимости от расположения расчетного элемента по высоте паллеты, представлены на рис. 4.4. – 4.5.

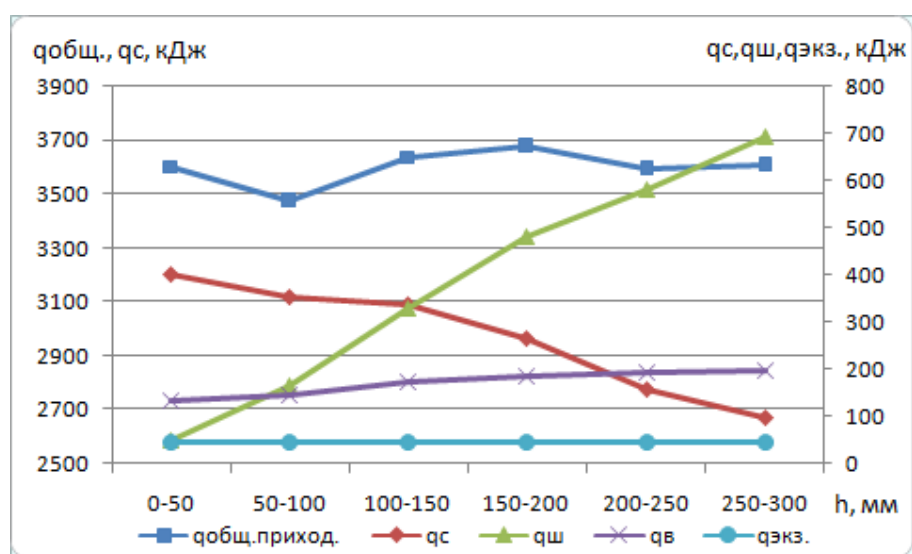
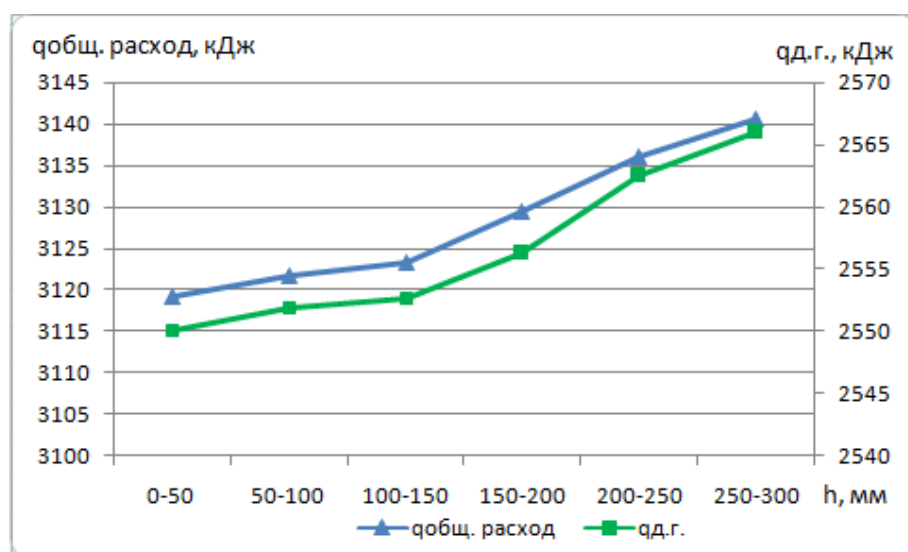
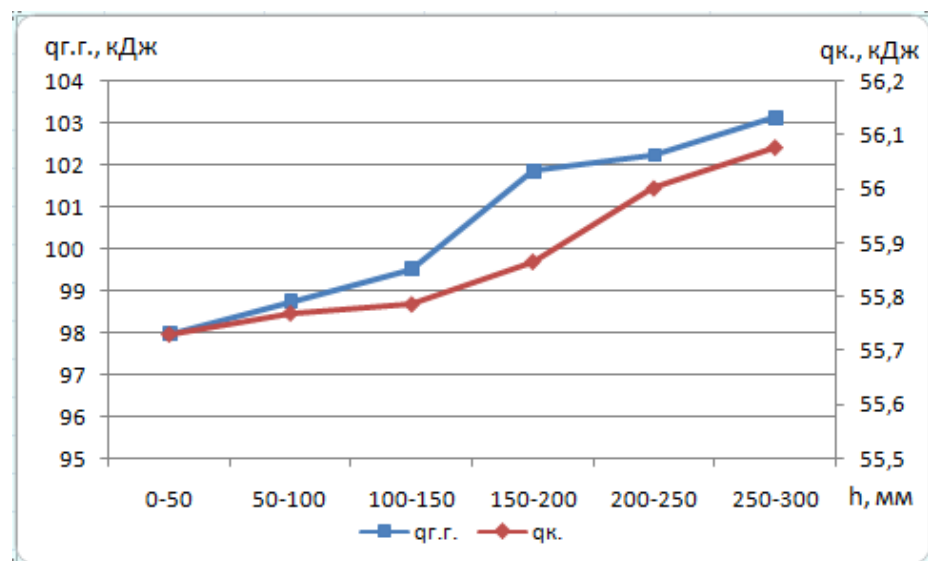


Рис. 4.4. Количество теплоты, выделяющейся в элементарном объеме  $P$  (общий приход теплоты, приход теплоты от топлива, экзотермических реакций).



а)



б)

Рис. 4.5. Количество теплоты поглощаемой в элементарном объеме  $P$ : а – общий расход теплоты, расход на дегитратацию; б – расход теплоты на разложение гидрогоematита и каолинита.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что используемая на предприятии система загрузки шихты не обеспечивает сегрегацию фракций материала по высоте слоя. Установлено, что размер частицы шихты существенно влияет на содержание топлива в грануле, как и для случая агломерации железорудного сырья. Таким образом, отсутствие сегрегации материала, подготовленного к спеканию по крупности, не обеспечивает заданное неравномерное распределение топлива по горизонтам слоя, что обуславливает появление дефицита теплоты в верхних и переизбыток в нижних слоях при спекании бокситовой шихты.

По результатам исследований установлены зависимости содержания топлива и химических компонентов шихты от  $d_{cp}$ , позволяющие рассчитать количество выделяемой и поглощаемой тепловой энергии в единичном расчетном объеме спекаемого слоя.

Полученные результаты обуславливают возможность оптимизации теплового режима процесса спекания бокситового агломерата на полученной



тепловой модели [203], учитывающей внутреннее тепловыделение в единичном объеме, а так же определения условий формирования слоя полидисперсной бокситовой шихты, с целью достижения рационального распределения твердого топлива по высоте агломерируемого слоя.

#### 4.2. Расчет оптимального распределения твердого топлива в агломерируемом слое бокситовой шихты

В настоящее время все агломерационные фабрики сталкиваются с проблемой постоянного подорожания энергоресурсов на фоне необходимости снижения либо сохранения на текущем уровне себестоимости производимой продукции. Это касается и процесса агломерации бокситов, где основным энергоносителем выступает коксовая мелочь, сокращение объемов потребления которой является крайне актуальным вопросом, с учетом сохранения качества агломерата по физико-химическим показателям.

Для повышения энергоэффективности агломерационного процесса необходимы дальнейшие исследования вопросов загрузки материала, распределения химкомпонентов и топлива по высоте паллеты, а также тепловых процессов, протекающих в слое спекаемой бокситовой шихты.

При исследовании процессов, протекающих в ходе осуществления данных операций, широко используется математическое моделирование, однако далеко не все известные модели [8,163,198-202], являются достаточно точными, адекватными и удобными для проведения исследований, направленных на оптимизацию теплового режима рассматриваемого процесса.

В третьем разделе данной диссертации представлена модель, базирующаяся на методе конечных элементов, позволяющая определить

оптимальное распределение компонентов шихты и твердого топлива по высоте и ширине паллеты агломашины, тем самым стабилизировать тепловой режим процесса спекания железорудной шихты. Приведенная модель достаточно просто может быть модифицирована для условий спекания на аглоленте с иными техническими характеристиками и технологическими особенностями.

Таким образом, для проведения исследований по моделированию теплового режима процесса агломерации бокситовой шихты с целью определения оптимального распределения твердого топлива, обуславливающего стабилизацию температуры зоны горения по высоте слоя, поставлены следующие задачи: модифицировать разработанную модель процесса спекания агломерационной шихты для условий спекания бокситов; получить математические зависимости теплофизических коэффициентов бокситовой шихты; провести моделирование процесса спекания с целью определения условий, обеспечивающих постоянство максимальной температуры зоны горения; определить оптимальное, для рассматриваемого процесса, распределение твердого топлива по высоте слоя.

Математическую модель теплового режима процесса спекания бокситовой шихты, реализуем на базе ранее полученной [203, 166], проверенной на адекватность [188], модели, основанной на методе конечных элементов (МКЭ).

Для построения расчетной области с учетом граничных условий используем схему, представленную в [166], рис.2.8. В условиях аглофабрики ПАО «Запорожский абразивный комбинат» бокситовая шихта спекается на паллетах шириной 2000 мм, с высотой слоя 250-300 мм. Таким образом, имеем вертикальный срез моделируемого слоя бокситовой шихты подготовленной к спеканию 2000x300x100 мм, который в свою очередь разбит на единичные объемы [220].

Используемое для моделирования процесса специализированное программное обеспечение ANSYS (Mechanical APDL), базирующееся на методе МКЭ, разбивает каждый из вышеуказанных единичных объемов на конечные элементы КЭ в виде тетраэдров. Решением задачи является множество узловых данных, состоящее из температуры по всему объему исследуемого слоя.

Таким образом, при использовании указанного КЭ в расчетной области, построена сетка из 428 тыс. ячеек тетраэдральной формы, рис. 4.6.

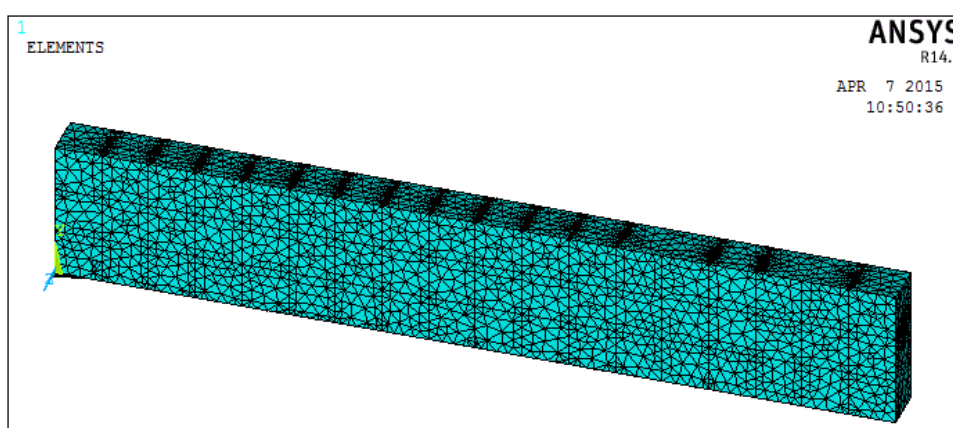


Рис.4.6. Расчетная область модели с конечно-элементной сеткой.

Для осуществления расчетов указаны свойства материала, такие как плотность, коэффициент теплопроводности, теплоемкость и т.д. Плотность бокситов, в зависимости от марки колеблется в диапазоне 1200-1600 кг/м<sup>3</sup> [162]. Коэффициент линейного расширения бокситов в интервале температур 0-1200°С составляет  $1,0 \times 10^{-5}, \text{K}^{-1}$ . Средняя теплоемкость бокситов в интервале температур 20-1000°С может быть рассчитана по следующей формуле [162]:

$$c_p(T) = 0,85 + 0,000285T - 0,00000212T^{-2}, \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}). \quad (4.14)$$

Коэффициент теплопроводности бокситов в сильной степени зависит от его плотности и влажности [162]:

$$\lambda(T) = aW^2 + b, \text{ Вт/(м}^\circ\text{С)}; \quad (4.15)$$

где  $W$  - влажность бокситов, %; значения коэффициентов  $a, b$  представлены в табл. 4.8.

Таблица 4.8.

#### Значения коэффициентов для расчета теплопроводности

Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1200	1300	1400	1500	1579
$a$ , Вт/м·К	0,0007	0,001	0,0015	0,00263	0,0037
$b$ , Вт/м·К	0,26	0,3	0,34	0,39	0,45

Граничные условия, накладываемые на расчетную область модели представляют собой Г.У. I-го и III-го рода (2.28), (2.29), рис. 2.8. Мощность внутренних источников энергии (HEAT GENERATOR), обуславливающих сгорание частиц твердого топлива и химических процессов, протекающих в слое спекаемой шихты, выбирали методом подбора (проб), с целью обеспечения постоянства максимальной температуры зоны горения, на основе исследований, проведенных в [221] и рассчитываемых по формуле:

$$q_v = \frac{Qm\varepsilon}{V\rho_o\Delta t}, \quad (4.16)$$

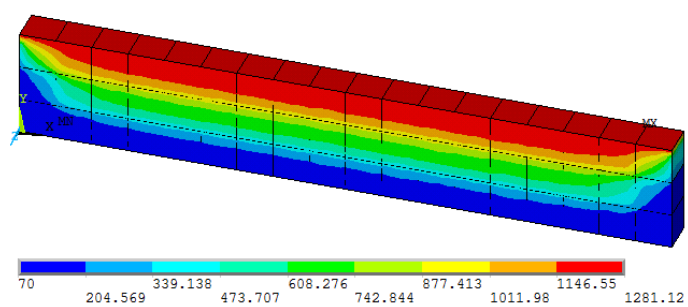
где:  $Q$  - теплота, выделяемая в элементарном объеме, определяемая из теплового баланса ячейки, кДж;  $m$  - масса единичного объема, кг;  $V$  - объем ячейки, м<sup>3</sup>;  $\rho_o$  - плотность бокситов, кг/м<sup>3</sup>;  $\Delta t$  - время спекания, с.

Результаты моделирования теплового режима спекания бокситовой шихты представлено на рис. 4.7.

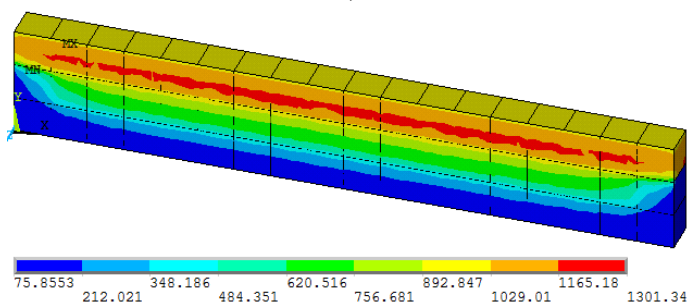
Из представленного на рис. 4.7 распределения температур видно, что по результатам моделирования удалось добиться устранения присущего для данного процесса недостатка теплоты в верхних горизонтах слоя и ее переизбытка, за счет аккумуляции регенерированной теплоты вышележащими горизонтами. Температура зоны горения в слое бокситового агломерата в производственных условиях, за счет отсутствия сегрегации шихты и, как следствие, равномерного распределения твердого топлива, достигала 1450-1500°C. Последнее неприемлемо в связи с переоплавлением нижних горизонтов шихты и преждевременным разрушением колосников агломерационной машины.

Результаты моделирования свидетельствуют о стабилизации температуры зоны горения в диапазоне 1290-1380°C, что призвано исключить переоплавление нижних горизонтов и недопек верхних слоев спекаемой бокситовой шихты, и тем самым повысить выход годного. Проведенные исследования позволили установить неравномерный характер распределения задаваемой мощности, выделяемой в единичном объеме, как по ширине, так и по высоте пирога, имеющий существенное увеличение в прибортовых зонах и постепенное снижение от верхних к нижним горизонтам спека. Последнее свидетельствует о значительных потерях теплоты через стенки паллеты и с уходящими газами через неплотности и повышенную порозность слоя шихты в первом случае, и о существенном уровне аккумуляции тепловой энергии во втором.

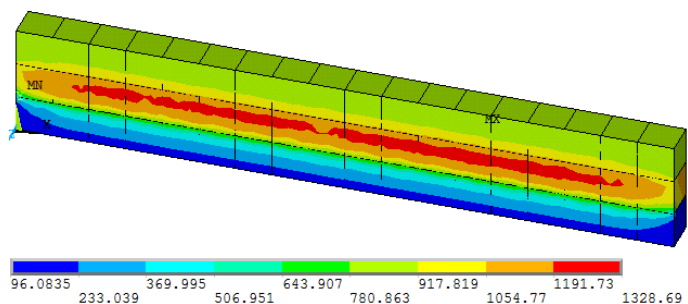
Таким образом, получив требуемое распределение температур по горизонтам и зная мощность внутренних источников в каждом элементарном объеме слоя, решена задача по определению оптимального распределения топлива по высоте и ширине паллеты, с учетом тепловых эффектов и аккумуляции теплоты в спеке.



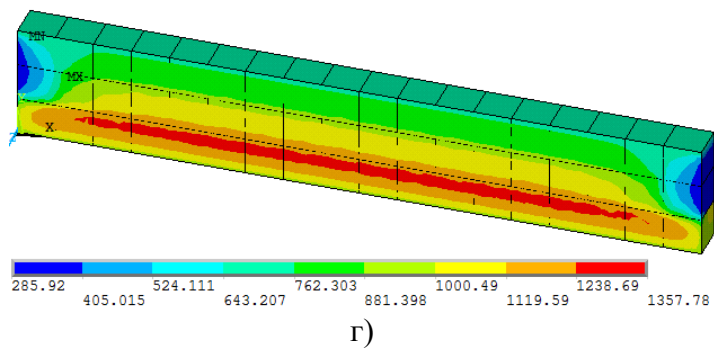
а)



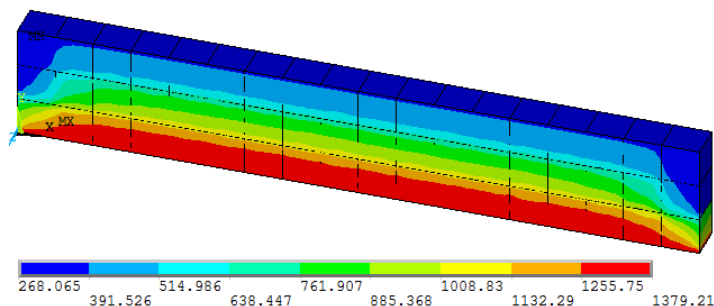
б)



в)



г)



д)

Рис. 4.7. Распределение температур в слое спекаемой шихты; а – горизонт 1, б – горизонт 2, в – горизонт 3, г – горизонт 4, д – горизонт 5.

Учитывая, что мощность внутренних источников энергии задается в кВт, для нахождения количество теплоты, выделяемой в элементарном объеме слоя, необходимо установить время, в течение которого в указанном объеме происходит горение частицы топлива. Время горения частицы зависит от ее размера. Результаты исследований, представленные в табл. 4.5. позволили установить средний диаметр частиц топлива  $d_{cp}$ , подаваемого в спекательное отделение для условий «Запорожского абразивного комбината», который составил 1,86 мм.

Время горения частицы коксовой мелочи, согласно результатам исследований Карабасова Ю.С. [53] о влиянии размера частиц различных сортов твердого топлива на время их выгорания, и зависимости, представленной на рис. 3.25, для условий аглофабрики предприятия находится в диапазоне 42-46 с.

Достижение необходимой температуры зоны горения в каждом элементарном слое происходит не только за счет теплоты выделяющейся при горении твердого топлива, но и благодаря экзотермическим реакциям и аккумуляции теплоты вышележащими горизонтами. Таким образом, получено, на базе результатов полученных в [221], процентное соотношение теплоты вносимой каждой составляющей в общий приход теплоты в рассматриваемый единичный объем по высоте слоя шихты.

Установлено, что суммарная теплота экзотермических реакций, изменяется в широком диапазоне 7-36 % по высоте слоя. Исключив эту составляющую из общего прихода теплоты в единичный объем спекаемого слоя, определено содержание твердого топлива в каждом из расчетных объемов. Для чего использована формула:

$$c_{ш} = \frac{q_c}{a_{co}q_{co} + a_{co2}q_{co2}}, \quad (4.17)$$

где:  $c_{ш}$  - содержание твердого топлива в шихте, кг;  $a_{co}, a_{co_2}$  - доля углерода сгорающего до  $CO$  и  $CO_2$ , %;  $q_{co}, q_{co_2}$  - теплота сгорания углерода до  $CO$  и  $CO_2$  соответственно, кДж/кг.

Процентное содержание углерода по высоте и ширине слоя определим из формулы:

$$c_{\%} = \frac{c_{ш} \cdot 100\%}{V \rho_o (1 - \varepsilon)}, \quad (4.18)$$

где:  $V$  - объем элементарного объема (конечного элемента),  $m^3$ ;  $\rho_o$  - плотность бокситов,  $kg/m^3$ ;  $\varepsilon$  - порозность слоя, %.

Таким образом, оптимальное распределение твердого топлива по высоте и ширине паллеты, обеспечивающее постоянство максимальной температуры в зоне горения, представлено на рис.4.8. Суммарное содержание топлива в шихте по результатам расчетов составило 5,58%, при существующем потреблении 6-8%.

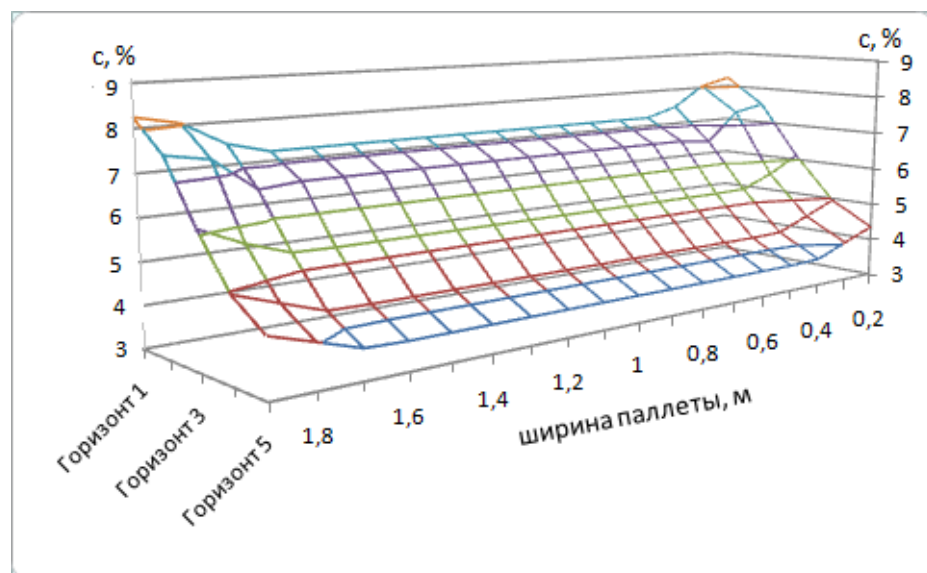


Рис. 4.8. Оптимальное распределение топлива по высоте и ширине паллеты.



Существующее на комбинате и оптимальное распределение топлива по горизонтам слоя при использовании барабанного питателя представлено на рис. 4.9.

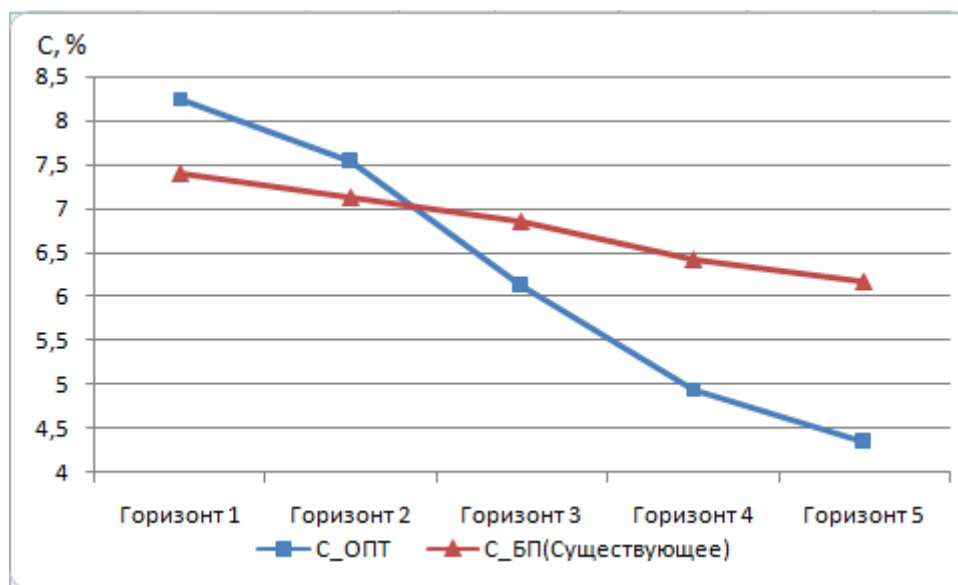


Рис. 4.9. Существующее и оптимальное распределение топлива по горизонтам.

В результате проведенных исследований, на базе тепловой модели процесса агломерации бокситовой шихты, удалось установить неравномерный характер распределения задаваемой мощности, выделяемой в единичном объеме, как по ширине, так и по высоте паллеты.

Представленные результаты характеризуют оптимальное распределение коксовой мелочи и свидетельствуют о возможности стабилизации температуры зоны горения в диапазоне 1290-1380°C, что призвано исключить переоплавление нижних горизонтов и недопек верхних слоев спекаемой шихты, и тем самым повысить выход годного.

Исходя из кривых, представленных на рис. 4.9, используемая система загрузки шихты в виде барабанного питателя, не обеспечивает требуемого распределения твердого топлива по высоте слоя, тем самым создавая предпосылки к выбору типа и расчету характеристик загрузочного устройства агломашины, с целью обеспечения максимально близкого к

расчетному распределению топлива в подготовленной к спеканию бокситовой шихте.

#### 4.3. Тепловые процессы в слое обжигаемых железорудных окатышей

К одному из способов подготовки тонких, богатых по железу концентратов для доменной плавки, помимо агломерации, можно отнести процесс производства железорудных окатышей. В настоящее время используется три типа агрегатов: шахтные печи, конвейерные машины и комбинированные установки. На сегодня агрегаты конвейерного типа, рис. 4.10, являются самыми распространенными при производстве окускованного железорудного сырья на территории Украины и стран СНГ, в связи с эффективностью и экономичностью данной схемы производства.

Производство окатышей является сложным процессом, в ходе которого последние претерпевают физико-химические превращения.

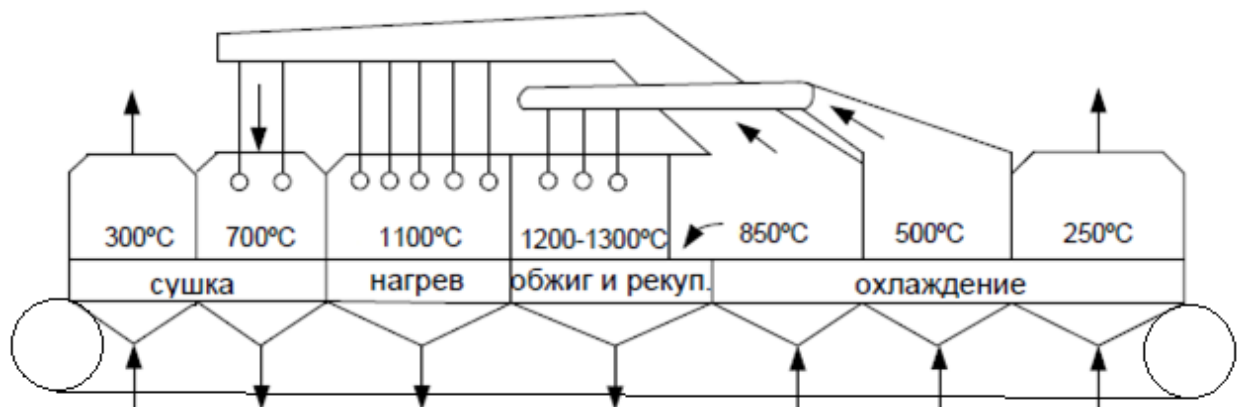


Рис. 4.10. Схема газопотоков обжиговой машины.

Термообработка окатышей происходит в несколько этапов, идущих один за другим, в широком диапазоне температур 50-1300°C, и растянута во времени 35-40 минут. Интенсивность термообработки существенным образом влияет на качество обжига материала и производительность процесса.

Современная обжиговая машина состоит из следующих зон: сушки, подогрева, обжига, рекуперации и охлаждения. Особенностью сушки окатышей, является то, что температура газа при просасывании через слой не должна превышать 400-500°C. Зачастую данная зона разбивается на два участка. Последнее вызвано тем, что окатыши в нижних горизонтах зоны сушки переувлажняются и деформируются под действием веса вышележащих горизонтов, в результате ухудшается интенсивность теплообменных процессов и газопроницаемость слоя на следующих этапах обжига.

Устранить этот недостаток удается за счет реверса газопотоков, таким образом, на первом участке зоны сушки продувка слоя окатышей ведется снизу вверх, во второй, газ подается сверху вниз. Продувка слоя снизу вверх не устраняет переувлажнение, но в таком случае переувлажненные окатыши пониженной прочности сконцентрированы на поверхности слоя, что устраняет их деформацию и сохраняет высокую газопроницаемость материала, подготовленного к обжигу.

На выходе из зоны сушки верхние горизонты окатышей имеют температуру 500-700°C. Влага из этих горизонтов удалена не полностью, и подвергать их спеканию, во избежание разрушения окатышей, нельзя. Таким образом, на машине выделена зона подогрева, где нагрев производится газом с температурой 900-1100°C.

В зоне обжига окатыши нагреваются до максимальных температур за счет подачи продуктов сгорания с температурой 1300-1350°C. С целью экономии топлива, до заданной температуры 1250-1300°C, прогревают

только  $\frac{3}{4}$  верха слоя окатышей. Нижняя четверть слоя материала нагревается до необходимой температуры в зоне рекуперации, где в слой поступают не продукты сгорания, а дымовые газы из зоны охлаждения. В результате происходит перенос тепла из верхних горизонтов в нижние.

Процесс охлаждения окатышей, является наиболее продолжительным этапом, с целью обеспечения требуемой интенсивности снижения их температуры. Скорость охлаждения окатышей не должна превышать  $100^{\circ}\text{C}/\text{мин}$  [222].

Результаты расчетных, экспериментальных исследований и практика работы обжиговых машин показали, что в условиях близких к оптимальным параметрам теплоносителя, высоты слоя окатышей и размеров зон обжиговой машины при обычном способе обжига с перекрестной схемой теплообмена, невозможно полностью устранить неравномерность нагрева слоя по всей высоте. Недостаточный максимум температуры и ограниченная продолжительность выдержки не обеспечивают полного завершения процессов термоупрочнения окатышей нижних горизонтов. Поэтому окатыши этой части слоя имеют более низкие качественные показатели [223].

С целью компенсации неравномерности нагрева слоя по высоте применялись решения с накатыванием твердого топлива на поверхность окатышей [86]. Однако неудобства, обусловленные трудностью сохранения строго одинаковым содержания пылевидного топлива в слое, и, вызванное этим непостоянством нарушение теплового режима, заставили отказаться от этого способа. К тому же значительный потери частиц дорогостоящего мелкодисперсного твердого топлива с поверхности «напудренных» окатышей при продувании через слой теплоносителя, свидетельствует о низкой эффективности предложенного мероприятия.

Для повышения интенсивности тепло- и массообмена в процессах упрочняющего обжига железорудных окатышей, предложено производить сжигание газа непосредственно в слое материала [117]. При этом происходит

горение природного газа, в общем случае, сопровождающееся движением зоны горения, составляющей небольшую часть от общей высоты слоя. Продукты горения газоздушной смеси проходят через нижележащие слои окатышей и нагревают их. Данный метод производства не нашел широкого распространения.

Известна технология производства безобжиговых самовосстанавливающихся окатышей с добавлением твердого топлива, которая обеспечивает получение вюститно-магнетитовой структуры окатышей, сохраняющей их прочность при восстановлении [224]. Следует отметить, что производство таких окатышей усложняет технологическую линию их подготовки к обжигу, к тому же, к частицам твердого топлива, закатанного внутрь окатыша, усложняется доступ кислорода, что не обеспечивает полного сгорания топлива и, соответственно, снижает эффективность его использования.

Таким образом, существующие решения по обеспечению необходимого теплового режима обжига окатышей с достижением необходимой температуры горизонта в 1250-1300 °С основываются либо на добавлении дополнительного топлива [111], либо на модификации обжиговой машины с целью увеличения рециркуляции газопотоков [115, 225-229].

В настоящей работе предлагается исследовать влияние сегрегации классов крупности окатышей по высоте слоя на их температурно-временную обработку. Для исследования процесса термообработки железорудных окатышей на конвейерной машине, необходимо установить влияние крупности гранул на их физико-химические характеристики и тепловые процессы, протекающие в окатышах во время обжига.

Производство обожженных окатышей в условиях Центрального горно-обогатительного комбината (ЦГОК) г. Кривой-Рог, осуществляется из тонкоизмельченного железорудного материала, который предварительно

окомковывается с целью получения сырых окатышей, гранулометрический состав которых приведен в табл.4.9.

Таблица 4.9.

### Гранулометрический состав сырых окатышей ЦГОК

	Фракции, мм					
	+16	16-12	12-10	10-8	-8	
Доля, %	7,6	52,5	34,1	4,7	1,1	100
$d_{ср}$ , мм	18	14	11	9	5	12,947

Распространенность в природе магнетитовых руд, а так же высокие технико-экономические показатели магнетитовых способов обогащения, привели к тому, что, в основном, окатыши изготавливают из магнетитовых концентратов. Химический состав окатышей, подготовленных к термической обработке, представленный в табл. 4.10, имеет существенное влияние на тепловой режим и физико-химические реакции, протекающие в окатыше при обжиге.

Технологический процесс обжига окатышей протекает с непрерывным выделением и поглощением значительных объемов тепловой энергии. Для ее численного определения разобьем слой материала, обжигаемого на паллете конвейерной машины, на единичные объемы, и рассмотрим процессы, входящие в состав приходной и расходной частей тепловой энергии, выделяющейся в объеме  $P$ , рис. 4.11.

Таблица 4.10.

**Химический состав сырых окатышей.**

	Концентрат	Бентонит	Флюс
Доля, %	97,18	0,82	2
$Fe_{общ}$	69,5	3,17	3,75
$FeO$	28,25	0,63	0,2
$SiO_2$	2,58	54,91	11,37
$Al_2O_3$	0,1	15,08	25,31
$CaO$	0,09	6,99	25,68
$MgO$	0,18	1,72	0,56
$MnO$	0,02	1,16	0,37

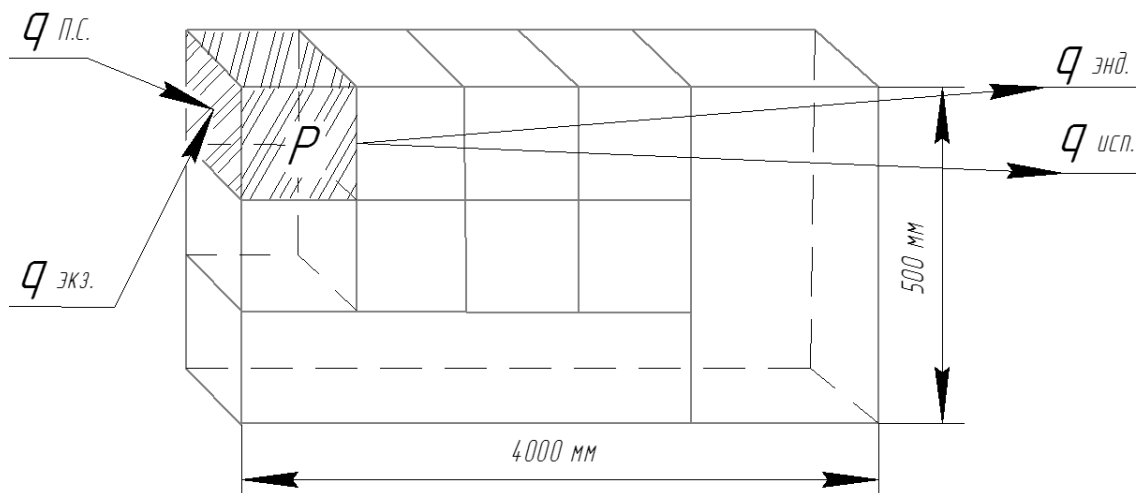


Рис. 4.11. Элементарный расчетный объем слоя обжигаемых окатышей

Основным источником тепловой энергии, поступающей в элементарный объем, является теплота продуктов сгорания топлива, просасываемых через слой. Для количественного определения объемов теплоты, выделяемой по пяти зонам обжиговой машины, воспользуемся формулой:

$$q_{п.с.} = \alpha_v \cdot (T_r(y, t) - T_m(y, t)), \quad (4.19)$$

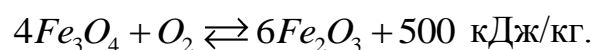
где:  $\alpha_v$  – объёмный коэффициент теплоотдачи в слое, Вт/(м<sup>3</sup>·К);  $t$  – время термообработки в каждой зоне I-V, с;  $T_r$  – температура продуктов сгорания, °С;  $T_m$  – температура материала определяется по результатам моделирования процесса на тепловой модели обжига окатышей [230].

Основной химической реакцией в период прогрева окатышей из магнетитовых руд является окисление магнетита до гематита. Превращение магнетита в гематит сопровождается значительным выделением теплоты [117]:

$$q_{\text{экз}} = a_m \cdot \Delta H_m, \quad (4.20)$$

где:  $a_m$  – содержание магнетита в материале, кг;  $\Delta H_m$  – теплота превращения магнетита в гематит, кДж/кг.

Окисление магнетита проходит по реакции:



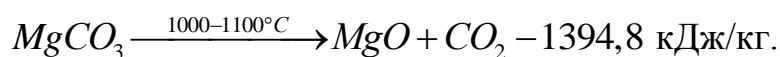
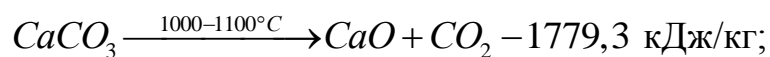
К расходным статьям, связанным с поглощением теплоты в элементарном объеме шихты, отнесем эндотермические реакции, протекающие в зоне подогрева в результате разложения карбонатов, содержащихся в шихте при производстве офлюсованных окатышей:

$$q_{\text{энд}} = a_u \cdot \Delta H_u + a_d \cdot \Delta H_d, \quad (4.21)$$

где:  $a_u$ ,  $a_d$  – доля известняка и доломита в шихте, кг;  $\Delta H_u$ ,  $\Delta H_d$  – теплота на химическую реакцию, кДж/кг.

Разложение карбонатов происходит по реакциям:





Теплота на испарение влаги, содержащейся в единичном объеме слоя, рассчитаем следующим образом:

$$q_e = a_e \cdot \Delta H_m, \quad (4.22)$$

где:  $a_e$  - содержание влаги в материале, кг;  $\Delta H_m$  - теплота испарения влаги - 179,5 кДж/кг.

Результаты расчетов количества теплоты, вносимой в единичный объем  $P$  продуктами сгорания в каждую зону обжиговой машины в зависимости от расположения расчетного элемента по высоте паллеты, а также суммарная энергия, выделяемая в элементе  $P$  по горизонтам, представлена на рис. 4.12.

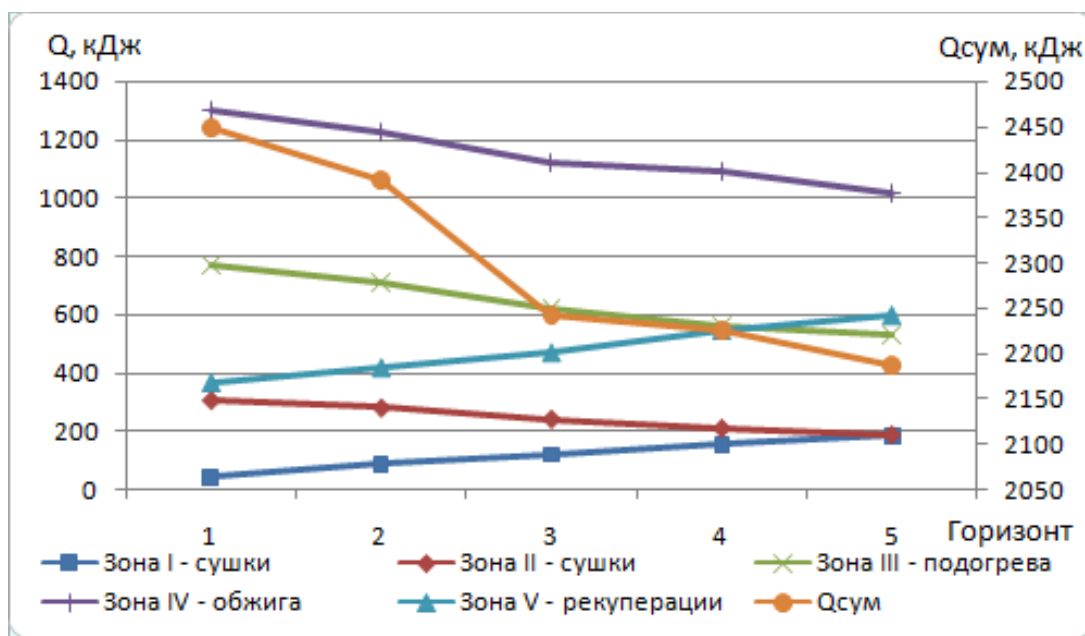


Рис. 4.12. Количество теплоты, поступающей в слой каждой зоны обжиговой машины и суммарная энергия, выделяющаяся в элементарном объеме  $P$ .

Из представленных данных видно, что количество теплоты, поступающей в элементарный объем в зависимости от зоны агрегата и горизонта слоя существенно различаются, что обусловлено температурой, поступающих в слой продуктов горения. Изменение кривой  $Q_{\text{сум}}$  демонстрирует, что распределение тепловой энергии, выделяемой в единичном объеме по горизонтам слоя, является неравномерным в связи с аккумуляцией теплоты в верхних слоях обжигаемого материала.

Полученные результаты исследований по определению количества энергии, выделяемой в элементарном объеме по горизонтам каждой из зон обжиговой машины, создают предпосылки к решению задачи по определению распределения температур в слое обжигаемого материала на базе полученной ранее конечно-элементной модели.

#### 4.4. Моделирование процесса термообработки железорудных окатышей с целью определения требуемой сегрегации гранул по высоте слоя

В современных условиях среди различных показателей качества окускованного железорудного сырья, наиболее важным является механическая прочность, которая зачастую лимитирует уровень форсирования доменной плавки и сокращения расхода твердого топлива на выплавку чугуна. Механическая прочность окатышей зависит как от физико-химических показателей сырья, так и от технологических факторов его обработки в процессе окускования. При этом, существенное значение имеет интенсивность температурно-временного режима обжига.

Известно, что время протекания физико-химических процессов при термической обработке окатышей зависит от их размера. Таким образом, актуальным становится вопрос определения требуемой сегрегации фракций

окатышей по высоте слоя, а так же времени и количества энергии, необходимой для нагрева окатыша заданного размера до требуемой температуры  $1250\div 1300^{\circ}\text{C}$  и полного завершения процессов термоупрочнения.

С целью определения распределения температур по горизонтам конвейерной машины, модифицирована ранее разработанная математическая модель тепловой обработки шихтовых материалов, базирующейся на методе МКЭ, расчетная схема которой приведена выше на рис. 2.8.

Процесс обжига железорудных окатышей в условиях ЦГОКа производится на конвейерных машинах типа ОК-324/336, с шириной и высотой обжигаемого слоя  $4000\times 500$  мм, соответственно, определяя, тем самым, размеры расчетной области.

Математическая постановка задачи теплопроводности следующая. Имеем слой окатышей заданной плотности, разбитый по ширине и высоте на единичные объемы (области). В зависимости от зоны машины действует сверху либо снизу источник с постоянной температурой. По бокам и в зависимости от зоны слой контактирует с внешней средой посредством конвективного теплообмена. Укладка окатышей в единичном объеме кубическая, размер окатышей принимаем постоянным (без сегрегации по высоте слоя). Движения продуктов сгорания происходит в идеальном слое. Объемная плотность распределения внутренних источников теплоты представляется в виде эндо- и экзотермических реакций, протекающих в слое обжигаемых окатышей, выраженной как функция координат  $q(x, y, z)$ .

Таким образом, согласно (2.19), позволяющей описать тепловые процессы, протекающие в слое монодисперсного материала, система уравнений для расчета температур в слое окатышей выглядит следующим образом:

$$\left\{ \begin{aligned}
 & c_{po}(T)\rho_m(T)(1-\varepsilon)\left[\frac{\partial T_o}{\partial t} + \omega_2 \frac{\partial T_2}{\partial y}\right] = \\
 & = \left[ \frac{\partial T_o}{\partial x} \left( \lambda(T,W) \frac{\partial T_o}{\partial x} \right) + \frac{\partial T_o}{\partial y} \left( \lambda(T,W) \frac{\partial T_o}{\partial y} \right) + \frac{\partial T_o}{\partial z} \left( \lambda(T,W) \frac{\partial T_o}{\partial z} \right) \right] + q(x,y,z); \\
 & \alpha_v(T_2 - T_o) = -c_2 \rho_2 \varepsilon \frac{\partial T_2}{\partial t} - c_2 \rho_2 \omega_2 \frac{\partial T_2}{\partial y}; \\
 & \frac{dP}{dy} = \psi_{cl} \omega_2^2 \rho_2 \frac{y}{r_3^2} (1 + \beta T_2).
 \end{aligned} \right. \quad (4.25)$$

где:  $\rho_o$ ,  $\rho_2$  - плотность окатышей и газа, кг/м<sup>3</sup>;  $c_{po}$ ,  $c_2$  - теплоемкость окатышей и газа, кДж/кг<sup>o</sup>C;  $\varepsilon$  - порозность слоя окатышей;  $T_o$ ,  $T_2$  - температура материала и газа, <sup>o</sup>C;  $\lambda(T,W)$  - коэффициент теплопроводности окатышей, Вт/м<sup>o</sup>C;  $P$  - перепад давления газа, Па;  $\alpha_v$  - объемный коэффициент теплоотдачи, Вт/м<sup>3</sup><sup>o</sup>C;  $r_3$  - эквивалентный радиус частицы, м;  $\omega_2$  - скорость газа, м/с;  $\psi_{cl}$  - коэффициент газодинамического сопротивления;  $\beta$  - коэффициент объемного расширения газа, K<sup>-1</sup>;  $t$  - время, с.

Объемный коэффициент теплоотдачи определим из (2.24).

Мощность внутренних источников теплоты в единичном объеме представим в виде:

$$q = \frac{Q_i m_o \varepsilon}{V \rho_o \Delta t}, \quad (4.26)$$

где:  $Q_i$  - теплота, выделяемая в единичном элементе слоя, определяемая из теплового баланса ячейки, рис. 4.13, кДж;  $m_o$  - масса единичного элемента,

кг;  $V$  - объем единичного элемента, м<sup>3</sup>;  $\rho_o$  - плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $\Delta t$  - время обработки окатышей в зоне обжиговой машины, с.

Теплоемкость и коэффициент теплопроводности окатышей в зависимости от температуры, для некоторых отечественных горно-обогатительных комбинатов представлены в табл. 4.11 [162].

Описанные соотношения  $c = f(T)$ ,  $\lambda = f(T)$  можно аппроксимировать полиномами второй степени в диапазонах температур:

$$\begin{aligned} \text{ЦГОК } 0 \div 800^\circ\text{C} \quad c &= 2,15 \cdot 10^{-6} T^2 - 0,0016T + 1,029, \\ 800 \div 1200^\circ\text{C} \quad c &= -2,32 \cdot 10^{-6} T^2 + 0,00348T - 0,938, \\ 0 \div 700^\circ\text{C} \quad \lambda &= 2,18 \cdot 10^{-6} T^2 - 0,0019T + 0,932, \\ 700 \div 1200^\circ\text{C} \quad \lambda &= 2,63 \cdot 10^{-6} T^2 - 0,0047T + 2,68. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{СевГОК } 0 \div 800^\circ\text{C} \quad c &= 1,77 \cdot 10^{-6} T^2 - 0,0011T + 0,923, \\ 800 \div 1200^\circ\text{C} \quad c &= 4,5 \cdot 10^{-6} T^2 - 0,0093T + 5,724, \\ 0 \div 700^\circ\text{C} \quad \lambda &= 2,72 \cdot 10^{-6} T^2 - 0,0026T + 1,128, \\ 700 \div 1200^\circ\text{C} \quad \lambda &= 3,21 \cdot 10^{-6} T^2 - 0,0059T + 3,269. \end{aligned}$$

Таблица 4.11.

**Теплофизические свойства окатышей**

Фабрика	Теплоемкость, кДж/(кг <sup>°</sup> С), при температуре, °С											
	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
ЦГОК	0,794	0,773	0,752	0,769	0,867	1,003	1,154	1,212	1,129	0,752	0,794	1,254
СевГОК	0,773	0,777	0,782	0,786	0,878	1,129	1,149	1,129	0,945	0,907	1,129	---
	Коэффициент теплопроводности окатышей, Вт/(м <sup>°</sup> С), при температуре, °С											
	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
ЦГОК	0,651	0,55	0,488	0,515	0,639	0,634	0,558	0,546	0,523	0,639	0,755	0,79
СевГОК	0,674	0,639	0,511	0,488	0,465	0,651	0,662	0,661	0,523	0,534	0,895	---

Система уравнений (4.25) решается при следующих начальных и граничных условиях, относящихся к соответствующей зоне конвейерной машины:

$$\text{Н.У. } t_0 = 0, T_o(x, y, z) = T_0, T_z(x, y, z) = T_0, \Delta P(y) = \Delta P(t_0).$$

Г.У. Зона – I:

$$y = y_0; -\lambda(T, W) \frac{\partial T_o}{\partial y} \Big|_{\Gamma_1} = \alpha_F (T_o(x, y, z) - T_{o.c.}), t > 0,$$

$$x = x_0; -\lambda(T, W) \frac{\partial T_o}{\partial x} \Big|_{\Gamma_2} = \alpha_F (T_o(x, y, z) - T_{o.c.}), t > 0,$$

$$x = x_n; -\lambda(T, W) \frac{\partial T_o}{\partial x} \Big|_{\Gamma_3} = \alpha_F (T_o(x, y, z) - T_{o.c.}), t > 0,$$

$$y = y_n; T_o \Big|_{\Gamma_4} = T_z, t > 0,$$

$$z_0 = z_n = 1.$$

Г.У. Зоны – II-V:

$$y = y_0; T_o \Big|_{\Gamma_1} = T_z, t > 0,$$

$$x = x_0; -\lambda(T, W) \frac{\partial T_o}{\partial x} \Big|_{\Gamma_2} = \alpha_F (T_o(x, y, z) - T_{o.c.}), t > 0,$$

$$x = x_n; -\lambda(T, W) \frac{\partial T_o}{\partial x} \Big|_{\Gamma_3} = \alpha_F (T_o(x, y, z) - T_{o.c.}), t > 0,$$

$$y = y_n; -\lambda(T, W) \frac{\partial T_o}{\partial y} \Big|_{\Gamma_4} = \alpha_F (T_o(x, y, z) - T_{o.c.}), t > 0,$$

$$z_0 = z_n = 1.$$

Расчетная область с учетом граничных условий представляет собой вертикальный срез слоя окатышей 4000x500x100 мм, разбитый на элементарные объемы. В результате, при использовании конечных элементов

тетраэдральной формы в расчетной области, построена сетка из 942 тыс. ячеек тетраэдральной формы, рис. 4.14.

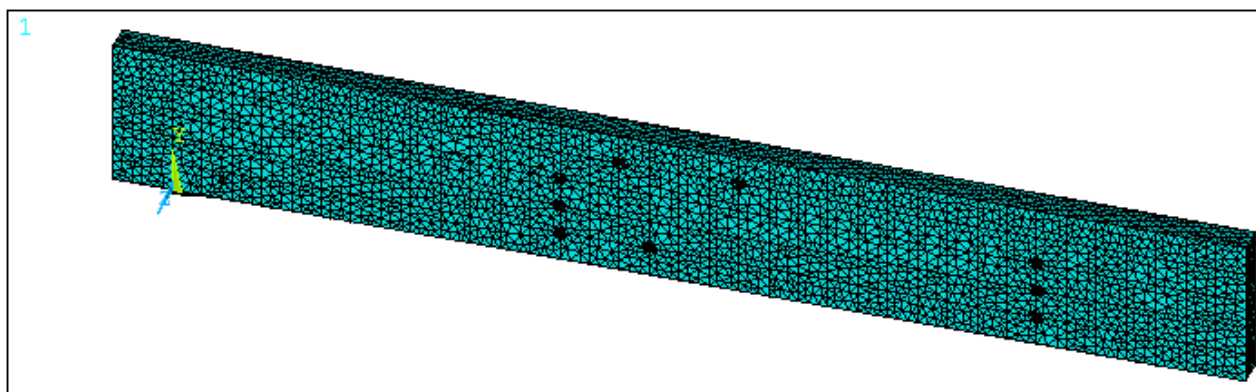


Рис.4.14. Расчетная область модели с конечно-элементной сеткой

Граничные условия для каждой из зон обжиговой машины выбирались исходя из направления движения газопотоков. Мощность внутренних источников энергии, обуславливающих протекание химических реакций в слое окатышей, устанавливалась исходя из элементарных тепловых балансов единичных ячеек.

Результаты моделирования тепловой обработки окатышей по зонам обжиговой машины приведены на рис.4.15. Представленные результаты позволили получить картину распределения температуры в каждой зоне обжиговой машины по горизонтам слоя окатышей одинакового размера  $d = 0,01$  м без сегрегации по высоте. Расчетное распределение температур в слое хорошо согласуется с экспериментальными данными Коротича В.И. по изучению температурного режима обжига железорудных окатышей [86].

Получив требуемое распределение температур по зонам обжиговой машины с достижением необходимой по технологии температуры обжига  $1300$  °С, решалась обратная задача по установлению времени и количества тепловой энергии, необходимой для обжига окатыша заданного размера и всего единичного объема рассматриваемого слоя.



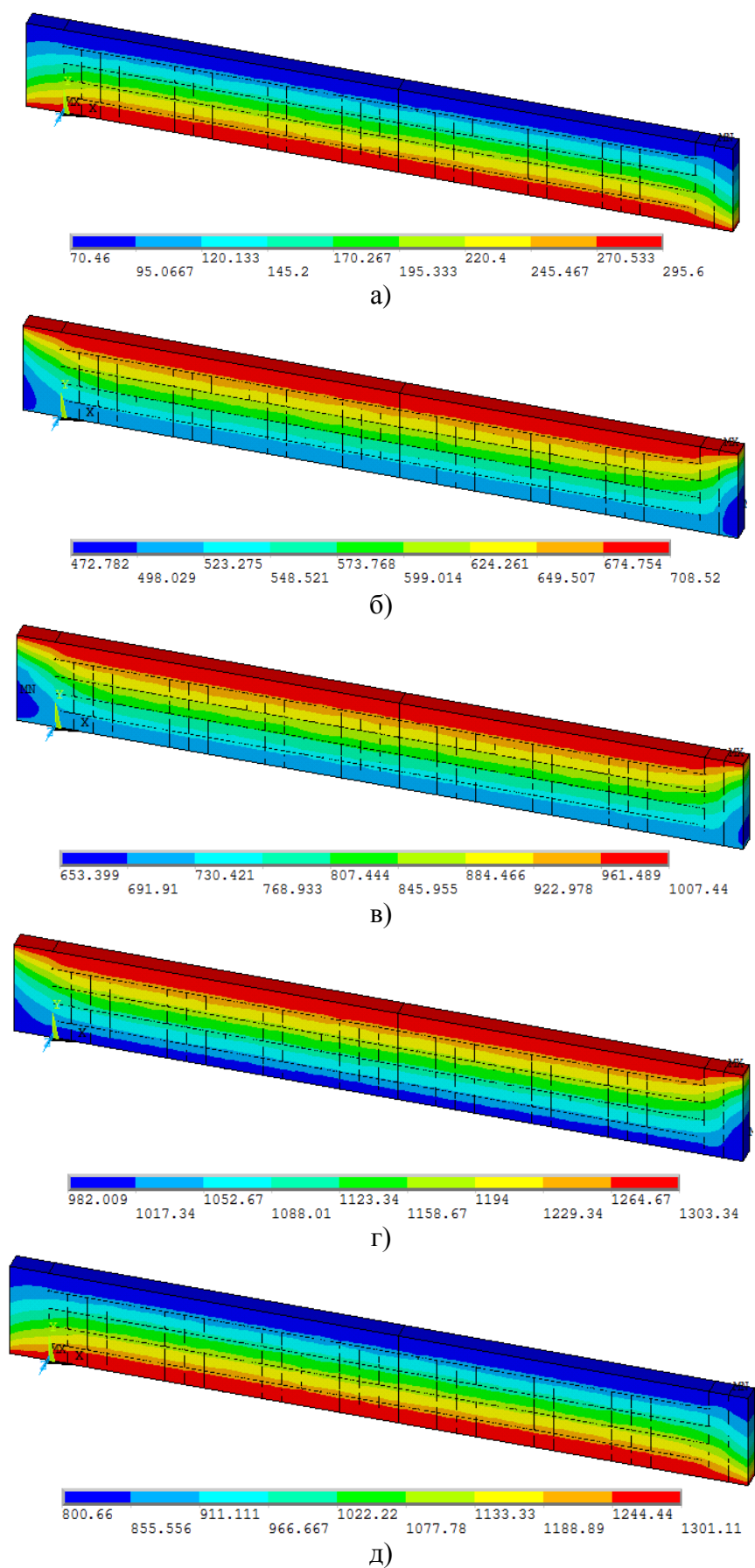


Рис.4.15. Распределение температур с слое окатышей при их термообработке: а, б – I,II зона сушки, в – III зона подогрева, г – IV зона спекания, д – V зона рекуперации.

Для этого рассчитано количество окатышей, которое возможно расположить в указанном единичном объеме. При принятой плотной ромбоэдрической укладке окатышей с размером единичной ячейки  $0,1 \times 0,1 \times 0,1$  м и диапазоном изменения  $d_{cp}$  окатыша  $5 \div 20$  мм, количество шарообразных частиц  $n$  изменяется в соответствии с кривой 1, рис. 4.16.

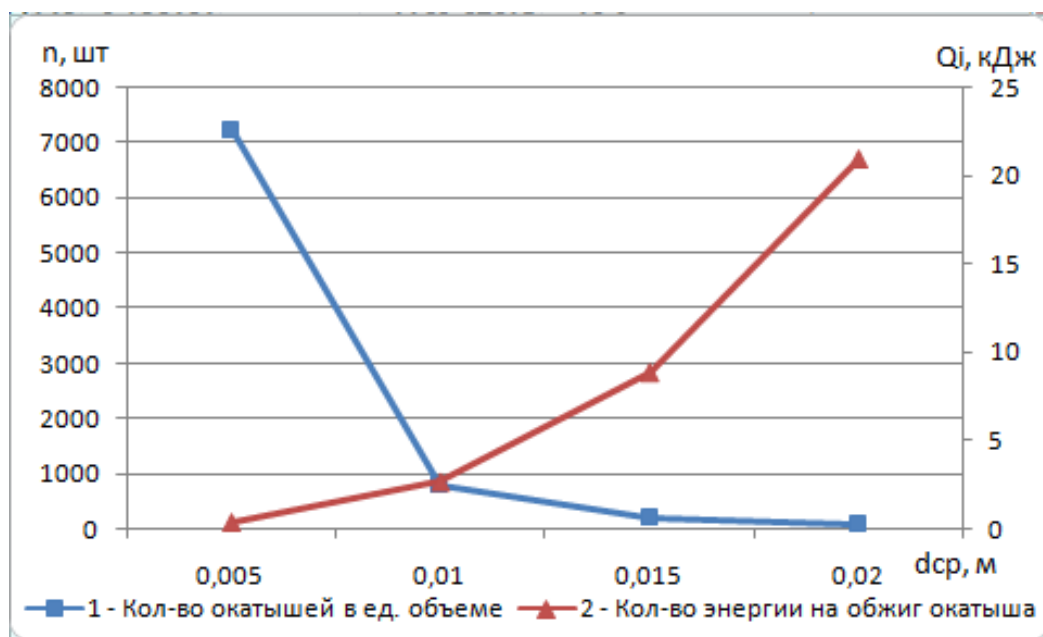


Рис. 4.16. Изменение количества окатышей и необходимого количества энергии для их термообработки в зависимости от  $d_{cp}$ .

Количество энергии, необходимое для обжига окатышей заданного размера, определим из формулы:

$$Q_i = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_o \varepsilon_0 (Q_{сум} / m), \quad (4.28)$$

где:  $r$  - радиус окатыша, м;  $\rho_o$  - плотность окатыша, кг/м<sup>3</sup>;  $Q_{сум}$  - суммарное, по зонам, количество теплоты, выделяемое в единичном объеме слоя окатышей, кДж;  $\varepsilon_0$  - пористость окатыша (0,21-0,36);  $m$  - масса единичного объема, кг [222].

Из кривой 2, рис. 4.16 видно, что с увеличением размера окатыша количество необходимой энергии для обжига существенно увеличивается. Необходимое время обработки окатыша определим следующим образом:

$$t_i = \frac{Q_i t_o}{Q_{\text{сум}}}, \quad (4.29)$$

где:  $t_o$  - время обжига, с.

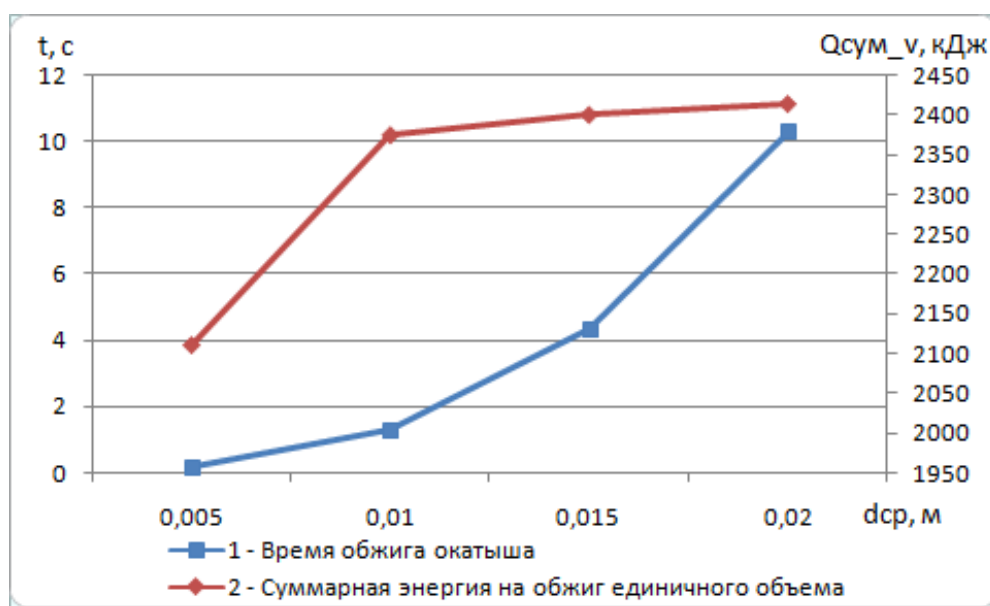


Рис. 4.17. Зависимость требуемого времени и энергии для обжига окатышей от  $d_{cp}$ .

Из кривой 1, рис. 4.17 видно, что размер окатыша значительно влияет на время его обжига. Так, время термической обработки окатыша с  $d_{cp} = 0,01$  м в 8 раз меньше необходимого времени обработки окатыша с  $d_{cp} = 0,02$  м.

Исходя из того, что скорость распространения изотермической поверхности в телах зависит от отношения поверхности частицы к ее объему, суммарную энергию, необходимую для нагрева до температуры  $1250 \div 1300^\circ\text{C}$  и завершения процессов термоупрочнения в единичном объеме, состоящем из окатышей заданного размера, определим из формулы:

$$Q_{\text{сум}_v} = Q_i n \frac{F}{V}, \quad (4.30)$$

где:  $Q_i$  - количество энергии, необходимое для обжига окатышей заданного размера, кДж;  $n$  - количество окатышей в единичном объеме, шт;  $F/V$  - отношение поверхности к объему шара.

Известно, что с уменьшением размера окатышей увеличивается их объемная поверхность  $F/V$ , что способствует интенсификации теплообмена [150]. В результате, из рис. 4.17, видно, что суммарное количество энергии, необходимое на обжиг единичного объема состоящего из мелких окатышей, существенно ниже, чем требуется для обжига окатышей большего диаметра.

Таким образом, с целью обеспечения равномерного обжига окатышей различного размера, необходимо обеспечить разделение классов крупности окатышей и их дифференцированную укладку по высоте слоя. Последнее призвано исключить недостаточный обжиг крупных гранул, попадающих в нижние горизонты слоя, за счет неравномерности их температурно-временной обработки.

Из анализа значений  $Q_{\text{сум}}$  и  $Q_{\text{сум}_v}$  получено требуемое распределение  $d_{\text{ср}}$  окатышей по горизонтам слоя, представленное на рис. 4.18.

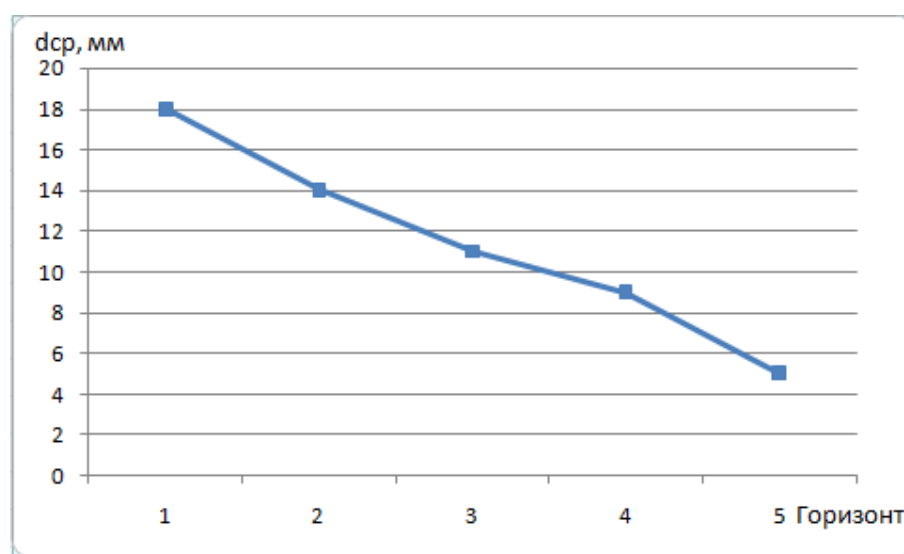


Рис. 4.18 Требуемое распределение крупности окатышей по горизонтам слоя

Таким образом, на основании исследований тепловых процессов, протекающих в слое обжигаемых окатышей, установлено время и необходимое количество тепловой энергии для обжига гранулы заданного размера. Суммарное количество тепловой энергии, необходимой для термической обработки единичного объема окатышей с заданным  $d_{cp}$ , свидетельствует о необходимости дифференцированной укладки гранул по высоте слоя, что призвано исключить неравномерность их тепловой обработки. Последнего возможно добиться, путем применения загрузочного устройства, сырых железорудных окатышей, модифицированной конструкции.

#### 4.5. Выводы к разделу 4

1. С целью моделирования тепловых процессов, протекающих в слое полидисперсной бокситовой шихты, для условий ПАО «Запорожский абразивный комбинат» проведены исследования по анализу сегрегации классов крупности шихтового материала по высоте спекательных тележек. Получены зависимости изменения содержания твердого топлива и химического состава гранул шихты от их среднего диаметра. Установлено, что причиной существующего для данного процесса перепада температуры зоны горения с  $1230^{\circ}\text{C}$ , для верхних горизонтов, до  $1500^{\circ}\text{C}$  для основания слоя, вызвано низким разделением классов крупности материала, и как следствие равномерным разделением твердого топлива по высоте.

2. Изучены процессы, входящие в состав приходной и расходной частей тепловой энергии, выделяющейся в единичном объеме спекаемого слоя бокситов. Установлена необходимость неравномерного распределения твердого топлива по высоте и ширине паллеты, что характерно и для

процесса агломерации железорудных материалов. Определено оптимальное распределение гранулометрического состава шихты по высоте и ширине спекательной тележки. Последнее обуславливает возможность стабилизации температуры зоны горения в диапазоне 1290-1380°C, что призвано исключить переоплавление нижних горизонтов и недопек верхних слоев спекаемой шихты, и тем самым повысить выход годного.

3. Система загрузки шихты, используемая на ПАО «ЗАК», в виде барабанного питателя, не обеспечивает требуемого распределения твердого топлива по высоте слоя, тем самым создавая предпосылки к выбору типа и расчету характеристик загрузочного устройства агломшины, с целью обеспечения максимально близкого к расчетному распределению топлива в подготовленной к спеканию бокситовой шихте.

4. Исследованы тепловые процессы, протекающие в слое обжигаемых железорудных окатышей. Получены зависимости, характеризующие объемы тепловыделения и поглощения теплоты в каждом расчетном единичном объеме, в зависимости от зоны конвейерной машины.

5. Рассчитано время и количество тепловой энергии, необходимые для обжига одного окатыша, и единичного объема, состоящего из окатышей заданного размера. Установлено, что время термической обработки окатыша с  $d_{cp}=0,01$  м в 8 раз меньше необходимого времени обработки окатыша с  $d_{cp}=0,02$  м. Последнее обусловлено тем, что с уменьшением размера окатышей увеличивается их объемная поверхность  $F/V$ , что способствует интенсификации теплообмена.

6. Установлено, что с целью обеспечения равномерного обжига окатышей различного размера, необходимо обеспечить разделение классов крупности окатышей и их дифференцированную укладку по высоте слоя. Последнее призвано исключить недостаточный обжиг крупных гранул, попадающих в нижние горизонты слоя, за счет неравномерности их температурно-временной обработки. Последнего возможно добиться за счет

использования принципиально новых загрузочных устройств сырых окатышей на поверхность паллет конвейерной машины.

Основное содержание 4 раздела опубликовано в работах [188, 203, 204, 220, 221, 230, 231].

## РАЗДЕЛ 5

### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ПОДГОТОВКИ СЛОЯ СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА К ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКЕ

5.1. Исследование динамики процесса формирования слоя аглошихты, подготовленной к тепловой обработке

Энергоэффективность и производительность аглопроцесса существенно зависят от теплового режима спекания шихтовых материалов, который обусловлен характером распределения твердого топлива и химических компонентов по высоте слоя. Последнее зависит от особенностей загрузки и сегрегации фракций материала по горизонтам шихты, подготовленной к спеканию.

Загрузка шихты, в свою очередь, зависит от типа загрузочного устройства, конструктивные особенности которого будут влиять на процесс формирования слоя материала, и как следствие, на фракционный состав отдельных горизонтов уложенной на паллеты шихты. Таким образом, исследование динамики процесса формирования слоя полидисперсного сыпучего материала является актуальной научной и практической задачей.

В настоящее время существует более 20 систем и устройств по регулированию и управлению подачей и укладкой шихты на агломерационную ленту. В работе [232] приводится способ загрузки шихты на спекательные тележки путем использования энергии сжатого воздуха. Обработка шихты воздухом при загрузке, приводит к сегрегации частиц по крупности, а так же к перераспределению по высоте слоя топлива и известняка. Пневматическая система загрузки позволяет получить слой шихты с более рыхлой структурой. Однако подобная система значительно



усложняет загрузочный узел агломашины, затрудняет условия работы агломератчиков из-за повышенной запыленности. К тому же происходит подсушивание гранул шихты, что увеличивает унос частиц твердого топлива, фракционный состав которого составляет порядка 0,5 – 1 мм.

Предложенная в работе [233] замена наклонного отражательного листа на грохот с переменным сечением отверстий, призвана повысить степень сегрегации шихты. Тем не менее, помимо сложности предложенной конструкции, для работоспособности данного загрузочного устройства необходима постоянная очистка валков в связи с налипанием на них частиц шихты. Загрузочное устройство подобной конструкции пригодно для эксплуатации только при производстве железорудных окатышей.

Многочисленные модификации загрузочных устройств, приведены в работах [22, 192, 213, 234]. В них предлагается усилить сегрегацию шихты с помощью различных приспособлений в виде дополнительного барабана и загрузочного лотка, дополнительного транспортера, устанавливаемого вместо отражательного листа, барабана после отражательного листа и другие.

Заслуживает внимания приспособление для усиления сегрегации по высоте, которое представляет собой подпружиненную направляющую балку с закрепленным на ней очистным ножом выгнутой вниз формы. Однако на практике описанные загрузочные устройства не применяются. Существенным недостатком таких загрузочных устройств является то, что они имеют только одну степень свободы. Угол наклона загрузочного лотка, даже с модификациями, связан с высотой слоя шихты синусоидальной зависимостью. Увеличение высоты слоя шихты до 0,40 м приводит к уменьшению угла наклона загрузочного лотка до  $38,6^\circ$ , в то время как угол естественного откоса подготовленной к спеканию шихты составляет  $39-45^\circ$ . Поэтому регулировать степень сегрегации шихты с помощью таких загрузочных систем практически невозможно.

Анализ динамики сегрегационных процессов, протекающих при формировании слоя шихты в результате использования загрузочных устройств различного типа, проводился в работах [235, 236]. В них заложены основы методики расчета разделения фракций шихтовых материалов в процессе их движения по поверхности загрузочного устройства и откоса слоя.

Результаты моделирования теплового режима процесса спекания [203], позволили сделать вывод, что создание направленной сегрегации гранулометрического состава шихты по высоте слоя позволит обеспечить требуемое распределение топлива и химкомпонентов, тем самым стабилизировать температуру зоны горения. Последнее направлено на повышение производительности агломашин при условии сокращения расхода твердого топлива и повышения прочности агломерата.

Формирование слоя агломерируемого материала в производственных условиях, осуществляется с помощью системы состоящей из вибрационного либо барабанного питателя в совокупности с загрузочным лотком. Сыпучий материал,двигающийся по поверхности загрузочного лотка и откосу слоя под действием гравитационных сил, представляет собой совокупность частиц, форма которых близка к сферической, рис. 5.1.

Указанная схема загрузки агломерационной шихты способствует расслоению материала по крупности. В результате мелкие частицы преимущественно сосредотачиваются в верхних горизонтах, а крупные скатываются к основанию формирующегося слоя. В связи с тем, что степень разрыхления движущегося по лотку сыпучего материала значительна, особенно при использовании вибрационного питателя, этот поток можно рассматривать как совокупность отдельных частиц, достаточно свободно перемещающихся по наклонной плоскости.

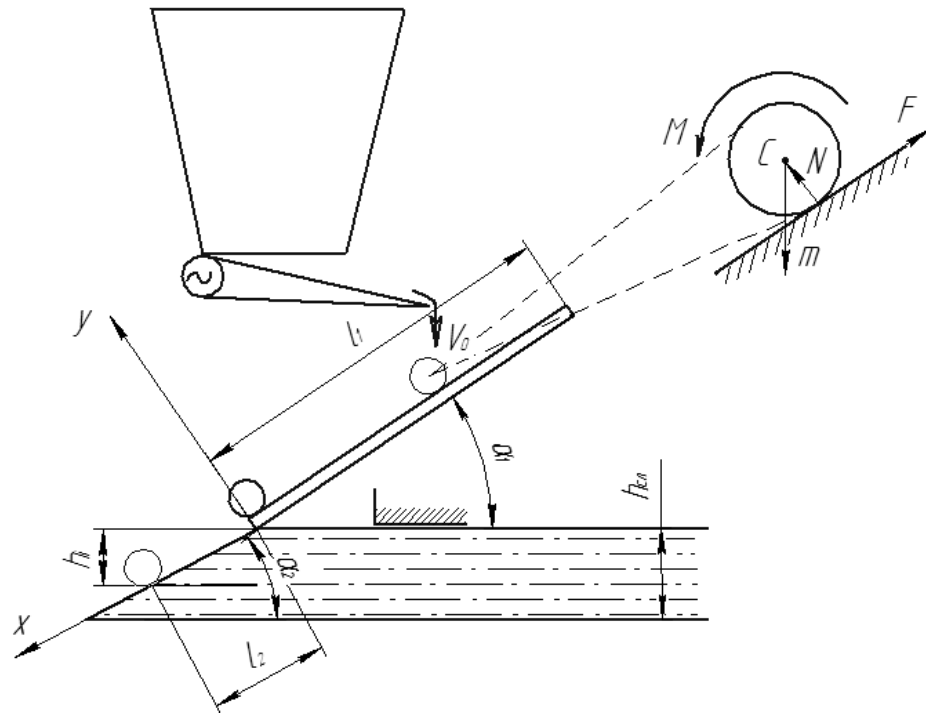


Рис. 5.1. Схема загрузки шихты при использовании прямолинейного лотка

Исходя из того, что отдельную частицу шихты с достаточной степенью приближения будем рассматривать как шар, свободно двигающийся по наклонной плоскости, дифференциальное уравнение плоского движения примет вид [235]:

$$\begin{cases} \frac{m}{q} \cdot \frac{d^2 x_c}{dt^2} = m \sin \alpha - F \\ \frac{m}{q} \cdot \frac{d^2 y_c}{dt^2} = m \cos \alpha - N, \\ I_z \cdot \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = F \cdot r - M \end{cases} \quad (5.1)$$

где:  $x_c$ ,  $y_c$  – координаты центра тяжести частицы, м;  $r$  – радиус частицы, м;  $m$  – вес частицы, Н;  $N = m \cos \alpha$  – нормальная реакция наклонной плоскости, Н;  $F$  – сила трения, Н;  $\varphi$  – угол поворота частицы, рад;  $\alpha$  – угол наклона лотка, рад;  $I_z$  – момент инерции тела относительно центральной оси;  $q$  –

ускорение свободного падения,  $m/c^2$ ;  $M = m \cos \alpha \cdot r \cdot f'$  – момент трения качения, Н·м;  $f'$  – коэффициент трения качения частицы по стальному лотку.

Движение частицы может осуществляться в нескольких режимах: качение, скольжение, качение со скольжением. Будем рассматривать движение частицы в режиме чистого качения, так как только в этом режиме происходит разделение частиц различного размера по скорости их схода с загрузочного лотка, тем самым обеспечивая сегрегацию материала по классам крупности.

При условии качения частицы без скольжения, точка ее соприкосновения с лотком является мгновенным центром скоростей. Обозначив угловую скорость частицы через  $\omega$ , получим:

$$V_c = r\omega, \quad (5.2)$$

где:  $V_c$  – скорость движения центра частицы шихты, м/с.

Отсюда:

$$\frac{dx_c}{dt} = r \frac{d\varphi}{dt};$$

или

$$\frac{d^2x_c}{dt^2} = r \frac{d^2\varphi}{dt^2}.$$

Так как движение частицы плоское ( $\frac{d^2y_c}{dt^2} = 0$ ), из системы уравнений

(5.1) найдем  $F$ :

$$F = m(\mu \sin \alpha_1 + f' \nu \cos \alpha_1), \quad (5.3)$$

где:  $\mu$  – коэффициент формы частицы для шара  $\mu = \frac{\rho^2}{\rho^2 + r^2} = \frac{2}{7}$  [235];

$\nu = 1 - \mu$ , для шара  $\nu = \frac{5}{7}$ ;  $\rho$  – радиус инерции частицы, м.

Подставив (5.3) в уравнение системы (5.1), получим:

$$\frac{d^2 x_c}{dt^2} = q\nu(\sin \alpha_1 - f' \cos \alpha_1). \quad (5.4)$$

Проинтегрировав обе части уравнения (5.4), получим мгновенную скорость движения частицы по наклонной плоскости:

$$\frac{dx_c}{dt} = q\nu(\sin \alpha_1 - f' \cos \alpha_1)t + V_0, \quad (5.5)$$

где:  $V_0$  – начальная скорость движения частицы, м/с.

Длина пути отдельной частицы составит:

$$x_c = \frac{q\nu(\sin \alpha_1 - f' \cos \alpha_1)t^2 + V_0 t}{2}. \quad (5.6)$$

Зная длину пути частицы по лотку,  $x_c = l_1$ , решим уравнение (5.6) относительно  $t$  и определим время качения частицы шихты по наклонной плоскости:

$$t = \frac{-2V_0 + \sqrt{4V_0^2 + 8q\nu l_1(\sin \alpha_1 - f' \cos \alpha_1)}}{2q\nu(\sin \alpha_1 - f' \cos \alpha_1)}. \quad (5.7)$$

Подставив значение  $t$  в (5.5), найдем конечную скорость качения частицы по лотку длиной  $l_1$ :

$$V = \sqrt{2ql_1 v(\sin \alpha_1 - f' \cos \alpha_1) + V_0^2}. \quad (5.8)$$

Приведенный случай чистого качения частицы по наклонной плоскости может быть рассмотрен только при соблюдении условия:

$$m(\mu \sin \alpha + f' v \cos \alpha) \leq m f \cos \alpha; \quad (5.9)$$

где:  $f$  – коэффициент трения скольжения частицы по лотку.

Значения коэффициентов  $f'$ ,  $f$  получены экспериментально [203, 237], согласно методикам [239, 240].

Опытные данные по определению коэффициента трения качения частицы по поверхности загрузочного лотка, представлены на рис.5.2.

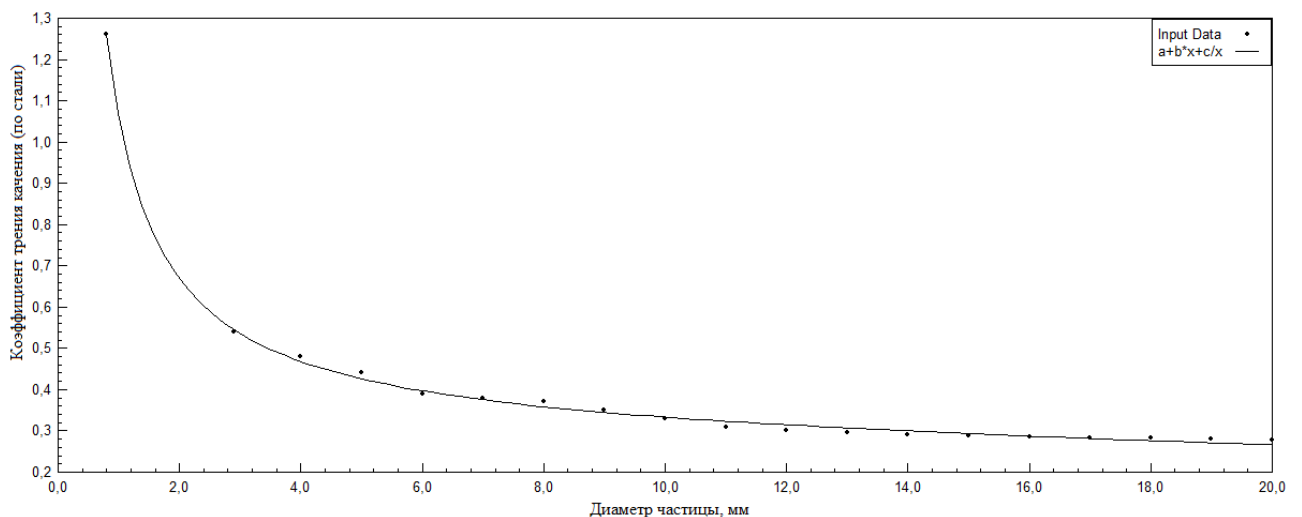


Рис. 5.2. Зависимость коэффициента трения качения от диаметра частиц шихты.

Результаты исследований изменения коэффициента трения скольжения агломерационной шихты по поверхности лотка и откосу слоя, в зависимости от ее влажности, представлены на рис. 5.3.

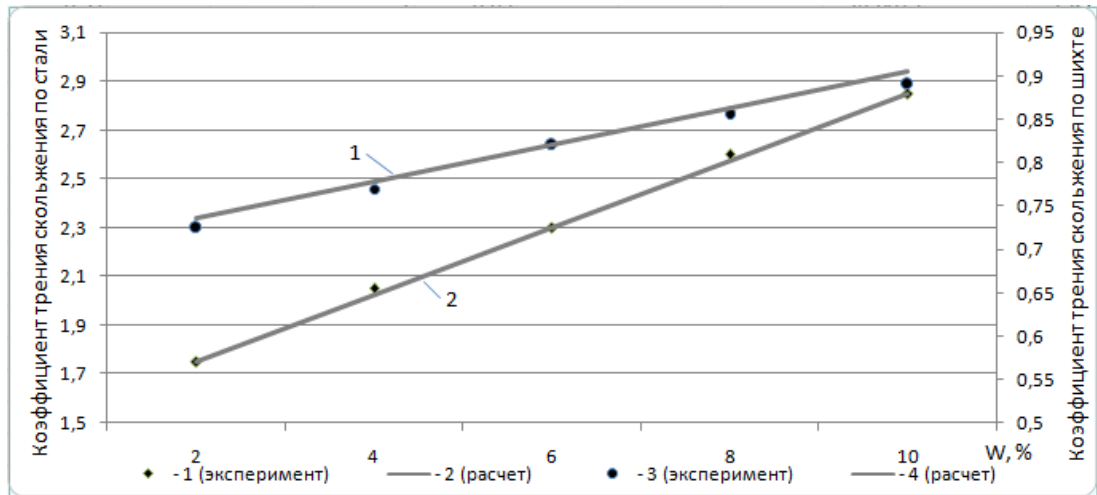


Рис. 5.3. Зависимость коэффициента трения скольжения шихты по стали и шихты по шихте от влажности материала

Для определения коэффициента трения качения гранул по поверхности массы агломерационной шихты, использована методика, описанная в [240]. В результате проведения экспериментов получены данные, представленные на рис. 5.4.

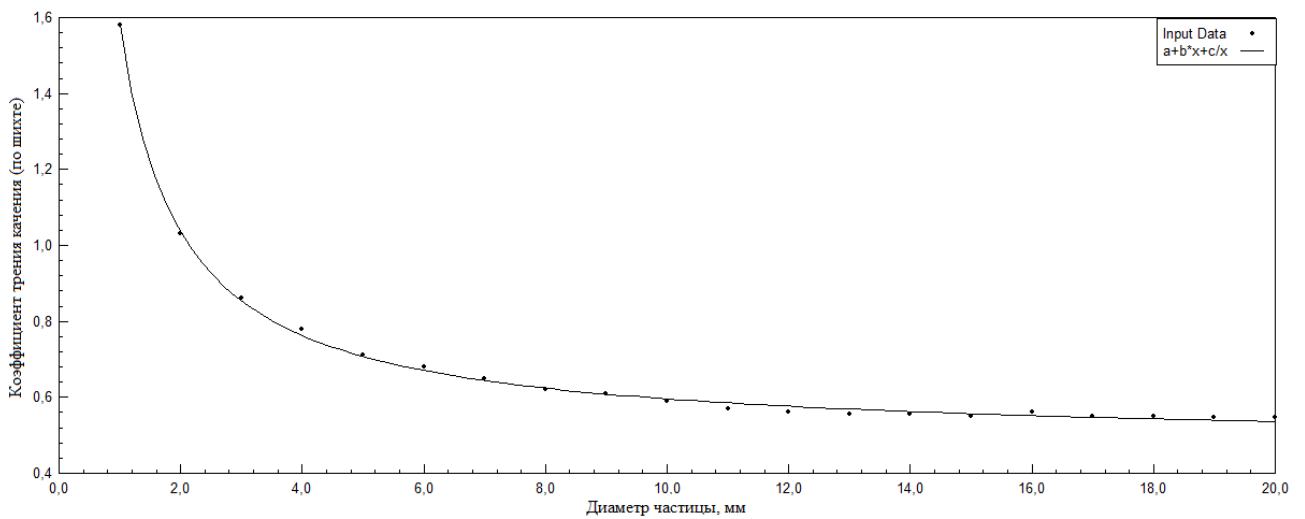


Рис.5.4. Зависимость коэффициента трения качения по шихте от диаметра частицы.

Определив значения коэффициентов  $f'$ ,  $f$ , из уравнения (5.9) получим:

$$\operatorname{tg} \alpha \leq \frac{f - f' v}{\mu}. \quad (5.10)$$

В режиме равноускоренного движения  $\frac{d^2x_c}{dt^2} > 0$ , тогда из (5.4)

получим:

$$f' < \operatorname{tg}\alpha. \quad (5.11)$$

Исходя из ограничений (5.10) (5.11), можно сделать вывод, что режим чистого качения шарообразной частицы по лотку, может иметь место при условии:

$$f' < \operatorname{tg}\alpha < \frac{f - f'v}{\mu}. \quad (5.12)$$

Если  $\operatorname{tg}\alpha > \frac{f - f'v}{\mu}$ , то качение частицы шихтового материала сопровождается скольжением, тем самым нарушая сегрегационные процессы в слое материала, подготовленного к спеканию.

После схода частиц с загрузочного лотка, они будут двигаться по поверхности откоса слоя с углом наклона  $\alpha_2$ . Для случая чистого качения частицы по поверхности загрузочного лотка и откоса слоя материала, конечная скорость ее движения составит:

$$V = \sqrt{2ql_2v(\sin\alpha_2 - f_2' \cos\alpha_2) + 2ql_1v(\sin\alpha_1 - f_1' \cos\alpha_1) + V_0^2}, \quad (5.13)$$

где:  $l_1, l_2$  – путь пройденный частицей по поверхности лотка и материала, м;  
 $f_1', f_2'$  – коэффициент трения качения по поверхности лотка и откосу материала.

Учитывая, что расстояние между краем рабочего органа питателя и поверхностью лотка незначительна, можно условно принять  $V_0 = 0$ . Для



определения распределения различных фракций материала по горизонтам, необходимо рассчитать длину пути, которую проходит  $i$ -я частица по поверхности откоса формирующегося слоя. Приняв условие, что  $V_i = 0$  в момент остановки отдельной частицы на поверхности откоса, получим:

$$2ql_2v(\sin \alpha_2 - f_2' \cos \alpha_2) + 2ql_1v(\sin \alpha_1 - f_1' \cos \alpha_1) = 0. \quad (5.14)$$

Решив (5.14) относительно  $l_2$ , получим путь, пройденный отдельной частицей по поверхности формирующегося слоя:

$$l_2 = \frac{l_1(\sin \alpha_1 - f_1' \cos \alpha_1)}{f_2' \cos \alpha_2 - \sin \alpha_2}. \quad (5.15)$$

Приняв, что  $h_i = l_2 \cos \alpha_2$ , запишем уравнение, характеризующее распределение частиц по высоте слоя:

$$h_i = \frac{l_1(\sin \alpha_1 - f_1' \cos \alpha_1) \sin \alpha_2}{f_2' \cos \alpha_2 - \sin \alpha_2}. \quad (5.16)$$

Таким образом, зная скорость схода  $i$ -й частицы шихты с загрузочного лотка, которая зависит от ее размера, и соответствующего ей коэффициента трения, можно определить дальность качения частицы. Результаты расчетов распределения фракционного состава шихты по высоте слоя с применением прямолинейного лотка представлены на рис. 5.5.

Данные о реальном распределении фракционного состава сыпучего материала, кривая 2, получены экспериментально, путем рассева проб шихты подготовленной к спеканию при загрузке прямолинейным лотком, совместно

с вибрационным и барабанным питателем, агломашины №4 и №2 МК «Запорожсталь» соответственно.

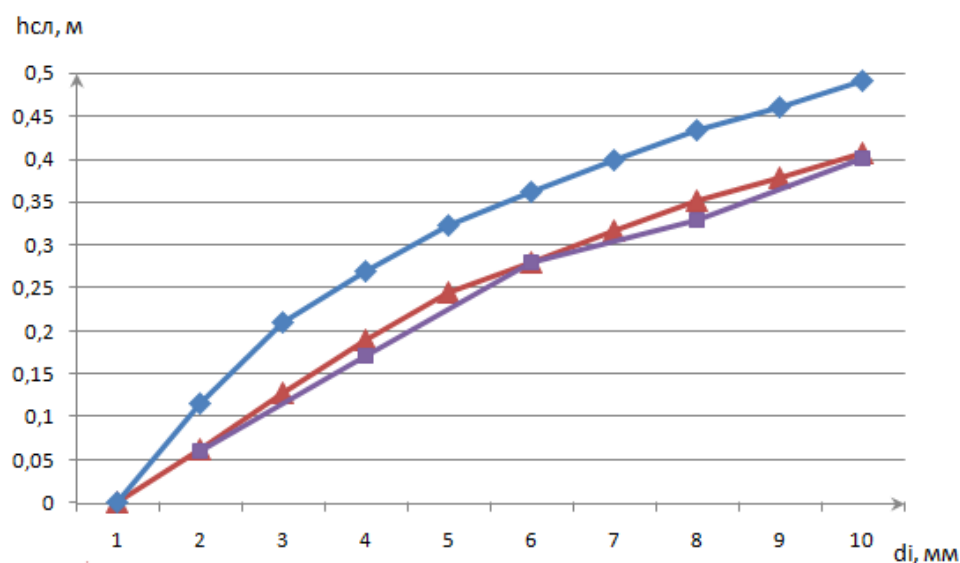


Рис. 5.5. Изменение фракционного состава материала по высоте слоя: —▲— 1 — результаты расчетов, слой 400 мм; —◆— 2 — эксперимент, слой 400 мм; —■— 3 — результаты расчетов, слой 500 мм

При сравнении кривых 1 и 2 рис. 5.5, можно сделать вывод о хорошей сходимости экспериментальных и расчетных данных. Угол наклона загрузочного лотка  $\alpha_1$  для случая формирования слоя шихты высотой 400 мм составил  $51^\circ$ . Однако в настоящее время на комбинате переходят к спеканию шихты в более высоких слоях до 500 мм. Для формирования слоя такой высоты, кривая 3 рис. 5.5, необходимо увеличить угол наклона загрузочного лотка до  $57^\circ$ .

Следует заметить, что при таком угле наклона не соблюдается условие (5.12) и режим движения частицы переходит от чистого качения к качению со скольжением. Последнее не позволяет обеспечить необходимую сегрегацию классов крупности шихтового материала, и, следовательно, требуемое распределение твердого топлива в шихте.

Таким образом, необходимо провести дальнейшие исследования и выбор системы загрузки аглошихты с целью обеспечения максимально

близкого к оптимальному распределению классов крупности шихтового материала.

## 5.2. Исследование систем загрузки полидисперсной шихты

Вопросу разработки загрузочных устройств конвейерных машин посвящено множество работ [22, 192, 213, 232-236]. Анализ динамики сегрегационных процессов протекающих при формировании слоя шихты [241], позволил сделать вывод, что для расположения мелких фракций в верхней части слоя необходимо, чтобы их скорость при сходе с загрузочного лотка, равнялась нулю, а крупные частицы должны обладать достаточной кинетической энергией, для достижения ими нижних горизонтов слоя. При использовании прямолинейных загрузочных лотков с постоянным углом наклона и коэффициентом трения, выполнить первое условие невозможно, т.к. угол наклона лотка должен быть меньше угла внешнего трения мелкой фракции, которая не может самостоятельно перемещаться по его поверхности. К тому же результаты расчетов распределения фракционного состава шихты при использовании прямолинейного лотка, показали, что для условий формирования слоя шихты высотой 500 мм и более, применение такого лотка не позволяет обеспечить требуемое разделение классов крупности материала по высоте паллеты.

Для усиления сегрегационных процессов, протекающих в слое загружаемого материала, можно использовать лоток с переменным углом наклона, что обеспечивает предварительный разгон частицы с последующим ее торможением на более пологом участке. Последнее дает возможность значительную часть поверхности лотка расположить под углом большим угла внешнего трения мелкой фракции шихты, что уменьшит ее налипание

на плоскость движения, и улучшит технологические характеристики загрузочного узла.

В работе [241] представлены, система дифференциальных уравнений плоского движения и зависимости, позволяющие рассчитать скорость движения и путь проходимый  $i$ -й частицей по поверхности лотка и откоса формирующегося слоя. Аналогично, для случая лотка с переменным углом наклона, рис. 5.6, для режима чистого качения на участке  $l_1$ , скорость движения частицы на участке  $l_2$  составит:

$$V_2 = \sqrt{2ql_2v(\sin \alpha_2 - f_2' \cos \alpha_2) + V_1^2}, \quad (5.17)$$

где:  $q$  - ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $f_2'$  - коэффициент трения качения частицы по стальному лотку;  $v$  - коэффициент формы частицы для шара  $v = \frac{5}{7}$ .

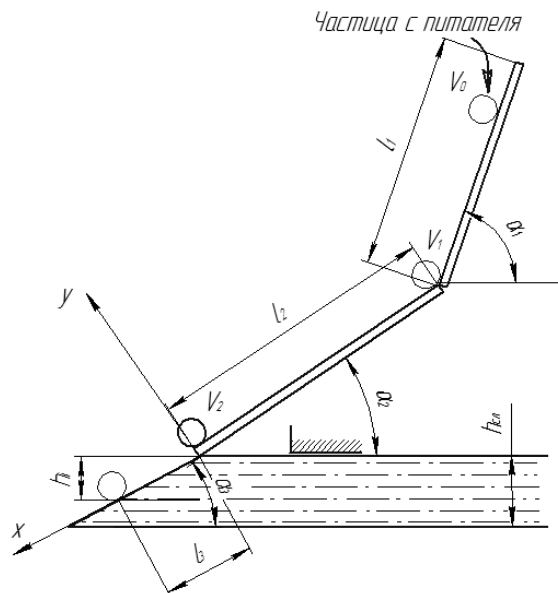


Рис.5.6. Схема движения частицы по лотку с переменным углом наклона.

Исходя из того, что начальную скорость движения материала на участке  $l_1$  можно условно принять близкой нулю ( $V_0 = 0$ ), и конечная

скорость движения  $i$ -й частицы в момент ее остановки на поверхности откоса также равна  $V_i = 0$ , получим:

$$2ql_3\nu(\sin \alpha_3 - f_3' \cos \alpha_3) + 2ql_2\nu(\sin \alpha_2 - f_2' \cos \alpha_2) + 2ql_1\nu(\sin \alpha_1 - f_1' \cos \alpha_1). \quad (5.18)$$

Решив (5.18) относительно  $l_3$  можно рассчитать путь, пройденный отдельной частицей по откосу формируемого слоя, после ее схода с поверхности лотка:

$$l_3 = \frac{l_2(\sin \alpha_2 - f_2' \cos \alpha_2) + l_1(\sin \alpha_1 - f_1' \cos \alpha_1)}{f_3' \cos \alpha_3 - \sin \alpha_3}. \quad (5.19)$$

Для вывода уравнения, характеризующего распределение фракций материала по высоте слоя, примем  $h_i = l_3 \cos \alpha_3$ , откуда:

$$h_i = \frac{(l_2(\sin \alpha_2 - f_2' \cos \alpha_2) + l_1(\sin \alpha_1 - f_1' \cos \alpha_1)) \cos \alpha_3}{f_3' \cos \alpha_3 - \sin \alpha_3}. \quad (5.20)$$

Для обеспечения требуемого уровня сегрегации скорость схода мелкой фракции со второй ступени загрузочного лотка должна составлять  $V_2 = 0$ . Таким образом, из уравнения (5.19), длина пути, проходимая мелкой фракцией должна составлять  $l_3 = 0$ .

В результате расчетов определены конструктивные характеристики лотка с переменным углом наклона рабочих поверхностей, которые составили:  $l_1 = 0,6$  м,  $l_2 = 0,4$  м и  $\alpha_1 = 56^\circ$ ,  $\alpha_2 = 43^\circ$ , соответственно. Загрузочный лоток с такими характеристиками, позволяет обеспечить наилучшую, для данной конструкции лотка, сегрегацию материала.

Полученное распределение фракционного состава шихты представлено на рис. 5.10, кривая 1.

Повысить сегрегацию массы загружаемого материала, можно путем разделения ее на отдельные фракции, которые затем уложить на заданные горизонты формирующегося слоя. Указанное разделение может быть достигнуто при использовании лотка с прямолинейным верхним участком, и закругленным нижним рис. 5.7.

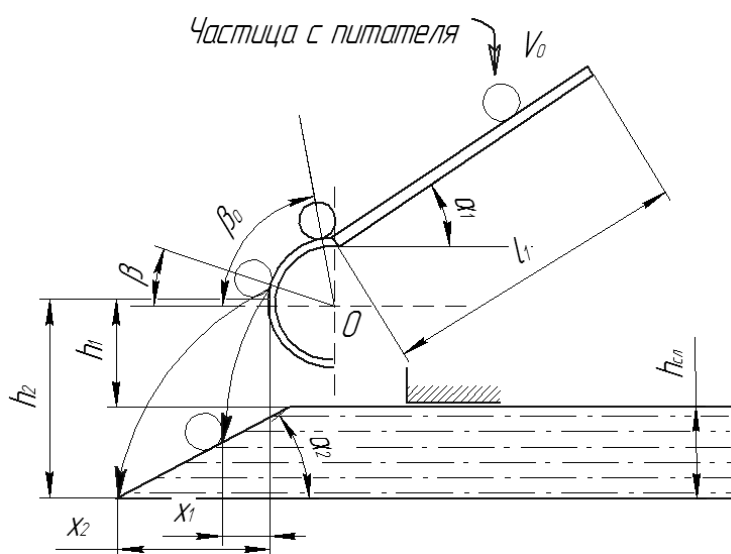


Рис.5.7. Схема движения частицы по лотку с сепаратором.

На прямолинейном участке, частицы достигают определенной скорости скатывания, зависящей от их физико-химических характеристик, а нижний участок, будет выполнять функцию сепаратора, за счет чего частицы будут переходить на воздушный участок траектории, тем самым снижая их взаимодействие.

Движение частицы в воздухе опишем системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{d^2 x}{dt^2} = 0 \\ \frac{d^2 y}{dt^2} = -g \end{cases}, \quad (5.21)$$

Начальные условия движения:  $t = 0$ ;  $x = 0$ ;  $y = h$ .

где:  $h$  - расстояние от точки отрыва частицы до поверхности откоса слоя, м.

Представим вектор скорости движения частицы в воздухе в виде двух векторов:

$$\begin{cases} V_x = V \cos \beta \\ V_y = -V \sin \beta \end{cases} \quad (5.22)$$

После интегрирования уравнения (5.21) и определения постоянных интегрирования, запишем:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = V \cos \beta \\ \frac{dy}{dt} = -V \sin \beta - qt \end{cases} \quad (5.23)$$

Интегрируя (5.23), и определив постоянные интегрирования, получим координаты частицы в момент ее падения на аглоленту:

$$\begin{cases} x = Vt \cos \beta \\ y = -Vt \sin \beta - \frac{qt^2}{2} + h \end{cases} \quad (5.24)$$

Выразив  $t$  из первого уравнения системы (5.24) и подставив во второе, получим:

$$y = -\frac{q}{2V^2 \cos^2 \beta} x^2 - xt \operatorname{tg} \beta + h. \quad (5.25)$$

В момент падения частицы на аглоленту,  $y = 0$ . Решив (5.25) относительно  $x$ , определим дальность полета частицы:

$$x = -\frac{\sin \beta V^2 \cos \beta}{q} + \frac{V^3}{Rq^2} \sqrt{\sin^2 \beta V^2 + 2qh}, \quad (5.26)$$

где:  $R$  - радиус окружности сепаратора, м.

Расчет скорости скатывания частицы по криволинейной поверхности нижнего участка, реализуем, используя теорему о приращении кинетической энергии движущегося тела в дифференциальной форме:

$$d\left(\frac{mV^2}{2}\right) = \left(mq \sin \beta - mqf' \cos \beta - f' \frac{mV^2}{2}\right) ds, \quad (5.27)$$

где:  $m$  - масса частицы, кг.

Скорость движения частицы и угол ее отклонения от вертикали отсчитывается относительно внешней системы координат. При скатывании частица движется в сторону, совпадающую с направлением отсчета угла  $\beta$ , отсюда  $ds = Rd\beta$ . Примем  $V_i^2 = y$  и получим линейное дифференциальное уравнение с правой частью:

$$\frac{dy}{d\beta} + 2f'y = 2qR(-f' \cos \beta + \sin \beta). \quad (5.28)$$

Общее решение этого уравнения имеет вид:

$$y = ce^{-2f'\beta} - \frac{6f'qR}{1+4f} \sin \beta + 2qR \frac{(1-2f) \cos \beta}{1+4f}. \quad (5.29)$$



Определив значение постоянной интегрирования  $c$ , и приняв, что  $\beta = \beta_0$ ,  $y = y_0$ , где  $y_0 = f(\alpha_1, f', e) = V_i$ , запишем решение уравнения (5.27):

$$V_i = \sqrt{\frac{2qR}{1+4f} \left( (1+2f) \cos \beta - 3f' \sin \beta \right) + \left( V_i^2 + \frac{2qR}{1+4f} (3f' \sin \beta_0 - (1-2f) \cos \beta_0) \right) \frac{e^{2f'\beta_0}}{e^{2f'\beta}}}. \quad (5.28)$$

Распределение фракционного состава шихты при использовании лотка с сепаратором, с параметрами  $R = 0,35$  м,  $\beta_0 = 72,5^\circ$ ,  $\beta = 34^\circ$ , представлены на рис. 5.10, кривая 2.

Загрузку полидисперсных материалов, на паллеты агломашины, можно производить лотком с криволинейной поверхностью рис. 5.8, обеспечивающего предварительный разгон частиц шихты, с последующим их торможением на более пологом участке.

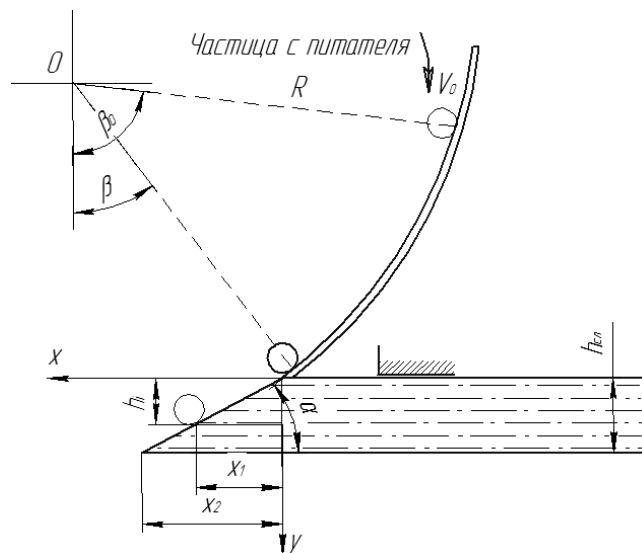


Рис. 5.8. Схема движения частицы по лотку с криволинейной поверхностью.

Для расчета скорости движения частицы по криволинейной поверхности лотка, используем (5.27). Так как при скатывании, тело

движется в сторону противоположную направлению отсчета угла  $\beta$ , то  $ds = -Rd\beta$ . Примем, что  $V_i^2 = y$ , тогда в результате преобразований получаем:

$$\frac{dy}{d\beta} - 2f'y = 2qR(f' \cos \beta - \sin \beta). \quad (5.29)$$

Решение этого уравнения даст скорость движения  $i$ -й частицы:

$$V_i = \sqrt{\frac{2qR}{1+4f} \left( \left( 3f' \sin \beta + (1-2f) \cos \beta \right) - \left( 3f' \sin \beta_0 + (1-2f) \cos \beta_0 \right) \frac{e^{2f'\beta}}{e^{2f'\beta_0}} \right)}. \quad (5.30)$$

Анализ (5.30) показывает, что помимо конструктивных параметров загрузочного лотка ( $R = 1,2$  м;  $\beta_0 = 72,5^\circ$ ;  $\beta = 41^\circ$ ) условия движения частицы по его поверхности зависят от коэффициента трения качения  $f'$ . Таким образом, при движении фракций шихты по лотку, будет происходить разделение их конечных скоростей  $V_i$ , а, следовательно, и сегрегация материала по высоте формирующегося слоя, кривая 3, рис. 5.10.

В случае загрузки шихты исключительно питателем, без использования лотка, рис. 5.9, скорость частицы в момент ее падения на поверхность слоя составит:

$$V_n = \sqrt{2qh}. \quad (5.31)$$

Таким образом:

$$V_\kappa = \sqrt{2qlv(\sin \alpha - f' \cos \alpha) + V_n^2}. \quad (5.32)$$

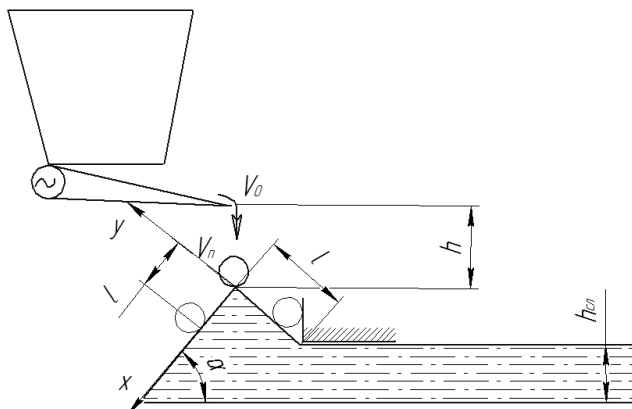


Рис. 5.9. Схема движения частицы без использования загрузочного лотка.

Приняв, что конечная скорость частицы  $V_k$  равна нулю, в момент ее остановки на откосе слоя, найдем путь пройденный  $i$ -й частицей материала.

Как видно из рис. 5.10, кривая 4, загрузка шихты таким способом не обеспечивает разделение классов крупности материала по высоте слоя, в связи с тем, что частицы не приобретают достаточной кинетической энергии для перемещения в соответствующий горизонт слоя.

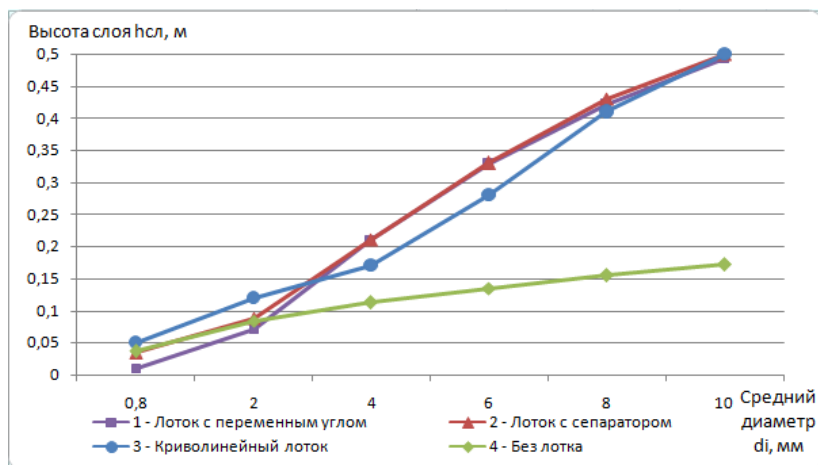


Рис. 5.10. Распределение фракционного состава шихты по высоте слоя.

Рассмотренные закономерности движения полидисперсного материала по сложной поверхности, использованы для расчета параметров составного

загрузочного лотка, рис. 5.11, для использования совместно с вибрационным питателем для условий агломашины №1 МК «Запорожсталь» [242, 243].

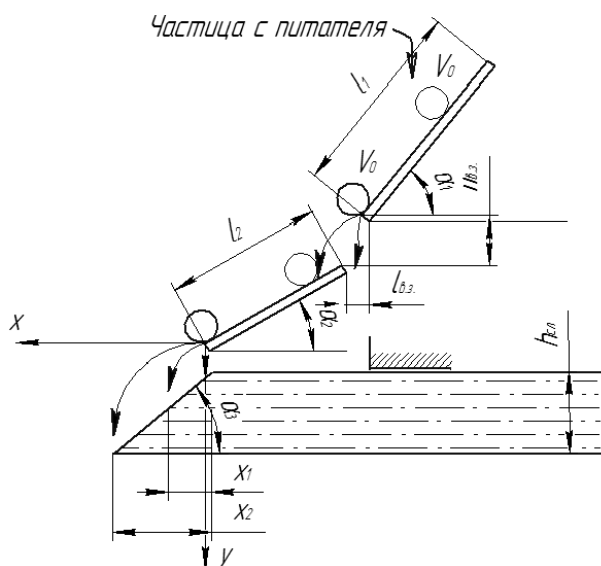


Рис. 5.11. Схема движения частицы по составному загрузочному лотку.

Основной особенностью данного лотка является наличие воздушного зазора между поверхностями движения, что позволяет в связи с малой кинетической энергией мелких фракций, преимущественно концентрировать их в верхних горизонтах, как требуется в [203], за счет их ссыпания в воздушный зазор, выполняющий роль сепаратора.

Скорость движения частиц по поверхности лотка, пропорциональна их размерам и физико-механическим свойствам. При условии чистого качения, без скольжения, частицы по поверхности загрузочного лотка, конечную скорость ее движения выразим в виде:

$$V_k = \sqrt{2ql_1\nu(\sin \alpha_1 - f'_1 \cos \alpha_1) + V_0^2}, \quad (5.33)$$

где:  $q$  - ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $f'_1$  - коэффициент трения качения частицы по стальному лотку;  $\nu$  - коэффициент формы частицы;  $l_1$  -

длина первой секции лотка, м;  $\alpha_1$  - угол наклона лотка, °;  $V_0$  - начальная скорость движения частицы по поверхности лотка, м/с.

В случае, если качение частицы по поверхности лотка происходит со скольжением, то  $V_k = const$ , следовательно, конечная скорость не зависит от размера фракций материала и такой режим движения не обеспечивает разделение классов крупности шихты.

Сила тяжести, действующая на частицу, отрывающуюся от нижней кромки первой секции лотка, обеспечивает перемещение последней за время падения  $t_i$ , с высоты  $h_{г.з.}$ , на расстояние  $l_{г.з.}$ .

Время падения частицы  $t_i$  связано со скоростью падения следующей зависимостью:

$$h_{г.з.} = V_n t_i + \frac{q t_i^2}{2}, \quad (5.34)$$

где:  $V_n = V_k \sin \alpha_1$ , м/с.

Решив (5.34) относительно  $t_i$ , получим уравнение:

$$t_i^2 + 2 \frac{V_n}{q} t_i - 2 \frac{h_{г.з.}}{q} = 0. \quad (5.35)$$

Возьмем действительный корень, соответствующий реальным условиям движения частицы. Тогда:

$$t_i = -\frac{V_n}{q} + \sqrt{\left(\frac{V_n}{q}\right)^2 + 2 \frac{h_{г.з.}}{q}}. \quad (5.36)$$

Приняв сопротивление воздушной среды, на участке  $l_{г.з.}$  близким к нулю, не оказывающим существенного влияния на время полета частицы, запишем:

$$V_n t_i = l_{г.з.} \quad , \quad \text{или} \quad t_i = \frac{l_{г.з.}}{V_{\kappa} \cos \alpha_1} \quad .$$

(5.37)

Подставив (5.37) в (5.36), получим:

$$\frac{l_{г.з.}}{V_{\kappa} \cos \alpha_1} = -\frac{V_{\kappa} \sin \alpha_1}{q} + \sqrt{\left(\frac{V_{\kappa} \sin \alpha_1}{q}\right)^2 + 2\frac{h_{г.з.}}{q}} \quad .$$

(5.38)

Решив (5.38) относительно  $V_{\kappa}$ , определим значение минимальной скорости частицы, обеспечивающей ее перелет через поперечный зазор составного лотка, при его заданной величине.

$$V_{\kappa\_min} = \sqrt{\frac{l_{г.з.}^2 q}{2(h_{г.з.} \cos^2 \alpha_1 - l_{г.з.} \sin \alpha_1)}} \quad . \quad (5.39)$$

Исследования влияния  $h_{г.з.}$  и  $l_{г.з.}$  на минимальную скорость частицы, обеспечивающей ее перелет через поперечный зазор лотка, представлены на рис. 5.12, 5.13.

Максимально допустимую высоту зазора  $h_{г.з.}$ , обеспечивающую перелет частицы при заданном значении  $V_{\kappa}$ , опишем зависимостью:

$$h_{6.3\_max} = \frac{l_{6.3}^2 q + 2l_{6.3} \sin \alpha_1 V_K^2}{2V_K^2 \cos \alpha_1}. \quad (5.40)$$

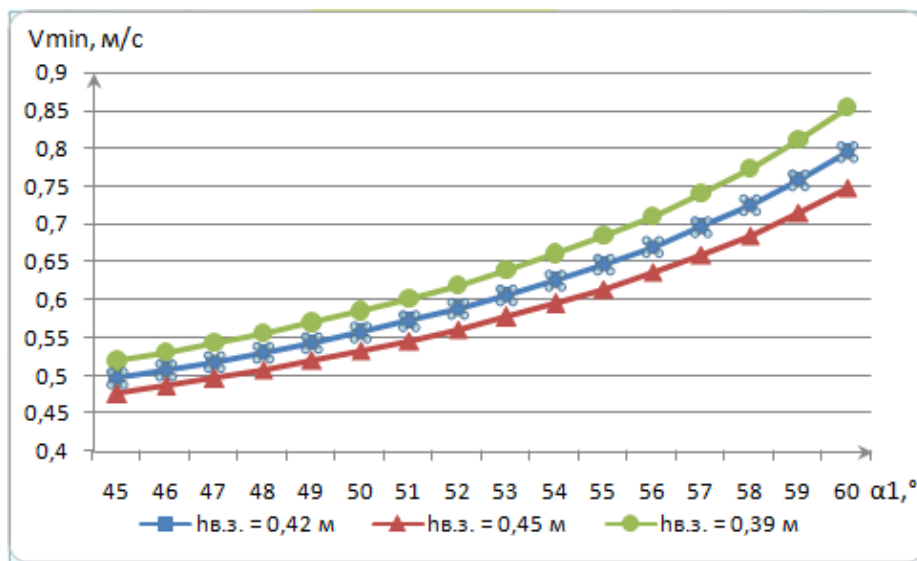


Рис. 5.12. Влияние  $h_{6.3}$  на минимальную скорость частицы.

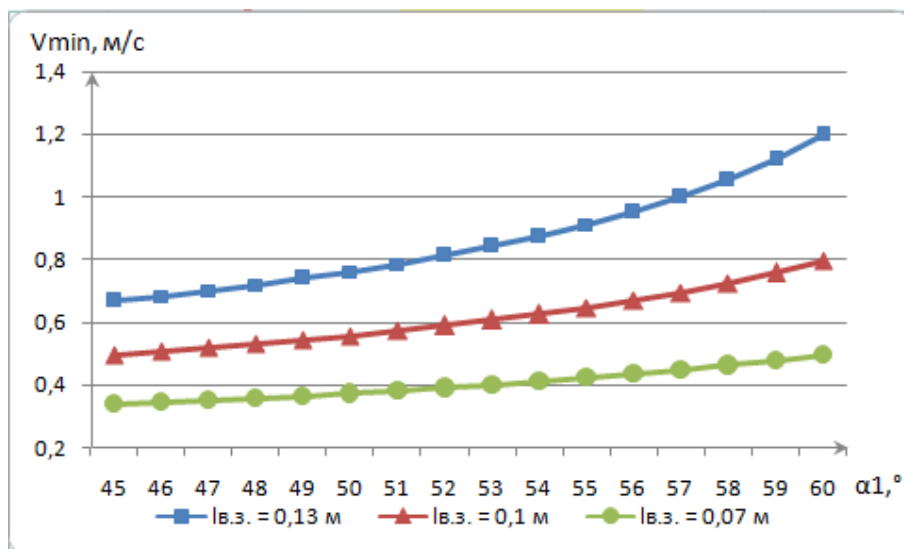


Рис. 5.13. Влияние  $l_{6.3}$  на минимальную скорость частицы.

Поперечный зазор на поверхности загрузочного лотка будет выполнять функцию сепаратора фракционного состава полидисперсного материала только в случае, когда скорость движения частиц  $V_K$  будет определяться их размером. Данное условие выполняется только при чистом качении гранул

шихты по поверхности лотка. В случае стационарного положения частей составного загрузочного лотка:  $\alpha_1 = const$ ;  $l_{6.3.} = const$ ;  $h_{6.3.} = const$ ;  $V_0 = 0$ , можно определить предельное значение коэффициента трения качения  $i$ -й частицы, обеспечивающий ее перелет через воздушный зазор.

$$f'_1 = \frac{V_0^2 + l_1 \sin \alpha_1 - \frac{l_{6.3.}^2 q}{2(h_{6.3.} \cos^2 \alpha_1 - l_{6.3.} \sin \alpha_1)}}{l_1 \cos \alpha_1}. \quad (5.41)$$

Скорость схода частицы со второй ступени загрузочного лотка, определим из выражения:

$$V_c = \sqrt{2ql_2 v (\sin \alpha_2 - f'_2 \cos \alpha_2) + V_\kappa^2}. \quad (5.42)$$

Согласно полученным уравнениям, управлять движением загружаемого материала по составному загрузочному лотку, можно путем изменения ширины и высоты поперечного воздушного зазора  $h_{6.3.}$ ,  $l_{6.3.}$ , длины пути разгона частицы  $l_1$ ,  $l_2$  и угла наклона поверхностей разгона  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ .

Для обеспечения заданного распределения фракций материала по высоте слоя, необходимо, чтобы отдельные частицы, поступающие на поверхность откоса, имели определенную скорость движения, обусловленную их физико-механическими характеристиками:

$$V_{ci} = \sqrt{\frac{2qh_i v (f'_3 \cos \alpha_3 - \sin \alpha_3)}{\sin \alpha_3}}, \quad (5.43)$$



где:  $h_i$  - заданное положение  $i$ -й частицы в слое относительно его поверхности, м;  $\alpha_3$  - угол наклона откоса слоя, град;  $f_3'$  - коэффициент трения качения по поверхности откоса слоя.

Мелкие фракции (0,5-1 мм) агломерационной шихты не должны перелетать воздушный зазор между первой и второй секциями составного лотка, что обеспечит их преимущественное скопление на поверхности формирующегося слоя. В процессе движения материала по воздуху, значительно снижается взаимодействие между отдельными частицами, составляющими его массу. В результате достигается более качественное разделение его по фракциям, чем при непосредственном переходе частиц шихты с плоскости загрузочного лотка на откос слоя.

После схода частиц с загрузочного лотка, они будут двигаться в воздухе по параболической траектории:

$$y_i = x_i \operatorname{tg} \alpha_1 + \frac{qx_i^2}{2V_c^2 \cos^2 \alpha} , \quad (5.44)$$

где:  $y_i, x_i$  - перемещение  $i$ -й частицы определенного размера, относительно осей координат, м.

Решив последнее уравнение относительно  $x_i$ , получим:

$$x_i = \frac{V_c^2 \sin^2 \alpha_1}{2q} \sqrt{1 + \frac{2qy_i}{V_c^2 \sin^2 \alpha_1}} .$$

Таким образом, зная скорость схода  $i$ -й частицы шихты с загрузочного лотка, которая зависит от ее размера, и соответствующего ей коэффициента трения, можно определить дальность полета частицы. Расчетное

распределение фракционного состава материала, при использовании прямолинейного и составного загрузочного лотка, приведено на рис. 5.14.

Различные фракции сыпучего материала, достигающие нижней кромки лотка, двигаются по нему единым потоком, что обуславливает определенное снижение степени их разделения за счет захвата крупными частицами более мелких и принудительного переноса последних в нижние горизонты формирующегося слоя. Исключить это явление возможно за счет полного разделения траектории движения фракций агломерационной шихты в воздушном зазоре составного лотка [246].

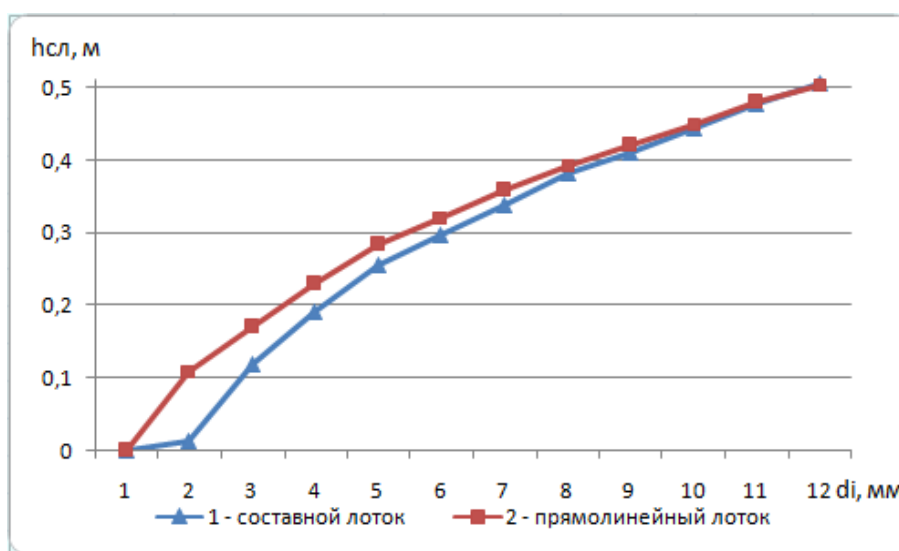


Рис. 5.14. Расчетное распределение фракционного состава по высоте слоя

Как видно, в результате использования лотка приведенной конструкции, мелкие частицы не перелетают воздушный зазор, что обеспечивает их преимущественной скопление на поверхности слоя. В процессе движения материала по воздуху значительно снижается взаимодействие между отдельными частицами, составляющими его массу. В результате достигается более качественное его разделение по фракциям, кривая 1, чем при непосредственном переходе частиц с плоскости прямолинейного лотка на поверхность откоса, кривая 2, рис. 5.14.

Конструкция лотка предусматривает возможность изменения углов наклона обеих поверхностей, что в свою очередь, будет влиять на скорость схода частиц, а так же ширину и высоту воздушного зазора, тем самым обеспечивая широкий спектр управляющих воздействий на динамику формирования слоя. В результате расчета конструктивных характеристик лотка, позволяющих обеспечить максимально близкое к требуемому распределение гранулометрического состава, получены результаты, представленные на рис. 5.15.

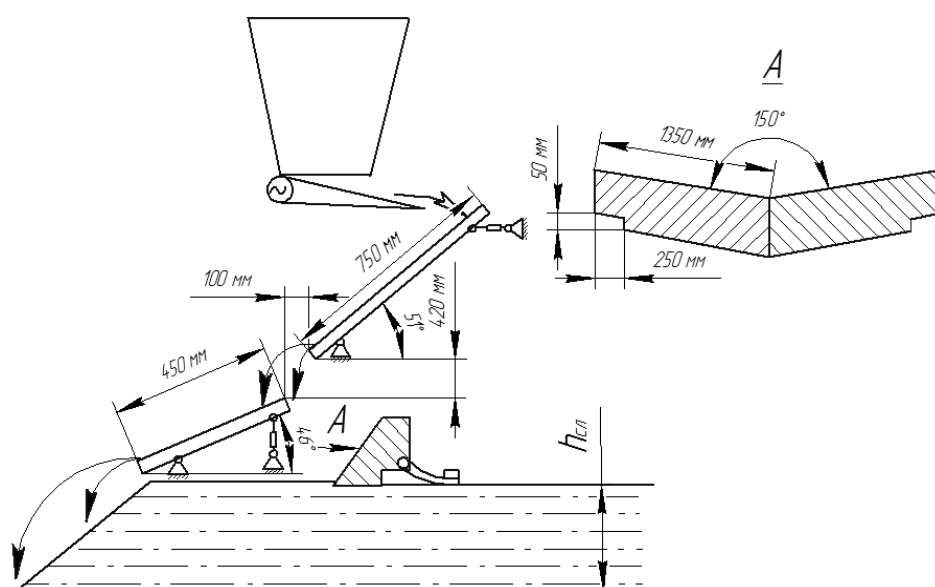


Рис. 5.15. Конструктивные характеристики модифицированного составного лотка.

Выбранная в результате расчетов длина 750 мм и угол наклона  $51^\circ$  первой секции, обеспечивают движение фракций материала в режиме чистого качения. В свою очередь фракции (-1, 1-3 мм), не приобретают достаточной кинетической энергии для перелета через воздушный зазор. Длина 450 мм и угол наклона  $46^\circ$  второй секции обеспечивают торможение и требуемое распределение грансостава по высоте слоя.

Полученное расчетным путем распределение фракционного состава материала по горизонтам слоя, рис. 5.16, свидетельствует о том, что применение составного лотка позволяет максимально приблизиться к

требуемой сегрегации фракций [203], тем самым обеспечить необходимое распределение топлива, что позволит стабилизировать тепловой режим спекания.

В работе [203] установлено, что прибортовые зоны паллет нуждаются в повышенной концентрации топлива, с целью обеспечения равномерного спекания слоя агломерата по ширине, в связи с прибортовыми подсосами воздуха и потерей тепла через стенки спекательных тележек.

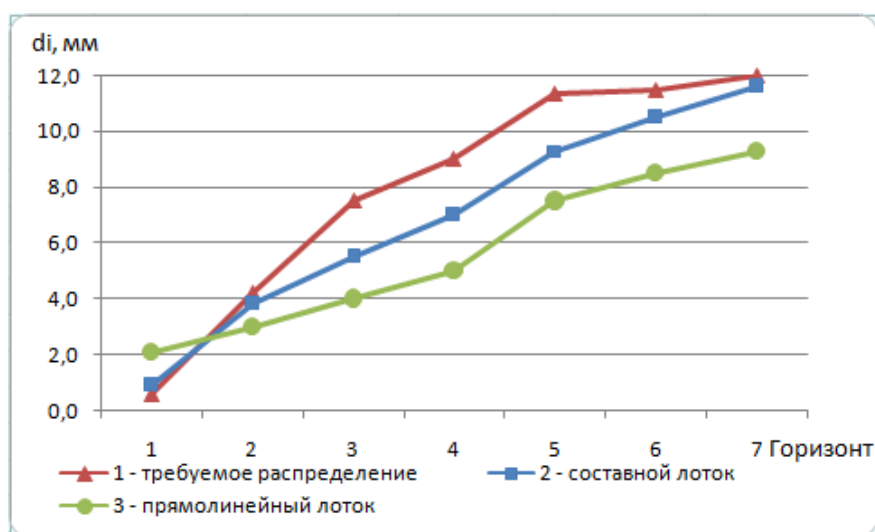


Рис. 5.16. Изменение среднего диаметра материала по горизонтам слоя

Известно [245], для устранения влияния прибортовых подсосов применение двухступенчатого составного лотка, состоящего из прямолинейного лотка и стреловидной второй ступени. В данной работе, предлагается применение, совместно с составным загрузочным лотком, указанной стреловидной секции, рис. 5.15. Использование последней, наряду с устранением выше указанных подсосов воздуха, позволит повысить концентрацию топлива в прибортовых зонах.

Конструкция стреловидной ступени предусматривает наличие двух щелей по краям секции, ширина которых выбрана на основании данных, полученных при исследовании газопроницаемости шихты по ширине паллеты, где зона прососов воздуха составляла 250-300 мм от стенок

спекательных тележек. Стреловидная форма второй ступени обеспечивает перенос части шихты в сторону разгрузочных щелей. Шихта, выходя через щели, формирует утолщение 250 мм вдоль бортов на 50 мм выше основного слоя шихты (400-500 мм). Уплотнение боковых утолщений слоя шихты до заданной высоты, обеспечивается гладилкой с давлением 0,01-0,02 МПа.

Результаты приведенных исследований динамики процесса формирования слоя полидисперсной шихты позволили определить тип и конструктивные характеристики лотка, обеспечивающего максимально близкое к требуемому распределение гранулометрического состава железорудной шихты для условий МК «Запорожсталь».

Опыт использования составного лотка [246] свидетельствует о эффективности его применения. Таким образом, необходимо провести активные эксперименты с целью определения влияния работы предложенного лотка на производительность процесса агломерации.

#### 5.2.1. Выбор системы для загрузки полидисперсной бокситовой шихты

Система загрузки бокситовой шихты на агломерационную машину должна обеспечивать равномерное распределение материала по ширине паллеты. В противном случае, через участки слоя с меньшим сопротивлением проходит большее количество воздуха и производительность машины снижается. У бортов паллет, где сопротивление движению воздуха меньше, чем по середине, необходимо сосредоточить большее количество шихты. Кроме того, сформированный спекаемый слой должен обладать минимальным газодинамическим сопротивлением, последнее достигается соответствующим распределением гранул шихты различной крупности по высоте.

При загрузке шихты на спекательные тележки, должно происходить ее расслоение по крупности. Таким образом, чтобы крупные частицы скатывались к основанию формирующегося слоя, а мелочь сосредотачивалась в его верхней части. Последнее обусловлено тем, что химический состав различных по крупности комочков шихты не одинаков, мелкая фракция содержит больше углерода, чем крупная. Сосредоточение твердого топлива в верхней части спекаемого слоя, испытывающего недостаток тепла, способствует выравниванию температурного режима процесса по высоте, а получаемая сегрегация материала приводит к улучшению газопроницаемости слоя шихты подготовленной к спеканию.

Исследование системы загрузки бокситовой шихты, для условий комбината «Запорожский абразивный комбинат», представляющей собой барабанный питатель, позволили сделать вывод о низкой сегрегации фракций материала по высоте паллеты, рис. 5.17.

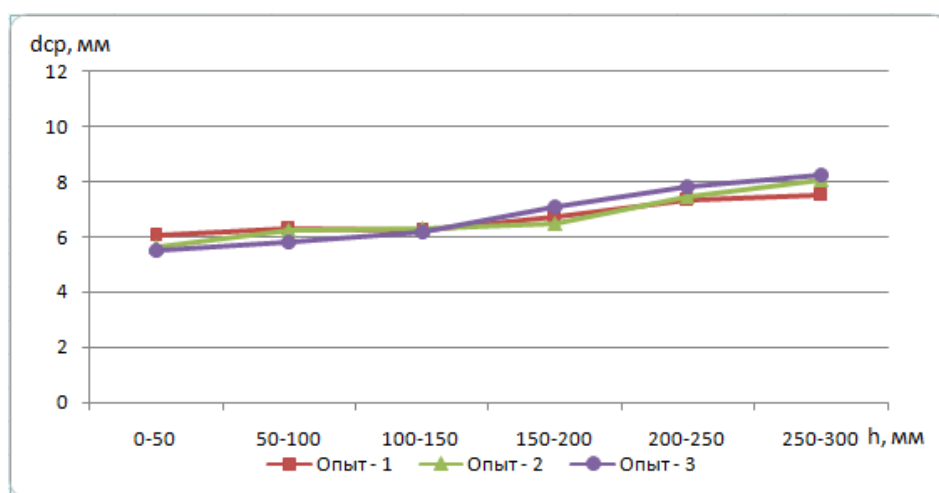


Рис. 5.17. Изменение среднего диаметра частиц по высоте слоя для условий ПАО «ЗАК»

Приведенные выше исследования динамики процесса формирования слоя полидисперсной шихты, позволили произвести расчет распределения гранулометрического состава бокситовой шихты при использовании существующей системы загрузки – барабанный питатель без лотка, и с

использованием вибрационного питателя и прямолинейного и составного лотка соответственно. Результаты приведены на рис. 5.18.

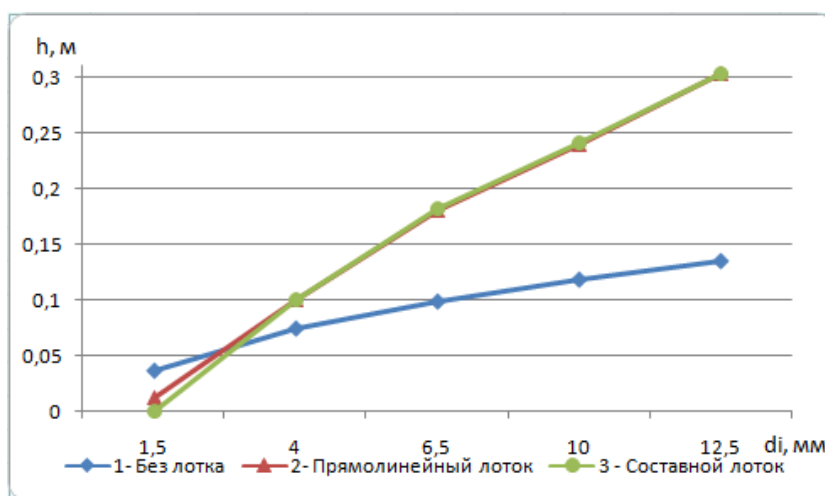


Рис. 5.18. Распределение гранулометрического состава бокситовой шихты при использовании различных загрузочных узлов

Полученное, расчетным путем, распределение фракционного состава материала по горизонтам слоя, рис. 5.19, свидетельствует о том, что применение загрузочных лотков позволяет максимально приблизиться к требуемой сегрегации фракций [247], тем самым обеспечить необходимое распределение топлива и стабилизировать тепловой режим спекания бокситовой шихты.

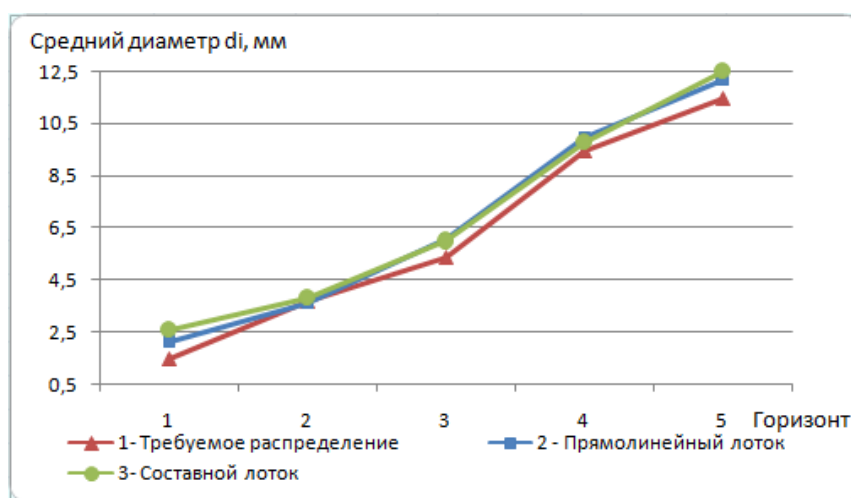


Рис. 5.19. Изменение среднего диаметра частиц шихты по горизонтам слоя

Исходя из того, что полученное распределение  $d_{cp}$  частиц, при использовании составного и прямолинейно лотка имеет несущественное отличие, что вызвано низким слоем 250-300 мм спекаемого материала, отпадает необходимость использования более сложной конструкции двухступенчатого лотка при загрузке бокситовой шихты. Исходя из указанной выше, необходимости в повышенной концентрации топлива в прибортовых зонах паллет, с целью обеспечения равномерного спекания слоя агломерата по ширине, в связи с прибортовыми подсосами воздуха и потерей тепла через стенки спекательных тележек, предлагается использование модифицированной конструкции прямолинейного загрузочного лотка со стреловидной секцией, рис. 5.20.

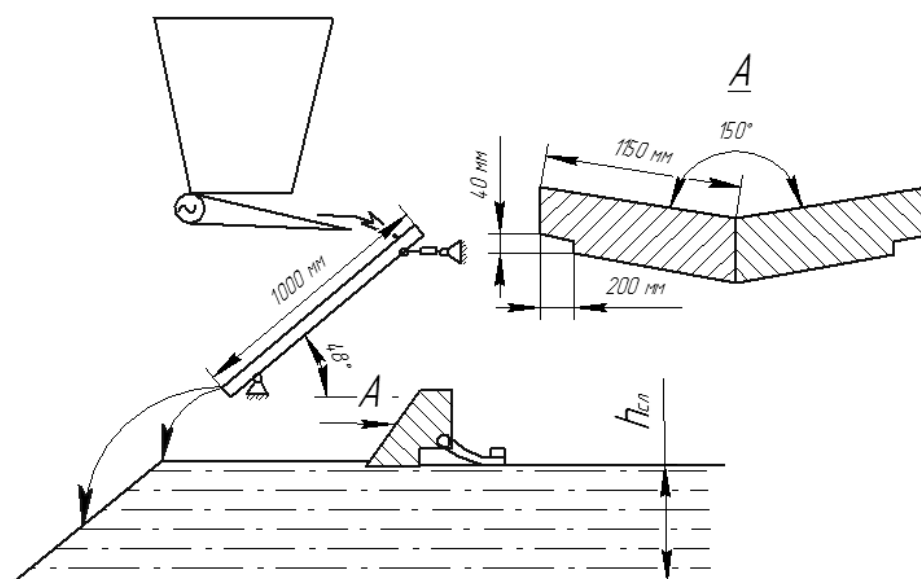


Рис. 5.20. Конструктивные характеристики модифицированного прямолинейного лотка

В результате расчета динамики процесса формирования слоя полидисперсной бокситовой шихты при использовании различных узлов загрузки, определены конструктивные характеристики загрузочного узла. Длина плоскости лотка 1000 мм, угол наклона  $48^\circ$ , что обеспечивает



максимально близкую к требуемой, сегрегацию классов крупности материала.

Помимо предлагаемой модификации лотка, предлагается замена, барабанного питателя на вибрационный, обеспечивающего лучшее разделение классов крупности материала, за счет снижения взаимодействия движущихся в потоке частиц. Последнее позволит более неравномерно распределить твердое топливо по горизонтам слоя, тем самым выровнять температуру зоны горения по высоте спека.

Результаты научных исследований по оптимизации теплового режима спекания бокситового агломерата, проведенных на ПАО «ЗАК» в соответствии с договором №12-1с/2015, внедрены на предприятии в качестве рекомендаций при разработке рациональных режимов работы агломерационной машины с целью повышения производительности процесса и выявления резервов экономии твердого топлива. Внедрение подтверждено соответствующим актом, приведенным в приложении Д.

### 5.2.2. Выбор системы для загрузки сырых железорудных окатышей

В результате анализа существующих загрузочных систем для укладки сырых железорудных окатышей, наиболее близким решением для обеспечения требуемой дифференцированной укладки материала будет применение традиционной загрузочной системы с заменой роликового укладчика на валковый грохот [234], рис. 5.21.

Достоинством грохота приведенной конструкции, является возможность настройки расстояния между валками таким образом, чтобы наиболее крупные частицы сырых окатышей концентрировались преимущественно в верхних горизонтах слоя, тем самым увеличивая время

пребывания последних в зонах высоких температур, а мелкие окатыши укладывались в нижние горизонты.

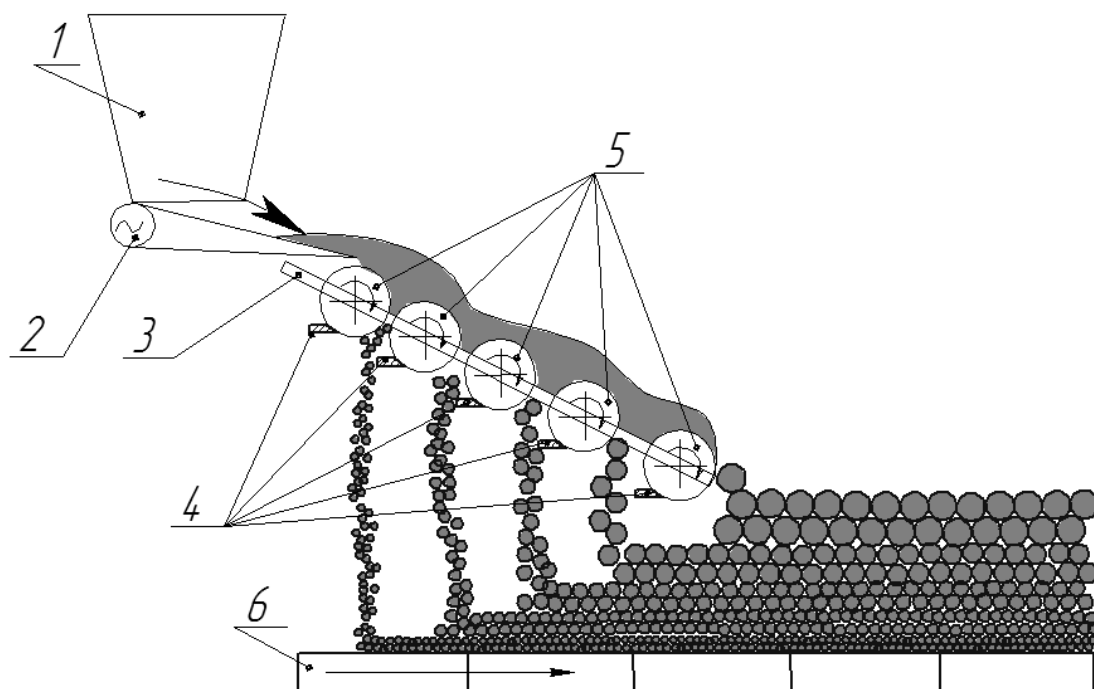


Рис. 5.21. Загрузочная система с применением валкового грохота: 1 – бункер, 2 – вибрационный питатель, 3 – валковый грохот, 4 – валки, 5 – очистные ножи, 6 – паллеты.

Таким образом, возможно обеспечить требуемую сегрегацию сырых окатышей, рис. 4.19 [231], что поспособствует увеличению прочности обожженных гранул и снижению затрат на тягодутьевые средства обжиговой машины за счет повышения порозности слоя и уменьшения его газодинамического сопротивления.

Предложенная автором конструкция загрузочной системы сырых железорудных окатышей с применением валкового грохота защищена патентом Украины на полезную модель №104024.

Результаты научных исследований по исключению неравномерности тепловой обработки железорудных окатышей внедрены в Ассоциации «Центр внедрения энергосберегающих и инновационных технологий», что подтверждено соответствующим актом, приведенным в приложении Е.

### 5.3. Исследование газодинамических характеристик слоя полидисперсной шихты, подготовленной к спеканию

Из теории агломерационного процесса известно, что для обеспечения успешного спекания шихты необходимо организовать интенсивное поступление воздуха в зону горения. Минимальная скорость фильтрации воздуха через слой, при которой возможно протекание реакции горения твердого топлива и образование жидкой фазы, должна составлять не менее  $0,15-0,2 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ .

Агломерационная шихта относится к сыпучим материалам, состоящим из отдельных частиц, контактирующих друг с другом, между которыми находятся межкусковые каналы или поры. Принято считать, что газ в слое сыпучего материала или обтекает отдельные частицы, либо движется по извилистым, переменного сечения, каналам.

Учитывая сложность и многообразие характеристик стационарного слоя полидисперсного материала, для исследования процессов, протекающих в нем, целесообразно последний рассматривать как однородную массу на каком-то конечном участке и использовать обобщенные характеристики, такие как порозность, удельная поверхность, коэффициент газодинамического сопротивления.

Газопроницаемость представляет собой способность элементарного слоя с единичной поверхностью всасывания и высотой пропускать через себя то или иное количество газа в единицу времени, при определенном начальном разрежении под слоем [74].

Исследованиям газодинамики агломерационного слоя посвящена фундаментальная работа Коротича В.И., Пузанова В.П. [186]. Авторами

получено двухчленное уравнение напора, в основу которого положено уравнение Дарси-Вейсбаха и коэффициент газодинамического сопротивления. Изложенная методика использована для количественного анализа газодинамического сопротивления различных зон слоя шихты с различным фракционным составом.

По данным Коршикова В.Г. [82], потеря напора газа в слое пропорциональна содержанию в шихте мелких классов -0,5 мм. Увеличение массовой доли этой фракции от 8 до 24% сопровождается увеличением перепада давления  $\Delta P$  с 10 до 40 кПа. На это же значение растет потеря напора при уменьшении среднегармонического диаметра гранул частиц шихты с 4,5 до 3,25 мм.

В работе [248] Фролов Ю.А. предложил упрощенное уравнение для расчета потерь напора газа в слое шихты. Однако, для его использования необходимо проведение трудоемких экспериментов с целью определения эмпирических коэффициентов, учитывающих сопротивление всего слоя, и установления средних за процесс параметров газового потока.

Зависимость для определения потерь напора от высоты слоя, предложенная Петрушовым С.Н. [22], позволяет учесть влияние усадки слоя, частичного разрушения гранул, неравномерности слоя, содержания концентрата в шихте на газодинамику процесса. Автором установлено процентное соотношение влияния каждой составляющей на газодинамическое сопротивление слоя.

Значительное количество работ посвящено установлению влияния сегрегации на газодинамику агломерируемого слоя. Результаты подавляющего большинства исследований показывают, что сегрегация классов крупности шихты положительно влияет на структуру и газопроницаемость слоя [108, 89]. Лишь некоторые исследователи отмечают вредное влияние сегрегации на распределение тепла и топлива в слое, а так же на его газодинамику [104]. В своих опытах авторы наблюдали

переоплавление поверхности слоя в связи с резким увеличением там содержания твердого топлива. В свою очередь, большое количество расплава, тем более в условиях применения внешнего нагрева, существенно снижало газопроницаемость слоя.

В работах [100, 88] отмечено, что при создании направленной сегрегации грансостава шихты по высоте слоя, обеспечивается повышение прочности агломерата и увеличение производительности агломашин при одновременном сокращении расхода твердого топлива.

Таким образом, можно сделать вывод, что газодинамическое сопротивление слоя оказывает значительное влияние на производительность агломерационного процесса и зависит от гранулометрического состава сырой шихты, укладываемой на паллеты, ее сегрегации по высоте слоя, от типа применяемого загрузочного устройства. В связи с тем, что отечественные металлургические предприятия переходят на спекание шихты в высоких слоях 500 мм и более, исследование газодинамических характеристик слоя полидисперсной шихты является актуальной научной задачей для контроля и управления работой агломерационных машин.

К основным факторам, влияющим на газопроницаемость слоя сыпучих материалов, относится температура, влияющая на основные параметры газового потока – объем, плотность, вязкость. Исходя из того, что для определения потерь давления в массе сыпучих полидисперсных материалов, слой шихты разбивали на участки, данные слои принимались как однородные изотермические.

Наиболее важной газодинамической характеристикой пористого слоя, является его сопротивление, которое складывается из сопротивления трения и местных сопротивлений. Доля местных сопротивлений по отношению к общему значительно выше, а при  $Re > 2000$ , превосходит 95%, поэтому потери в пористом слое  $\Delta P$ , определялись на основании расчета местных сопротивлений при движении газа по каналам. Для описания потерь

давления в слое использована интерпретация общего для всех сыпучих материалов уравнения Дарси-Вейсбаха, описывающего канальное течение газа при наличии трения в канале:

$$\Delta P = K_{cl} \frac{\omega^2}{2} \rho (1 + \beta T), \quad (5.45)$$

где:  $\omega$  - скорость газового потока, м/с;  $\rho$  - плотность газового потока, кг/м<sup>3</sup>;  $\beta$  - коэффициент объемного расширения газа (0,003661 K<sup>-1</sup>);  $T$  - температура газа, К;  $K_{cl}$  - коэффициент, комплексно учитывающий влияние неопределенности форм и размеров пор.

$$K_{cl} = 4\psi_{cl} \frac{H}{d_p}, \quad (5.46)$$

где:  $\psi_{cl}$  - коэффициент газодинамического сопротивления, (Па·м·с<sup>2</sup>)/кг;  $H$  - высота слоя, м;  $d_p$  - эквивалентный диаметр пор, м.

При расчетах потерь давления в реальных условиях использованы экспериментальные значения  $\psi_{cl}$ . Последние получены в условиях лаборатории комбината МК «Запорожсталь». Опытная установка представляет собой спекательную чашу в виде усеченной пирамиды размером 0,5x0,5x1,2 м, толщина стенок 3 мм, заполненной полидисперсной шихтой, лежащей на колосниковой решетке и эксгаустера, создающего разрежение под слоем.

Предварительно шихта рассеивалась на фракции размером: -3, 3-5, 5-8 и +8 мм. Изначально опыты проводились как с чистыми фракциями, так и с комбинированными попарно. На следующем этапе комбинировались все 4 фракции, их состав в смеси задавался, исходя из того, что определяющей при вычислении сопротивления является фракция -3 мм. Ее количество

относительно массы всей смеси изменялось с 10 до 60%. Изменение остальных составляющих смеси представлено в табл. 5.1.

Таблица 5.1.

### Содержание фракций полидисперсной шихты

№	Фракции, %				d <sub>ср</sub> , мм
	Ф1(-3, мм)	Ф2(3-5, мм)	Ф3(5-8, мм)	Ф4(+8, мм)	
1	10	30	30	30	6,3
2	20	20	30	30	6,05
3	25	25	25	25	5,5
4	30	30	30	10	4,6
5	40	25	25	10	4,225
6	50	20	20	10	3,85
7	60	20	10	10	3,35

При проведении экспериментов фильтрующая среда (воздух  $T = 20^\circ\text{C}$ ) проходила в спекательную чашу, просасываясь сквозь слой шихты сверху вниз и по газоходу, через эксгаустер выбрасывалась в атмосферу. В процессе работы контролировалась скорость фильтрации среды при помощи анемометра и потери давления в слое для каждого режима эксгаустера. На основе полученных данных рассчитан критерий Рейнольдса и соответствующие ему коэффициенты сопротивления слоя  $\psi_{cl}$ .

$$\text{Re} = \frac{\omega \cdot d_s}{\nu(T)}, \quad (5.47)$$

где:  $\nu$  - кинематическая вязкость воздуха, м<sup>2</sup>/с,

$$d_s = \mu \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} d_{cp}, \quad (5.48)$$

где:  $\mu$  - коэффициент формы частиц шихты (для шара  $\mu=2/3$ );  $d_{cp}$  - средний диаметр частиц шихты, м;  $\varepsilon$  - порозность слоя, которая в зависимости от типа укладки может быть описана уравнением Слихтера:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\pi}{6(1 - \cos \gamma) \sqrt{1 + 2 \cos \gamma}}, \quad (5.49)$$

где:  $\gamma$  - угол между прямыми, проходящими через центры шарообразных частиц, град.

Коэффициент газодинамического сопротивления слоя  $\psi_{cl}$ , соответствующий числу Re, вычислялся согласно формулы:

$$\psi_{cl} = \frac{\Delta P d_s}{2H \omega^2 \rho (1 + \beta T)}. \quad (5.50)$$

Результаты исследований сведены в графики критериальных зависимостей  $\psi_{cl} = f(\text{Re})$  для смесей шихты различного фракционного состава, рис. 5.22, 5.23.

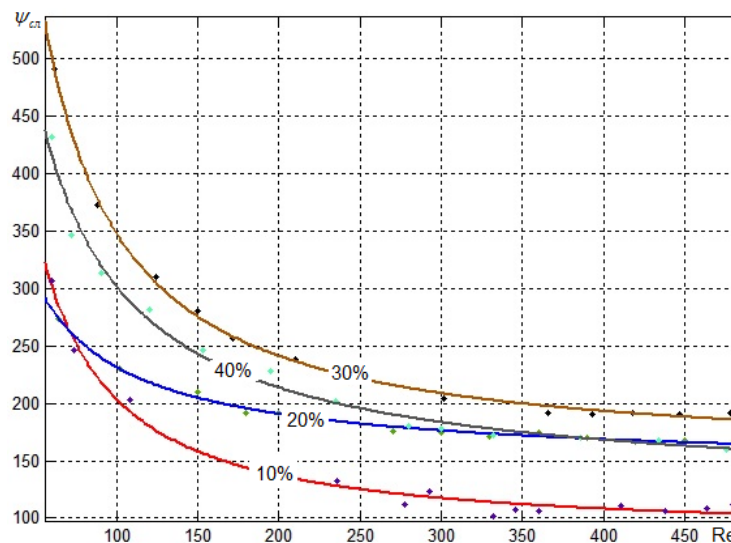


Рис. 5.22. Зависимость  $\psi_{cl} = f(\text{Re})$  для смесей, содержащих 10 – 40% фракции -3 мм



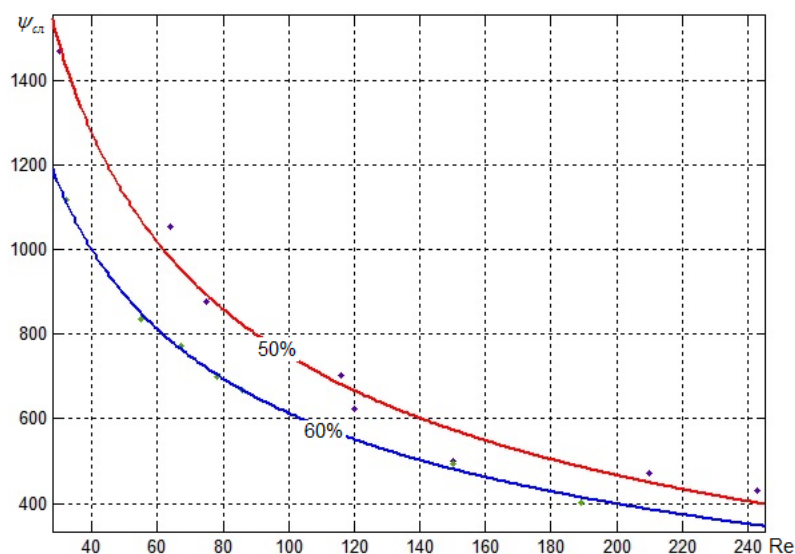


Рис. 5.23. Зависимость  $\psi_{сл} = f(\text{Re})$  для смесей содержащих 50 и 60% фракции -3 мм

В третьем разделе настоящей диссертации получено требуемое распределение фракционного состава шихтовых материалов, подготовленных к спеканию в слое высотой 500 мм. Результаты расчетов газодинамического сопротивления по горизонтам данного слоя приведены на рис. 5.24, 5.25.

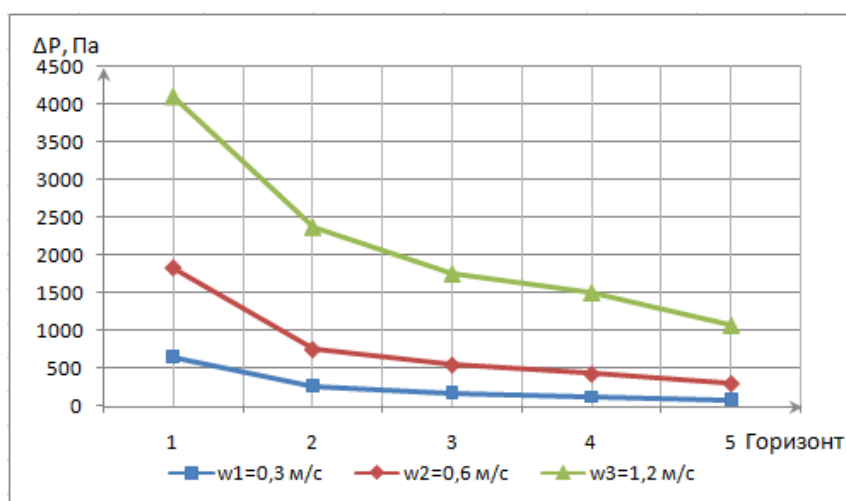


Рис. 5.24. Влияние скорости фильтрации газа на потери давления в горизонте

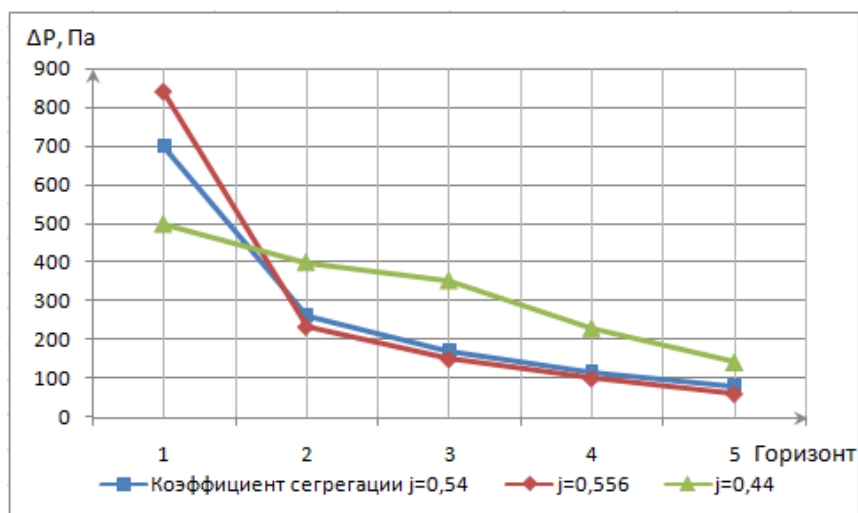


Рис. 5.25. Влияние сегрегации на потери давления в горизонте

Анализ полученных результатов показал, что наравне с сегрегацией гранул по высоте, существенное влияние на газодинамику слоя оказывает скорость движения воздуха и фракционный состав исходной шихты.

Следует отметить, что значительный перепад давления в верхнем горизонте слоя, вызванный повышенной концентрацией (60-80%) мелкодисперсной (-3 мм) окомкованной шихты характерен для сырого слоя без влияния внешнего источника теплоты. При зажигании горном твердого топлива в слое шихты, в ней, за счет испарения влаги, интенсифицируются процессы порообразования, что влечет за собой снижение газодинамического сопротивления верхнего горизонта до 0,55 – 0,60 кПа.

Особый интерес представляет определение газодинамических характеристик колосников. Сопротивление колосников определяется их состоянием и формой. Под состоянием понимается степень засорения колосника частицами и кусочками шихты. Так, исследования, проведенные в [248], показали, что при реальных параметрах газа в свободной от материала решетке потери давления составляют 40...70 Па, а в рабочих условиях аглофабрик этот показатель составляет 0,11...0,47 кПа. При залипании колосника мелочью потери давления возрастают и достигают значения 0,9...1,0 кПа.

Форма колосников влияет следующим образом: сопротивление ромбических колосников на 20...30% меньше, чем прямоугольных, а наибольшим сопротивлением обладает полукруглая в верхней части решетка: потери давления в них достигают 3 кПа.

На агломерационных машинах комбината МК «Запорожсталь» паллеты оборудованы колосниками прямоугольной формы самоочищающейся конструкции. Это позволило обеспечить потери напора в колосниковом поле на уровне 0,20...0,35 кПа.

В связи с вышеизложенным, необходимо иметь в виду, что величина потерь давления в спекательной тележке отражает газодинамическое состояние слоя с определенной долей погрешности. Значение коэффициента сопротивления слоя, определенного для этого значения потерь давления, будет завышено на 20...30 %.

Для учета влияния на газодинамику спекаемого слоя таких факторов, как усадка слоя, частичное разрушение гранул и т.д., использована следующая зависимость [22]:

$$\Delta P_{\text{сум}} = \Delta P \cdot H + \Delta P_1 (H - 1) + \Delta P_2 (H - 2)^2 + \Delta P_3 (H - 3)^3 + G \cdot H, \quad (5.51)$$

где:  $\Delta P_1$  - сопротивление за счет усадки (0,01-0,05), кПа;  $\Delta P_2$  - сопротивление, возникающее при частичном разрушении гранул (0,01-0,03), кПа;  $\Delta P_3$  - сопротивление, учитывающее неравномерность изменения структуры слоя по высоте (0,03), кПа;  $G$  - коэффициент, характеризующий количество мелкой фракции (-3 мм) в шихте (при 20% мелочи  $G=0$ , при 30% -  $G=1$  и т.д.).

Таким образом, общее газодинамическое сопротивление спекаемого слоя высотой 500 мм, изменяется в зависимости от скорости фильтрации воздуха и фракционного состава шихты, и представлено на рис. 5.26, 5.27.

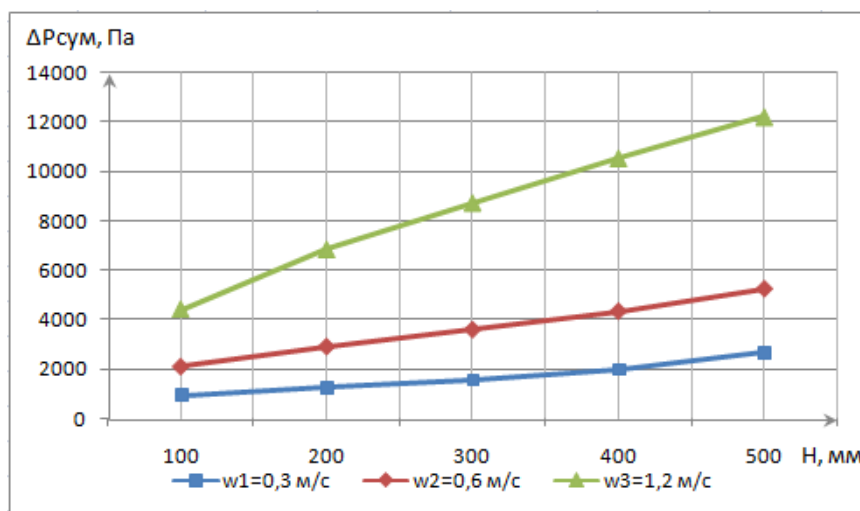


Рис. 5.26. Изменение перепада давления от скорости фильтрации воздуха

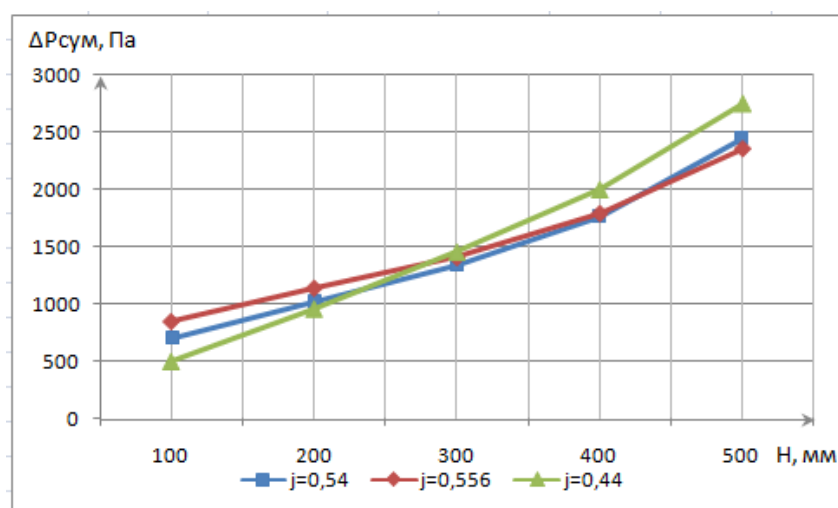


Рис. 5.27. Изменение общего сопротивления слоя от сегрегации шихты

Исходя из результатов исследований, можно сделать вывод, что увеличение скорости фильтрации воздуха через слой спекаемой шихты прямопропорционально увеличивает газодинамическое сопротивление слоя и, как следствие, перегружает тягодутьевое оборудование агломерационной машины и увеличивает расход электроэнергии.

Влияние сегрегации не однозначное. При низком значении коэффициента сегрегации прослеживается минимальное падение  $\Delta P$  в верхнем горизонте 0-100 мм. Однако следует учесть, что при таком распределении фракционного состава не обеспечивается требуемое

содержание твердого топлива в верхних слоях шихты, и как следствие происходит нарушение теплового режима спекания. При высоком значении  $j$ , начальный  $\Delta P$  в верхнем горизонте наибольший, за счет концентрации там мелкой фракции, являющейся основным носителем твердого топлива, что позволяет добиться требуемой температуры спекания, а увеличение содержания крупных фракций шихты в нижних горизонтах снижает общие потери давления в слое.

Проведенные исследования позволили установить зависимости  $\psi_{сн} = f(\text{Re})$  от фракционного состава шихты, определить потери давления в слое высотой 500 мм в зависимости от скорости фильтрации воздуха и сегрегации шихтовых материалов по высоте. Отмечено, что увеличение скорости фильтрации воздуха от 0,3 до 1,2 м/с, увеличивает газодинамическое сопротивление слоя в 5 раз, а усиление сегрегационных процессов в слое позитивно влияет как на тепловой режим спекания, так и на газодинамику слоя.

Результаты исследований создают предпосылки к постановке оптимизационной задачи с разработкой алгоритма управления загрузочным устройством агломашины, с целью формирования слоя шихты с минимальным  $\Delta P$  и требуемым распределением твердого топлива по высоте спекательной тележки.

#### 5.4. Оптимизация структуры слоя агломерационной шихты с целью стабилизации теплового режима процесса спекания

Эффективность работы конвейерных машин в значительной степени зависит от совершенствования технологий шихтоподготовки, окомкования и загрузки шихты на паллеты агломашины, что обуславливает формирование

слоя материала с заданными характеристиками. Последнее обеспечивается за счет использования загрузочных устройств различной конструкции. В свою очередь, эффективное управление формированием слоя шихты обеспечивается только в случае взаимосвязи газодинамических характеристик слоя материала и теплового режима спекания с производительностью процесса.

Опыт эксплуатации отечественных и зарубежных конвейерных машин показал, что отсутствие указанных выше взаимосвязей приводит к тому, что корректировка структуры слоя шихты, подготовленной к спеканию, происходит через значительный интервал времени, после изменения теплового режима и газодинамического состояния слоя.

Отсутствие контроля структурных характеристик материала на паллетах агломашины не позволяет оперативно анализировать изменение распределения химкомпонентов и газодинамики слоя шихты и, следовательно, оперативно корректировать режим загрузки.

Повышения производительности агломерационных машин по кондиционной фракции можно добиться, во первых, за счет обеспечения заданного распределения химического и гранулометрического составов по высоте слоя, что призвано выровнять тепловой режим спекания агломерата, а во вторых, за счет снижения газодинамического сопротивления слоя шихты. Таким образом, при загрузке материала на спекательные тележки необходимо комплексно учитывать влияние сегрегации гранул и газодинамики сформированного слоя.

Исследования газодинамических характеристик слоя шихты при различных условиях формирования его структуры позволили сделать вывод, что потери давления в верхних горизонтах слоя, со структурой оптимальной с точки зрения распределения твердого топлива по высоте, больше чем для исходного материала. Поэтому, с этой позиции, целесообразно снижение сегрегации фракций по высоте формирующегося слоя.

С другой стороны следует отметить, что сегрегационные процессы, влияющие на распределение топлива по высоте слоя, оказывают преобладающее воздействие на металлургические свойства агломерата по сравнению с газопроницаемостью. Таким образом, в качестве критерия оптимальности необходимо выбрать максимальное соответствие оптимальному распределению твердого топлива по высоте спекательной тележки, с целью обеспечения стабилизации теплового режима спекания агломерата, с учетом снижения потерь давления в слое.

Постановку задачи оптимизации представим в виде:

$$\begin{cases} C_{расч}(h) \rightarrow C_{опт}(h); \\ \sum \Delta P \rightarrow \min. \end{cases}$$

При ограничениях:

$$\begin{cases} \Phi_i + \Phi_{i+1} + \dots + \Phi_n = \Phi_{\Sigma}; \\ d_i \Phi_i + d_{i+1} \Phi_{i+1} + \dots + d_n \Phi_n = d_{cp} \Phi_{\Sigma}; \\ \alpha_{\min} \leq \alpha_i \leq \alpha_{\max}; \\ C_{\min} \leq C_i \leq C_{\max}; \\ \sum \Delta P_{\min\_раб} \leq \sum \Delta P \leq \sum \Delta P_{\max\_раб}. \end{cases}$$

где:  $C_{расч}(h)$ ,  $C_{опт}(h)$  - расчетное и оптимальное содержание топлива в слое, %;  $\sum \Delta P$  - суммарные потери давления в слое, Па;  $\Phi_i$  - содержание  $i$ -й фракции, %;  $d_i$  - средний диаметр  $i$ -й фракции, мм;  $d_{cp}$  - средний диаметр частиц слоя, мм;  $\alpha_i$  - угол наклона лотка, град;  $C_i$  - содержание топлива в горизонте, %;  $\sum \Delta P_{\min\_раб}$ ,  $\sum \Delta P_{\max\_раб}$  - диапазон рабочего перепада давления, Па.

Разработанный алгоритм оптимизации структуры слоя агломерационной шихты приведен на рис. 5.28.

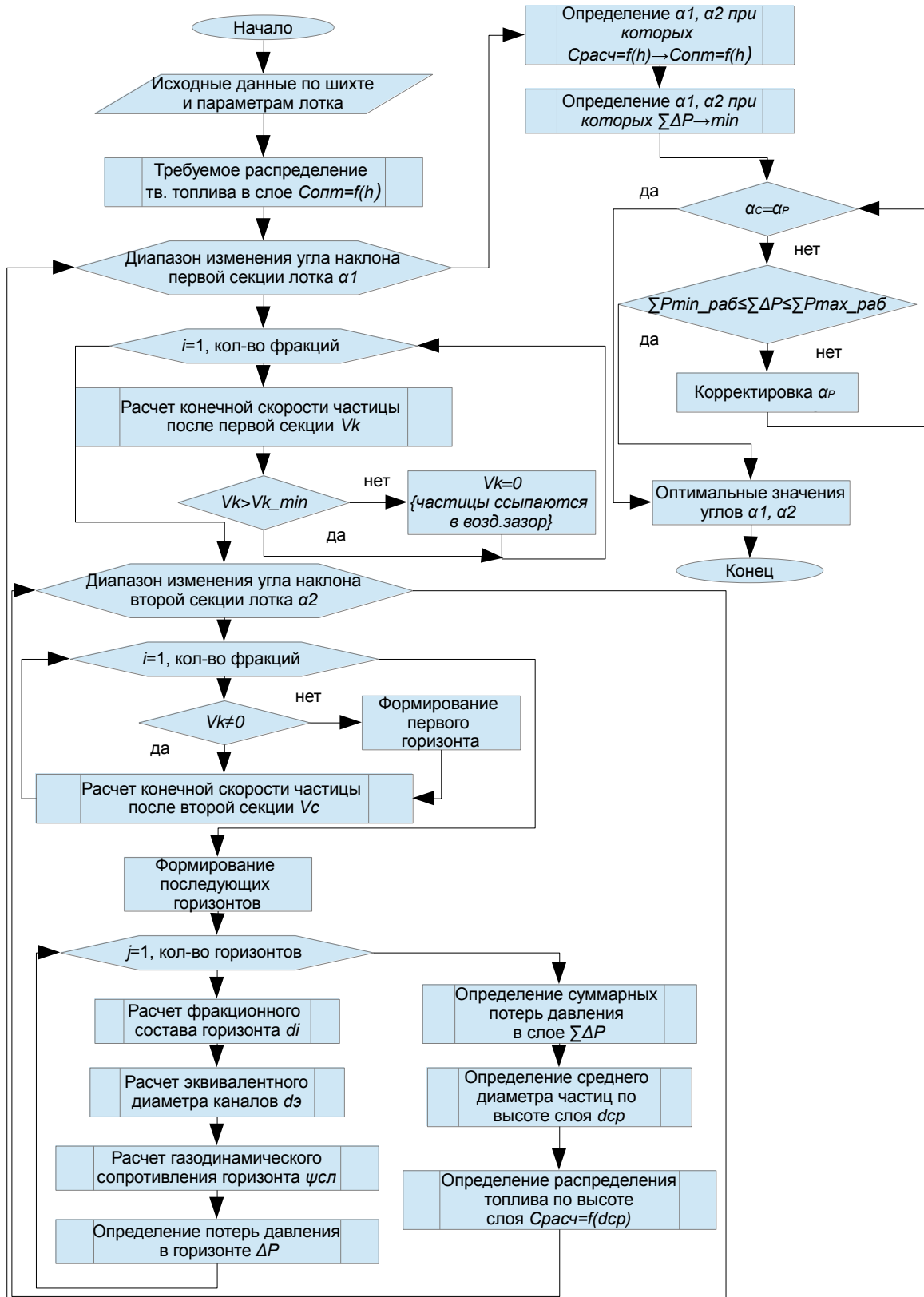


Рис.5.28. Алгоритм расчета управляющих воздействий на загрузочное устройство с целью оптимизации структуры слоя агломерационной шихты.



Исходными данными для расчета режима работы загрузочного узла являются параметры шихтовых материалов – фракционный состав, химический состав, содержание топлива, так же задаются параметры узла загрузки – длины секций лотка, диапазон варьирования углов их наклона, высота и ширина воздушного зазора. На следующем этапе задается оптимальное распределение твердого топлива по высоте слоя.

Оптимизация условий формирования структуры слоя шихты, сводится к расчету величины управляющего воздействия (в наиболее распространенном случае – углы наклона загрузочного лотка), обеспечивающего заданную сегрегацию материала, т.е. требуемое распределение топлива и газодинамику слоя.

После задания исходных данных и требуемого распределения твердого топлива, организовывается внешний цикл по изменению угла наклона первой секции загрузочного лотка  $\alpha_{1i}$ . Внутри данного цикла производится расчет конечных скоростей  $V_{ki}$  для каждой из фракций исходной шихты. Частицы, конечная скорость которых не соответствует условию  $V_k > V_{\min}$ , формируют верхний горизонт слоя, ссыпаясь в воздушный зазор, остальные частицы переходят на второй лоток с углом наклона  $\alpha_{2i}$  (в алгоритме организована соответствующая проверка).

На следующем этапе создается внутренний цикл по изменению угла наклона второй секции загрузочного лотка  $\alpha_{2i}$ . Внутри которого, рассчитываются скорости схода частиц с его поверхности  $V_c$ . Исходя из полученных данных о скоростях движения частиц при соответствующих углах наклона  $\alpha_{1i}$ ,  $\alpha_{2i}$ , производится расчет фракционного состава горизонтов слоя.

Определение потерь давления в горизонтах производится на основании предварительного расчета эквивалентного диаметра каналов и коэффициента газодинамического сопротивления. После расчета параметров по всем

горизонтам осуществляется расчет суммарных потерь давления в слое, изменения среднего диаметра частиц, и распределения твердого топлива по его высоте.

По завершению внутреннего (по  $\alpha_2$ ) и внешнего (по  $\alpha_1$ ) циклов получаем двумерные массивы данных в виде зависимостей  $C_{расч} = f(\alpha_1, \alpha_2)$  и  $\sum \Delta P = f(\alpha_1, \alpha_2)$ . Данные массивы данных обрабатываются с целью определения  $\alpha_1, \alpha_2$  при которых обеспечивается наилучшее совпадение расчетного и оптимального распределения твердого топлива, а так же минимальные потери давления по высоте слоя. Далее с учетом приоритетности требуемого распределения топлива выбираются углы наклона секций загрузочного устройства, обеспечивающие оптимальную структуру слоя агломерационной шихты.

Программная реализация представленного алгоритма осуществлена на языке программирования Object Pascal. Листинг программы приведен в приложении 3 настоящей диссертации.

Исходя из того, что углы наклона секций лотка варьировались в диапазоне  $\alpha_1 (45 \div 58^\circ)$ ,  $\alpha_2 (45 \div 60^\circ)$ , получено 224 комбинации расположения поверхностей загрузочного узла, обеспечивающих соответствующее распределение топлива. Наиболее наглядные результаты расчетов распределения топлива в слое при заданных углах наклона секций лотка представлены на рис. 5.29.

Из полученных результатов видно, что при низких углах наклона сегрегационные процессы в слое протекают слабо, за счет того, что крупные частицы не приобретают достаточной кинетической энергии для их концентрации в нижних горизонтах слоя.

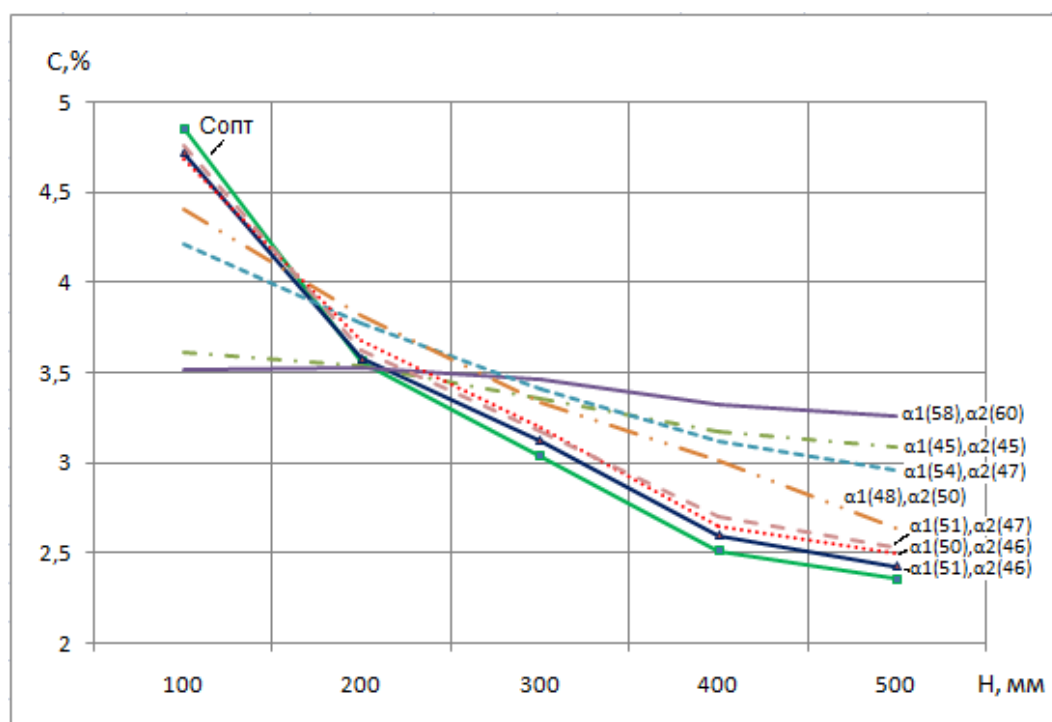


Рис.5.29. Результаты расчетов распределения топлива в слое.

В свою очередь, большие значения углов наклона лотков, влекут за собой движение частиц шихты в режиме скольжения, что так же пагубно сказывается на сегрегации классов крупности частиц и как следствие, наблюдается практически равномерное распределение топлива по высоте слоя. Наилучшее соответствие оптимальному распределению топлива обеспечивается при значениях углов наклона загрузочного устройства  $\alpha_1$  ( $51^\circ$ ),  $\alpha_2$  ( $46^\circ$ ).

Результаты расчетов потерь давления в слое при использовании всех комбинаций углов наклона секций загрузочного лотка, представлены на рис. 5.30, 5.31.

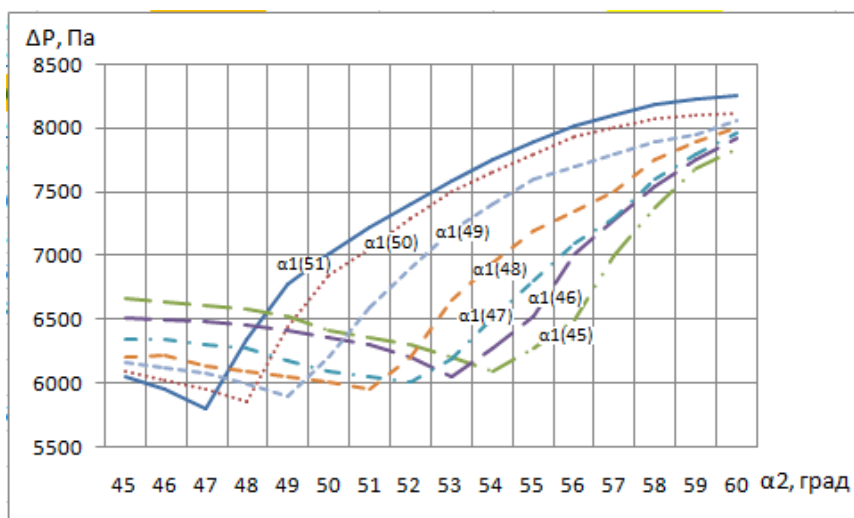


Рис.5.30. Потери давления в слое при изменении  $\alpha_1$  (45÷51°)

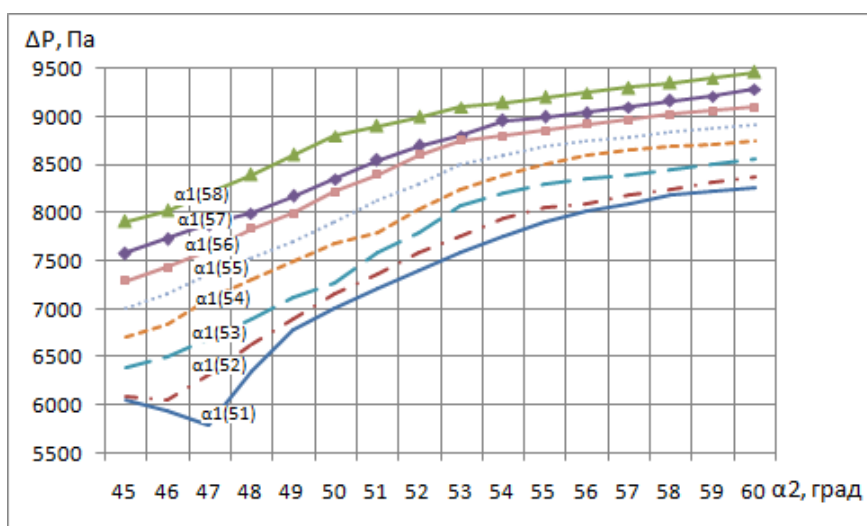


Рис.5.31. Потери давления в слое при изменении  $\alpha_1$  (51÷58°)

Исходя из результатов расчетов, можно сделать вывод, что минимальные потери давления в слое обеспечиваются при комбинации углов наклона составного загрузочного лотка  $\alpha_1$  (51°),  $\alpha_2$  (47°). Так же, очевидно, что дальнейшее увеличение углов наклона секций лотка ухудшает сегрегационные процессы в слое и, следовательно, его газодинамику. Последнее вызвано тем, что средние и крупные частицы, движущиеся с высокими скоростями, увлекают за собой в нижние горизонты мелкие фракции, в результате чего уплотняется структура загружаемого слоя.

Таким образом, разработанный алгоритм управления загрузочным устройством агломашины с целью формирования оптимальной структуры слоя шихты подготовленной к спеканию, позволил установить оптимальные значения углов наклона секций составного загрузочного лотка  $51^\circ$  и  $47^\circ$  соответственно, обеспечивающих наилучшее соответствие требуемому распределению твердого топлива и снижению потерь давления по высоте слоя агломерационной шихты.

#### 5.5. Исследование влияния теплового режима процесса спекания на качественные показатели агломерата

Анализ эффективности предложенных мероприятий по усилению сегрегационных процессов в слое загружаемого материала, за счет использования загрузочного лотка предложенной конструкции, проведен методом активного эксперимента, на «Опытной установке аглоцефа для спекания агломерата» МК «Запорожсталь», рис.5.32.



Рис.5.32. Опытная установка аглоцефа для спекания агломерата

Агломерационная шихта, состав которой приведен в табл.5.2, увлажнялась до 8,5% [257] и окомковывалась в лабораторном окомкователе, рис. 5.33, диаметром 0,8 м. Окомкованная шихта рассеивалась на фракции +12 мм, 12-8 мм, 8-5 мм, 5-3 мм, 3-1 мм, -1 мм, которыми в определенной последовательности, рис. 5.34, заполнялась спекательная чаша.



Рис.5.33. Лабораторный окомкователь

Таблица 5.2.

**Компонентный состав шихты для условий МК «Запорожсталь».**

№	Компонент	кг/т	%
1	Концентрат	478	47,8
2	Аглоруда	282	28,2
3	Известняк	129	12,9
4	Известь	21	2,1
5	Шлам	15	1,5
6	Пыль колошник	13	1,3
7	Отсев агломерата	29	2,9
8	Шлак металлургический	8	0,8
9	Топливо	33	3,3

Заполнение чаши проводилось согласно расчетной зависимости изменения среднего диаметра частиц шихты по горизонтам слоя, при условии использования составного загрузочного лотка, представленной на рис. 5.29.

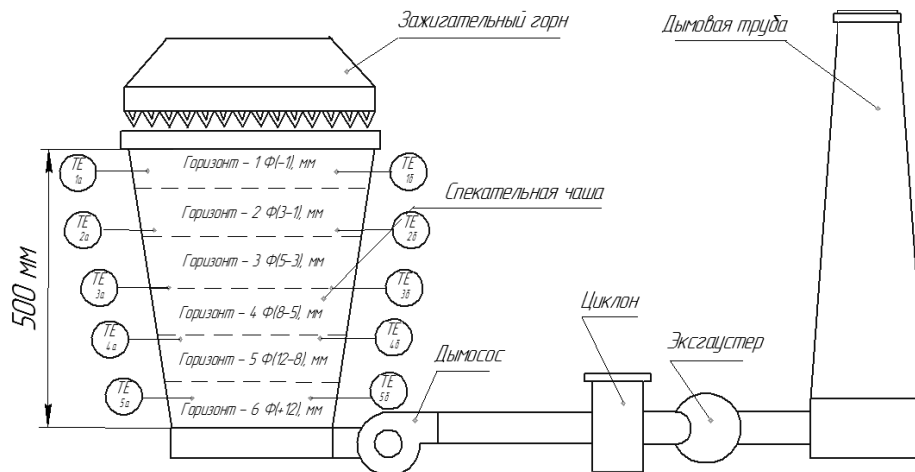


Рис. 5.34. Схема лабораторной установки. ТЕ – термопара.

Распределение топлива и основности, при указанном способе загрузки приведены на рис. 5.35. Общее содержание топлива в шихте составляло 3,3%, и закономерность его распределения максимально приближена к результатам теоретического расчета оптимального распределения твердого топлива по горизонтам слоя [203].

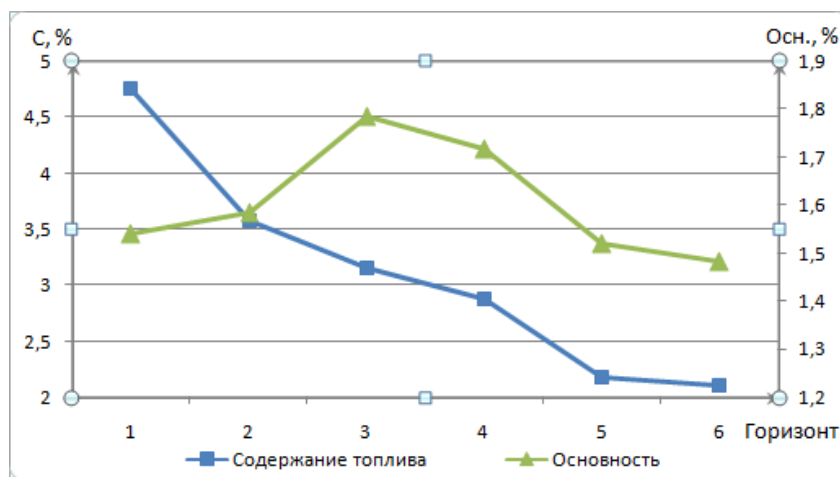


Рис. 5.35. Распределение топлива и основности в слое

Высота слоя загружаемого материала составляла 500 мм, что соответствует условиям работы агломашины №1 предприятия. Зажигание шихты производилось в течении одной минуты, удельный расход воздуха и газа соответствовал условиям работы горна агломашины. Температура зажигания шихты составляла примерно 1250-1300° С. Во время спекания шихты непрерывно производилась регистрация температуры отходящих газов и разрежения под спекаемым слоем.

Измерение температуры зоны горения проводилось группой термопар по пяти горизонтам, результаты представлены на рис. 5.36.

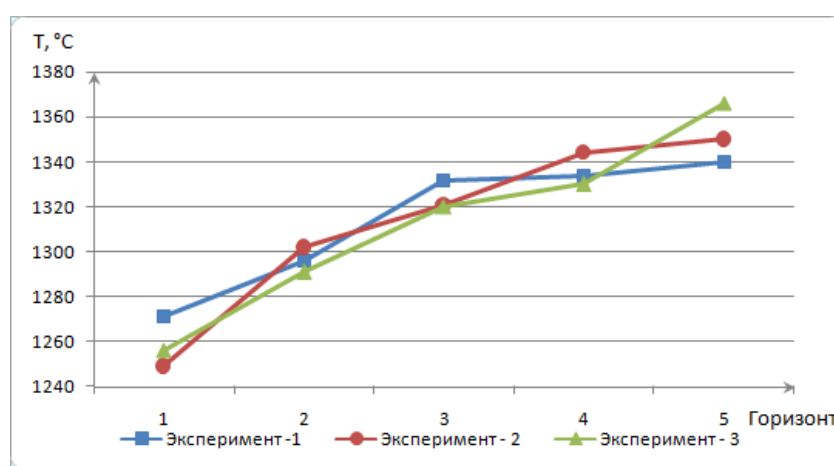


Рис. 5.36. Изменение температуры зоны горения

Из полученных результатов видно, что по горизонтам слоя удалось достичь стабилизации температуры в диапазоне 1250-1360 °С, что позволило исключить переоплавление нижних и недопек верхних горизонтов спекаемой шихты, и тем самым повысить выход годного.

После окончания процесса спекания, готовый агломерат проверялся на прочность и соответствие стандартам качества предприятия, согласно СТП 8.2-05-03. Испытания на механическую прочность проводились во вращающемся барабане, рис. 5.37.





Рис. 5.37. Лабораторный барабан



Рис. 5.38. Большая щековая дробилка

Предварительно проба массой 15 кг и крупностью 5-40 мм, додрабливалась в большой щековой дробилке, рис. 5.38, с последующим рассевом на сите с ячейками размером 5 мм и затем загружалась в барабан.

Испытания агломерата заключались во вращении пробы в течении 8 минут в барабане (ДСТУ 3200-95) со скоростью  $(25 \pm 1)$  об/мин., после чего выгружаемая проба агломерата подвергалась рассеву на ситах с ячейками 5,0 и 0,5 мм. Полученные при расसेве фракции +5 мм, 5-0,5 мм, -0,5 мм взвешивались с точностью 0,1 % от массы испытываемой пробы. Результаты испытаний агломерата на механическую прочность приведены в табл. 5.3.

Таблица 5.3.

**Результаты испытаний агломерата на механическую прочность,  
лаборатория МК «Запорожсталь»**

№	Средний диаметр частиц $d_i$ , мм						$d_{cp}$	$j$	Фракции агломерата после барабана, %	
	Высота слоя, мм								$\Phi(-0,5 \text{ мм})$	$\Phi(+5 \text{ мм})$
	50 $\Phi 1$ (-1)	140 $\Phi 2$ (1-3)	230 $\Phi 3$ (3-5)	320 $\Phi 4$ (5-8)	410 $\Phi 5$ (8-12)	500 $\Phi 6$ (+12)				
1	0,9	3	5,2	7,1	9,8	12	6,33	0,562	7,2	70,9
2	1,1	3,2	5,1	7	9,6	12,2	6,37	0,572	6,9	73,3
3	0,8	3	5,6	7,3	10	11,9	6,43	0,55	7,4	71,4
Базовый агломерат									7,46	68,83

где:  $j$  – коэффициент сегрегации.

$$j = \frac{h_{cp}}{h_{cl}}, \quad (5.52)$$

где:  $h_{cp}$  - положение условной частицы с диаметром  $d_{cp}$  в слое относительно уровня засыпи, м ;  $h_{cl}$  - высота слоя шихты, м.

Исходя из приведенных выше результатов, сделан вывод, что предложенная модернизация узла загрузки агломерационной машины, за счет использования составного загрузочного лотка, обеспечивает более неравномерное, по сравнению с текущим, распределение твердого топлива в слое. Предложенные закономерности распределения топлива, при спекании шихты в высоких слоях, 500 мм и более, позволяют стабилизировать тепловой режим процесса спекания. Последнее достигается за счет сосредоточения топлива, в основном, в верхней половине слоя 61,6 %, что устраняет дефицит тепла в верхних и его переизбыток в нижних горизонтах, тем самым влияя на производительность процесса.

Результаты экспериментов, позволили сделать вывод, что при использовании загрузочного лотка предложенной конструкции (патент Украины №110975), улучшаются сегрегационные процессы в слое, количество фракции -3 мм в верхних горизонтах слоя (0-100 мм) увеличилось с 54,3 % до 59,6 % по сравнению с действующей на предприятии схемой загрузки. Среднее содержание топлива на этих горизонтах возросло с 3,8 %, при использовании схемы барабанный питатель – загрузочный лоток, и 4,4 % при схеме вибрационный питатель – загрузочный лоток, до 4,76 %, при условии сокращения общего содержания твердого топлива в шихте с 3,6-3,8 % до 3,3 %.

Результаты испытаний свидетельствуют, что стабилизация теплового режима процесса спекания, позволила повысить механическую прочность и выход годного на 4,22 %. Полученное сокращение потребления коксика, при сохранении качественных показателей процесса спекания, потенциально

позволит экономить до 547,12 тыс. грн. в год с шести агломашин, для условий аглофабрики предприятия, что подтверждено расчетом технико-экономического обоснования, утвержденного руководством комбината, приложение Г.

По результатам работ получен акт о внедрении методики оптимизации теплового режима процесса производства железорудного комбината в условиях МК «Запорожсталь», приложение В.

#### 5.6. Влияние структуры слоя агломерационной шихты, подготовленной к тепловой обработке на количество вредных выбросов в атмосферу

Одним из основных источников загрязнения атмосферы предприятиями черной металлургии является агломерационное производство. Среднегодовая величина вредных выбросов в воздушный бассейн в процентном соотношении от общих выбросов составляет: по серным газам  $SO_2$  (46,7%), по монооксиду углерода  $CO$  (54,5%), по оксидам азота  $NO_x$  (20,4%), по выбросам пыли (16,8%) [139].

Образование пыли в аглопроизводстве происходит на всех этапах процесса, с момента шихтоподготовки до грохочения спека при перегрузках, транспортировке и спекании шихтовых материалов. Основной объем выделения вредных веществ, выбрасываемых в атмосферу, в состав которых входят  $SO_2$ ,  $CO$ ,  $NO_x$ , наблюдается на этапе спекания аглошихты.

В связи с ростом загрязнения окружающей среды промышленностью и увеличением штрафов для предприятий за выбросы вредных веществ, что сказывается на себестоимости получаемой продукции, актуальным становится вопрос разработки мероприятий, направленных на сокращение пылегазовых выбросов при агломерации.

Вопросам определения величины и сокращения объемов выбросов, в зависимости от условий технологического процесса и конструкции агломерационной машины, посвящено ряд работ. Такими учеными, как Андоньев С.М., Толочко А.И. и др. [136, 253], предложены зависимости для приближенного расчета содержания в агломерационных газах сернистого ангидрида и оксидов углерода, а так же ряд технических решений по очистке газов.

В работе [254], проведены исследования по установлению влияния скорости фильтрации воздуха и крупности частиц топлива на объемы выделения  $CO_2$  при агломерации.

В работе [255], предложена методика расчета состава аглогазов на выходе из зоны горения, приведены результаты расчетов для ряда агломерационных фабрик СНГ. Следует отметить, что при применении указанной методики, как и для использования зависимостей, представленных в [256], необходимо наличие значительного количества экспериментальных данных с технологического объекта, что затрудняет их практическое применение.

Автором, в работе [165] установлено, что в сложившихся условиях работы агломерационного производства, основное влияние на количество образующихся в процессе спекания вредных соединений оказывают такие факторы как: высота слоя и расход топлива на спекание. На основании лабораторных исследований сделан вывод, что объем выделения вредных веществ зависит от теплового режима процесса спекания, а общее количество выбросов – от протекающих в агломерационном слое окислительно-восстановительных процессов. Установлено, что увеличение высоты спекаемого слоя и сокращение потребления твердого топлива позитивно влияют на снижение выбросов вредных соединений.

Результаты изучения вредных выбросов при агломерации, представленные в [261], свидетельствуют о том, что сокращения выбросов

можно добиться при радикальном сокращении потребления твердого топлива на процесс спекания шихты. Таким образом, чем меньше сжигается топлива, тем меньше образуется продуктов горения, удаляемых в атмосферу.

Целью исследования является определение удельных выбросов вредных газов по высоте спекаемого слоя, при условии формирования требуемой структуры шихтового материала, подготовленного к спеканию.

Преобладающее влияние на условия протекания агломерационного процесса и качественные характеристики агломерата, оказывает структура подготовленного к спеканию слоя железорудного материала и закономерности распределения по его высоте топлива и химических компонентов.

Усиление сегрегационных процессов в слое загружаемого шихтового материала при использовании составного загрузочного лотка, позволило обеспечить увеличение неравномерности распределения твердого топлива и отдельных химических компонентов по слою. Зная изменение среднего диаметра частиц шихты по высоте спекательной тележки, рис. 5.39 [242], на основании функциональных зависимостей, полученных в [203], возможно рассчитать содержание твердого топлива и химических компонентов в горизонтах слоя шихты.

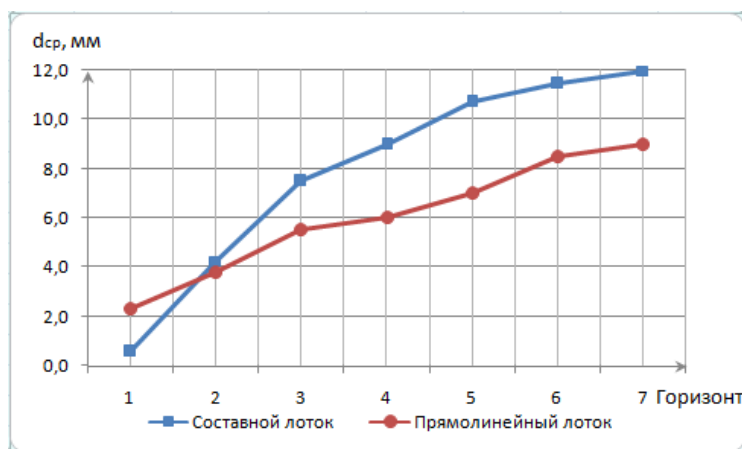


Рис. 5.39 Изменение среднего диаметра частиц шихты по горизонтам слоя при использовании для загрузки прямолинейного и составного лотков

Таким образом, на основании зависимостей [139], можно реализовать приближенный расчет количества вредных выбросов агломерационного производства при стандартном, с использованием вибрационного питателя и отражательного листа (прямолинейного лотка), и предлагаемом, с использованием вибрационного питателя и составного лотка, способах загрузки шихтовых материалов.

Общее количество продуктов горения, образующееся при агломерации шихты, может быть определено из уравнения [139]:

$$V_G = \frac{100}{21} (C_u - C_a - C_n) \frac{n \cdot 0,5 \cdot 22,4}{\mu_C} \cdot \frac{2 + \alpha}{1 + \alpha}, \quad (5.53)$$

где:  $C_u$  - количество углерода в шихте, кг;  $C_a$  - количество углерода в агломерате, кг;  $C_n$  - количество углерода, унесенное пылью, кг;  $n$  - коэффициент избытка воздуха;  $\alpha$  - отношение процентных содержаний  $CO$  и  $CO_2$  в газе, зависящее от расхода топлива;  $\mu_C$  - молекулярная масса углерода, кг/моль.

Следует отметить, что количество горючего углерода  $C_u$ , за счет усиления сегрегации при предлагаемом способе загрузки, удалось сократить с 3,6-3,8% до 3,3% [250].

Для приближенного определения удельных выбросов окиси углерода и углекислого газа с точностью до 15-20% воспользуемся формулами [139]:

$$V_{CO} = \chi_{CO} (C_u - C_a - C_n) \frac{\mu_{CO}}{\mu_C}, \quad (5.54)$$

$$V_{CO_2} = \chi_{CO_2} (C_u - C_a - C_n) \frac{\mu_{CO_2}}{\mu_C}, \quad (5.55)$$

где:  $\mu_{CO}$ ,  $\mu_{CO_2}$  - молекулярные массы окиси углерода и углекислого газа соответственно, кг/моль;  $\chi_{CO}$ ,  $\chi_{CO_2}$  - доля углерода, перешедшего в  $CO$  и  $CO_2$ ;

$$\chi_{CO} = \frac{1}{1+\alpha}; \chi_{CO_2} = \frac{\alpha}{1+\alpha}.$$

В процессе спекания агломерата сера переходит в газ из шихты в виде сернистого ангидрида. Выгорание серы при агломерации и степень обессеривания шихты зависит от минералогического состава сырья и содержания твердого топлива в шихте. Сегрегация шихтовых материалов по высоте слоя, так же имеет немаловажное влияние на количество выбросов  $SO_2$ . На основании [182] установлено, что содержание  $S$ , как и  $C$ , в мелких фракциях выше, чем в более крупных. За счет преимущественной концентрации мелких фракций в верхних горизонтах слоя, при спекании аглошихты, степень обессеривания будет снижаться, по причине повышенного содержания здесь твердого топлива. В результате, в зоне горения увеличивается количество железистых и силикатных расплавов, в которых растворяется большое количество  $FeS$ .

Содержание сернистого ангидрида в агломерационных газах, с точностью до 10-15%, можно рассчитать по формуле [139]:

$$V_{SO_2} = 2(S_{ш} - S_a - S_n), \quad (5.56)$$

где:  $S_{ш}$  - сера шихты, кг/т агломерата;  $S_a$  - сера агломерата, кг/т агломерата;  $S_n$  - сера, увлекаемая пылью, кг/т агломерата.

Результаты расчетов выделения  $CO$  и  $SO_2$  по высоте спекаемого слоя, при использовании прямолинейного и составного лотков для загрузки шихты, представлены на рис. 5.40, 5.41.

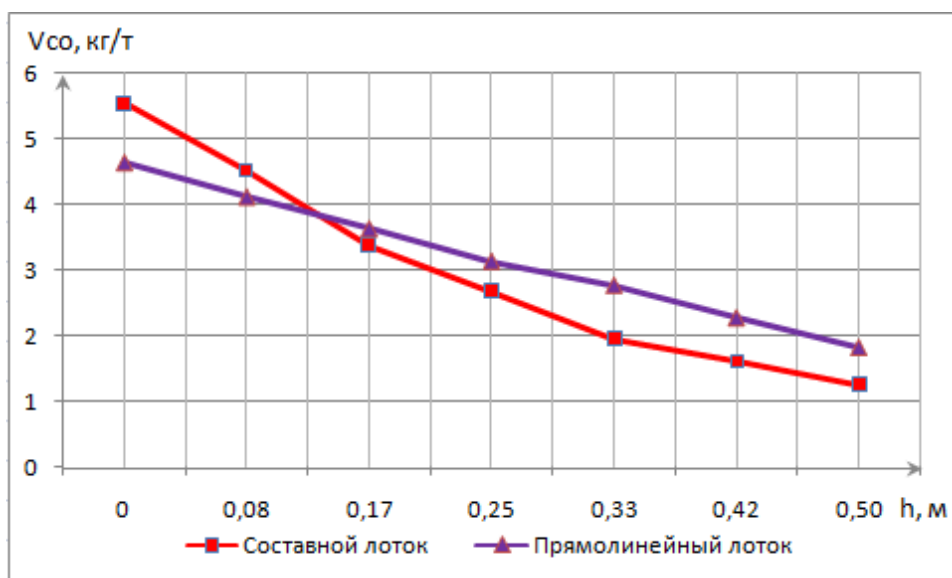
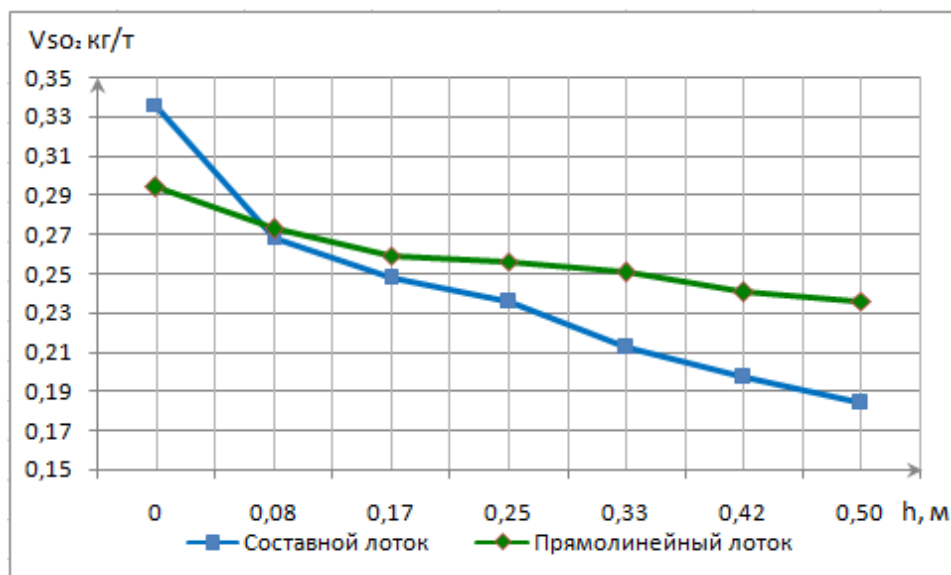


Рис. 5.40. Удельные выбросы CO по высоте слоя

Рис. 5.41. Удельные выбросы SO<sub>2</sub> по высоте слоя

Из представленных графиков видно, что на начальных этапах спекания, за счет концентрации в верхних горизонтах слоя мелких фракций шихты, последнее необходимо для обеспечения требуемого температурного режима спекания, наблюдается наибольшее образование вредных соединений, с последующим их сокращением при движении зоны горения к колосникам.

Общие выбросы CO, CO<sub>2</sub> и SO<sub>2</sub> по слою представлены на рис. 5.42.



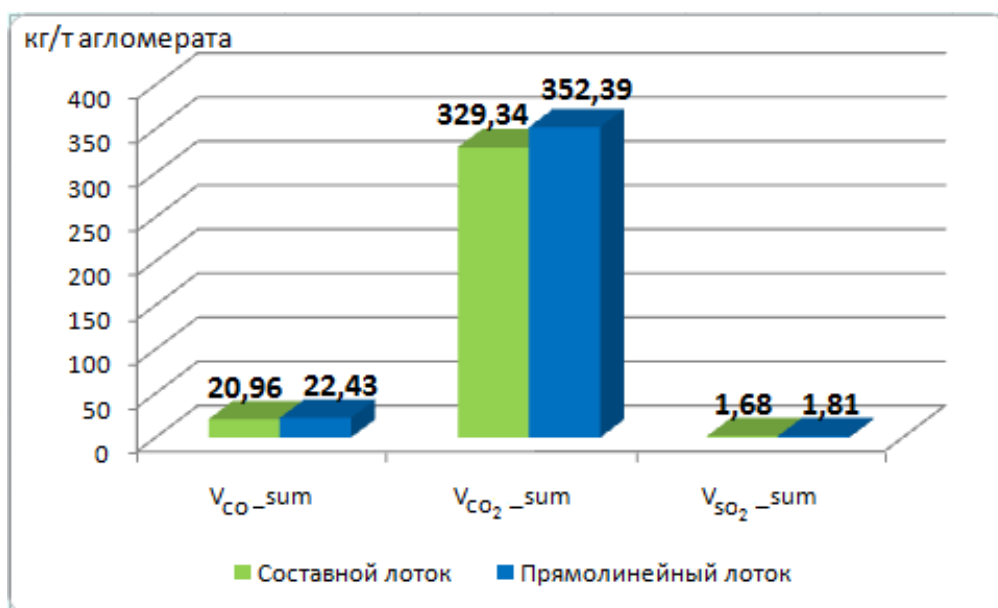


Рис. 5.42. Общее количество выбросов вредных газов при использовании различных загрузочных узлов

Приведенные в работе расчеты выбросов вредных веществ ( $CO$ ,  $CO_2$ ,  $SO_2$ ) агломерационного производства, позволяют сделать вывод о положительном влиянии сегрегации на сокращение количества газовой выделений. Формирование структуры слоя шихты, подготовленной к спеканию с использованием составного загрузочного лотка, позволяет обеспечить усиление сегрегационных процессов в слое с общим сокращением содержания топлива в шихте с 3,6-3,8% до 3,3%. При этом выбросы  $CO$  сокращаются на 6,55% (отн.),  $CO_2$  на 6,54% (отн.) и  $SO_2$  на 7,18% (отн.).

Соотношение объемов  $CO:CO_2$  в отходящих газах за счет увеличения полноты сгорания углерода и общего сокращения его содержания удалось снизить с 0,63651% до 0,63642%.

## 5.7. Выводы к разделу 5

1. Предложена методика исследования динамики процесса формирования слоя полидисперсного сыпучего материала подготовленного к спеканию. Рассмотрен случай загрузки шихты системами вибрационный питатель – прямолинейный лоток и барабанный питатель – прямолинейный лоток. Установлено, что движение частиц материала должно происходить в режиме чистого качения. Последнее обусловлено тем, что только в этом режиме происходит разделение частиц различного размера по скорости их схода с загрузочного лотка, тем самым обеспечивая сегрегацию материала по классам крупности. Получены ограничения, определяющие режим движения частиц шихты по загрузочному лотку.

Установлено, что прямолинейный лоток не подходит для условий спекания агломерационной шихты в высоких слоях, что создает необходимость выбора типа загрузочного устройства, способного обеспечить требуемую сегрегацию фракций материала.

2. Определены значения коэффициентов трения качения и скольжения по стали и шихте. Использование указанных коэффициентов, в составе уравнений характеризующих распределение частиц по высоте формирующегося слоя, позволяет анализировать влияние на формирование слоя полидисперсных материалов таких параметров, как физико-механические свойства шихты, угол наклона и длина загрузочного лотка.

3. Исследована динамика процесса формирования слоя полидисперсного сыпучего материала при использовании различных узлов загрузки, в комплекте с вибрационным питателем. Установлено диапазон изменения параметров рассматриваемых лотков, для их эффективной работы. Сделан вывод, что применение составного загрузочного лотка, является наиболее эффективным для обеспечения требуемого распределения фракций

материала, и, как следствие, необходимого распределения твердого топлива по горизонтам шихты подготовленной к спеканию, что обуславливает возможность стабилизации теплового режима процесса спекания.

Предложена модификация составного загрузочного лотка с дополнительной стреловидной секцией (патент Украины №110975), призванной снизить влияние прибортовых прососов воздуха на тепловой режим спекания. Определены конструктивные характеристики загрузочного узла.

4. Выбран тип и конструктивные характеристики загрузочных узлов бокситовой шихты и сырых железорудных окатышей (патент Украины №104024) с целью обеспечения требуемого распределения гранулометрического состава материала, позволяющего стабилизировать тепловой режим его обработки.

5. Установлено изменение коэффициента газодинамического сопротивления от фракционного состава полидисперсной шихты. Определены потери давления в слое высотой 500 мм в зависимости от скорости фильтрации воздуха и сегрегации шихтовых материалов по высоте. Установлено, что увеличение скорости фильтрации воздуха от 0,3 до 1,2 м/с, увеличивает газодинамическое сопротивление слоя в 5 раз, а усиление сегрегационных процессов в слое позитивно влияет как на тепловой режим спекания, так и на газодинамику слоя.

6. Разработан алгоритм управления загрузочным устройством агломашины с целью формирования оптимальной структуры слоя шихты подготовленной к спеканию.

Результаты расчетов позволили установить оптимальные значения углов наклона секций составного загрузочного лотка  $\alpha_1$  (51°),  $\alpha_2$  (47°), обеспечивающих наилучшее соответствие оптимальному распределению твердого топлива и снижение потерь давления по высоте слоя агломерационной шихты.

7. Анализ результатов активного эксперимента по спеканию агломерата, позволил сделать вывод, что при использовании загрузочного лотка предложенной конструкции, улучшаются сегрегационные процессы в слое, количество фракции -3 мм в верхних горизонтах слоя (0-100 мм) увеличилось с 54,3 % до 59,6 % по сравнению с действующей на предприятии схемой загрузки. Среднее содержание топлива на этих горизонтах возросло с 3,8 %, при использовании схемы барабанный питатель – загрузочный лоток, и 4,4 % при схеме вибрационный питатель – загрузочный лоток, до 4,76 %, при условии сокращения общего содержания твердого топлива в шихте с 3,6-3,8 % до 3,3 %.

Результаты испытаний свидетельствуют, что стабилизация теплового режима процесса спекания, позволила повысить механическую прочность и выход годного на 4,22 %. Полученное сокращение потребления коксика, при сохранении качественных показателей процесса спекания, потенциально позволит экономить до 45 млн. грн. в год с шести агломашин, для условий аглофабрики предприятия (по состоянию цен на энергоносители на 09.2016 г.).

8. Установлено, что формирование структуры слоя шихты, подготовленной к спеканию с использованием составного загрузочного лотка, позволяет обеспечить усиление сегрегационных процессов в слое с общим сокращением содержания топлива в шихте с 3,6-3,8% до 3,3%. При этом выбросы CO сокращаются на 6,55% (отн.), CO<sub>2</sub> на 6,54% (отн.) и SO<sub>2</sub> на 7,18% (отн.).

Основное содержание 5 раздела опубликовано в работах [203, 237, 238, 241- 244, 249-252, 257].

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

На основе развития научных основ теплотехнических процессов окускования сыпучих материалов, выполнено теоретическое обобщение и получено комплексное решение важной научно-прикладной проблемы снижения расхода твердого топлива и повышения выхода годного при агломерации железорудных, бокситовых материалов и обжиге железорудных окатышей за счет формирования слоя подготовленного к тепловой обработке с заданными химико-гранулометрическими характеристиками. Разработана методология расчета конструктивных характеристик загрузочных узлов и оптимального распределения физико-химических компонентов материала, обеспечивающего требуемый тепловой режим термообработки.

1. На основе выполненного анализа научно-технической информации проведено обобщение направлений совершенствования процессов окускования материала на машинах конвейерного типа в вопросах повышения качества продукта, снижения потребления твердого топлива и количества вредных выбросов, образующихся при горении. Обобщение теоретических, экспериментальных и производственных исследований позволило установить, что преобладающее влияние на качественные показатели агломерата и окатышей оказывает структура подготовленного к термообработке слоя материала. Последнее обуславливает закономерности распределения топлива и химических компонентов, а следовательно и интенсивность протекания экзо- и эндотермических реакций в слое и тепловой режим процессов окускования.

2. Реализовано обобщенное математическое описание тепловых процессов в стационарных слоях моно- и полидисперсных материалов с учетом внутренних источников энергии. Установлено влияние структуры слоя на его теплофизические характеристики. Предложено использование

средневзвешенного коэффициента теплопроводности сыпучего материала и установлен интервал варьирования степени влияния  $r_i$  физических величин (температура, влажность, крупность) на его численное значение.

3. Установлено существенное влияние степени разделения классов крупности сыпучего материала, что обусловлено типом загрузочной системы, на неравномерность величины коэффициента теплоотдачи для верхних и нижних горизонтов. При загрузке железорудного материала вибрационным питателем, происходит ослабление связей между частицами сыпучего материала, что усиливает сегрегационные процессы в слое, коэффициент  $\alpha_v$  в данном случае изменяется в пределах 2800...9500 Вт/(м<sup>3</sup>·К). При использовании барабанного питателя, сегрегационные процессы не значительны, в результате наблюдается монотонное снижение величины коэффициента, для случая железорудного материала диапазон изменения  $\alpha_v$  составил 3300...4800 Вт/(м<sup>3</sup>·К), а бокситов 5900...7200 Вт/(м<sup>3</sup>·К). Последнее связано с большим размером частиц бокситового материала.

4. Получили дальнейшее развитие исследования процессов тепловой обработки сыпучих материалов на конвейерных машинах. Анализ тепловых режимов процессов спекания на базе разработанной численной конечно-элементной модели, позволил сделать вывод, что при агломерации железорудной шихты существует рациональная температура зоны горения составляющая 1280 ...1340° С, и 1290...1380° С при агломерации бокситовой шихты, при которой образуется мелкопористый, легковосстановимый агломерат с достаточной прочностью. Стабилизации зоны горения в указанном диапазоне можно добиться за счет обеспечения требуемой сегрегации твердого топлива и химкомпонентов по высоте слоя.

5. Изучен механизм дробления твердого топлива в валковом агрегате, что позволило сделать вывод о необходимости изменения схемы дробления, с целью снижения влияния истирающих нагрузок на измельчаемый материал

и повышения выхода кондиционной фракции 0,5...3,0 мм. Установлено, что природные свойства топлива существенно влияют на выход кондиционной фракции при стабильном режиме дробления. Максимальный выход кондиционной фракции при дроблении коксовой мелочи обеспечивается при производительности 14 т/ч, а антрацитового штыба 12 т/ч.

6. Установлены закономерности содержания химических компонентов от крупности гранул железорудного и бокситового материала путем проведения спектрального анализа. Предложенная в работе методология идентификации гранулометрического состава шихты, позволяет в режиме реального времени оценивать распределение твердого топлива и химкомпонентов по горизонтам слоя.

Обобщены результаты исследований тепловых процессов, протекающих в слое полидисперсных сыпучих материалов. Получена приходная часть теплового баланса высокотемпературной зоны спекания в зависимости от расположения горизонта, с учетом статей: теплота горения топлива 84,5...65,1%, теплота экзотермических реакций 3,1...3,5%, теплота продуктов сгорания, теплота шихты 12,6...31,4%. Это позволило путем решения обратной задачи осуществить расчет рационального распределения твердого топлива по высоте и ширине слоя для процессов агломерации железорудных и бокситовых материалов, обеспечивающих стабилизацию температурного режима спекания и сокращения общего потребления твердого топлива.

7. Развита основы тепловых процессов, протекающих в слое обжигаемых железорудных окатышей, получены закономерности объемов тепловыделения и поглощения теплоты в каждом расчетном единичном объеме, по зонам конвейерной машины. Рассчитано время и количество тепловой энергии, необходимые для обжига одного окатыша, и единичного объема, состоящего из окатышей заданного размера. Установлено, что время термической обработки окатыша с  $d_{cp}=0,01$  м в 8 раз меньше необходимого

времени обработки окатыша с  $d_{cp} = 0,02$  м. Последнее обусловлено тем, что с уменьшением размера окатышей увеличивается их объемная поверхность  $F/V$ , что способствует интенсификации теплообмена.

Установлено, что с целью обеспечения равномерного обжига окатышей различного размера, необходимо обеспечить разделение классов крупности окатышей и их дифференцированную укладку по высоте слоя.

8. Экспериментально исследованы газодинамические процессы, протекающие в высоком (500 мм) полидисперсном слое шихты подготовленной к тепловой обработке. Установлено, что повышение скорости фильтрации воздуха с 0,3 до 1,2 м/с, увеличивает сопротивление слоя в 5 раз, а усиление сегрегационных процессов в слое позволило стабилизировать тепловой режим спекания и снизить газодинамическое сопротивление слоя.

9. Получили обобщение исследования динамики процесса формирования слоя сыпучего материала при использовании различных типов загрузочных устройств. Экспериментально установлены закономерности изменения коэффициентов трения качения и трения скольжения по поверхности лотка и откосу слоя от грансостава материала. Получила дальнейшее развитие методология расчета характеристик загрузочных устройств и предложены их модифицированные конструкции, призванные обеспечить максимально близкое к требуемому распределение фракционного состава материала. Так для условий различных предприятий предложены следующие конструкции загрузочных узлов:

- для аглофабрики ОАО «Запорожсталь» для условий спекания шихты в слое 500 мм, предложено использование составного двухступенчатого лотка со стреловидной секцией (патент Украины №110975);

- для цеха агломерации ПАО «Запорожский абразивный комбинат», где высота спекаемого слоя составляет 250...300 мм, рекомендовано применение одноступенчатого лотка со стреловидной секцией;



- для обжига железорудных окатышей в условиях Центрального горно-обогатительного комбината (ЦГОК) г. Кривой-Рог – валкового грохота с возможностью изменения расстояния между валками (патент Украины №104024).

11. Разработан алгоритм и программное обеспечение для оптимизации структуры слоя агломерационной шихты. Результаты расчетов позволили установить значения углов наклона секций составного загрузочного лотка  $\alpha_1 = 51^\circ$  и  $\alpha_2 = 47^\circ$  соответственно, обеспечивающих наилучшее соответствие требуемому распределению твердого топлива и снижению потерь давления по высоте слоя агломерационной шихты.

12. Результаты экспериментов в условиях аглофабрики ОАО «Запорожсталь», позволили сделать вывод, что при использовании составного загрузочного лотка, улучшаются сегрегационные процессы в слое, количество фракции -3 мм в верхних горизонтах слоя (0...100 мм) увеличилось с 54,3 % до 59,6 % по сравнению с действующей на предприятии схемой загрузки. Среднее содержание топлива на этих горизонтах возросло с 3,8 %, при использовании схемы барабанный питатель – загрузочный лоток, и 4,4 % при схеме вибрационный питатель – загрузочный лоток, до 4,76 %, при условии сокращения общего содержания твердого топлива в шихте с 3,6...3,8 % до 3,3 % (9,81-15,14% отн.).

Результаты испытаний свидетельствуют, что стабилизация теплового режима процесса спекания, позволила повысить механическую прочность и выход годного на 4,22 %. Полученное сокращение потребления коксика, при сохранении качественных показателей процесса спекания, потенциально позволит экономить до 45 млн. грн. в год с шести агломашин, для условий аглофабрики предприятия (по состоянию цен на энергоносители на 09.2016 г.).

12. Предложен подход к формированию структуры слоя шихты, подготовленной к спеканию с использованием составного загрузочного лотка, позволяющий обеспечить усиление сегрегационных процессов в слое с

общим сокращением содержания топлива в шихте, при этом выбросы  $CO$  сокращаются на 6,55% (отн.),  $CO_2$  на 6,54% (отн.) и  $SO_2$  на 7,18% (отн).

Результаты работы, проектные и технические решения, полученные в ходе выполнения диссертации, внедрены:

- в виде методики оптимизации теплового режима процесса производства железорудного офлюсованного агломерата аглофабрики ОАО «Запорожсталь»;

- в проекте разработки рациональных режимов работы агломерационной машины, с целью повышения эффективности процесса агломерации бокситов и выявления резервов экономии твердого топлива цехом агломерации ПАО «Запорожский абразивный комбинат»;

- в виде методики и инструмента для исследования тепловых режимов термообработки железорудных окатышей на машинах конвейерного типа в Ассоциации «ЭНЕРГОИНТЕХ» г. Днепропетровск;

- в учебном процессе при изучении дисциплин «Основы расчетов тепло- массообменных процессов»; «Производственные процессы и оборудование объектов автоматизации»; «Высокотемпературные теплотехнические процессы и установки».

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юсфин, Ю. С. Обжиг железорудных окатышей [Текст]/ Ю.С. Юсфин, Т.Н. Базилевич. М.: Metallurgy, 1973, 272с.
2. Базилевич, С. В. Агломерация [Текст]/ С. В. Базилевич, Е.Ф. Вегман. М.: Metallurgy, 1967, 368с.
3. Ростовцев, С. Т. Зажигание в процессе спекания криворожских железных руд. [Текст]/ С.Т. Ростовцев. С.М. Мееров. – Теория и практика металлургии, 1936, №3. – С. 12-22.
4. Ковальский, Л. А. Расчет зажигательного горна агломерационной машины Дуайт-Ллойда [Текст]/ Л.А. Ковальский. – Урал. Metallurgy, 1938, №7-8. – С. 45-48.
5. Петрушов С. Н. Формирование слоя шихты на агломашине: Курс лекций [Текст]/ С. Н. Петрушов // Алчевск: ДонГТУ. – 2006. – 187 с.
6. Бражников, С. Г. Теплотехника окускования железорудного сырья [Текст]/ С.Г. Бражников, Ю.А. Берман, Я.Л. Белоцерковский. – М.: Metallurgy. 1970. – 343 с.
7. Варгафтик, Н. Б. Теплофизические свойства веществ: Справочник. – М.: Госэнергоиздат, 1956. – 367 с.
8. Сигов, А. А. Агломерационный процесс [Текст]/ А.А. Сигов, В.А. Шурхал. – К.: Техника, 1969. – 232 с.
9. Бабушкин, Н. М. Экспериментальное изучение горения углерода в слое агломерационной шихты [Текст]/ Н.М. Бабушкин, В.Н. Тимофеев. – Сб. науч. тр. ВНИИМТ, 1962, №7. – С. 17-46.
10. Бражников, С. Г. Анализ теплообменных процессов при агломерации методом просасывания [Текст]/ С.Г. Бражников, С.В. Базилевич, Ю.Г. Ярошенко. – Известия вузов. Черная металлургия, 1963, №6. С. 18-21.

11. Shenk H., Wentzel W., Dietrich G. Bedeutung der Warmetransportvorgänge beim Saugzug – Aitering. – Arch. Eisenhüttenw., 1963, 34, #7, S. 493-496.
12. Шурхал, В. А. Внешний нагрев при агломерации [Текст]/ В.А. Шурхал. – Киев, Наукова думка, 1985. – 190 с.
13. Берштейн, Р. С. Пути улучшения качества агломерата [Текст]/ Р.С. Берштейн, С.В. Базилевич// Металлург. - 1975, № 4. С. 10-13.
14. Коршиков, Г. В. Влияние степени окомкования шихты и ее физических свойств на показатели процесса спекания. [Текст]/ Г.В. Коршиков, В.Н. Пономарев, Е.В. Невмержицкий// Сталь. – 1972, №11. С. 969-974.
15. Базилевич, С. В. Интенсификация агломерационного процесса и улучшение качества агломерата при спекании тонкоизмельченных концентратов. // Бюллетень ЦНИИ ЧМ. – 1975. №24. С. 16-23.
16. Коршиков, Г. В. Формирование структуры слоя при однослойной и двухслойной загрузке шихты на агломерационную машину [Текст]/ Г.В. Коршиков, М.А. Хайков, А.В. Буев // Сб. «Теплотехника и газодинамика агломерационного процесса». – Киев, Наукова думка. 1983. С. 22-25.
17. Voice E., Brooks S., Gledhib P. The permeability of sinter beds. – Journal of Iron and Steel Institute. – 1953. #174. pt.2. p. 136-139.
18. Исикава Я. Двухслойное спекание на агломашине в Ванамачу [Текст]/ Я. Исикава, К. Серавара, И. Носака// Тэцу то хаганэ. – 1979. т.65. №11. с.4.
19. А.с. №876756 (СССР). Способ получения агломерата/ А.М. Ли. – Опубл. в Б.И. – 1981. №40.
20. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах / Ю.И. Розенгарт, Б.Б. Потапов, В.М. Ольшанский, А.В. Бородулин / Под ред. Ю.И. Розенгарта. - Киев; Донецк: Вища школа, 1986. - 296 с.

21. Китаев Б. И., Ярошенко Ю. Г., Сучков В. Д. Теплообмен в шахтных печах. Свердловск: Metallurgizdat, 1957. – 279 с.
22. Петрушов, С.Н. Формирование структуры агломерационного слоя шихты [Текст]/ С.Н. Петрушов, А.М. Новохатский// Известия вузов. Черная металлургия. – 1998. №8. С. 21-24.
23. Высокопроизводительная работа аглофабрики завода «Хирохата»/ Joshida Hitoshi// Тецу то хаганэ. – J. Iron and Steel Institute. – 1992. – 78. - №8. – p.T125-T128.
24. Майерчак, Ш. Изучение температурно-тепловых условий агломерационного слоя [Текст]/ Ш. Майерчак, А. Майерчакова, В. Фарби// Известия вузов. Черная металлургия. – 1982. №3. С. 17-19.
25. Voice E.W. The importance of the phenomena of heat transfer and combustion of sintering/ E.W.Voice, R.Wild// In. Second symposium Intern J'agglomeration des minerals de fer. – Paris: Inst. Research Siderurque. – 1956. p. 7-30.
26. Voice E.W. How can theory help make more sinter? / E.W. Voice, R. Wild// J. Metals. – 1958. #2. p. 105-110.
27. Коротич, В. И. Удельный расход воздуха на агломерацию [Текст]/ В.И. Коротич// Изв. вузов. Черная металлургия. – 1992. №2. С. 10-111.
28. Котов, В. Г. Прогнозирование вертикальной скорости спекания слоя агломерационной шихты [Текст]/ В.Г. Котов// Изв. вузов. Черная металлургия. – 1984. №9. С. 14-17.
29. Коротич, В.И. Агломерация рудных материалов [Текст]/ В.И. Коротич. Ю.А. Фролов, Г.Н. Бездежский. – Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ». – 2003. 400с.
30. Петрушов, С. Н. Современный агломерационный процесс. Монография/ С.Н. Петрушов. – Алчевск: ДонГТУ, 2006. 360 с.

31. Виноградов, В. В. Новый фактор повышения производительности агломерационных установок [Текст]/ В.В. Виноградов // Бюллетень ЦНИИ Черн. мет. – 1955. №5-6. С. 31-32.
32. Океке, С. И. Исследование вариантов технологии подогрева агломерационной шихты горячим возвратом [Текст]/ С.И. Океке, Е.Ф. Вегман, С.Д. Филимонов// Изв. вузов. Черная металлургия. – 1985. №7. С. 42-43.
33. Вегман, Е. Ф. Некоторые итоги исследования блочной структуры железорудного агломерата [Текст]/ Е.Ф. Вегман, Л.Н. Крафт // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1983. №9. С 11-18.
34. Дорошенко, Н. В. Исследование влияния возврата на показатели агломерационного процесса [Текст]/ Н.В. Дорошенко, Е.Ф. Вегман // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1987. №11. С 22-25.
35. Коршиков, Г. В. Влияние механической активности агломерационной шихты на ее комкующие свойства [Текст]/ Г.В. Коршиков, М.А. Хайков, А.В. Бартедьев// Изв. вузов. Черная металлургия. – 1994. №12. С 4-6.
36. Вегман, Е. Ф. Эффективность прогрева компонентов агломерационной шихты в зоне интенсивного подогрева [Текст]/ Е.Ф. Вегман, Н.В. Панищев, В.М. Борисов// Изв. вузов. Черная металлургия. – 1979. №5. С 16-19.
37. Павловец, В. М. Продувка слоя влажных железорудных окатышей низкотемпературными струями сжатого воздуха [Текст]/ В.М. Павловец // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2006. №2. С 7-12.
38. Мищенко, И. М. Подогрев агломерационной шихты паром [Текст]/ И. М. Мищенко, П.И. Гурин, С.Н. Петрушов // Совершенствование технологий окускования железорудных материалов. – Свердловск. 1981. С. 86-89.

39. Парфенов, А. М. Агломерация железных руд [Текст]/ А.М. Парфенов. – М.: Metallurgizdat. 1954. 312 с.
40. Колесник, В. В. Математическое моделирование процесса нагрева шихты в шихтоподогревателе барабанного типа [Текст]/ В.В. Колесник, В.Н. Орлик, В.М. Олабин // Пром. теплотехника. – 2003. №2. С. 21-27.
41. Вегман, Е. Ф. Теория и технология агломерации [Текст]/ Е.Ф. Вегман. – М.: Metallurgiya, 1974. 288 с.
42. Шурхал, В. А. Внешний нагрев при агломерации [Текст]/ В.А. Шурхал. – К.: Наукова думка, 1985. 192 с.
43. Толочко, А. И. Утилизация пылей и шламов в металлургическом производстве [Текст]/ А.И. Толочко, В.И. Славин, Ю.И. Супрун. – Челябинск: Metallurgiya, 1990. 124 с.
44. Коршиков. Г. В. Динамика структурных преобразований агломерата при стабилизации [Текст]/ Г.В. Коршиков, М.А. Хайков, В.Я. Лядова // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1990. №1. С 12-14.
45. Жилкин, В. П. Разработка новой конструкции укрытия агломашин с рециркуляцией отходящих газов [Текст]/ В.П. Жилкин. Е.Г. Дмитриева. Ю.И. Толстова // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2008. №6. С 44-48.
46. Сталинский, Д. В. Экологические аспекты функционирования и энергоэффективность современного металлургического предприятия на примере реконструкции ОАО «Алчевский металлургический комбинат» [Текст]/ Д.В. Сталинский, Ю.Г. Банников, А.А. Павленко // Экология и промышленность. – 2009. №2(19). С. 16-21.
47. Пат. 2086673 Российская Федерация, МПК C22B1/16. Способ спекания железорудных материалов на агломерационной машине/ Ф. Штилер, Н. Магеданц, В. Герлах; Заявитель и патентообладатель Metallgesellschaft AG. - №5052944/02. 1997. 11с.

48. Колесанов, Ф. Ф. Совершенствование агломерационного процесса [Текст]/ Ф.Ф. Колесанов, Н.С. Хлопонин, В.Н. Кривошеев // - К.: Техника. 1983. 110 с.
49. Ярошенко, Ю. Г. Особенности процесса спекания железорудных материалов в различных газовых средах [Текст]/ Ю.Г. Ярошенко. В.И. Лобанов, В.М. Павловец// Изв. вузов. Черная металлургия. – 1985. №2. С 16-19.
50. Mashida Satishi. Optimization of coke segregation in sintering bed corresponding to deterioration in iron ore quality/ M. Satishi, T. Koichi, H. Takahide // The 5 International congress on the science and technology of ironmaking, Shanghai, - Technical program. – 2009. p. 217-221.
51. Mashida Satishi. Optimization of coke breeze segregation in sintering bed under high pizolite and ratio / M. Satishi, H. Takahide, N. Oyama// ISIJ Int. – 2009. #5. p. 667-675.
52. Модель, М. С. Ферритообразование в железорудном сырье [Текст]/ М.С. Модель, В.Я. Лядова, Н.В. Чугунова. – М.: Наука, 1990. 150 с.
53. Карабасов, Ю. С. Использование топлива в агломерации [Текст]/ Ю. С. Карабасов, С .М. Валавин. - М.: Металлургия, 1976. – 264 с.
54. Гугис, Н. Н. О необходимости регулирования крупности твердого топлива при спекании руд и концентратов [Текст]/ Н.Н. Гугис // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1990. №11. С 8-10.
55. Михалевич, А. Г. К вопросу о механизме горения твердого топлива при агломерации [Текст]/ А.Г. Михалевич// Сталь. – 1980. №5. С. 357-359.
56. Михайлов, В. Г. Влияние крупности агломерационного топлива на показатели спекания и качество агломерата из концентратов КМА [Текст]/ В.Г. Михайлов, А.А. Ряжских, Е.А. Путилин// Современная металлургия начала нового тысячелетия: сб. науч. тр. – Липецк: Изд. ЛГТУ. – 2007. Ч.3. С. 68-75.



57. Карабасов, Ю. С. Об эффективной реакционной способности агломерационного топлива и оптимальной высоте спекаемого слоя [Текст]/ Ю.С. Карабасов, В.С. Валавин. В.П. Севрюгин// Изв. вузов. Черная металлургия. – 1975. №3. С 36-40.

58. Попов. Г. Н. Об интенсивности горения твердого топлива в агломерируемом слое [Текст]/ Г.Н. Попов. В.Ф. Лобастов, В.А.Козачишин// Изв. вузов. Черная металлургия. – 1989. №5. С 26-28.

59. Чижилова, В. М. Влияние фракционного состава угля на его реакционную способность [Текст]/ В.М. Чижилова. Т.К. Ефремова// Изв. вузов. Черная металлургия. – 1988. №5. С 25-27.

60. Витущенко, М. Ф. Влияние твердого топлива на выбросы монооксида углерода и оксидов азота при агломерации [Текст]/ М.Ф. Витущенко. Н.Л. Татаркин, А.И. Кузнецов// Сталь. – 2007. №8. С. 18-21.

61. Колесников, Ф. Ф. К вопросу о температуре воспламенения твердого топлива при агломерации руд [Текст]/ Ф.Ф. Колесников, Н.С. Хлапонин, Б.М. Ротмистровский// Изв. вузов. Черная металлургия. – 1976. №3. С 12-16.

62. Карабасов, Ю. С. Особенности горения частиц твердого агломерационного топлива [Текст]/ Ю.С. Карабасов, Е.М. Воропаев, В.С. валавин // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1976. №5. С 21-24.

63. Горбунов, А. В. Использование торфа и продуктов его переработки в металлургических процессах/ А.В. Горбунов// Международный научно-промышленный симпозиум «Уральская горная школа - регионам». Экология и рациональное природопользование. – 2010. С. 511-512.

64. Debanuc M. Use of raw petroleum coke in sinter plants/ M/ Debanuc, K. Vipul, A. Rabech// ISIJ Int. -2009. #5. p. 676-680.

65. Сысоев, Н. П. Технологические параметры аглопроцесса при использовании мелочи нефтяного кокса [Текст]/ Н.П. Сысоев, В.Л. Терентьев, М.Ф. Гибадулин. // Сталь. – 2005. №5. С. 8-9.
66. Мохамед Эль-Меншауй Хуссейн Шалаби. Опыт использования жидкого топлива при агломерации железных руд. [Текст]/ Шалаби Мохамед Эль-Меншауй Хуссейн, Е.Ф. Вегман // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1990. №7. С 11-12.
67. Kaczorowski J. The influence of potassium on the boudouard reaction in manganese production/ J. Kaczorowski, T. Lindstat, M. Syversten// ISIJ. Int. – 2007. #11. p. 599-604.
68. Карабасов, Ю. С. О влиянии катализатора на реакционную способность твердого топлива [Текст]/ Ю.С. Карабасов, В.М. Чижикова // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1984. №3. С 22-24.
69. Zhao Pei. Исследование путей повышения скорости реакций при низкой температуре за счет механического воздействия реагирующих компонентов/ Zhao Pei, Guo Peimin, Zhang Dianwei// Gang tie fun – Iron Steel Vanadium Titanium. – 2007. #2. p. 1-5.
70. Пат. 2026377 Российская Федерация, МПК С22В1/24. Способ производства агломерата/ Киселев И.Ю., Захарова Е.В., Девочкина С.И. - № 4888841/02. – 1995. 4с.
71. Лобанов, В. И. Совершенствование процесса зажигания и начальной стадии спекания агломерационной шихты при использовании комбинированного топлива [Текст]/ В.И. Лобанов, В.И. Матюхин, О.В. Матюхин// Теория и практика производства чугуна: сб. трудов международной научно-технической конференции. – Кривой-Рог. КГГМК «Криворожсталь». – 2004. С. 162-166.
72. Берштейн, Р. С. Повышение эффективности агломерации [Текст]/ Р.С. Берштейн. – М.: Металлургия, 1979. – 144 с.

73. Фролов, Ю. А. Теплотехнические аспекты процесса агломерации [Текст]/ Ю.А.Фролов // Сталь. – 2003. - №12. – С. 2-11.
74. Авдеенко А.А. Оперативное определение газодинамического сопротивления слоя агломерационной машины / А.А. Авдеенко, Ю.Г. Клейн // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1998. - №12. – С.6-10.
75. Юсфин, Ю. С. Производство агломерата и окатышей: справочник / Ю.С. Юсфин. – М.: Металлургия, 1984. – 216 с.
76. Базилевич С.В. Спекание агломерационной шихты в высоком слое [Текст]/ С.В. Базилевич, В.Б. Исполатов, Ф.Ф. Колесанов [и др.]. // Бюллетень ЦНИИ ЧМ. – 1975. №6. С.3-10.
77. Якубовский, В. П. Интенсификация агломерационного процесса продувкой слоя шихты перед внешним нагревом восходящим потоком воздуха / В.П. Якубовский // Теплотехника и газодинамика агломерационного процесса: сборник. – Киев: Наукова думка. - 1983. С.42-47.
78. Минаков, Н. С. Исследование влияния газодинамического режима на показатели процесса агломерации при спекании шихты в высоком слое [Текст] / Н.С. Минаков, Г.А. Арыков // Сталь. – 1994 - №6. – С. 6-11.
79. Коршиков, В. Г. Газопроницаемость слоя шихты на агломашине с площадью спекания  $252 \text{ м}^2$  при различных способах загрузки [Текст]/ В.Г. Коршиков, С.И. Шаров, В.П. Хайдуков // Сталь. – 1970. - №9. – С. 772-776.
80. Hiroshi O. Повышение производительности агломашины №4 на заводе Chiba [Текст]/ O. Hiroshi, T. Hiroyasu, N. Masaru, N. Toshihiko, K. Kiyoshi //Тэцу то хаганэ. – Iron and Steel Institute. – 1990. – 76. - №5. – P.667-674.
81. Druet I. Medelisation de la segregation granulometrique lors du chargement des chales d'aggregation/ I. Druet // Revue metallurgie. – 1984. - №2. – P. 89-99.

82. Коршиков, Г. В. Влияние строения структурных элементов агломерационной шихты на газодинамическую характеристику спекаемого слоя [Текст]/ Г.В. Коршиков, М.А. Хайков, Н.Н. Должикова // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1983. - №6. – С.12-15.

83. Томаш, А. А. Новый подход при расчете перепада давления газа в бинарном зернистом слое [Текст]/ А.А. Томаш/ // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1997. - №8. –С.16-18.

84. Oyama N. Effects of the magnetic field exerted on the plate type feeder on the void fraction in the sintering bed and sinter productivity / N. Oyama, K. Yagawa, K. Nushiro // Journal of the Iron and Steel Institute of Japan.– 2000. - №5. – P. 309 – 314. - Яп.

85. Oyama N. Development of charging technology for raw mixture for the improvement of packed structure in the sintering bed/ N. Oyama, S. Nakajima, K. Fujii.// Current Advances in Materials and Processes. – 2002. - № 4. – P 694 - 697. – Яп.

86. Коротич, В. И. Основы теории и технологии подготовки сырья к доменной плавке [Текст] / В.И. Коротич. – М.: Металлургия, 1978. – 208 с.

87. Колесанов, Ф. Ф. Движение газов через слой кусковых материалов [Текст] / Ф.Ф. Колесанов. – М.: Металлургиздат, 1956. – 88 с.

88. Nakano M. Sintercake Structure Offering High Productivity and High Yield / M. Nakano, T. Kawaguchi, S. Kasama. // ICSTI Ironmaking Conference Proceedings. – 1996. – P.1283 - 1290. - Англ.

89. Matsumura T. Development of new feeding equipment for controlling charge segregation of sinter feed / T. Matsumura, S. Amano, H. Asahara.// Current Advances in Materials and Processes. – 1999. - №4. – P 766. – Яп.

90. Ergun S. // Chemical Engineer Progress. - 1952. – V.48, №2. – P. 89-94.

91. Коротич, В. И. Теоретические основы окомкования железорудных материалов [Текст] / В.И. Коротич. - М.: Metallurgy, 1966. – 150 с.
92. Коротич, В. И. К расчету газодинамических параметров агломерационного процесса [Текст]/ В.И. Коротич, В.П. Пузанов. // Сталь. – 1967. - №7. – С. 583-587.
93. Сейнти, Н. Сегрегация аглошихты при подаче на агломашину [Текст] / Н. Сейнти, С. Киниши, И. Еззи// Тэцу то хаганэ. – 1980. т. 66. №4. С. 87.
94. Сасаки, С. Сегрегация аглошихты при подаче на агломашину [Текст] / С. Сасаки, Е. Огра // Тэцу то хаганэ. – 1980. т. 66. №4. С. 86.
95. Готовцев, А. А. Оценка сегрегации агломерационной шихты [Текст] / П.А. Готовцев, И.М. Сальников, В.И. Тихонов// Тез. докл. Республ. научно-техническая конференция. Днепропетровск. – 1980. С. 29-30.
96. Беер, Г. Новое в области спекания железных руд/ Г. Беер, Ф. Каппель, Б. Эркардт. – Черные металлы. М.: Metallurgy. – 1976. №6. С. 27-30.
97. Пузанов, В. П. Причины не равномерности химического и минералогического состава агломерата по высоте слоя [Текст] / В.П. Пузанов, А.М. Ли, С.Х. Насыбулин// Metallurgical and Iron-Ore Industry. – 1968. №1. С. 8-12.
98. Ли, А. М. Совершенствование загрузки шихты на агломерационную машину [Текст] / А.М. Ли, М.Ф. Витушенко, Ю.А. Кабанов// Metallurg. – 1984. №3. С. 12-14.
99. Илюхин, А. Я. Развитие технологии загрузки шихты на агломерационные машины [Текст] / А.Я. Илюхин, И.А. Овчинникова// Metall and Casting of Ukraine. – 2007. № 9-10. С. 3-11.

100. Пазюк, М. Ю. Исследование сегрегации топлива в слое шихты [Текст] / М.Ю. Пазюк, В.И. Гранковский// Изв. вызов. Черная металлургия. – 1982. №12. С. 6-8.
101. Пожуев, В. И. Влияние параметров загрузочного устройства агломерационной машины на распределение топлива по высоте слоя шихты на аглоленте [Текст] / В.И. Пожуев, М.Ю. Пазюк, Ю.М. Пазюк и др.// Металлургия (Наукові праці ЗДІА) – 2009. Вып. 19. С. 5-11.
102. Пазюк, М. Ю. Моделирование закономерностей распределения фракций агломерационной шихты по высоте слоя [Текст] / М.Ю. Пазюк// Изв. вызов. Черная металлургия. – 1987. №4. С. 142-145.
103. Кухарь, А. С. Производство и качество агломерата. [Текст] / А.С. Кухарь. – М.: Металлургия. 1977. 55 с.
104. Фролов, Ю. А. Исследование сегрегации агломерационных шихт [Текст] / Ю.А. Фролов, С.Г. Братчиков, Е.Е. Заславский и др.// Сталь. – 1974. №10. С. 882-888.
105. Пазюк, М. Ю. Исследование стабильности подачи шихты на конвейерные машины [Текст] / М.Ю. Пазюк, В.В. Шаповаленко, В.И. Ваха и др.// Изв. вузов. Черная металлургия. – 1989. №3. С. 23-27.
106. Русаков, П. Г. Описание сегрегации агломерационных шихт и других сыпучих материалов [Текст] / П.Г. Русаков, И.Ф. Русаков// Теория и технология подготовки металлургического сырья к доменной плавке. – Днепропетровск. ДМетИ. – 1985. С. 159-160.
107. Коршиков, Г. В. Влияние строения структурных элементов агломерационной шихты на газодинамическую характеристику спекаемого слоя [Текст] / Г.В. Коршиков, М.А. Хайков, Н.Н. Должикова.// Изв. вузов. Черная металлургия. – 1983. №6. С. 12-15.
108. Петрушов, С. Н. Исследование и совершенствование укладки шихты на агломашину [Текст] / С.Н. Петрушов, А.П. Полухин, Л.М.

Рузанов// Сб. «Теплотехника и газодинамика агломерационного процесса». – Киев, Наукова думка. 1983. С. 29-33.

109. Берштейн, Р. С. Применение вибропитателя для загрузки агломерационных машин [Текст] / Р.С. Берштейн, Ю.А. Фролов// *Металлург.* 1977. №7. С. 12-13.

110. Тарасов, В. П. Укладка слоя агломерационной шихты с использованием энергии сжатого воздуха [Текст] / В.П. Тарасов, В.С. Солок, В.А. Белоног// *Теория и технология подготовки металлургического сырья к доменной плавке.* – Днепропетровск. ДМетИ. – 1980. С. 32-33.

111. Редько, А. А. Когенерационная энергетическая установка в тепловой схеме обжиговой машины железорудных окатышей [Текст] / А. А. Редько, А. И. Компан, А. Ф. Редько, А. М. Голышев// *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит.* – 2013. - №3(109). – С. 18-24.

112. Бабушкин. Н. М. Охлаждение агломерата и окатышей [Текст] / Н.М. Бабушкин, С.Г. Братчиков, Г.Н. Намятов. – М.: *Металлургия.* 1975. 207 с.

113. Ковалев, Д. А. Разработка и внедрение технологии производства и использования в доменной печи безобжиговых самовосстанавливающихся окатышей [Текст] / Д.А. Ковалев, Б.П. Крикунов, Н.Д. Ванюкова// *Сталь.* – 2010. №4. С. 283-292.

114. Симонов, В. К. Кинетика отдельного и комплексного восстановления железорудных материалов газами и твердым углем [Текст] / В.К. Симонов, Л.Н. Руденко// *Интенсификация восстановительных процессов. Диффузионно-химические аспекты.* М.: *Наука.* 1980. С. 36-51.

115. Воеводин, Л. И. Перспективы использования интерполимерных связующих при производстве железорудных окатышей [Текст] / Л.И. Воеводин. Б.Г. Виничук, Л.П. Вахрушев// *Сталь.* - 2008. №12. С. 43-46.

116. Журавлев, Ф. М., Малышева, Т. Я. Окатыши из концентратов железистых кварцитов. [Текст] / Ф. М. Журавлев, Т. Я. Малышева. – М.: Металлургия, 1991. – 127 с.

117. Лисиенко, В.Г. Теплофизика металлургических процессов [Текст]/ В.Г. Лисиенко, В.Г. Лобанов, Б.И. Китаев и др. Учебное пособие для вузов. М.: Металлургия, 1982, 240 с.

118. Гришин, А. А. Моделирование процесса плавления металлизированных окатышей в ванне дуговой печи [Текст] / А. А. Гришин, А.В. Сазонов, Э.Э. Меркер // Фундаментальные исследования. – 2005. – № 2 – стр. 94-96.

119. Абзалов, В. М. Методика оперативного определения коэффициента газодинамического сопротивления слоя окатышей/ В.М. Абзалов, В.А. Горбачев, В.И. Клейн // Сталь. – 2000. - №12. – С.1-2.

120. Абзалов, В. М. Газодинамика слоя сырых окатышей на обжиговой машине/ В.М. Абзалов, В.И. Клейн, В.Н. Леушин, С.В. Шаврин // Сталь. – 2003. – №1. – С. 17-20.

121. Кривоносов, В. А. Математическая модель процесса обжига окатышей по зонам обжиговой машины для оптимизации режима. [Текст] / В.А. Кривоносов, Д.С. Пирматов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2010.Т.6. - №5. С. 128-132.

122. Пирматов, Д. С. Моделирование процесса тепловой обработки окатышей для оптимизации работы обжиговой машины. // Сборник трудов международной научно – практической конференции преподавателей, сотрудников и аспирантов «образование, наука, производство и управление».– Старый Оскол. 2009. С. 94-97.

123. Кривоносов, В. А. Контроль температуры окатышей по зонам обжиговой машины. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. – №8. С. 189-194.



124. Буткарев, А. П. Математические модели для управления процессом производства окатышей на конвейерной машине [Текст]/ А.П. Буткарев, А.А. Буткарев [и др. ] // Сталь. – 2000 - №3. – С. 10-13.

125. Разработка математических моделей для расчета теплотехнических параметров обжига окатышей на конвейерных машинах / Г.М. Майзель, А.П. Буткарев, Ф.Р. Шкляр [и др.] // Сталь. –1981. №4. –С. 21-25.

126. Графман, С. М. Теплотехнические и аэродинамические исследования обжига и охлаждения железорудных окатышей в кипящем слое: дисс.канд. техн. наук: 05.14.04 / Графман Семен Михайлович. –Донецк, 1975. –179 с.

127. Бережний, М. М., Збагачення та окускування сировини [Текст] / М.М. Бережний, В.П. Мовчан// Під редакцією д.т.н. М.М. Бережного. – Кривий Ріг, 2000. – 367 с.

128. Похвиснев, А. Н. Получение прочных при восстановлении окатышей из богатых железо-рудных концентратов [Текст] / А. Н. Похвиснев, Н. Ф. Пашков, С. Г. Савельев // Известия вузов. Черная металлургия. – 1976. – № 9. – С. 30-32.

129. Алексеев, Л. Ф. Структура и разрушение окатышей при восстановлении. [Текст]/ Л.Ф. Алексеев, В.А. Горбачев, Д.З. Кудинов, С. В. Шаврин. - М.: Наука, 1983. 78 с.

130. Федченко, Н. Н. Исследование процесса термообработки железорудных окатышей и разработка системы автоматической оптимизации: дисс.канд. техн. наук: 05.13.07 / Н.Н. Федченко. – К., 1979. 178 с.

131. Бруев, Б. П. Оптимизация состава и структуры окатышей — резерв повышения их металлургических свойств [Текст]/Б.П. Бруев, С. Н. Евстюгин, И. Кретов, А. В. Шаврин, и др. // Сталь. 2003. № 1. С. 8- 10.

132. Ванюкова, Н. Д. Исследование металлургических свойств железорудных окатышей, полученных с твердым топливом [Текст] / Н. Д. Ванюкова / Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2001. – № 3 (204). – С. 12-15.

133. Абзалов, В. М. Возможности повышения металлургических свойств бокситсодержащих окатышей [Текст] / В. М. Абзалов, Н. Н. Копоть, В. Е. Мальцева, Г. Г. Розенко, С. В. Шаврин. // «Сталь» . № 1. 2003. С. 18- 21.

134. Большаков, В. И. Исследование металлургических свойств окатышей и особенностей их использования [Текст] / В. И. Большаков, Н. А. Гладков, А. С. Нестеров, Г. И. Орел, П. И. Оторвин. // Сталь, № 10. 2004. С. 6-12

135. Мищенко, И. М. Черная металлургия и охрана окружающей среды: учебное пособие/ И. М. Мищенко. - Донецк.: ГВУЗ "ДонНТУ", 2013. 452с.

136. Осипенко, В. Д. Наладка и эксплуатация газоочистных сооружений в черной металлургии [Текст] / В.Д. Осипенко, Н.М. Васильченко. – М.: Металлургия. 1983. 243 с.

137. Старк, С.Б. Пылеулавливание и очистка газов в металлургии / С. Б. Старк. - М.: Металлургия, 1977. - 328 с.

138. Рышка, Э. Защита воздушного бассейна от выбросов предприятий черной металлургии Пер. с польск / Э. Рышка. - М.: Металлургия, 1979. - 240 с.

139. Андоньев, С.М. Пылегазовые выбросы предприятий черной металлургии / С. М. Андоньев, О. В. Филиппо. - Харьков: Металлургия, 1998. - 246 с.

140. Каплун, Л. Л., Экспериментальное исследование процесса горения твердого агломерационного топлива. [Текст] / Л.Л. Каплун, А.В. Александров, Л.К. Герасимов // Проблемы теории и технологии подготовки железорудного сырья для доменного процесса и бескоксовой металлургии:

Тез. докл. Всесоюзной научно-технической конференции. Днепропетровск: ДМЕТИ, 1990. С.74.

141. Чернов, Н. Н. Влияние формы частиц, размера, порозности и поверхности на коэффициент гидравлических сопротивлений [Текст]/ Н.Н. Чернов, Л.А. Сафина // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1998. №10. – С. 16-18.

142. Телегин, А. С. Гидравлическое сопротивление неподвижного слоя окатышей [Текст]/ А.С. Телегин, Б.П. Юрьев // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1984. №11. – С. 32-34.

143. Гольдштик, М.А. Процессы переноса в зернистом слое [Текст]/ М.А. Гольдштик. – Новосибирск. – 1984. – 164 с.

144. Китайгородский, А. И. Порядок и беспорядок в мире атомов [Текст]/ А.И. Китайгородский. Изд. 4-е. М.: Наука, 1966, 141с.

145. Аэров, М. Э. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем [Текст]/ М.Э. Аэров, О.М. Годес. Л.: Химия, 1968, 178 с.

146. Чудновский, А. Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов [Текст]/ А. Ф. Чудновский. М.: Физматгиз, 1962, 456 с.

147. Гольдфарб, Э. М. Теплотехника металлургических процессов[Текст]/ Э.М. Гольдфарб. М.: Металлургия, 1967, 442 с.

148. Китаев, Б.И. Тепло- и массообмен в плотном слое [Текст]/ Б. И. Китаев, В.Н. Тимофеев, Б.А. Боковиков и др. М.: Металлургия, 1972, 432 с.

149. Wyllie M. R., Gregory A. R. – Ind. Eng. Chem., 1955, v. 47, p. 1379.

150. Исаченко, В. П. Теплопередача [Текст]/ В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. Учебник для вузов, Изд. 3-е. М.: Энергия, 1975, 488 с.

151. Зобенин, Б. Ф. Теплотехнические расчеты металлургических печей. [Текст]/ Б.Ф. Зобенин, М.Д. Казяев, Б.И. Китаев и др. Учебное пособие для вузов. Изд. 2-е. М.: Металлургия, 1982, 360 с.

152. Трудоношин, В. А. Конечно-элементное моделирование тепловых процессов в программной среде ANSYS [Текст]/ Трудоношин В.А., Носко А.П. – М.:МГТУ. 2005г. – 54с.

153. Сагдеева, Ю. А. Введение в метод конечных элементов: методическое пособие/ сост. Ю.А. Сагдеева и др. – Ижевск.: Изд-во «Удмуртский ун-т». 2011г. – 44с.

154. Клованич, С. Ф. Метод конечных элементов в нелинейных задачах инженерной механики/ С.Ф. Клованич– Запорожье: Издательство журнала «Світ геотехніки». 2009г. – 400 с.

155. Патанкар, С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. Пер. с англ. под ред. В.Д. Виоленского. – М.: Энергоатомиздат. 1984г. – 124с.

156. Румянцев, А.В. Метод конечных элементов в задачах теплопроводности.: Учебное пособие / Калинингр. ун-т., Калининград. 1995г. – 170с.

157. Метод конечных элементов: Учебн. пособие для вузов / Под ред. П.М. Варвака. – Киев: Вища школа. Головное изд-во. 1981г. – 176с.

158. Шимановский, А. О. Применение метода конечных элементов в решении задач прикладной механики : учеб.-метод. пособие для студентов технических специальностей / А. О. Шимановский, А. В. Путято ; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус.гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2008. – 61 с.

159. Фефелов, А.А. Оценка квазисингулярных интегралов при численной реализации метода граничных элементов в трехмерных неосесимметричных задачах теплопроводности.// Вестник РГРТУ. – 2008. вып 23. – с. 41-46.

160. Мных, А.С. Решение методом конечных элементов задачи о распределении температур в единичном объеме агломерационного слоя при

заданных граничных условиях. // Збірник наукових праць ДДТУ(технічні науки). – 2014. №2(25). – с.153-159.

161. Скворцов, А. В. Методы построения триангуляции с ограничениями // Вычислительные методы и программирование. 2002. Т.3.

162. Бабошин, В.М. Теплофизические свойства топлив и шихтовых материалов черной металлургии. Справочник. В.М. Бабошин, Е.А. Кричевцов, Е.М. Абзалов, Я.М. Шелоков - М.: Металлургия, 1982. 152 с.

163. Вегман, Е.Ф. Окускование руд и концентратов.// Е.Ф Вегман. Учебник для техникумов – 3-е изд. перераб. и доп. М.:Металлургия, 1984. 256 с.

164. Лукомский Ф.И. Теория корреляции и ее применение к анализу производства. – М.:Госстатиздат, 1958.120 с.

165. Деткова Т.В. Разработка новых интенсивных методов зажигания шихты и совершенствование технологии агломерации: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. - М., 1993. -32с.

166. Мных, А. С. Синтез трехмерной модели теплового режима процесса спекания агломерационной шихты [Текст] / А. С. Мных // Вісник КрНУ (збірник наукових праць). – 2014. - №38 – С. 174-177.

167. Мных, А. С. Структурные характеристики стационарного слоя сыпучего материала [Текст] / А. С. Мных // Материалы XI международной научно-практической конференции «Новости научной мысли». Чехия. Прага. – 2015. том 11. – С. 64-67.

168. Гаврилко, С. А. Исследование размягчаемости восстановленных агломератов различных фракций [Текст] / С. А. Гаврилко, А.А. Киселев, Г.А. Громак, Н.В. Личконенко и др. // Металлургия «Труды ЗГИА». – 2009. №4(20) – С. 32-37.

169. Мних, А. С. Сучасний стан та шляхи підвищення енерго-ефективності агломераційного виробництва [Текст] / А. С. Мных, А. В.

Альошина // Матеріали ІХ науково-технічної конференції ЗДІА. – 2014. С. 108.

170. Марюта, А. Н. Автоматический контроль гранулометрического состава сыпучих материалов [Текст] / А. Н. Марюта, Ю. Г. Качан // Киев – Донецк, издательское объединение «Вища школа», 1977. – 120 с.

171. Персиц, В. З. Измерение и контроль технологических параметров на обогатительных фабриках [Текст] / В.З. Персиц. – М.: Недра, 1982. – 191 с.

172. Миздряков, О. А. Дифференциальные методы гранулометрии [Текст] / О.А. Миздряков. – М.: Metallurgy, 1974. – 240 с.

173. Юсфин, Ю. С. Управление окускованием железорудных материалов [Текст] / Ю.С. Юсфин, А.Д. Каменов, А.П. Буткарев. – М.: Metallurgy. 1999, – 279 с.

174. Маковский, В. А. Оптимальное управление агломерационным процессом [Текст] / В.А. Маковский, Ю. Н. Власюк, Ю.В. Карташов. – Киев: Вища школа, 1987. -122 с.

175. Бережной, Н. Н. Автоматизация процессов окускования железных руд [Текст] / Н.Н. Бережной, П.В. Терехов. – Киев: Техника, 1976. – 153 с.

176. Федоровский, Н. В. Автоматическое управление технологическими процессами окускования сыпучих материалов [Текст] / Н.В.Федоровский. Киев: Техника, 1976. 224 с.

177. Федоровский, Н. В. Разработка АСУ ТП окускования железных руд [Текст] / Н. В. Федоровский. – Киев: Знание, 1978. – 20 с.

178. Антипин, В. Г. Состояние и некоторые перспективы черной металлургии [Текст] / В.Г. Антипин, Н.Г. Зиновьева// Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2013. №3. – с. 2-19.

179. Ефимов. И. П. Статистическая обработка результатов многофакторного эксперимента по определению момента инерции тела [Текст]/ И. П. Ефимов, Д.А. Ульянов – Ульяновск: УлГТУ. 2009. – 36 с.

180. Wendeborn, H. V. Iron and steel, 1953, № 14, pp. 632-635.

181. Фролов, Ю. А. Теплотехническое исследование процесса агломерации и совершенствование технологии и техники для производства агломерата [Текст] : автореф. дис. ... д.т.н / Ю. А. Фролов – Екатеринбург., 2005. – 49с.

182. Мных, А. С. Исследование влияния фракционного состава агломерационной шихты на распределение химических компонентов слоя материала для условий комбината «Запорожсталь». [Текст] / А. С. Мных, В.Д. Ашихмин // Теория и практика металлургии. – 2014. - №3(6).- С 11-15.

183. Мных, А.С. Моделирование распределения частиц полидисперсной шихты по высоте слоя на аглоленте. [Текст] / А.С. Мных, Ю.М. Пазюк, В.Д. Ашихмин // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2014. №3. – с. 12-15.

184. Пожуев, В. И. Идентификация гранулометрического состава агломерационной шихты, подготовленной к спеканию [Текст] / В.И. Пожуев, М.Ю. Пазюк, Ю.М. Пазюк, Е.Н. Барищенко, А.С. Мных // Металлургия (наукові праці Запорізької державної інженерної академії). – 2010. – вип. 22. – с. 14-20.

185. Michard, J. Iron and coal trades review, 1957, 175, №4, pp. 841-850.

186. Коротич, В. И. Газодинамика агломерационного процесса [Текст] / В. И. Коротич, В.П. Пузанов – М.: Металлургия, 1969. – 206 с.

187. Тарасов, П. В. Основные закономерности сопротивления и газопроницаемости зернистого слоя [Текст] / П. В. Тарасов. // Сталь. - 2006. – №3 – С. 12-15.

188. Мных, А.С. Исследование количества тепловыделения в слое агломерационной шихты. [Текст] / А.С. Мных// Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. -№6. – С. 14-18.

189. Ефимов, С. П. Влияние крупности топлива на процесс агломерации и качество агломерата [Текст]/ С. П. Ефимов, Г. Г. Ефименко// Изв. вузов «Черная металлургия». – 1970. - №9. – С. 21-25.

190. Карымов, Д. В. Влияние расхода твердого топлива на показатели спекания смеси гематитовых и магнетитовых концентратов [Текст]/ Д. В. Карымов, Г. В. Губин, Л. Н. Сайтгареев // Вестник КТУ. – 2011. - №27. – С. 149-151.

191. Бережной, Н. Н. Обогащение и окускование сырья [Текст]/ Н. Н. Бережной, В. П. Мовчан // Кривой Рог. – 2000. – 365 с.

192. Крижевский, А. З. Влияние гранулометрического состава спекаемой шихты на расход агломерационного топлива [Текст]/ Крижевский А. З., Рудовский Г. И. Камышный Ю. А. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1992. - №1. – С. 4-6.

193. Auliman, K. Stahlund E,-sen, №2, 1994, p. 7 – 11.

194. Мищенко, И. М. Совершенствование технологии и оборудования агломерационного производства [Текст]/ И.М. Мищенко, В.В. Кочура, Я.Ю. Асламова, Г.И. Стамбулжи// Металлургические процессы и оборудование - 2011. - № 3. - С. 35-44.

195. Machida Satoshi. Optimization of coke breeze segregation in sintering bed under high pizolite ore ratio/ Satoshi Michida, Takahide Higuchi, Nobuoki Oyama etc.// ISIJ Int. – 2009/ - №5. – P.667-675.

196. Борисов, В. М., Пути повышения газопроницаемости агломерационных шихт. [Текст]/ В. М. Борисов, Ю. С. Карабисов, Э. В. Ловчиновский // Окускование руд. – Сер.3. – Вып. 3. ЦНИИ информации и технико-экономических исследований черной металлургии, 1973.- с 29.



197. Новак, С. Б. Теория и практика управления агломерационным процессом [Текст]/ С. Б. Новак, Н. И. Гармаш, В. А. Мартыненко// Кривой Рог. – 2006. – 340 с.

198. Савельев, С. Г. Математическое моделирование в исследовании процессов производства окускованного сырья. [Текст] / С. Г. Савельев, Я. А. Стойкова // Вісник КрНУ (збірник наукових праць). – 2012. - №34 – С. 44-47.

199. Цаплин, А. И. Моделирование теплофизических процессов и объектов в металлургии [Текст] / А. И. Цаплин, И. Л. Никулин – Пермь: Изд-во ПГТУ, 2011. – 203 с.

200. Калашников, С. Н. Математическое моделирование тепло-массообменных процессов в металлургических агрегатах на основе объектно-ориентированной технологии [Текст]: дисс. ... д. т. н. / С. Н. Калашников – Новокузнецк, 2002. – 278с.

201. Боковиков, Б. А. Математическая модель обжиговой конвейерной машины как инструмент для оптимизации тепловой схемы агрегата. [Текст]/ Б. А. Боковиков, В. В. Брагин, В. М. Малкин и др. // Сталь. – 2010. - №9. – С. 84-87.

202. Елисеев, А. А. Исследование тепло-массообменных процессов при агломерации шихты [Текст]: дисс. канд. техн. наук / А. А. Елисеев - Череповец., 2006. – 165с.

203. Мных, А. С. Определение оптимального распределения твердого топлива в слое загружаемой шихты для выравнивания теплового режима агломерационного процесса [Текст]/ А.С. Мных// Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика (збірник наукових праць). – 2014. вып. 6. – С. 69-79.

204. Мных, А. С. Анализ адекватности конечно-элементной модели процесса агломерации железорудной шихты [Текст]/ А.С. Мных// Технологический аудит и резервы производства. – 2015. №1/1 (21). – С. 22-25.

205. Пазюк, М. Ю. Контроль гранулометрического состава окомкованной шихты [Текст] / М. Ю. Пазюк, А. Н. Николаенко, В. И. Гранковский // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1981. - №12. – С. 4-6.
206. Овчинникова, И. А. Автоматизированное управление процессом формирования слоя шихты на агломерационной ленте [Текст] / И. А. Овчинникова // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. - 5/3(59). – С.35-38.
207. Рахуба, В. О. Оптимізація управління формуванням гранулометричних характеристик агломераційної шихти при підготовці до спікання: автореф. дис.. к.т.н.: 05.13.07 / В. О. Рахуба. – К. – 2010. – 21 с.
208. Русаков, П. Г. Исследование закономерностей распределения неоднородного сыпучего материала по откосу [Текст] / П. Г. Русаков, Н. Ф. Русаков, В. Г. Морозов // Изв. вузов. Черная металлургия, 1985. - №6. – С. 15-19.
209. Ищенко, А. Д. Математическая модель гранулометрического состава железорудных окатышей [Текст]/ А. Д. Ищенко// Бюл. ин-та Черметинформация. – 1992. –Вып.3. – С15-17.
210. Готовцев, А. А. Формирование слоя агломерационной шихты перед спеканием [Текст] / А. А. Готовцев, В. И. Тихонов, И. М. Сальников, С. А. Вакуленко // Сталь, 1981. - №12. – С. 11-15.
211. Коршиков, Г. В. Формирование структуры слоя шихты и спека на агломашинах АКМ-312 при различных способах загрузки [Текст] / Г. В. Коршиков, М. А. Хайков, А. С. Кузнецов// Сталь. 1996. - №11 – С.3-8.
212. Сальников, И. М. Анализ методов оценки неоднородностей структуры слоя шихты [Текст]/ И. М. Сальников, В. И. Тихонов, М. Ю. Пазюк// Изв. вузов. Черная металлургия. – 1991. - №10. С.13-15.
213. Maki Takeshi. Study for evaluation and optimization of iron ore granulation with consideration of dynamics and particle conditions/ Maki Takeshi, Sekiguchi Tao// ISJJ Int. – 2009. 49. - #5. – P.631-636.

214. Евстюгин, С. Н. Применение системы «Гранулометр» для непрерывного бесконтактного определения гранулометрического состава кусковых материалов [Текст]/ С. Н. Евстюгин. А. В. Стародумов, В. Н. Круглов// Сталь. – 2003. - №1. – С.36-38.

215. Мных, А. С. Определение сегрегации фракций аглошихты, требуемой для стабилизации теплового режима спекания [Текст]/ А.С. Мных А.О. Еремин, И.Н. Мных// Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2015. №1/8 (73). – С. 68-73.

216. Утков, В. А. Высокоосновные бокситовые агломераты [Текст]/ В. А. Утков, Б. З. Кудинов, С. В. Иванова и др.// Сталь. – 1966. - №3. – С. 212-215.

217. Ломака, Н. Ф. Производство высокоосновных бокситовых агломератов и использование их в доменной печи [Текст]/ Н.Ф. Ломака, Баев С. А., Бычин А. И. и др. // Сталь. – 1974. - №9. – С. 40-43.

218. Кашин, В. В. Теоретические и технологические основы подготовки шихты и формирования агломератов из железных, хромовых и бокситовых руд. // Диссертация на соискание ученой степени докт. техн. наук. Екатеринбург. 2000. – 300 с.

219. Mashida Satishi. Optimization of coke segregation in sintering bed corresponding to determination in iron ore quality/ Matishi Mashida, Koichi Tamiura, Takahide Higuchi etc.// The 5 International Congress on the Science and Technology of Ironmaking, Shanghai, Oct. 19-23, 2009. – Technical Program Beijing: Chin. Soc. Metals. – 2009. – P. 217-212.

220. Мных, А. С. Решение задачи распределения температуры в единичном объеме агломерационного слоя методом конечных элементов с учетом внутреннего источника тепла [Текст] / А. С. Мных // Збірник наукових праць ДДТУ. – 2014. – №2(25). – С 47-51.

221. Мных, А.С. Исследование тепловых процессов в агломерируемом слое бокситов в зависимости от сегрегации топлива и химкомпонентов по

высоте [Текст] / А. С. Мных // Энергетика. Энергосбережение. Энергоаудит. – 2015. - №6(136). – С. 23-27.

222. Плотников, С. В. Исследование механизма фазообразования при окислительном обжиге и металлизации окатышей из руд железистых кварцитов [Текст]: автореф. дисс. ... к.т.н. // С. В. Плотников – Москва, 2013. – 28с.

223. Юсфин, Ю. С. Интенсификация производства и улучшение качества окатышей [Текст] / Ю.С. Юсфин, Н.Ф. Пашков, Л.К. Антоненко и др. – М.: Metallurgy. 1994. – 240с.

224. Ковалев, Д. А. Опыт производства и использования в доменной плавке безобжиговых самовосстанавливающихся окатышей [Текст] / Д. А. Ковалев, Н. Д. Ванюкова // Теория и практика металлургии. – 2009. - №2 – С.83-92.

225. Брагин, В. В. Разработка и внедрение энергоэффективных тепловых схем конвейерных машин для обжига железорудных окатышей [Текст]: автореф. дисс. ... к.т.н. // В. В. Брагин – Екатеринбург, 2013. – 20с.

226. Копоть, Н. Н. Сравнительный анализ теплотехнических схем современных обжиговых конвейерных машин [Текст]/ Н.Н. Копоть, А.Б. Воробьев, С.С. Гончаров и др. // Сталь. – 2010. - №3. – С. 8-13.

227. Буткарев, А. А. Исследование и оптимизация теплотехнических схем обжиговых конвейерных машин и режимов термообработки железорудных окатышей [Текст]// автореферат дис. д-ра техн. наук. – Екатеринбург, 2012. -40с.

228. Дрожилов, Л. А. Сравнительный анализ агрегатов для обжига окатышей [Текст]/ Л.А. Дрожилов, А.А. Паталах, И.Ф. Дворниченко и др.// Новое в технологии и технике переработки минерального сырья: Сб. науч. тр. – Кривой рог: Механообрчермет, 2009. – С. 107-125.

229. Федоров, О. Г. Исследования термообработки железорудных окатышей с известью на обжиговых машинах [Текст] / О.Г. Федоров, В.Н.

Бойко, А.В. Петровский и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1990. - №4. – С. 5-6.

230. Мных, А. С. К вопросу синтеза тепловой модели термообработки железорудных окатышей [Текст] / А. С. Мных // *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. – 2015. – №7. – С 14-20.

231. Мных, А. С. Исследование сегрегации гранул по высоте слоя обеспечивающей исключение неравномерной тепловой обработки окатышей [Текст] / А. С. Мных // *Збірник наукових праць ДДТУ*. – 2015. – №2(27). – С. 148-153.

232. Бережной, Н. Н. Анализ способов и систем загрузки агломерационных и обжиговых машин конвеерного типа [Текст]/ Н. Н. Бережной, Я. А. Стойкова// *Вісник КрНУ (збірник наукових праць)*. – 2012. - №32 – С. 44-47.

233. Безверхий, И. В. Разработка мероприятий для увеличения сегрегации агломерационной шихты при ее загрузке на аглоленту [Текст]/ И. В. Безверхий, А. А. Томаш// *Международная научно-техническая конференция «Университетская наука 2010»*. Тезисы докладов. Том 1. – Мариуполь, 2010. – С. 40-42.

234. Пат. №2089806 Российская федерация, МПК F27B21/10 Устройство для загрузки обжиговой конвейерной машины /Л.К.Кокорин, Ю.Д.Флягин // АО «Уральский завод тяжелого машиностроения»; заявл. 02.03.1994; опубл. 10.09.1997. – 4 с.

235. Пазюк, М. Ю. Влияние условий загрузки на формирование структуры слоя шихты [Текст] // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 1985. - №6. – С.133-136.

236. Пазюк, М. Ю. Управление процессом формирования слоя агломерационной шихты [Текст] // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 1985. - №10. – С.131-134.

237. Мних, А. С. Дослідження факторів, що впливають на формування шару полідисперсних залізорудних матеріалів [Текст]/ А.С. Мних // *Металургія (наукові праці Запорізької державної інженерної академії)*. – 2014. – вип.1(31). – С. 19-23.

238. Мних, А. С. К вопросу исследования механизма формирования слоя полидисперсной агломерационной шихты [Текст]/ А.С. Мних, М.Ю. Пазюк// *Металургія (наукові праці Запорізької державної інженерної академії)*. – 2014. – вип.2(32). – С. 5-9.

239. Пазюк, М. Ю. Особенности формирования слоя полидисперсных сыпучих материалов [Текст] / М. Ю. Пазюк, В. И. Гранковский, Г. М. Туровцев // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 1983. – № 10. – С. 13-16.

240. Зенков, Р. Л. Бункерные устройства [Текст] / Р. Л. Зенков, Г. П. Гринкевич, В. С. Исаев. – М.: Машиностроение. – 1977. – 219 с. – Библиогр. : с. 214-216.

241. Мних, А. С. Исследование динамики процесса формирования слоя аглошихты подготовленной к тепловой обработке [Текст]/ А.С. Мних // *ТАРП* – 2015. №2/1 (22). – С. 39-42.

242. Мних, А. С. Исследование систем загрузки полидисперсной аглошихты с целью обеспечения требуемого теплового режима процесса спекания [Текст]/ А.С. Мних // *Вісник ПДТУ Серія: Технічні науки*. – 2015. Вип.30. Т.1. – С. 177-186.

243. Мних, А. С. К вопросу стабилизации теплового режима спекания аглошихты при использовании составного загрузочного лотка [Текст]/ А.С. Мних, И.А. Овчинникова // *Сборник трудов ДГТУ (технические науки)*. – 2015. Вып. 1(26). – С. 156-161.

244. Мних, А. С. До питання вибору системи завантаження полідисперсної бокситової шихти з метою підвищення енергоефективності теплового режиму процесу спікання [Текст]/ А.С. Мних // *Вісник ВПІ*. – 2015. №4(121) – С. 70-75.

245. Пат 42105 Україна, МПК F 27 В 21/06, С 22 В 1/16 (2009.01) Завантажувальний пристрій конвеєрної агломераційної машини/ Овчинникова І. А., Міщенко І. М., Ілюхін О. Я., Овчинников О. В. (Україна); заявник та патентотримач Запорізький нац. техн. Університет. - Заявл. 05.01.2009; опубл. 25.06.2009, Бюл. №12.

246. Сальников, И. М. Составной загрузочный лоток агломашины [Текст] / И. М. Сальников, М. Ю. Пазюк, Ю. Д. Гузь// Изв. вузов. Черная металлургия. – 1990. -№10. – С.5-7.

247. Мных, А.С. Вибір раціонального розподілу твердого палива у шарі бокситової шихти на основі моделі теплового режиму спікання [Текст] / А. С. Мных, И.Г. Яковлева // Энергетика.- 2015. №3(41) - С. 59-66.

248. Фролов Ю.А. Анализ газодинамической работы агломерационных машин [Текст]/ Ю.А. Фролов // Сталь. - 2005. –№6 – с. 42-51.

249. Мных, А. С. Исследование газодинамического сопротивления слоя полидисперсной агломерационной шихты подготовленной к спеканию [Текст]/ А.С. Мных, И.Г. Яковлева, М.Ю. Пазюк, И.А. Овчинникова // Промышленная теплоэнергетика. – 2015. - №5. Том 37. – С. 16-23.

250. Мных, А. С. Исследование влияния теплового режима процесса спекания на качественные показатели агломерата [Текст]/ А.С. Мных // ЭЭЭ. – 2015. - №4(135). – С. 46-52.

251. Мных, А. С. Оптимизация структуры агломерационной шихты с целью стабилизации теплового режима процесса спекания [Текст]/ А.С. Мных, И.Г. Яковлева, М.Ю. Пазюк, А.А. Жеребцов // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2016. - № 2. С. 34-37.

252. Мных, А. С. Усиление сегрегационных процессов в слое агломерационной шихты для снижения уровня вредных выбросов в атмосферный воздух [Текст]/ А.С. Мных // Экология и промышленность. – 2015. - №4. – С. 34-37.

253. Толочко, А. И. Очистка технологических газов в черной металлургии [Текст] / А. И. Толочко, В. И. Филипов, О.В. Филипьев. – М.: Металлургия, 1982. – 280 с.

254. Дмитриева, Е. Г. Совершенствование технологии производства агломерата на основе анализа закономерностей горения твердого топлива [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Е. Г. Дмитриева. – Екатеринбург, 2007. – 26 с.

255. Клейн, В. И. Теплотехнические методы анализа агломерационного процесса [Текст] / В. И. Клейн, Г. М. Майзель др. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. - 224 с.

256. Дельденков, А. А. Количество и состав агломерационных газов [Текст] / А. А. Дельденков, Х. Х. Тургумбаева, И. Ф. Мазалов и др. // Сб. научных трудов КазНТУ. – 2008. – № 6. – С. 29–32.

257. Мних, А. С. Про підвищення ефективності роботи барабана окомковувача з метою стабілізації якості грудкування шихти. [Текст] / А. С. Мних, Ю.М. Пазюк, М.Б. Федіна // Восточно-европейский журнал передових технологій. – 2010. - №2/1(44). С. 70-73.

258. Мных, А. С. Исследование изменения качественных показателей агломерата от теплового режима процесса спекания [Текст]// Материалы Всеукраинской научно-практической конференции «Актуальні питання енергоефективності гірничо-металургійного виробництва», Кривой-Рог. – 2015. С. 99.

259. Мных, А. С. Описание тепловых процессов в слое монодисперсного сыпучего материала [Текст] / А. С. Мных // Материалы X международной научно-практической конференции «Перспективные вопросы мировой науки». г. София, Болгария. – 2015. том 19. – С. 42-44.

260. Мных, А. С. К вопросу оптимизации подготовки твердого топлива к тепловой обработке агломерационной шихты [Текст]/ А.С. Мных, И.Г. Яковлева, М.Ю. Пазюк // ЭЭЭ. – 2015. - №10(141). – С. 56-63.

261. Бережной, Н. Н. Вредные выбросы при агломерации железорудных концентратов на ГОКах Кривбасса [Текст] / Н. Н. Бережной,



П. В. Бересневич, А. М. Голышев и др. // Вестник КрНУ. – 2006. – № 2. – С. 300–309.

262. Кривенко, С. В. Структура агломератов различной основности [Текст]/ С.В. Кривенко, Г.Г. Божков // Вісник ПДТУ Серія: Технічні науки. – 2014. Вып.28. Т.1. – С. 31-37.

263. Мных А. С. Влияние условий формирования сыпучего слоя железорудных и бокситовых материалов на коэффициент теплоотдачи [Текст]/ А.С. Мных, И.Г. Яковлева, М.Ю. Пазюк // Холодильна техніка та технологія. – 2016. – Том 52, №4. – С. 16-20.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

## Приложение А

## Приложение Б



## Приложение В

## Приложение Г







## Приложение Д

## Приложение Е

## Приложение Ж

## Приложение 3

Листинг программы оптимизации структуры слоя агломерационной шихты:

```

Program layer_opt;
uses crt;
type shihta=record
  d_av:real;
  part:real;
  V0:real;
  Vc:array [1..30]of real;
  Vk:real;
  f1:real;
end;
type gorizont=record
  d_cp:real;
  de:real;
  Re:real;
  khi:real;
  dP:real;
  C:real;
end;
var alpha1,alpha2,alpha_min,alpha_max:real;
  sh,tsh:array[1..20]of shihta;
  gor:array[1..10]of gorizont;
  gor_part:array[1..10]of real;
  sum_dp,c_sum:array [1..20,1..20]of real;
  c:array[1..20,1..20,1..10]of real;
  c1:array[1..10] of real;
  sito_count:integer;
  gor_count:integer;
  l1,l2:real;
  dp_min,c_min,a1_min,a2_min,c1_min,c2_min:real;
  w,dt,q,nu,eps,mu:real;
  H,ro,betta,T:real;
  V_min:real;
  i,j,a1,a2,m1,m2:integer;

```

```

begin
  clrscr;
  {Блок ввода входных данных}
  alpha_min:=45;alpha_max:=51;
  l1:=0.75;
  l2:=0.46;
  H:=0.1;
  q:=9.81;nu:=5/7;eps:=0.44;mu:=2/3;w:=0.6;dt:=0.0000145;
  ro:=1.1;beta:=0.003661;T:=20;
  V_min:=0.64;
  {Ввод исходной шихты}
  sito_count:=6;
  gor_count:=5;
  sh[1].d_av:=2; sh[1].part:=0.16;
  sh[2].d_av:=3.5;sh[2].part:=0.25;
  sh[3].d_av:=4.6;sh[3].part:=0.18;
  sh[4].d_av:=6.2;sh[4].part:=0.23;
  sh[5].d_av:=8.5;sh[5].part:=0.12;
  sh[6].d_av:=11.2;sh[6].part:=0.07;
  c1[1]:=4.85;c1[2]:=3.56;c1[3]:=3.04;c1[4]:=2.515;c1[5]:=2.36;
  {}
  writeln('Количество групп фракций', sito_count);
  writeln('Таблица значений среднего диаметра каждой группы фракций и их
  доленое содержание');
  writeln('№ | d ср | Φi ');
  for i:=1 to sito_count do
    writeln(i:2,'|', sh[i].d_av:7:3,'|', sh[i].part:6:3);

  {Построение таблицы}

  {Блок расчета }
  alpha1:=alpha_min;
  alpha2:=alpha_min;
  a1:=1;
  while alpha1<=alpha_max do
    begin

```

```

writeln('-----');
writeln('Альфа 1=',alpha1:6:2);
writeln('№ | d cp | Φi | V0 | f1 | Vk');
for i:=1 to sito_count do
  begin
    sh[i].V0:=0.12;
    sh[i].f1:=1.412*exp(-0.39*ln(sh[i].d_av));
    sh[i].Vk:=2*q*I1*nu*(sin(alpha1*pi/180)-
sh[i].f1*cos(alpha1*pi/180))+sqr(sh[i].V0);
    if sh[i].Vk>=0 then sh[i].Vk:=sqrt(sh[i].Vk) else sh[i].Vk:=0;
    writeln(i:2,'|', sh[i].d_av:7:3,'|', sh[i].part:6:3,'|',
sh[i].V0:6:3,'|',sh[i].f1:6:3,'|',sh[i].Vk:6:3);
  end;
writeln;
for i:=1 to sito_count do
  begin
    write('Группа фракций №', i, ' со средним диаметром ',sh[i].d_av:5:2);
    if sh[i].Vk>V_min then
      begin
        writeln(' попала на лоток 2');
        j:=1; alpha2:=alpha_min;
        while alpha2<=alpha_max do
          begin
            sh[i].Vc[j]:=2*q*I2*nu*(sin(alpha2*pi/180)-
sh[i].f1*cos(alpha2*pi/180))+sqr(sh[i].Vk);
            sh[i].Vc[j]:=sqrt(sh[i].Vc[j]);
            writeln('alpha2= ',alpha2:6:2,'| Vc(' ,j:2,')= ', sh[i].Vc[j]:6:3);
            alpha2:=alpha2+1;
            inc(j);
          end;
        end
      else
        begin
          writeln(' попала в верхний горизонт');
          j:=1; alpha2:=alpha_min;
          while alpha2<=alpha_max do

```

```

begin
  sh[i].Vc[j]:=0;
  alpha2:=alpha2+1;
  inc(j);
end;
end;
end;
a2:=1;
alpha2:=alpha_min;
while alpha2<=alpha_max do
begin
  for i:=1 to sito_count do tsh[i]:=sh[i];
  writeln('\V\V\V\V\V\V\V\V\V\V\V\V\V\V\V\');
  writeln('Формирование горизонтов');
  for i:=1 to gor_count do
  begin
    gor_part[i]:=1/gor_count;
    gor[i].d_cp:=0;
  end;
  (*-----*)
  j:=sito_count;
  for i:=gor_count downto 1 do
  begin
    while tsh[j].part<=gor_part[i] do
    begin
      gor[i].d_cp:=gor[i].d_cp+tsh[j].d_av*tsh[j].part*gor_count;
      gor_part[i]:=gor_part[i]-tsh[j].part;
      dec(j);
    end;
    tsh[j].part:=tsh[j].part-gor_part[i];
    gor[i].d_cp:=gor[i].d_cp+tsh[j].d_av*gor_part[i]*gor_count;
  end;
  (*-----*)
  writeln('№ | d_cp |,' de |,' Re |,' khi |,' dP | C ');

  sum_dP[a1,a2]:=0;

```



```

for i:=1 to gor_count do
  begin
    gor[i].de:=mu*eps/(1-eps)*gor[i].d_cp/1000;
    gor[i].Re:=w*gor[i].de/dt;
    gor[i].khi:=29570*exp(-1.2*ln(gor[i].Re))+85.71;
    gor[i].dP:=4*gor[i].khi*H/gor[i].de*sqr(w)/2*ro*(1+beta*T);

gor[i].C:=0.001495*gor[i].d_cp*gor[i].d_cp*gor[i].d_cp*gor[i].d_cp*gor[i].d_cp;
    gor[i].C:=gor[i].C-
0.0447*sqr(sqr(gor[i].d_cp))+0.4664*gor[i].d_cp*gor[i].d_cp*gor[i].d_cp;
    gor[i].C:=gor[i].C-2.001*sqr(gor[i].d_cp)+2.951*gor[i].d_cp+3.389;
    c[a1,a2,i]:=gor[i].C;
    sum_dP[a1,a2]:=sum_dP[a1,a2]+gor[i].dP;
    writeln(i:2,'|', gor[i].d_cp:6:3,'|',gor[i].de:9:6,'|',
gor[i].Re:8:3,'|',gor[i].khi:8:3,'|',gor[i].dP/1000:8:3,'|', gor[i].C:8:3);
    end;
    writeln('Суммарные потери давления в слое= ',sum_dP[a1,a2]/1000:8:4, '
кПа ');
    sum_dP[a1,a2]:=sum_dP[a1,a2]/1000;
    alpha2:=alpha2+1;
    inc(a2);
    end;

    alpha1:=alpha1+1;
    inc(a1);
  end;

dec(a1);dec(a2);
write('  |');
for i:=1 to a2 do
write(alpha_min+i-1:6:0,'|');
writeln;
for i:=1 to a1 do
  begin
    write(alpha_min+i-1:6:0,'|');
    for j:=1 to a2 do

```

```

begin
  write(sum_dP[i,j]:6:2,'|');
end;
writeln;
end;
a1:=1;a2:=1;
dp_min:=9999999999999999999;
c_min:=9999999999999999999;
alpha1:=alpha_min;
while alpha1<=alpha_max do
begin
  alpha2:=alpha_min;
  a2:=1;
  while alpha2<=alpha_max do
  begin
    for i:=1 to gor_count do
    begin
      c_sum[a1,a2]:=c_sum[a1,a2]+sqr(c[a1,a2,i]-c1[i]);
    end;
    if sum_dP[a1,a2]<dp_min then begin
      dp_min:=sum_dP[a1,a2];
      m1:=a1;m2:=a2;
      a1_min:=alpha1;a2_min:=alpha2;
    end;
    if c_sum[a1,a2]<c_min then begin
      c_min:=c_sum[a1,a2];
      c1_min:=alpha1;c2_min:=alpha2;
    end;

    alpha2:=alpha2+1;
    inc(a2);
  end;
  alpha1:=alpha1+1;
  inc(a1);
end;

```

```
writeln('Min давление', dp_min:7:3,', при Альфа1=', a1_min:4:1,', при  
Альфа 2=', a2_min:4:2);  
writeln('Min расход топлива', c_min:7:3,', при Альфа 1=', c1_min:4:1,', при  
Альфа 2=', c2_min:4:2);  
readln;  
end.
```