

Казахский национальный исследовательский технический университет имени  
К.И. Сатпаева

УДК 550.34.013.4 (661.63)

На правах рукописи

**ТОКТАСЫНОВА НИГИНА РИШАТОВНА**

**Моделирование и исследование системы управления процессом  
агломерации фосфоритных руд**

6D070200 – Автоматизация и управление

Диссертация на соискание степени  
доктора философии (PhD)

Научный консультант  
доктор технических наук, профессор  
Сулейменов Б.А.

Зарубежный научный консультант  
PhD, Associate Professor  
Hassen Fourati

Республика Казахстан  
Алматы, 2021

## СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ .....	2
НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ .....	4
ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	5
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ .....	7
ВВЕДЕНИЕ.....	9
1    СОВРЕМЕННОЕ                  СОСТОЯНИЕ                  МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ АГЛОМЕРАЦИОННОГО ПРОЦЕССА .....	16
1.1    Описание агломерационного процесса.....	16
1.2    Основные направления моделирования агломерационного процесса .....	18
1.2.1  Моделирование распространения теплового фронта.....	19
1.2.2  Прогнозирование производительности и качества агломерата .....	19
1.2.3  Прогноз точки спекания.....	21
1.2.4  Трехмерное прогнозирование температуры твердого агломерата вдоль агломашины .....	21
1.2.5  Прогнозирование качества агломерата, производительности потребления топлива .....	22
1.2.6  Влияние влаги на процесс агломерации.....	22
1.2.7  Управление проницаемостью шихты .....	22
1.2.8  Характерные черты математических моделей агломерационного процесса .....	23
Выводы по первому разделу .....	31
2    РАЗРАБОТКА                  МАТЕМАТИЧЕСКОЙ                  МОДЕЛИ                  ПРОЦЕССА АГЛОМЕРАЦИИ ФОСФОРИТОВЫХ РУД.....	33
2.1    Объект моделирования.....	33
2.2    Схематичное представление модели.....	34
2.3    Расчет изменения температуры при спекании.....	35
2.3.1  Теплопередача в пористом материале .....	35
2.3.2  Расчет теплообмена между твердым и газообразными средами .....	36
2.4    Определение скорости движения газа в пористой среде.....	37
2.5    Определение теплоты в результате горения кокса.....	41
2.6    Изменение концентрации в результате реакции горения .....	41
2.7    Определение теплофизических свойств шихты .....	42
2.8    Моделирование процесса агломерации .....	44
2.8.1  Среда моделирования .....	44

2.8.2	Создание модели в программной среде COMSOL Multiphysics .....	45
2.8.3	Результаты моделирования .....	62
2.8.4	Исследование продолжительности спекания .....	65
	Выводы по второму разделу .....	66
3	СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТОДОВ СИНТЕЗА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТОЧКОЙ СПЕКАНИЯ ПРИ АГЛОМЕРАЦИОННОМ ОБЖИГЕ .....	68
3.1	Прогнозные модели точки спекания агломерационной шихты .....	68
	Выводы по третьему разделу .....	72
4	МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОГНОЗА ТОЧКИ СПЕКАНИЯ ПРОЦЕССА АГЛОМЕРАЦИИ .....	74
4.1	Основные параметры прогнозной модели точки спекания .....	74
4.2	Проверка влияния параметров на температуру спекания .....	76
4.3	Серые системы для прогнозирования точки спекания .....	79
4.3.1	Серая модель GM(1,1) .....	81
4.3.2	Непрерывная интегральная серая модель свертки GMC(1,2) .....	83
4.3.3	Непрерывная интегральная серая модель свертки первой пары данных FGMC(1,n) .....	84
4.3.4	Оптимальная непрерывная динамическая интегральная серая модель свертки OGDMC(1,n) .....	84
4.4	Определение объема исходной выборки для построения модели .....	85
4.5	Результаты прогнозных моделей .....	86
4.6	Оптимальная серая прогнозная модель точки спекания OGMС(1,n) .....	89
	Выводы по четвертому разделу .....	92
5	МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ АГЛОМЕРАЦИИ ФОСФОРИТНЫХ РУД .....	94
	Выводы по пятому разделу .....	99
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	101
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	104
	Приложение А. Виды заданий исходных параметров модели .....	110
	Приложение Б. Исходные Данные .....	113
	Приложение В. Реализация алгоритмов на Matlab .....	114
	Приложение Г. Акт передачи алгоритмов .....	126
	Приложение Д. Список опубликованных работ .....	127

## **НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ**

В настоящей диссертации использованы ссылки на следующие стандарты: «Инструкция по оформлению диссертации и автореферата», ВАК МОН РК, №377-3ж.

ГОСТ 7.32-2001 – Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. «Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления».

ГОСТ 7.1 – 2003. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления.

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящей диссертации применяют следующие термины с соответствующими определениями:

**Агломерация** – термический процесс окускования мелких материалов (руды, рудных концентратов, содержащих металлы отходов и др.), являющихся составными частями металлургической шихты, путем их спекания с целью придания формы и свойств (химического состава, структуры), необходимых для плавки.

**Аглошихта** – смесь исходных рудных материалов, флюсов и топлива в соотношении, обеспечивающем получение агломерата заданного качества.

**Аглолента** – конвейерная машина для агломерации руд и концентратов.

**Алгоритм трехдиагонального матричного решателя** – алгоритм Томаса (по имени Луэллина Томаса), является упрощенной формой исключения Гаусса, которая может быть использована для решения трехдиагональных систем уравнений.

**Вакуум-камера** – сварная конструкция с патрубками и тарельчатыми компенсаторами, предназначена для отсоса отходящих газов.

**Горн** – корпус, футерованный огнеупорным кирпичом, плоский подвесной свод с установленными в нем газогорелочными устройствами, представляющими собой трубчато-щелевые многоструйные горелки с подводом вторичного воздуха, имеют поперечное расположение на всю ширину аглоленты.

**Интерполяция** – от лат. *interpolis* — «разглаженный, подновлённый, обновлённый; преобразованный») – в вычислительной математике нахождение неизвестных промежуточных значений некоторой функции, по имеющемуся дискретному набору ее известных значений, определенным способом.

**Метод конечных разностей** – численный метод решения дифференциальных уравнений, основанный на замене производных разностными схемами.

**Паллета** (обжиговая или спекательная тележка) – часть обжиговой или агломерационной машины в виде массивной тележки, на которую загружается слой агломерационной шихты при производстве агломерата.

**Пористость** – доля объема пор в общем объеме пористого тела.

**Постель** – слой агломерата крупностью 10—20 мм без топлива.

**Тестовый котелок** – лабораторная установка для проведения тестов над процессом агломерации.

**Точка спекания** – точка с наивысшей температурой.

**Третичный возврат** – возврат агломерата крупностью  $(0-6) \times 10^{-3}$  м.

**Холодный возврат** – возврат агломерата от узла контрольного грохочения шихтовального отделения печного цеха.

**Шихта** – смесь мелочи фосфорита крупностью  $(0-10) \times 10^{-3}$  м, отсева контрольного грохочения из шихтовального отделения печного цеха (агломерат фракции  $(0-6) \times 10^{-3}$  м) и мелочи кокса (антрацита, графита) фракции  $(0-3) \times 10^{-3}$  м.

**LU-разложение (LU-декомпозиция, LU-факторизация)** – представление матрицы  $A$  в виде произведения двух матриц,  $A=LU$ , где  $L$  — нижняя треугольная матрица, а  $U$  — верхняя треугольная матрица.

**Step time** – ступенчатый сигнал

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В диссертационной работе использованы следующие сокращения:

- НДФЗ – Новоджамбульский фосфорный завод  
AGO (Accumulated Generating Operation) – Аккумулятивная генерирующая операция;  
FGMC – непрерывная интегральная серая модель свертки, построенная на идее независимости прогноза от первой пары исходных данных выборки;  
GM (Grey Model) – серая модель первого порядка с одной переменной;  
GMC – непрерывная интегральная серая модель свертки;  
GRA (Grey Relational Analysis) - серый реляционный анализ;  
IGDMC – интервальная модель с интегралом свертки;  
MSE (Mean Square Error) – среднеквадратичная ошибка соответствует значению квадрата потери ошибок;  
OGDMC – оптимальная непрерывная динамическая интегральная серая модель свертки;  
TI – показатель холодной механической прочности или показатель способности сопротивляться разрушающим усилиям (трению, сжатию и удару) при транспортировке, загрузке и движении в доменной печи;  
RDI (Reduction Degradation Index) – показатель прочности агломерата после восстановления или показатель способности агломерата сохранять механическую прочность после восстановления и поддерживать газодинамическое сопротивление слоя как можно меньше и дольше при высоких температурах для обеспечения ровного хода доменной печи;  
RI – показатель реактивности;  
RMSE (Root Mean Square Error) – среднеквадратичная ошибка;  
RMSPE (Root Mean Square Percentage Error) – среднеквадратичная ошибка в процентах;  
RMSPEPR (Root Mean Square Percentage Error PRiori) – значение среднеквадратичной ошибки в процентах к периоду априорной выборки.

В диссертационной работе использованы следующие обозначения:

- $\Delta p$  – падение давления, [Па];  
 $L$  – высота шихты, [м];  
 $\mu$  – вязкость, [Па·с];  
 $\varepsilon$  – пористость;  
 $\rho$  – плотность, [кг/м<sup>3</sup>];  
 $d$  – диаметр гранул, [м];  
 $u$  – скорость воздушного потока, [м/с];  
 $k$  – теплопроводность (газ), [Вт/(м · К)];  
 $C_p$  – теплоемкость при постоянном давлении (газ), [Дж/(кг · К)];  
 $\gamma$  – соотношение удельных теплоемкостей (газ);  
 $\theta$  – объемная доля (твердое тело);  
 $Q$  – источник тепла от химических реакций и тепла подаваемых извне, [Вт/м<sup>3</sup>];  
 $T_0$  – температура окружающей среды, [С];

$T$  – температура шихты, [С];  
 $Re$  – число Рейнольдса;  
 $Pr$  – число Прандтля;  
 $k$  – проницаемость (пористая матрица), [м<sup>2</sup>];  
 $f_p$  – фактор изменения пористости при усадке спекания;  
 $f_{pbase}$  – глобальная константа калибровки;  
 $k_f$  – константа скорости реакции;  
 $A^f$  – частотный коэффициент;  
 $E^f$  – энергия активации, [Дж/моль];  
 $R_g$  – универсальная газовая постоянная;  
 $H_j$  – энтальпия;  
 $\omega_i$  – массовая доля газа  $i$ ;  
 $j_i$  – переменная, включающая в себя модель диффузии процесса;  
 $R_i$  – скорость реакции;  
 $r$  – коэффициент корреляции;  
 $\sum d^2$  – сумма квадратов разностей рангов;  
 $n$  – число парных наблюдений;  
 $\varepsilon_{yx}^{\pm}$  – расчет двунаправленного абсолютного серого реляционного коэффициента.

В диссертационной работе использованы следующие индексные обозначения:

$g$  – свойства газовой фазы;  
 $s$  – свойства твердой фазы;  
 $l$  – свойства жидкой фазы;



## ВВЕДЕНИЕ

**Оценка современного состояния решаемой научно-технологической задачи.** Агломерация в металлургии представляет собой термический процесс окускования металлургической шихты, состоящей из гранул различных металлов и топлива. С точки зрения природных ресурсов агломерация является ключевой технологией, позволяющей переработать продукты или пыль, образующуюся в металлургии. Используемое сырье может широко варьироваться от руды до вторичного использования пыли и флюсов.

Процесс агломерации представляет собой сложный, многомерный технологический процесс который протекает в условиях большого числа возмущающих воздействий: изменение химико-минералогического, гранулометрического состава шихты; условий увлажнения, дозирования, смешивания и укладки шихты на спекательные тележки агломашины. Несмотря на наличие автоматизации процесса, системы управления агломерационным обжигом на современных производствах не позволяют обеспечить максимальную производительность агломашин и постоянство высокого качества выходного продукта.

Агломерация является нелинейным процессом из-за чего управление качеством конечного продукта в режиме реального времени представляет собой сложную задачу. На практике управление процессом происходит с запаздыванием: оператор изменяет параметры процесса уже после получения готового продукта, что приводит к появлению возврата, т.е. агломерата, который необходимо вернуть на начальную стадию для повторной обработки. Возврат может достигать до 40-50% от готового агломерата, что значительно увеличивает стоимость процесса, а также вносит неопределенность в состав исходной шихты.

Улучшение качества агломерата можно добиться как через изменение процесса – оптимизация состава шихты, размеров гранул, изменения количества топлива, воды и т.д., так и через управление процессом – управление скоростью движения паллет, разряжением в вакуум-камерах, высотой шихты.

Решение задачи изменения процесса приводит к необходимости использования аналитического метода моделирования, использующего физико-химические процессы, происходящие при агломерации. Преимущество аналитического метода заключается в полноте построения модели, учитывающего все процессы агломерации и позволяющего на основе модели проводить исследования и эксперименты. При этом данный метод является универсальным для моделирования сходных процессов. Проблема использования и адаптация существующих моделей для процесса агломерации фосфоритовых руд заключается в нераспространенности данного процесса, а использование готовых моделей агломерации железных руд невозможно в виду различий в происходящих химических реакциях. Это обстоятельство, приводит к необходимости построения оригинальной модели агломерационного обжига фосфоросодержащих материалов.

Современные методы решения задачи управления процессом основаны на эмпирическом методе исследования, который заключается на сборе большого

количества данных и построении модели на алгоритмах обучения. Данный метод предполагает проведение экспериментов над объектом для получения репрезентативной выборки данных. В настоящий момент для технологических процессов все чаще используются модели, построенные на основе нейронных сетей. Недостатком данного метода является необходимость в большом количестве данных и переобучение модели при изменении условий процесса. Данный факт, является критичным для процесса агломерации, ввиду изменения состава шихты, зависящего как от минералогических свойств руды, так и от количества возврата. В связи с вышесказанным, возникает необходимость построения модели, используя малый объем информации и позволяющий в режиме реального времени переобучать модель.

**Основание и исходные данные для разработки темы.** Основанием для разработки данной темы является выписка из протокола заседания кафедры «Автоматизация и управление» №3 от 30 сентября 2016 г. об утверждении научных руководителей и тем докторских диссертации PhD докторантов специальности 6D070200 – Автоматизация и управление. Исходными данными для выполнения исследования являются статьи, доклады, учебники и монографии, а также техническая документация и опыт автора, полученный во время работы в научно-исследовательских проектах и на производственных объектах в период с 2013 по 2019 гг.

**Обоснование необходимости проведения научно-исследовательской работы.** Исследование процесса агломерации и возможность внедрения изменений в технологический процесс до недавнего времени проводилось на основе реальных экспериментов на специальной лабораторной установке, называемой «тестовым котелком» [1,2]. Это позволяло выявить изменение основных параметров при агломерации и определить основные физико-математические уравнения для описания процесса. Эти опыты привели к использованию аппарата математического моделирования для исследования процесса, которые стали экономически более выгодны для проведения исследований. И хотя существует огромное количество моделей агломерации, в виду различий минералогического состава и свойств фосфоритовых руд от распространенных железных руд, моделирование данного процесса является необходимым.

С точки зрения задач прогнозирования качества агломерата, большая часть современных работ использует огромное количество данных и параметров для построения адекватной модели. Это требует времени как для сбора данных, так и для проведения обучения, а также необходимость повторного обучения при изменении процесса. В реалиях рассматриваемого агломерационного цеха, это требует колоссальных финансовых и временных ресурсов на систему сбора данных, что приведет к удорожанию конечного продукта. Поэтому возникает необходимость построения прогнозной модели на основе малой выборки данных в режиме реального времени.

**Сведения о планируемом научно-техническом уровне разработки, патентных исследованиях и выводы из них** определяются полнотой исследования процесса моделирования агломерации различных руд, а также

прогнозных моделей точки спекания. По обоим проблемам будет проведен тщательный литературный обзор за последние годы.

Научно-технический уровень диссертационной работы будет обеспечен новизной и адекватностью полученных результатов, их практической значимостью и перспективностью использования. В результате проведенных исследований будут разработаны математическая модель процесса агломерации в специальном программном пакете COMSOL Multiphysics, методы и алгоритмы построения оптимальной серой модели, реализация предложенных алгоритмов для прогноза точки спекания фосфоритовых руд, а также разработана структура управления процессом на основе динамической прогнозной модели.

**Сведения о метрологическом обеспечении диссертации.** Математические модели процесса агломерации будут реализованы в программном пакете COMSOL Multiphysics с использованием специальных модулей теплопередачи, движения газа и химических реакций. Для проверки адекватности системы будет использован модуль теплопередачи в твердых и газообразных средах, модели агломерации, представленные в других работах и на основе реальных данных с предприятия. Построение прогнозной математической модели будет реализовано с помощью пакета прикладных программ Matlab с помощью m-файлов. Во время исследования будут использованы программные пакеты MS Excel. Экспериментальные исследования на объекте будут проводиться с использованием заводского приборного парка, прошедшего все необходимые поверки и сертификации.

**Актуальность темы диссертационного исследования.**

ТОО «Казфосфат» представляет фосфорную промышленность Республики Казахстан, и является лидирующим предприятием по производству фосфорсодержащей продукции на территории стран СНГ. Продукция предприятия поставляется как в страны Восточной и Западной Европы, так и в страны СНГ, Китая, а также на внутренний рынок. Деятельность компании направлена на решение приоритетных задач по развитию предприятий химической подотрасли Казахстана, создание качественной конкурентоспособной продукции на мировом рынке, создание имиджа Республики Казахстан как поставщика высокотехнологичных товаров, являющихся результатом высокого уровня переработки сырья [3].

На предприятии впервые в мировой практике внедрена технология получения желтого фосфора из агломерированной мелочи фоссырья (агломерат). Необходимость выпуска продукции высокого качества и уменьшение себестоимости продукции металлургических предприятий приводят к необходимости улучшения качества на всех этапах производства и, в частности, на начальном переделе – агломерационном производстве [4].

Процесс агломерации управляется с задержкой по времени, т.е. по получению готового пирога и возврата определяется необходимость в изменении скорости, исходного количества кокса и разряжения в вакуум-камерах. Это обстоятельство приводит к появлению большого количества возврата, который подвергается повторной обработке. И хотя отходы в данном случае минимальны, возврат приводит к внесению возмущений в процесс и необходимости

дополнительных ресурсов на спекание. В этой связи для улучшения качества продукта актуальной является задача исследования процесса, с целью синтеза его математической модели, которая позволит управлять за счет прогнозирования качества продукта в ходе спекания, что позволит принимать решение об управлении заранее.

**Научная новизна темы исследования.** Существует огромное количество математических моделей агломерации различных руд: железных, свинцово-цинковых, алюминиевых и других металлов. Все разработанные модели, использующие уравнения теплового баланса, основаны на теплообмене в твердых и газообразных средах. Также каждая модель использует уравнение движения газа, горения топлива, испарения и конденсации, и прочие физико-химические и геометрические процессы, протекающие при спекании. Это приводит к необходимости решения дифференциальных уравнений высокого порядка. Любое уменьшение порядка модели приводит к уменьшению времени моделирование и использованию меньших вычислительных ресурсов компьютера. Поэтому научная новизна исследования заключается в разработке математической модели меньшего порядка, используя теплообмен в пористых материалах, для фосфоритовых руд.

Задача управления агломерационным процессом является актуальной в виду большого количества возврата и необходимости повторного спекания агломерата плохого качества. Эта задача решается с помощью построения различных моделей, которые используют нечеткую логику, нейронные сети, генетические алгоритмы, механизмы кластеризации и прочие. Каждая из моделей имеет свои особенности, такие как опора на знания экспертов, обучение модели, большая выборка данных, а построение таких моделей требует больших ресурсов времени и необходимость переобучения при изменении процесса. В виду этого разработка динамической модели, которая будет на основе малой выборки (в условиях неопределенности) данных давать адекватные результаты является необходимой и обладает научной новизной.

Научная новизна исследования заключается в:

- разработке модели агломерации фосфоритовых руд на основе физики теплообмена в пористых материалах вместо классического теплообмена в твердых и газообразных средах;
- разработке новой оптимальной прогнозной серой модели (Grey model) на основе теории серых систем и алгоритма оптимизации «роя частиц». Теория серых систем относится к классу неопределенных системы представляет собой новую методологию, которая фокусируется на изучении проблем, связанных с малыми объемами выборки данных и недостаточной (poor) информацией;
- алгоритме получения прогноза точки спекания агломерата на основе разработанной оптимальной прогнозной серой модели;
- структуре управления процессом агломерации, включающая в себя разработанную динамическую модель прогноза.

**Связь данной работы с другими научно-исследовательскими работами.** Данная работа тесно связана с ранее выполненными исследованиями по научно-техническим проектам «AP05130067-OT-18 Разработка и испытание

интеллектуальных алгоритмов оптимального управления технологическим процессом получения ангидрида фосфора  $P_2O_5$  в условиях опытно-промышленной установки НДФЗ» и «AP08856867-OT-18 «Разработка и испытание интеллектуальных алгоритмов оптимального управления технологическим процессом очистки желтого фосфора в условиях НДФЗ» 2018-2020 гг.

**Цель работы** заключается в моделировании агломерационного процесса фосфоритовых руд и разработки структуры управления. В связи с этим необходимо определить направление моделирования, структуру модели, описать разработанные математические модели физических явлений, проверить на адекватность и точность. На основе полученных исходных данных необходимо построить динамическую прогнозную модель, которая позволит в режиме реального времени прогнозировать качество конечного продукта. Для построения динамической прогнозной модели необходимо провести анализ имеющихся моделей, определить ее основные параметры, построить оптимальную с точки зрения используемых данных модель, оценить точность и предложить структуру системы управления на основе прогнозной модели.

**Объект исследования.** Объектом исследования является процесс агломерации фосфоритовых руд.

**Предмет исследования.** Предметом исследования является физико-химические процессы, происходящие при агломерации фосфоритовых руд и методы прогнозирования точки спекания агломерата.

**Задачи исследований, их место в выполнении научно-исследовательской работы в целом.** В соответствии с поставленной целью, определены следующие задачи, которые необходимо решить в настоящей работе:

- выполнить анализ математических моделей агломерационного процесса: основные направления, методы моделирования, используемые физико-химические процессы и задачи моделирования. Определить наиболее важные черты математических моделей;

- разработать математическую модель процесса агломерации и проверить ее адекватность: описать основные физико-химические процессы, среду моделирования, представить результаты исследования;

- провести анализ прогнозных моделей точки спекания: определить основные алгоритмы, используемые для прогноза, выявить достоинства и недостатки, выбрать оптимальный алгоритм для построения прогноза;

- разработать динамическую математическую модель прогноза точки спекания: проверить на адекватность и точность существующие модели, улучшить точность моделей через выбор оптимального размера исходной выборки для обучения, а также использования алгоритмов нахождения оптимума;

- разработать структуру системы управления на основе прогнозной модели и представить результаты.

**Методологическая база исследований.** Поставленные задачи решались путём проведения теоретических и практических исследований. В ходе решения поставленных задач использовались законы теплопередачи в твердых и газообразных средах, теплообмена в пористом материале, законы движения газа, уравнения горения топлива, методы корреляций, различные алгоритмы теории серых систем, алгоритмы оптимизации «роя частиц», а также теория и основные принципы работы процесса агломерации.

**Положения, выносимые на защиту.** На защиту выносятся следующие положения:

1) разработанная математическая модель в среде COMSOL Multiphysics с использованием физических законов теплообмена в пористых средах, позволяющая проводить исследования процесса агломерации при изменении температуры внутри шихты, изменении давления, содержания топлива, воды и других параметров процесса, а также проводить параметрический анализ и оптимизацию процесса с учетом реальных условий и режимов работы;

2) разработанный пошаговый алгоритм оптимальной серой прогнозной модели OGMС(1,n), на основе непрерывной интегральной серой модели свертки GMC(1,n) и метода оптимизации «роя частиц», включающий в себя определение влияющих параметров, объема исходной выборки и построения самой модели;

3) разработанная динамическая серая прогнозная модель точки спекания фосфоритовых руд, с использованием одного влияющего параметра – скорости газа.

4) структура управления на основе динамической прогнозной модели.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, заключения и приложений, библиографического списка из 91 наименований и содержит 127 страниц, 55 рисунков и 10 таблиц.

Ход работы будет организован в соответствии с последовательностью, изображенной на рисунке 1.

**В первом разделе** рассмотрены особенности технологического процесса агломерации как объекта управления и определено направление для моделирования агломерационного процесса. В разделе проведен обзор различных моделей агломерации, выделены их характерные черты, преимущества и недостатки. На основе сравнительного анализа моделей определен дальнейший тип модели агломерационного процесса, основные параметры и переменные процесса, допущения и ограничения.

**Во втором разделе** представлен объект моделирования, даны основные уравнения, описываемые процесс спекания агломерата, определены свойства и параметры модели. Описываются физические свойства процессов, которые происходят для получения агломерата от исходной шихты. Также создана непосредственно модель процесса и представлены результаты моделирования.

**Третий раздел** посвящен оценке современного состояния прогнозных моделей и их применения, проанализированы имеющиеся модели и методы их построения. На основе проведенного анализа в качестве модели для спекания выбрана теория серых систем.

**Четвертый раздел** посвящен построению математической модели прогноза точки спекания, начиная от определения основных переменных прогнозной модели и заканчивая построением оптимальной серой модели. В подразделах представлены различные модели серых систем, а также их использование для процесса агломерации фосфоритовых руд. В результате построена математическая модель прогноза точки спекания агломерата на основе теории серых систем, позволяющая на основе малой выборки данных получать результаты высокой точности.

**Пятый раздел** посвящен описанию структуры системы управления на основе динамической модели прогноза, что позволит изменять переменные процесса в режиме реального времени с целью достижения точки спекания агломерата.

**В заключении** диссертации по результатам представленных исследований сформулированы основные выводы работы.

**В приложении** приведены сведения об исходных данных с агломерационного цеха, представлены алгоритмы для построения прогнозных моделей и использовании результатов работы для практических целей.

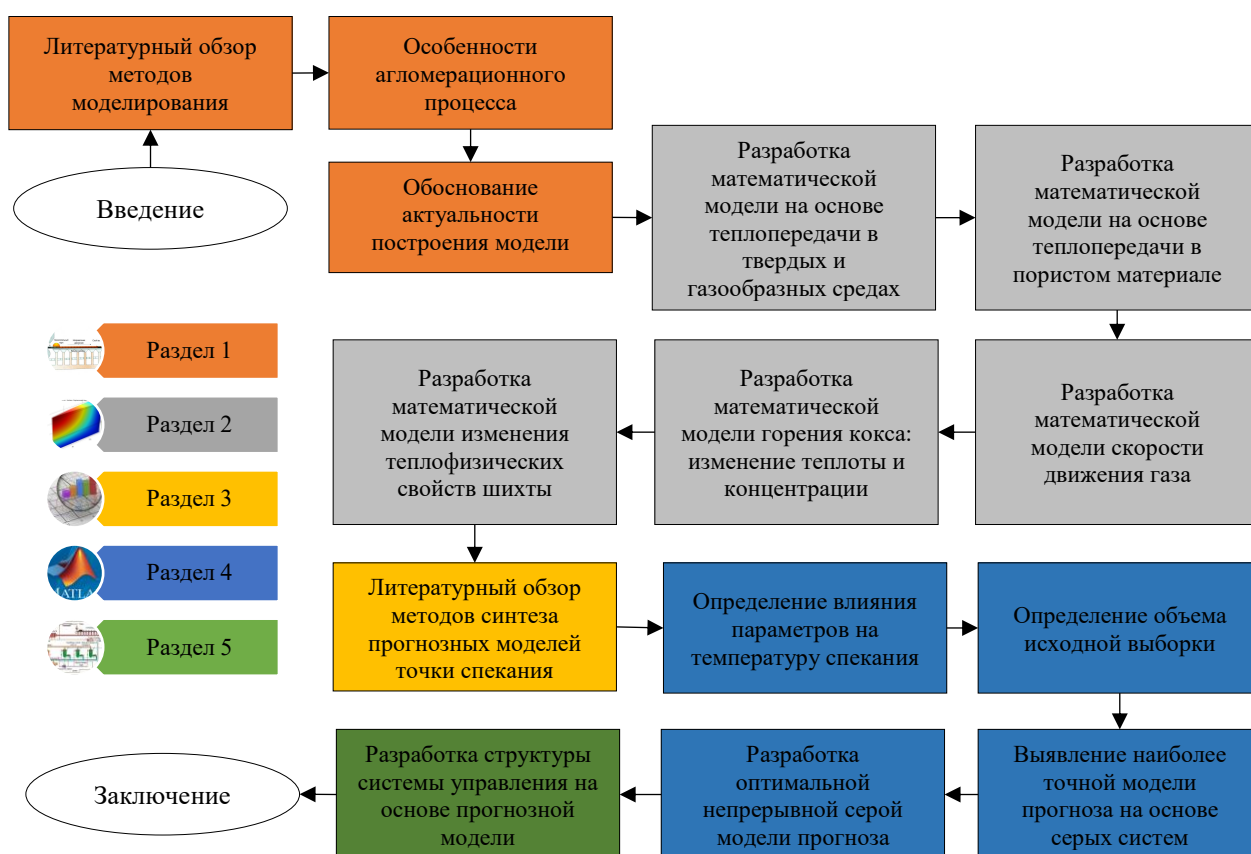


Рисунок 1 – Последовательность выполнения диссертационной работы

# 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ АГЛОМЕРАЦИОННОГО ПРОЦЕССА

*Для реализации поставленной выше цели исследования, необходимо рассмотреть особенности технологического процесса агломерации как объекта управления и определить направление для моделирования агломерационного процесса. В данном разделе проводится обзор различных моделей агломерации, выделяются их характерные черты, преимущества и недостатки. На основе сравнительного анализа моделей определяется дальнейший тип модели агломерационного процесса, основные параметры и переменные процесса, допущения и ограничения.*

## 1.1 Описание агломерационного процесса

Агломерация в металлургии представляет собой термический процесс окускования мелких материалов (руды, рудных концентратов, содержащих металлы отходов и др.), которые входят в состав металлургической шихты. Агломерационный процесс – сложная нелинейная система, с большим запаздыванием, в которой многие параметры процесса являются взаимосвязанными, а процесс спекания проходит с различными химическими превращениями на каждом этапе работы агломашины и на различных слоях спека.

Процесс агломерации фосфоритовых руд производится на Новоджамбульском фосфорном заводе (НДФЗ), расположенном на юге Казахстана, близ месторождения Каратау. Метод агломерации представляет собой спекание мелочи фосфорита на агломашине АКМ-7-312 при температуре до 1623 К, где в качестве твердого топлива выступает измельченный кокс в качестве. Агломерация является вторым по важности процессом на заводе, после производства желтого фосфора, для которого агломерат является исходным сырьем. Технологический процесс (рисунок 1.1) начинается с первичного смешивания шихты с холодным и третичным возвратом, который подается без дозирования, что ведет к значительным изменениям топлива в шихте. Затем шихта направляется на движущую ленту (Рисунок 1.2), где зажигается с помощью природного газа или  $CO_2$ , проходя через горн (рисунок 1.3, а). Агломерационные газы отсасываются через 26 вакуум-камер, расположенных под агломашинной. Спекание шихты производится на движущейся колосниковой решетке агломашины с просасыванием воздуха через слой шихты в 260 мм, и идет до конца ленты длиной 78 м (рисунок 1.3, б). Просасывание воздуха, предназначенного для окисления топлива (кокса), производится с помощью эксгаустеров, которые установлены на тракте агломерационных газов. Во всех вакуум-камерах предусмотрен контроль температуры и разрежения. Регулирование разрежения в вакуум-камерах производится с помощью заслонок, которые управляются дистанционно с пульта управления агломератчика. Далее агломерат охлаждается, дробится до необходимой крупности и после сортировки направляется в шихтовальное отделение печного цеха №05, а агломерат плохого качества отправляется в начало процесса.



Агломерационная машина состоит из подвижной ленты, спекательных тележек, приводов, питателей шихты и «постели», зажигательного горна, вакуум-камер и системы смазки.

Производительность и качество фосфорного агломерата зависит от известных параметров состава шихты, операционных параметров типа скорости движения аглоленты и параметров состояния процесса, как вертикальная скорость спекания. Качество агломерата оценивают по химическому составу, прочности и восстанавливаемости.



Рисунок 1.1 – Технологический процесс агломерации фосфоритовых руд

Первичная агломерационная шихта включает в себя мелочь фосфорита крупностью  $(0-10) \times 10^{-3}$  м, отсев агломерата (третичный возврат) контрольного грохочения из шихтовального отделения печного цеха (агломерат фракции  $(0-6) \times 10^{-3}$  м) и мелочь кокса (кокса, антрацита, графита) фракции  $(0-3) \times 10^{-3}$  м [5].

Содержание кокса в первичной шихте должно составлять (8-10)%, остальное – мелочь фосфорита в смеси с отсевами агломерата контрольного грохочения.

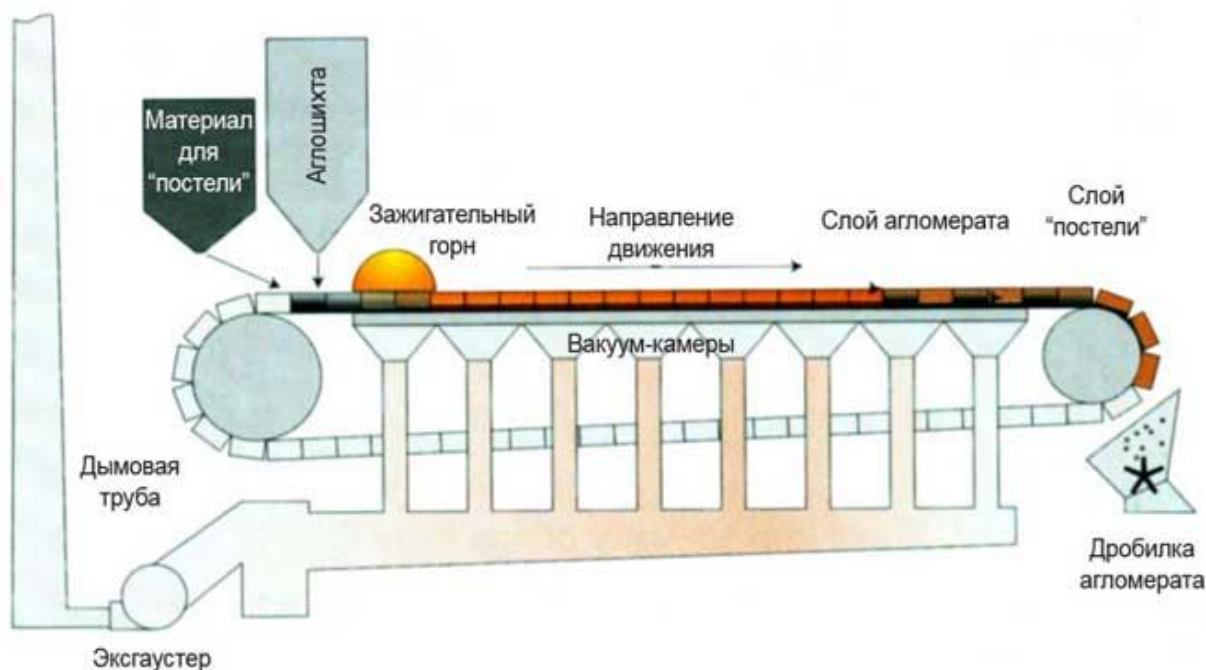


Рисунок 1.2 – Схематическое представление агломерационной машины



(а) Под горном



(б) Конец аглоленты

Рисунок 1.3 – Агломерационная машина Новоджамбульского фосфорного завода

## 1.2 Основные направления моделирования агломерационного процесса

Агломерационный процесс представляет собой сложный термохимический процесс, включающий в себя большое количество химических реакций и термодинамических превращений. Балансовые уравнения теплопередачи, изменения масс и уравнения моментов тесно связаны с химическими реакциями, протекающими при агломерации [6-8], что значительно повышает сложность анализа процесса. Процесс спекания начинается с горения топлива (кокс) в верхней части агломерационного пирога, затем слой за слоем тепло передается на нижние слои. Влияние химических реакций и фазовых превращений на конечное качество агломерата зависит не только от изменений теплового фронта, но и модификации местного состава газа

и начальных температур плавления смеси сырья, которое в свою очередь также различно. Исходная шихта включает в себя руду, кокс, возврат и другие составляющие. Конечные свойства агломерата сильно зависят от термического цикла, исходного химического состава сырья и теплофизических свойств, возникающих при спекании.

Для улучшения процесса агломерации – повышения производительности, исследования влияния различных компонентов на качество, при моделировании процесса можно использовать 2 подхода: эмпирический – через лабораторные испытания, что является трудозатратным и энергоемким процессом, и аналитический – используя математическое моделирование. Постоянное развитие методов анализа, совершенствования математических методов решений, а также определение новых законов, протекающих при спекании, дают возможность построения более точных математических моделей агломерации, глубокого исследования процессов и проверки гипотез для улучшения качества конечного продукта. Математическая модель, которая отражает все важные факторы, является мощным инструментом анализа и используется для определения важности различных факторов, влияющих на производство, то есть качество агломерата, скорость производства и требования к энергии.

Существует множество математических моделей, описывающих процесс спекания, которые начали разрабатываться еще с 1950-х гг. Рассмотрим их подробнее.

### 1.2.1 Моделирование распространения теплового фронта

Модель процесса позволяет получить изменение значения температуры внутри постели, описывает массовый поток газовых компонентов на входе и выходе из постели, скорость превращений  $CO$  внутри постели, скорость конденсации и скорость затвердевания.

Процесс включает в себя: жидкое поведение газовой смеси внутри уплотненного слоя, теплопередачу вследствие конвекции и проводимости, испарение и конденсацию воды, термическое разложение карбонатов внутри слоя, сжигание кокса, преобразование газовых компонентов, частичный расплав и затвердевание смесей твердых материалов.

*Дискретная математика в 1-мерной модели* используется для решения балансов каждой ячейки, вместо решения дифференциальных уравнений. Преимущество такого типа модели по сравнению с другими - простой способ решения энергетических и материальных балансов для рассматриваемого среза слоя спекания.

Результаты проведения моделирования на разработанной модели показали, что наиболее чувствительные параметры - средний диаметр частиц слоя, количество коксовой мелочи, влажность исходной шихты и доля исходной руды шихте [9].

### 1.2.2 Прогнозирование производительности и качества агломерата

Модель рассчитывает изменения в термохимических процессах спекания, состав шихты и прогнозирует качества агломерата вдоль всего пирога,

рассматривая следующие параметры качества - прочность по TI, RDI и реактивность по RI.

Математическая модель процесса описана как набор дифференциальных уравнений в базовых переменных состояния - плотность, состав шихты, температура и скорость - с использованием закона сохранения массы, энтальпии и момента. Также описана математическая модель структуры агломерационной постели с использованием дифференциальных уравнений. Интеграция дифференциальных уравнений осуществлена с помощью *метода конечных разностей*.

Модель процесса рассматривает 2 фазы (вместо распространенных 3 - твердое, жидкое и газообразное) - газовую фазу и фазу конденсации (в которую входят жидкая и газообразная фаза в виду их неподвижности в процессе агломерации). Каждая фаза описывается следующими уравнениями обмена масс:

$$\frac{\delta A}{\delta t} + \nabla \cdot (A \cdot \vartheta) = \nabla \cdot Q + S \quad (1.1)$$

$$Q = D \cdot \nabla \cdot X \quad (1.2)$$

$$A_i = V \cdot \rho \cdot X_i \quad (1.3)$$

$$S_i = \sum_n (m_{n,i} \cdot R_n) \quad (1.4)$$

$A$  - основная физическая величина;

$X$  - физическое состояние;

$\nabla Q$  - показатель диффузии;

$\nabla \cdot (A \cdot \vartheta)$  - показатель конвективности потока масс;

$D$  - коэффициент диффузии;

$S$  - показатель наличия или отсутствия  $A$ ;

$m_{n,i}$  - стехиометрическая константа;

$R_n$  - скорость реакции.

Наряду с уравнением баланса массы рассматривается закон сохранения энергии и момента для газовой фазы.

Модель структуры постели агломерата рассматривает 5 переменных - доля пор, доля жидкой фазы, доля твердой фазы, состав шихты и расстояние между частицами. Статья рассматривает процесс изменения структуры постели в процессе спекания: растворение, образование пор, связность и формирование минеральной фазы.

Сложность использования данной методики для агломерации других минералов состоит в необходимости лабораторных исследований процесса [8, p.915].

### 1.2.3 Прогноз точки спекания

Модель определяет свойства агломерата - профиль температуры, температуру в точке спекания и саму точку спекания, а также свойства отходящих газов.

В состав модели входят уравнения тепло-, массообмена, кинетика химических реакций и процесс спекания. Рассматриваются балансовые дифференциальные уравнения энергии для твердой и газообразной фазы, а также массовые балансы различных газов в газообразной фазе, включая баланс влаги. Массовый баланс влаги рассматривается и в твердой фазе, а также все балансы превращений. Математические модели представлены в виде дифференциальных уравнений с частными производными и включают производные по времени процесса и высоте слоя

Уравнения решались одновременно с использованием техники *конечных разностей*. Последовательность вычислений начинается с конца подачи, и результаты каждого вычисления назначаются следующему элементу в качестве начального значения. Впоследствии итеративная петля поперек каждой вертикальной коллекции элементов обеспечивает сходимость падения давления по высоте слоя.

Результаты модели проверены на тестовых лабораторных данных по температуре в вакуум-камерах [1, p.1150].

### 1.2.4 Трехмерное прогнозирование температуры твердого агломерата вдоль агломашины

В статье приведены результаты моделирования распределения температуры твердой фазы в процессе агломерации, определения количества  $CO_2$  в вакуум-камерах и рассчитываются основные показатели процесса - продуктивность, количество возврата, расход входных компонентов агломерации.

Математическая модель процесса построена с использованием уравнений переноса момента, массы и энергии для газовой, твердой и жидкой фазы с учетом формирования пор в агломерате. Рассматривается одновременное взаимодействие фаз и протекание химических реакций с учетом законов сохранения.

Набор дифференциальных уравнений, характеризующий многофазную модель приводится к дискретному аналогу с помощью метода конечного объема. Полученный набор алгебраических уравнений решается с помощью итерационной процедуры с использованием линейного метода в сочетании с *алгоритмом трехдиагонального матричного решателя*.

Точность построения модели такого вида для других видов агломерационных процессов зависит от полного и четкого описания химических реакций протекающих в фазах [11].

### 1.2.5 Прогнозирование качества агломерата, производительности потребления топлива

Математическая модель определяет продолжительность агломерационного процесса, максимальную температуру под постелью, скорость спекания, производительность, потребление топлива.

Модель описывает взаимосвязь между перепадом давления и расходом газа сквозь шихту, горение кокса, парообразование и конденсацию влаги, процессы плавления и затвердевания. Все исходные уравнения, используемые в работе определены в [1, p.1149] и [22]. Неизвестные параметры оптимизировались для улучшения корреляции между тестовыми и реальными данными.

*Метод конечных разностей* используется для решения задач распределения массы и тепла по высоте и времени.

Проверка результатов моделирования проводилась на основе данных лабораторной установки по производству агломерата [2, p.75].

### 1.2.6 Влияние влаги на процесс агломерации

Модель разработана для определения температурного профиля в определенной точке агломерационной машины, с учетом влияния влаги на процесс.

Рассматриваются математические модели сохранения энергии в газовой и жидкой форме, а также массовые балансы твердых частиц, кокса и влаги через кинетику химических реакций.

Приведение основных уравнений энергии к дискретной форме привело к появлению 4 параметров, которые были определены с помощью генетического алгоритма [12].

### 1.2.7 Управление проницаемостью шихты

Основная идея работы заключается в моделировании агломерационного процесса для оптимизации конфигурации модели проницаемости. В работе рассмотрено две различных конфигурации и их влияние на температуру шихты, горение углерода, процессы испарения.

Для этого были рассмотрены и учтены следующие физические и химические явления:

- теплообмен между твердой и газовой фазой;
- газовый поток сквозь пористый материал через уравнение Бринкмана и Эргуна;
- разработана модель пористости аглошихты;
- транспорт концентрированных компонент в модели;
- реакции конденсации, горения углерода, кальцинирования и сульфации, а также учтены балансовые уравнения массы и энергии.

Результатом моделирования является получение оптимальной конфигурации вакуум-камер: линии горизонтальных камер с диаметром 20 см или комбинацией вертикальных 30-40 см с горизонтальными между ними [13].

### 1.2.8 Характерные черты математических моделей агломерационного процесса

Выделим основные характерные черты математических моделей агломерационного процесса:

1) Как и любые математические модели они подразделяются на одномерные, двумерные и трехмерные по отношению к размерности пространства (таблица 1.1). Одномерные модели позволяют рассчитать изменение температуры по времени в определенной точке агломерата. Двумерные модели описывают процессы теплопередачи в зависимости от геометрических изменений шихты в ходе спекания. Модели трехмерного пространства также учитывают геометрические изменения гранул шихты, а также необходимы для анализа направления газового потока и расположения вакуум-камер на распределение температуры в пироге.

2) В процессе спекания шихта претерпевает три фазовых состояния: твердое, газообразное и жидкое. Наиболее развернутые и подробные модели описывают все 3 агрегатных состояния, образуемых в процессе спекания, что значительно усложняет модель процесса и расчеты. Поэтому для упрощения модели, без сильного влияния на результат моделирования большинство исследователей используют модели теплообмена между твердым и газообразными средами.

3) Основным механизмом передачи тепла, рассматриваемым в ходе агломерационного процесса, является конвекция, которая составляет основу теплопередачи при спекании. Некоторые работы включают в модель также теплопроводность и радиацию, но при этом делают вывод о малом эффекте данных видов теплопередачи на температуру внутри агломерата.

4) Основным уравнением движения газовой фазы или уравнением момента является уравнение Эргуна для пористых сред

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{150\mu u(1-\varepsilon)^2}{d^2\varepsilon^3} + \frac{1.75\rho u^2(1-\varepsilon)}{d\varepsilon^3}, \quad (1.1)$$

где  $\Delta p$  – падение давления,  $L$  – высота шихты,  $\mu$  – вязкость,  $\varepsilon$  – пористость,  $\rho$  – плотность,  $d$  – диаметр гранул,  $u$  – скорость воздушного потока. При этом некоторые авторы используют различные модификации уравнения, касающиеся нахождения коэффициентов при слагаемом поверхностного трения и сопротивления, а также включают данные слагаемые в качестве определенных коэффициентов в уравнениях Дарси [23] или Бринкмана [13, р.3].

5) Любая математическая модель строится с определенной целью, в случае агломерационного процесса выделяются 2 основные группы: модели, описывающие процесс для прогнозирования температуры и модели, исследующие изменение определенных характеристик агломерата (выход продукции, качество) за счет различных изменений в структуре или управлении (Рисунок 1.4). Задачу прогнозирования решают либо через построенные физико/химико-математические модели (более ранние работы), либо через анализ исторических данных, который приобретает все большую популярность в связи с высокой точностью и более быстрым построением моделей.

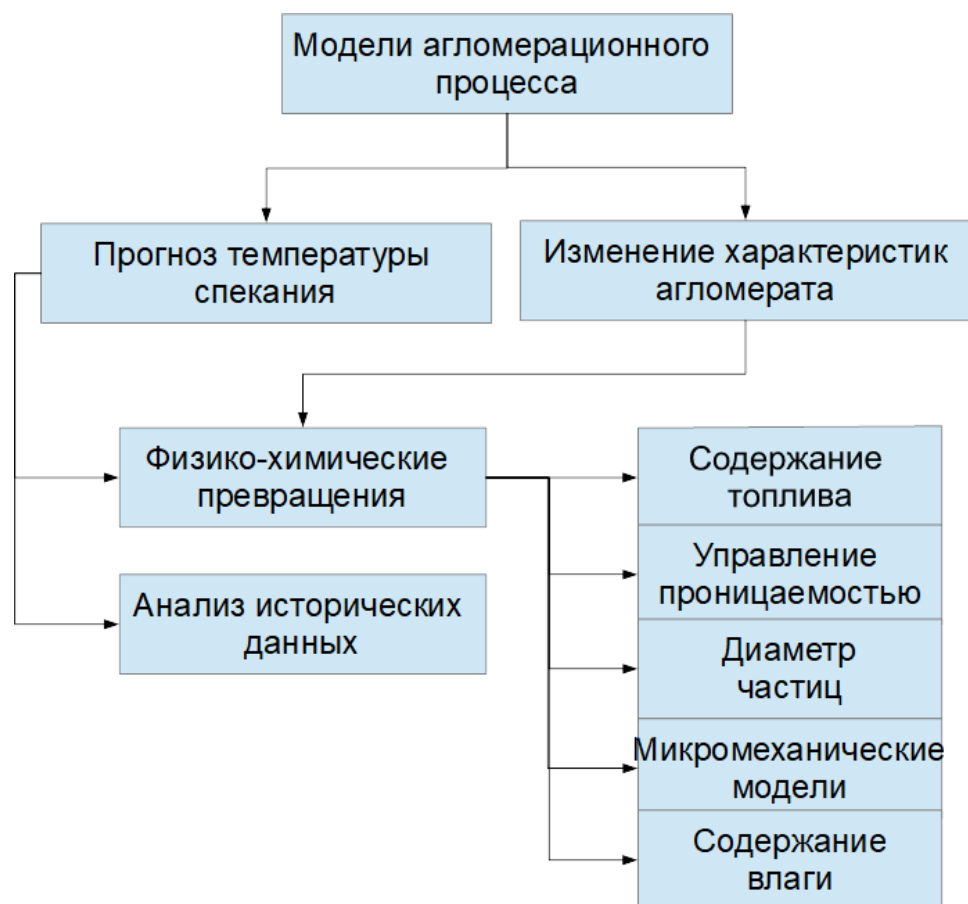


Рисунок 1.4 – Виды моделей агломерационного процесса

Аналитический тип моделирования с помощью физико-химических превращений также разделяется по целям исследования. Ввиду того, что процесс является энергозатратным, одним из крупных направлений является определение влияния различного содержания топлива (кокса) на температуру в агломерате и качество конечного продукта. Так, в работе [18] проводится моделирование зоны плавления и температуры в слоях агломерата при различном содержании кокса от 3-4%. Работа [20] посвящена определению оптимального соотношения кокса в двухслойном агломерате и определению толщины слоя для достижения высокого качества спекания с минимальным потреблением кокса. Эти соотношения определяются за счет применения генетического метода оптимизации, целевой функцией которого является получение высококачественного агломерата с минимальным количеством возврата. Также авторами даны результаты однослойной шихты, которые показывают низкое качество плавления на верхних уровнях агломерата и как следствие достижение 40% возврата. Статья [19] также исследует изменение температуры и зоны плавления в зависимости от содержания кокса от 3.4-4.2%, а также изменения скорости воздуха от 0.26-0.52 м/с. При этом исследования проводятся как на реальной установке, так и проверяются на модели.

Изменение скорости потока (воздух, газ) также является параметром, влияющим на качество конечного пирога. Управление проницаемостью шихты исследовано в работе [11, р.850], где для улучшения подачи воздуха для горения



кокса промоделирована возможность внедрения дополнительных установок – вертикальных и горизонтальных планок, подающих воздух и естественно точно влияющих на скорость потоков воздуха. Результаты модели представлены через изменение температуры, долю кокса в конечном агломерате и влажности, что позволяет судить о качестве агломерационного пирога. 3-х мерная модель [10] показывает изменения в структуре агломерата: соотношение пор, минералогический состав, качество агломерата, а также дополнительно исследует влияние на данные показатели тарелки газового потока, расположенной параллельно над паллетой. Дополнительная установка позволила увеличить температуру в верхней части шихты.

При моделировании процесса спекания исследователями рассматривается диаметр частиц, соотношение пор и структурные изменения. Так, в статье [22] определяется влияние роста гранул на продолжительность агломерации и выход готовой продукции. В результате моделирования, увеличение выхода агломерата и уменьшение толщины расплавленной зоны можно добиться за счет увеличения размера исходной железной руды, которая позволяет сократить продолжительность процесса.

Микромеханическая модель была разработана в работе [14], которая позволяет рассмотреть микроструктуру и ее изменения в процессе спекания. Описанная модель рассматривает перенос тепла, расход газа, потребление кокса, потерю влаги, и изменение в явлениях плавления и затвердевания.

Огромные усилия были приложены в работе [9, p.13] для определения физико-химических и тепловых параметров для расчета, сделанных с помощью лабораторных экспериментов – измерением скорости испарения влаги с паллет, и с пилотных точечных тестов по изучению процесса охлаждения пирога.

Развитие методологии искусственного интеллекта привело к прогрессу эмпирических методов получения адекватных моделей, которые зависят от собранных данных с процесса (анализ исторических данных). Моделирование и оптимизация различных стадий процесса от первичного смешивания, гранулирования к химико-технологическому процессу спекания в агломашине широко рассмотрено в производстве стали [15,16], цинка [17], фосфора и других химических элементов [18-20]. Качество агломерата регулируется через изменение доли углерода (кокса) с использованием нейронной сети обратного распространения ошибки [16, p.120], определение оптимального соотношения исходного материала шихты, используя теорию серых систем [15, p.189], и моделей различных нейронных сетей [17]. Серые модели с методом наименьших квадратов использованы для прогнозирования щелочности процесса [20, p.3]. Определение оптимальных зон для параметра скорости агломашин, а также содержания серы в шихте использовались для увеличения производительности агломашины Dwight-Lloyd [18, p.265].

Исходя из анализа современных исследований агломерационного процесса (таблица 1.1) можно сделать следующие выводы:

– большинство рассмотренных работ посвящены агломерации железных руд, как наиболее распространенному процессу, в связи с чем есть пробел в исследовании фосфоритовых руд. Разница между процессом спекания железных

и фосфоритовых руд состоит в химических превращениях, протекающих на агломашине, а также оперативными переменными – временем спекания, температурой и разряжением в вакуум-камерах, проницаемостью пирога и многими другими параметрами.

– результаты исследований сверены с лабораторными экспериментами, получаемые в «тестовом котелке», материал расположенный в котором проходит через те же этапы, что и материал на аглоленте. Поэтому результаты не учитывают влияния естественных внешних факторов, встречаемых непосредственно в реальном процесса, что делает результаты, получаемые с помощью лабораторной установки идеальными. Это приводит к необходимости дополнительной проверки полученных математических моделей в заводских условиях;

– большинство моделей не учитывает влияние изменение пористости при спекании, которая является важной характеристикой процесса, влияющей на скорость движения газа в шихте;

– химические реакции, протекаемые в процессе, оказывают основное влияние на температуру шихты.

Таким образом, для построения адекватной модели необходимо провести полный анализ шихты: температура плавления и затвердевания, свойства компонентов, такие как плотность, теплоемкость, вязкость и другие, построить математическую модель изменения пористости агломерата и проверять данные на реальных объектах.

Работы по классическому моделированию объекта посвящены использованию уравнений изменения температуры в твердой, газовой фазах и теплообмену между ними. При этом исходная шихта представляет собой пористый материал, что предполагает возможность использования модели теплообмена в пористой среде. Это позволит учесть как изменение тепла в твердой и газовой средах, так и модель изменения пористости материала.

Таблица 1.1 - Сравнительный анализ различных моделей агломерации

Лит.	Цель	Тип	Фазы	Виды теплообмена	Горение кокса	Химические реакции	Ур-е газового потока	Конденсация и испарение	Пористость	Результат
[6]	Моделирование структурных изменений агломерата	1-D	Твердое, газовое	конвекция	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	Декомпозиция $CaCO_3$	Не известно	Скорость испарения как зависимость от диаметра частицы	Изменение радиуса частиц за счет горения	Исследование влияния содержания кокса и температуры плавления на структуру агломерата
[7]	Моделирование процесса агломерации с фокусом на скорость теплового фронта через слой	1-D	Твердое, газовое	Конвекция, Теплопроводность	$(1 + \varphi)C + \left(1 + \frac{\varphi}{2}\right)O_2 \rightarrow \varphi CO + CO_2$ $CO + 1/2O_2 \rightarrow CO_2$	Декомпозиция $CaCO_3, FeCO_3, MgCO_3, MnCO_3$ Уравнение Аррениуса. Уравнение нелинейной регрессии для $CaO$ и $Ca(OH)_2$	Модифицированное уравнение Эргуна	Уравнение температуры испарения в зависимости от давления	Через модель усадки частиц	Определены наиболее чувствительные параметры процесса
[8]	Моделирование процесса в многослойной твердой фазе, с учетом пористости и усадки при геометрических изменениях	1-D	Несколько твердых, газовое	Конвекция, Теплопроводность, радиация	$CO + 1/2O_2 \rightarrow CO_2$ $C + 1/2O_2 \rightarrow CO$	Декомпозиция $CaCO_3$	Скорость входного воздуха - функция времени – полином 2 порядка. Падение давления не учитывается	Через реакции твердой-газовой фазы	Геометрические изменения в агломерате связанные с реакциями между твердым и газом	Анализ влияния 3 различных содержаний кокса на температуру агломерата и состав газа
[21]	Модель изменения в структуре агломерата: соотношение пор, минералогический состав, качество агломерата	3-D	Твердое, газовое, жидкое	Конвекция, Теплопроводность Уравнение Ранз-Маршалла для теплообмена между 2 фазами и	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	Декомпозиция $CaCO_3, MgCO_3, Fe_2CO_3$	Уравнение Эргуна	$H_2O(l) = > H_2O(g)$	Изменение пористости представлено через псевдо частицы, которые исчезают через уравнения выпоризации,	Рассмотрение изменений в качестве агломерата и производительности за счет установки тарелки газового потока

Продолжение таблицы 1.1

Лит.	Цель	Тип	Фазы	Виды теплообмена	Горение кокса	Химические реакции	Ур-е газового потока	Конденсация и испарение	Пористость	Результат
				Куни-Смита – для теплопроводности					горения и декарбонизации	
[9]	Определение оптимальной структуры 2-уровневого процесса – содержание кокса на каждом уровне и определение толщины слоя	2-D	Твердое, газовое	Конвекция согласно уравнению Куни-Сузуки	$C + O_2 \rightarrow CO_2$ $2C + O_2 \rightarrow 2CO$ $C + CO_2 \rightarrow 2CO$	Декомпозиция $CaCO_3$ , $Fe_2O_3$	Уравнение Эргуна	$H_2O(l) \Rightarrow H_2O(g)$ $H_2 + 1/2O_2 \Rightarrow H_2O$	Не рассматривается	Получение высококачественного агломерата с мин. кол-вом возврата за счет генетического метода оптимизации с мин. кол-вом кокса
[22]	Разработка симулятора агломерации влажных железных руд	2-D	Твердое, газовое	Не известно	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	Декомпозиция $CaCO_3$	Уравнение Эргуна	Не известно	Не рассматривается	Модель для анализа, оптимизации и контроля процесса. Модель прогнозирует температуру агломерата и газа, точки спекания.
[10]	3D модель для моделирования процессов в агломерате	3-D	Твердое, газовое, жидкое	Конвекция, Теплопроводность, радиация	$C + O_2 \rightarrow CO_2$ $C + 1/2O_2 \rightarrow CO$ $C + CO_2 \rightarrow 2CO$ $C + H_2O = CO + H_2$	Декомпозиция $CaCO_3$ , $Fe_2O_3$	Модифицированное уравнение Эргуна	$CO_2(g) + H_2(g) \leftrightarrow CO(g) + H_2O(g)$ $H_2O(l) \leftrightarrow H_2O(g)$	Рассмотрение объемной доли, диаметра частиц и размерного фактора	Демонстрация 3D поведения агломерационного фронта и распределения внутренней температуры
[23]	Разработка комплексной численной модели с рассмотрением основных процессов и видов теплообмена	1-D	Твердое, газовое	Конвекция согласно уравнению Куни-Сузуки, Теплопроводность, радиация	$2C + O_2 \rightarrow 2CO$ $2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$	Декомпозиция $CaCO_3$ , $CaMg(CO_3)_2$ , окисление $Fe_3O_4$	Уравнение импульса с исходным коэф., рассчитанным по модифицирова	$H_2O(l) \leftrightarrow H_2O(g)$	Является величиной постоянной	Разработанные результаты 1-D переходных моделей могут быть легко преобразованы в двумерное

Продолжение таблицы 1.1

Лит.	Цель	Тип	Фазы	Виды теплообмена	Горение кокса	Химические реакции	Ур-е газового потока	Конденсация и испарение	Пористость	Результат
							нному уравнению Эргуна, с коэф. сопротивления для разных зон			устойчивое представление процесса спекания на ленте
[1]	Разработка модели агломерационного процесса с использованием эффектов влажности, конденсации и испарения	1-D	Твердое, газовое	конвекция	Горение кокса	Не рассматривается	неизвестно	Балансовые уравнения изменения влаги, испарения, конденсации	Не рассматривается	Модель прогнозирует значения температуры в агломерате
[11]	Прогнозирование качества агломерата, включая химические хар-ки и физическую прочность, производительность и потребление топлива	1-D	Твердое, газовое	конвекция	$(1 + \varphi)C + (1 + \frac{\varphi}{2})O_2 \rightarrow \varphi CO + CO_2$	Декомпозиция $CaCO_3$ $MgCO_3$	Уравнение Эргуна	испарение и конденсация	Не рассматривается	Идентификация параметров модели с помощью оптимизации + температурные измерения и самоорганизующуюся карту Кохонена
[24]	Улучшение эффективности агломерационного процесса через оптимизацию конфигурации проницаемости	2-D	Твердое, газовое	конвекция	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	Декомпозиция $CaCO_3$ , уравнение сульфатации	Уравнение Бринкмана, где коэффициенты проницаемости и Форшеймера выражены через уравнение Эргуна	$H_2O(l) \leftrightarrow H_2O(g)$	Разработано на основе измеренных значений скорости воздуха в шихте и зависит от вертикальных и горизонтальных планок проницаемости	Рассмотрены 1 и 2 слойные горизонтальные и вертикальные планки и их влияние на температуру в агломерате, остаток кокса и содержание влаги
[12]	Определить влияние роста гранул на продолжительность агломерации и выход готовой продукции	2-D	Твердое, газовое	Конвекция, Теплопроводность, радиация	$(1 + \varphi)C + (1 + \frac{\varphi}{2})O_2 \rightarrow \varphi CO + CO_2$ $CO + 1/2O_2 \rightarrow CO_2$	Декомпозиция $CaCO_3$ $Fe_2O_3$ окисление $Fe_3O_4$	Уравнение Навье – Стокса, где падение давления описывается законом Дарси	Модель Патинсона для прогнозирования испарения $CO_2(g) + H_2(g) \leftrightarrow CO(g) + H_2O(g)$	Эмпирическое уравнение Кастро	Увеличен выход агломерата и уменьшена толщина расплавленной зоны за счет увеличения размера железной

Продолжение таблицы 1.1

Лит.	Цель	Тип	Фазы	Виды теплообмена	Горение кокса	Химические реакции	Ур-е газового потока	Конденсация и испарение	Пористость	Результат
							и подчиняется уравнению Эргуна в пористой среде			руды, что сокращает продолжительность агломерации

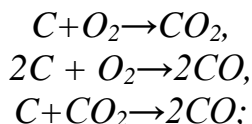
## Выводы по первому разделу

Агломерация в металлургии – это тепловой процесс спекания мелочи, входящий в состав шихты. Исследование и моделирование этого процесса является основой решения проблем эффективного управления и оптимизации.

Увеличение производительности и улучшение качества агломерата являются основными показателями, которые берутся в рассмотрение различными исследователями. Исследователи процесса агломерации строят математические модели для 2 целей: прогноза конечного качества агломерата и изменения параметров процесса или шихты. При этом в различных статьях рассматривается оптимизация следующих параметров: содержание кокса, температура спека, проницаемость пирога, характеристики зажигания под горном и другие. Воздействие на процесс спекания на агломашине непосредственно на рассматриваемый пирог оказывают через скорость агломашины и разряжение в вакуум-камерах.

Основу аналитического метода моделирования агломерационного процесса составляют:

- математические модели процессов агломерации, выраженные через дифференциальные уравнения теплообмена между твердой и газовой фазой;
- моделирование газового потока сквозь пористый материал определяется уравнением Бринкмана и Эргуна;
- для моделирования процессов горения кокса используются следующие химические уравнения:



- уравнения химических превращений соединений, входящих в состав руды, характеризующие теплофизические свойства шихты.

Каждая аналитическая модель агломерационного процесса уникальна и для точного моделирования необходимо использовать данные о химическом составе шихты, процессах горения, охлаждения, увлажнения, зажигания шихты, размерах аглоленты, гранул и т.д.

Большинство работ используют классическую математическую модель теплообмена между твердой и газообразной средой, не учитывая пористость самой шихты. Модели пористых материалов, которые представляют собой взаимодействие 2 фаз: твердой и газообразной, позволяют уменьшить количество дифференциальных уравнений и ускорить процесс моделирования.

Таким образом, для моделирования процесса фосфоритовых руд в данной работе будет использоваться:

- для уменьшения количества уравнений и ускорения процессов расчета используется математическая модель теплообмена в пористой среде;
- в виду того, что шихта будет считаться однородной по ширине аглоленты, для упрощения используем двумерную модель;

- уравнения горения представим через химические реакции не только углерода и кислорода, но также реакции с водой, для учета влажности шихты;
- уравнения для учета теплофизических свойств шихты.

Необходимость построения математической модели агломерации фосфоритовых руд вызвана следующими причинами:

- отсутствие математических моделей агломерации фосфоритовых руд;
- возможность проведения исследований не на реальном объекте, а на основе численной модели, что сокращает финансовые, человеческие и временные ресурсы на исследования;
- возможность проведения параметрического анализа и использования методов оптимизации различных параметров процесса;
- возможность использования полученных данных о параметрах процесса для дальнейших исследований.

Результаты работы, приведенные в данном разделе, были опубликованы в работе [26,27].



## 2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА АГЛОМЕРАЦИИ ФОСФОРИТОВЫХ РУД

*В предыдущем разделе были рассмотрены основные виды моделей агломерационного процесса, на основе анализа которых были выделены необходимые физические явления, параметры и переменные для моделирования процесса агломерации фосфоритовых руд. В данном разделе будет непосредственно представлены объект моделирования, даны основные уравнения, описываемые процесс спекания агломерата, определены свойства и параметры модели. Каждый подраздел описывает физические свойства процессов, которые происходят для получения агломерата от исходной шихты. Также будет создана непосредственно сама модель процесса и представлены результаты моделирования.*

### 2.1 Объект моделирования

Правильные инженерные расчеты базируются на экспериментальных моделях, которые заменяют физические эксперименты, прототипирование, а также позволяют с легкостью понять разрабатываемую конструкцию или производственный процесс. Моделирование быстро, эффективно и точно оптимизирует процессы и имеет преимущества как по временным, так и финансовым ресурсам перед физическими экспериментами и испытанием прототипов.

Объект моделирования представляет собой паллету на которую поступает исходный материал – шихта. Для моделирования подачи газа на паллету под горном используется ступенчатый сигнал (step time = 2 мин) (среднее время паллеты под горном). Эти допущения взяты исходя из [28] в зависимости от скорости движения аглоленты. Длина агломашины составляет 78 м, средняя скорость 3,6 м/мин, высота слоя шихты 260 мм.

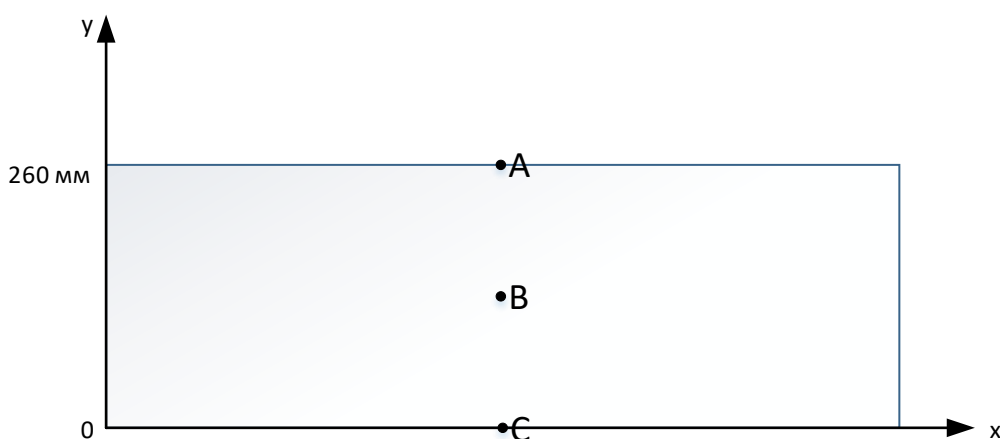


Рисунок 2.1 – Объект моделирования

Как видно из литературного обзора для моделирования процесса агломерации, а именно изменения температуры при спекании используется физические законы теплообмена между твердым и газообразным средами.

Известно, что шихта в результате протекания процесса агломерационного обжига превращается в агломерат, представляющий собой окускованный материал и по сути являющийся в пористым материалом.

Пористый материал представляет собой твердое тело, которое содержит свободное пространство в виде полостей, каналов или пор. Геометрические размеры пор гораздо меньше размеров твердого тела. Исходную шихту также можно рассматривать в качестве пористого материала, так как гранулы шихты имеют размер  $(3-10) \times 10^{-3}$  м, а расстояние между гранулами  $(0-3) \times 10^{-3}$  м. Поэтому для моделирования изменения температуры в вакуум-камерах в процессе агломерации в данной работе рассматривается модель теплопередачи в пористом материале, при котором температуры газа и твердого материала считается одинаковой. Это позволит уменьшить размерность конечной математической модели, и ускорить процесс моделирования и расчета. Для определения правильности построенной модели будет также создана классическая модель теплопередачи между твердым и газообразными фазами процесса спекания. Результаты моделирования будут представлены в точках А, В и С (рисунок 2.1).

## 2.2 Схематичное представление модели

Математическая модель процесса агломерации будет описывать следующие физико-химические явления (Рисунок 2.2):

- теплопередачу в пористом материале;
- движение газа в пористом материале с использованием уравнением Эргуна и Бринкмана;
- химические реакции горения кокса и учета влажности шихты;
- изменение концентрации газов;
- изменение теплофизических свойств шихты.

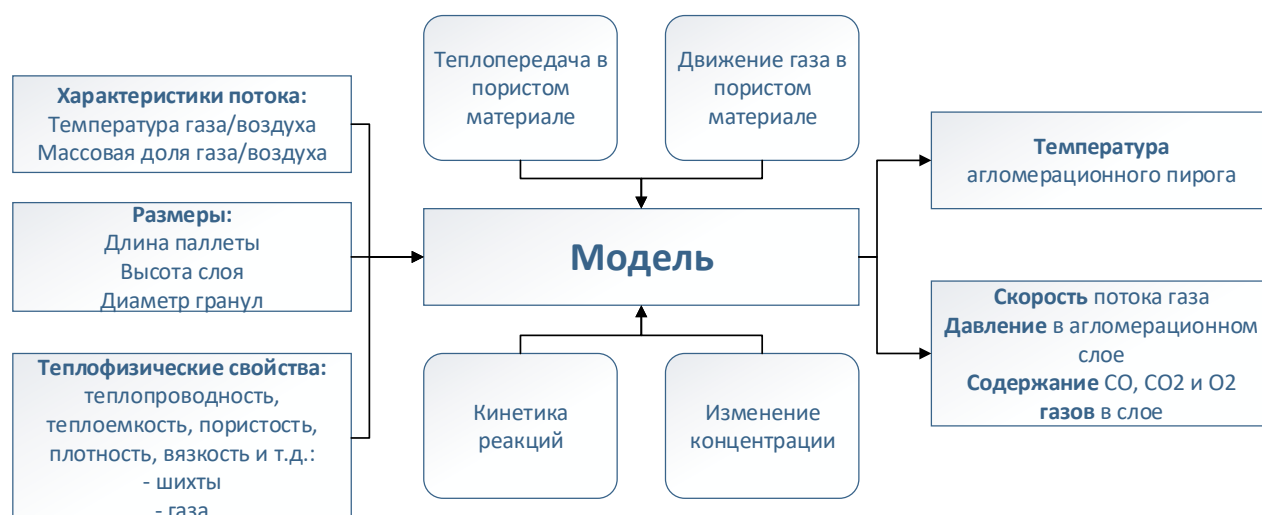


Рисунок 2.2 – Схематичное представление модели

При моделировании процесса агломерационного обжига на входе модели будут изменяться следующие переменные:

- значения потока – температура и массовая доля газ/воздуха;
- размеры – длина паллеты, высота слоя, средний диаметр гранул;
- теплофизические свойства шихты и газа – теплопроводность, теплоемкость, пористость, вязкость.

На выходе модели будем контролировать:

- температуру шихты;
- скорость потока газа;
- давление слоя;
- содержание  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $O_2$  в слое.

Таким образом, с учетом вышесказанного постановка задачи моделирования звучит следующим образом: необходимо на основе переменных на входе процесса агломерации построить модель, отражающую физико-химические явления, происходящие при спекании шихты, которая будет определять основные переменные для контроля процесса.

## 2.3 Расчет изменения температуры при спекании

### 2.3.1 Теплопередача в пористом материале

Теплопередача через пористую среду обычно рассматривается как комбинированные тепловые потоки [29], такие как теплопроводность вдоль ее твердой матрицы, тепловое излучение через внутренние поры и тепловая конвекция или теплопроводность через газы, заполняющие поры. Что касается последнего, неизбежного выбора между конвективным и кондуктивным тепловым потоком в порах, заполненных газом, конвективная теплопередача подавляется в порах размером менее примерно 10 мм. Пористые материалы имеют приложения по широкому спектру инженерных и научных дисциплин. Пористый материал представляет собой, по существу, двухфазную структуру - твердую фазу и газовую (жидкую) фазу [30]. Исходная фосфоритовая шихты, как и конечный агломерат представляют собой пористый материал, в котором рассматриваются твердая и газообразная фаза. При этом температуры твердой и газообразной фазы в пористом материале равны  $T_s = T_f = T$  и определяются по следующей формуле:

$$\theta \rho_s c_{\rho,s} + (1 - \theta) \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_s u \nabla T + \nabla(-(\theta k_s + (1 - \theta)k) \nabla T) = Q, \quad (2.1)$$

где  $k$  [Вт/(м·К)] – теплопроводность (газ),  $\rho$  [кг/м<sup>3</sup>] – плотность (газ),  $C_p$  [Дж/(кг·К)] – теплоемкость при постоянном давлении (газ),  $\gamma$  – соотношение удельных теплоемкостей (газ),  $\theta$  = (1- пористость) – объемная доля (твердое тело),  $k_s$  [Вт/(м·К)] – теплопроводность (пористая матрица),  $\rho_s$  [кг/м<sup>3</sup>] – плотность (пористая матрица),  $c_{\rho,s}$  [Дж/(кг·К)] – удельная теплоемкость (пористая матрица) (формула 2.16),  $Q$  [Вт/м<sup>3</sup>] - источник тепла от химических реакций (формула 2.13) и тепла подаваемых извне,  $u$  – скорость газов в пористой среде (формула 2.7).

В качестве начального значения температуры шихты взята температура окружающей среды  $T_0 = 20.15^\circ\text{C}$ . Граничные условия для рассматриваемой паллеты:

- левая и правая части паллеты (рисунок 2.1) имеют ту же температуру, что и шихта;
- сверху на паллету подается газ с температурой  $1200^\circ\text{C}$  (0-2 мин) моделируя процесс нахождения под горном, и со 2 минуты до конца аглоленты – температура окружающей среды;
- агломерационные газы проходят вниз аглоленты и всасываются вакуум-камерами.

### 2.3.2 Расчет теплообмена между твердым и газообразными средами

Теплопередача представляет собой процесс передачи тепла от одной точки к другой за счет разницы в температуре. Теплопередача объединяет в себя 3 основных процесса - теплопроводность (кондукцию), конвекцию и излучение

Передача тепла между неподвижными частицами твердой, жидкой или газообразной среды, находящимися в непосредственном контакте друг с другом называется теплопроводностью и в чистом виде встречается только в твердых телах.

Конвекция представляет собой перенос теплоты движущимися частицами вещества, то есть происходит в жидких и газообразных веществах, а также между жидкой или газообразной средой и поверхностью твердого тела.

Излучение – это процесс переноса теплоты с поверхности на поверхность через лучепрозрачную среду электромагнитными волнами, трансформирующимися в теплоту. В данной работе процесс излучения не берется в рассмотрение в виду малого влияния на температуру спекания.

При рассмотрении процесса теплообмена, протекающего при спекании шихты, чаще рассматривают модель, при которой рассматривается 2 среды: твердая (шихта) и газообразная (агломерационные газы) и теплообмен между ними [1, p.1143].

Температура твердой фазы определяется по следующей формуле:

$$\rho_g C_{pg} \frac{\partial T_g}{\partial t} + \rho_g C_{pg} u \nabla T_g - \nabla \cdot k_g \nabla T_g = Q + Q_{sg}, \quad (2.2)$$

где индекс  $g$  обозначает свойства газовой фазы,  $Q_{sg}$  – теплообмен между твердой и газовой фазами (формула 2.5). Граничные условия всех стенок соответствуют температуре  $T_g$ .

Температура твердой составляющей рассчитывается по формуле:

$$\rho_s C_{ps} \frac{\partial T_s}{\partial t} + \rho_s C_{ps} u \nabla T_s - \nabla \cdot k_s \nabla T_s = Q + Q_{gs}, \quad (2.3)$$

где индекс  $s$  обозначает свойства твердой фазы,  $Q_{gs}$  – теплообмен между газовой и твердой фазой.

В рассматриваемом случае температура в вакуум-камере – это температура отходящих газов.

Теплообмен между фазами согласно [31] вычисляется по формуле:

$$Q_{g \rightarrow s} = (T_g - T_s) \frac{\alpha \cdot 6(1-\varepsilon)}{d}, \quad (2.4)$$

$$\alpha = \frac{k_g}{d} (2 + 0.6\sqrt{Re} \sqrt[3]{Pr}),$$

где  $\varepsilon$  – пористость материала,  $Re$  – число Рейнольдса,  $Pr$  – число Прандтля.

В связи с тем, что доля твердой фазы не равна газовой введем в формулу (2.4) это соотношение:

$$Q_{gs} = -\frac{Q_{g \rightarrow s}}{\theta}; Q_{sg} = \frac{Q_{g \rightarrow s}}{1-\theta}. \quad (2.5)$$

Число Прандтля определяется по формуле [32]:

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k},$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость газовой фазы.

#### 2.4 Определение скорости движения газа в пористой среде

Моделирование движение газового потока для процесса агломерации фосфоритовых руд оказывает наибольшее влияние на скорость, температуру процесса спекания и его качество. При описании движения газовой фазы авторами используются различные виды уравнений.

1) *Использование уравнения Эргуна.* Скорость движения газа в процессе агломерации описывается уравнением Эргуна, которое применяется в гидродинамике для расчёта течения однофазной жидкости в неподвижных слоях с определённой пористостью и плотностью упаковки частиц. При этом перепад давления является одним из основных факторов при рассмотрении неподвижных слоёв. Перепад давления в слое  $\frac{\Delta p}{L}$  определяется через скорость жидкости, её плотность и вязкость, размер, форма и ориентация частиц, пористость слоя, шероховатость поверхности и наличие стенок:

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{150\mu u(1-\varepsilon)^2}{d^2 \varepsilon^3} + \frac{1.75\rho u^2(1-\varepsilon)}{d \varepsilon^3}, \quad (2.6)$$

где  $L$ [м] – высота шихты,  $\mu$ [Па·с] – динамическая вязкость (газ),  $\varepsilon$  – пористость (пористая матрица),  $d$ [м] – характерный размер частиц,  $\rho$  – плотность шихты,  $u$ [м/с] – скорость газа.

Экспериментальные опыты для определения соответствия реальным данным были проведены для газового потока, проходящего через разрушенный пористый твердый материал. В статье [33] определено что падение давления вызвано одновременными потерями кинетической энергии и энергией вязкости, а уравнение (2,6) применимо для всех видов потока. Слагаемые уравнения также называют слагаемыми поверхностного трения и сопротивления.

Уравнение Эргуна (1) является базовым уравнением в определении скорости движения газа через слой аглошихты, представляющий собой пористый материал. Так, например, в работе [10, p.528] с помощью уравнения Эргуна описывается сопротивление газового потока через слой шихты. Скорость газа в процессе агломерации описывается через уравнение (2.6) и в работах [1,2,7].

2) *Модифицированное уравнение Эргуна.* Если в работе [34] для подгонки уравнения Эргуна изменялся параметр, отвечающий за форму гранул, то работа [35] посвящена определению коэффициентов  $k_1$  и  $k_2$ :

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{k_1}{36} \cdot \frac{\mu u (1-\varepsilon)^2}{d^2 \varepsilon^3} + \frac{k_2}{6} \cdot \frac{\rho u^2 (1-\varepsilon)}{d \varepsilon^3}, \quad (2.7)$$

на основе нелинейного регрессионного анализа, целевой функцией при этом является минимизация суммы квадрата ошибки между прогнозной и измеренной скоростью. Для прогноза объема газового потока значения коэффициентов уравнения Эргуна также были определены в работе [9, p.15], где использовался метод наименьших квадратов, вместо изменения значений формы гранул и пористости.

В работе [36] проведено моделирование воздушного потока сквозь аглошихту с использованием уравнения Эргуна (2.7), где параметры  $\varepsilon$  пористости,  $d$  диаметра гранул и фактора, отвечающего за форму гранул (в уравнение (2.7) фактор равен 6) были вычислены через массив данных, включающих в себя значения падения давления и скорости воздуха. Обоснованность использования уравнения Эр-гуна была проверена через значение падения давления  $\Delta p$  другой выборки, в результате чего показано совпадение проницаемости до горения в большом разрезе изменений влажности шихты.

Уравнение передачи момента между твердым и газообразными фазами промоделировано при помощи модифицированного уравнения Эргуна в работе [11, p.851], где учитывается характер плавления исходной шихты в зависимости от изменения объемной доли и диаметра по данным плавления. Здесь параметры  $d$  диаметра гранул и фактора, отвечающего за форму гранул рассчитываются как среднее от представленных распределения размеров гранул и определяются в отличии от предыдущего автора через данные по плавлению, представленные в виде кривых зависимости давления от температуры и рассчитываемых по формуле:

$$\varepsilon_i = 1 - (0.403[100d_i]^{0.14}) \cdot \left( 1 - \frac{S_m}{100} \max \left( 0, \min \left( 1, \frac{T_s - T_{im}}{\Delta T_m} \right) \right) \right),$$

$$\varepsilon_s = \sum \varepsilon_i + \varepsilon_l + \varepsilon_{ls},$$

$$d_s = d_{initial} + (d_{final} - d_{initial}) \cdot \left( \frac{\varepsilon_l + \varepsilon_{ls}}{\varepsilon_s} \right)^3,$$

где  $i$  – исходная шихта, возврат, твердое топливо, флюс и другие добавки, входящие в состав шихты,  $l$  и  $ls$  - доли жидких и твердых образований в процессе агломерации,  $d_{initial}$  и  $d_{final}$  – средний размеры частиц в шихте и готовом агломерате,  $T_{im}$ ,  $\Delta T_m$  и  $S_m$  – начальная температура плавления, интервал температур плавления и %усадки.

Сопротивление газового потока в пористой среде, используемое в уравнение передачи момента также рассчитано с помощью модифицированного уравнения Эргуна в работе [24, р.1153], где для каждой зоны агломерации использовался свое значение сопротивления.

Работа [37] описывает газопроницаемость слоя через японскую единицу проницаемости (JPU):

$$JPU = \frac{F}{A} \left( \frac{h}{s} \right)^{0.6},$$

где  $F$  – скорость воздушного потока  $\text{Nm}^3$ ,  $A$  - площадь поперечного сечения слоя  $\text{m}^2$ ,  $h$  – высота слоя шихты м,  $s$  - давление всасывания под слоем мм. Газопроницаемость слоя является основной величиной, влияющей на производительность, так как разрежение в вакуум-камерах на производстве поддерживается постоянным. Проницаемость слоя в работе также определена с помощью уравнения Эргуна (2.7) для различных слоев: влажного и высокотемпературных слоев. Работа посвящена исследованию изменения газопроницаемости слоя до агломерации при различных значениях влажности, содержания кокса, диаметра частиц и др.

3) *Уравнение Эргуна в составе других уравнений.* При моделировании газового потока в процессе агломерации в работе [13, р.3] используется уравнение Бринкмана, где значения проницаемости и коэффициент Форшеймера определяются через слагаемые поверхностного трения и сопротивления уравнения Эргуна. Авторы [25, р.12] для моделирования воздушного потока использовали уравнение Навье-Стокса, где падение давления описано через закон Дарси и подчиняется уравнению Эргуна.

4. *Другие.* Газопроницаемость слоя шихты играет основную роль при контроле свойств агломерата и производительности, она определяет температурный профиль слоя через скорость газа. Газопроницаемость слоя агломерационной шихты на колосниковой решетке в работе [38] описана через уравнение Рамзина [39]:

$$W = \sqrt[n]{\frac{\Delta p}{Ah}},$$

где  $W$  – количество воздуха на 1  $\text{m}^2$  площади  $\text{m}^3/(\text{m}^2\text{c})$ ,  $\Delta p$  – разрежение мм вод. ст.,  $h$  – высота слоя шихты,  $A$  и  $n$  – коэффициенты, величина которых зависит от размера и формы частиц. Производными от формулы Рамзина являются уравнения, описанные в [40,41]. Трудности рассмотренных уравнений

заключаются в непостоянстве коэффициентов  $A$  и  $n$  из-за изменения характера поверхности частиц.

Для моделирования процесса агломерации авторами [22, p.495] рассматривалось уравнение изменения скорости подачи воздуха. Для его определения после установки начального значения рабочих параметров (содержание кокса в твердом материале и начальный перепад давления), давление всасывания изменяется в зависимости от хода сгорания кокса и спекания руды. С учетом этих изменений скорость подачи воздуха, рассматривается как полином второго порядка от времени (2.8), при этом перепад давления не отражается на расчетах. Коэффициенты уравнения (2.8) получены из данных измерений скорости воздуха:

$$u = A + Bt + Ct^2. \quad (2.8)$$

Одно из новых направлений для описания движения газового потока при агломерации является использование уравнения Эргуна в составе других уравнений. Уравнение Бринкмана появилось как соединение закона Дарси и уравнения Навье-Стокса, и описывает медленное движение потока в пористой среде и быстрый поток в каналах. Моделирование течения в насыщенной пористой среде можно представить, используя закон Дарси или модель Дарси-Бринкмана в зависимости от размера пор. Если влияние вязкости на течение жидкости можно не учитывать при данном размере пор, то применяется закон Дарси, и поток описывается только переменной давления. При геометрическом размере пор, который позволяет передавать изменения момента путем воздействия сдвига, следует использовать уравнения Бринкмана. Представленные уравнения позволяют определять те же переменные, что и с помощью уравнения Навье-Стокса, но при этом учитывают пористость среды, через которую протекает жидкость [42]. Тогда уравнения движения в пористом материале можно определить по уравнению Бринкмана:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = \nabla[-pI + \mu \frac{1}{\epsilon_p} (\nabla u + (\nabla u)^T)] - \left( \mu k^{-1} + \beta_f |u| + \frac{\rho \nabla u}{\epsilon_p^2} \right) u, \quad (2.9)$$

где  $k$  [ $m^2$ ] – проницаемость (пористая матрица),  $T$  [C] – температура шихты (формула 2.1), тогда с учетом уравнения Эргуна, пористость слоя, шероховатость поверхности и, возможно, наличие стенок [13, p.3]:

$$k = \left[ \frac{150 \mu u (1-\epsilon)^2}{d^2 \epsilon^3} \right]^{-1} \cdot \frac{1}{f_p f_{pbase}}, \quad (2.10)$$

$$\beta_f = \frac{1.75 \rho u^2 (1-\epsilon)}{d \epsilon^3} \cdot \frac{1}{f_p f_{pbase}}, \quad (2.11)$$

где  $f_p$  – фактор изменения пористости при усадке спекания,  $f_{pbase}$  – глобальная константа калибровки в уравнении Эргуна = 3.5.

В качестве газа рассматриваются свойства  $CO_2$ , выделяющийся  $CO$  при химических реакция входит в состав расчетов тепла, образуемого в шихте.



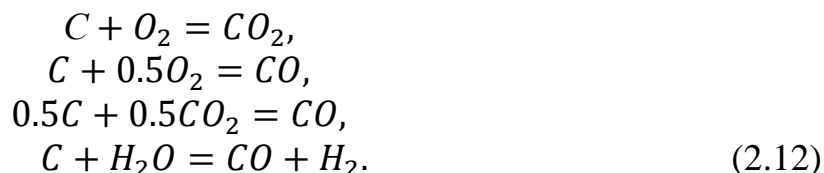
Начальные значения: скорость по оси  $x$  и  $y = 0$  м/с, давление = 1 атм. В процессе моделирования из-за малой скорости газа по оси  $y$  по сравнению со скоростью по оси  $x$ ,  $u_y$  приняли равным 0.

Агломерационные газы в шихте перемещаются за счет разряжения создаваемого вакуум-камерами. Поэтому определены следующие граничные условия:

- сверху давление равно 1 атм;
- снизу разряжение создаваемое вакуум-камерами принято усредненно согласно их часовым сводкам = 80000 Па = 0.8 атм.

## 2.5 Определение теплоты в результате горения кокса

Процесс агломерации сопровождается выделением тепла за счет горения кокса. При этом при горении кокса только часть кокса окисляется до диоксида углерода, другая часть окисляется до монооксида углерода. Высокая температура в слое, приводит к тому, что большая часть монооксида окисляется до углекислого газа [7, р.287]. При горении кокса обычно рассматриваются следующие химические реакции:



Кинетика реакций согласно работе [43], зависит от концентрации монооксида углерода, кислорода и воды в газе.

$$R_j = k^f \prod c_i^j, \quad (2.13)$$

где  $k^f$  – константа скорости реакции, определяемая уравнением Аррениуса

$$k^f = A^f \exp\left(\frac{-E^f}{R_g T}\right), \quad (2.14)$$

где  $A^f$  – частотный коэффициент,  $E^f$  [Дж/моль] – энергия активации,  $R_g$  – универсальная газовая постоянная. Коэффициенты определяются согласно [7, р.287].

Тогда тепло выделяемое реакцией определяется по формуле:

$$Q_j = -R_j H_j, \quad (2.15)$$

где  $H_j$  – энтальпия.

## 2.6 Изменение концентрации в результате реакции горения

Изменение концентрации газов в уравнении (2.12, 2.13) определяется:

$$c_i = \frac{\rho \omega_i}{M_i}, \quad (2.16)$$

где  $\omega_i$  – массовая доля газа  $i$ :

$$\varepsilon\rho \frac{\partial \omega_i}{\partial t} + \nabla j_i + \rho(u \cdot \nabla)\omega_i = R_i, \quad (2.17)$$

где  $j_i$  - переменная, включающая в себя модель диффузии процесса,  $R_i$  – скорость реакции (формула 2.13).

## 2.7 Определение теплофизических свойств шихты

Определение теплофизических свойств (ТФС) рудных материалов достигается за счет проведения множества экспериментов, в виду многокомпонентности минерального и химического состава, плюс ко всему отдельные составляющие при различных температурах претерпевают химические изменения. Поэтому необходимо получить зависимости теплопроводности и теплоемкости веществ от структурных особенностей, химического и минерального состава на основе моделей ТФС композитной структуры с учетом изменений при температурном воздействии.

Состав исходной шихты включает в себя карбонатные фосфориты (содержание  $P_2O_5=18-25\%$ ) и кокс. Данные по теплоемкости, теплопроводности, плотности можно определить из различных справочников [44-47]. Тогда теплофизические свойства шихты (теплопроводность  $k_s$ , теплоемкость  $c_{p,s}$ , плотность  $\rho_s$ ) можно определить следующим образом [49]:

$$k_s = \sum \omega_{s,i} k_{s,i}; c_{p,s} = \sum \omega_{s,i} c_{p,s,i}; \rho_s = \sum \omega_{s,i} \rho_{s,i}, \quad (2.18)$$

где  $\omega_{s,i}$  – массовая доля компонента шихты.

Теплопроводность составляющих в фосфоритовой руде определена по экспериментальным данным для широкого диапазона минералогического состава фосфоритов методом нелинейных наименьших квадратов. Определены коэффициенты теплопроводности фосфатного вещества, кремнезёма, непрореагировавшего и обожженного карбоната. Температурные зависимости теплопроводности компонент описываются полиномами второй степени в интервале 400...1300К.

Фосфатное вещество:

$$k_{s,1} = 2,82 - 0,30 \cdot 10^{-2}T + 0,14 \cdot 10^{-5}T^2, \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}.$$

Кремнистая составляющая:

$$k_{s,2} = 12,6 - 1,75 \cdot 10^{-2}T + 0,95 \cdot 10^{-5}T^2, \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}.$$

Непрореагировавшая карбонатная компонента:

$$k_{s,3} = 7,58 - 1,08 \cdot 10^{-2}T + 0,49 \cdot 10^{-5}T^2, \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}.$$

Обожженный карбонат:

$$k_{s,4} = 1,52 - 0,13 \cdot 10^{-2}T + 0,48 \cdot 10^{-6}T^2, \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}.$$

Метод экстраполяции был использован для образцов с непрореагировавшими карбонатными включениями ввиду сложности экспериментального определения теплопроводности в зоне химического реагирования.

Теплоёмкости компонент получены путём обработки экспериментальных значений различных типов фосфоритов с различным компонентным составом с учетом модификационных превращений  $\alpha$  в  $\beta$  кварц.

Для кремнистой составляющей до температуры модификационного превращения  $\alpha$  в  $\beta$  кварц  $T = 850\text{K}$ :

$$c_{\rho.s.1.1} = 0,394 + 0,15 \cdot 10^{-2}T - 0,4 \cdot 10^{-6}T^2.$$

Для температур выше 850K:

$$c_{\rho.s.1.2} = 4,15 - 0,572 \cdot 10^{-2}T + 0,27 \cdot 10^{-5}T^2.$$

Фосфатная компонента описывается уравнением:

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

Карбонатная составляющая до температур начала декарбонизации:

$$c_{\rho.s.3.1} = 0,41 - 0,155 \cdot 10^{-2}T - 0,4 \cdot 10^{-6}T^2.$$

Карбонатная составляющая после обжига:

$$c_{\rho.s.3.2} = 1,943 - 1,58 \cdot 10^{-2}T + 0,98 \cdot 10^{-6}T^2.$$

Для отдельных составляющих значения плотностей можно определить путем анализа плотности от различного содержания компонент. Явная зависимость плотности образцов от содержания характерна для карбонатных, карбонатно-кремнистых и высококачественных фосфоритов, асимптотически приближаясь к значению плотности  $3,1\text{г/см}^3$  для субмономинерального фосфорита:

Таблица 2.1 – Плотность составляющих шихты

Порода	Содержание $P_2O_5$ , %	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>
Фосфатизированные сланцы	0...10	2,4...2,7
Доломиты	10...15	2,75...2,85
Фосфориты карбонатные	18...25	2,75...2,92
Карбонатно-кремнистые высококачественные	25...30	2,9...3,01
От высококачественных до субмоно- минеральных	30...35	2,96...3,1

## 2.8 Моделирование процесса агломерации

### 2.8.1 Среда моделирования

В качестве среды моделирования был выбран COMSOL Multiphysics [49], представляющий собой графическую среду численного моделирования различных систем, устройств и процессов в различных областях проектирования, производства и научных исследований.

Функционал базовой платформы расширяется за счет различных модулей для моделирования электромагнитных полей, напряженно-деформированного состояния твердых тел, акустических полей, гидродинамических, теплообменных и химических процессов. За счет использования модулей расширения и модулей группы LiveLink обеспечивается единый рабочий процесс для любых физических явлений.

COMSOL Multiphysics — это интегрированная платформа для моделирования, которая включает в себя различные этапы: создание геометрии, определение свойств материалов и описание физических явлений, настройка решения и процесса постобработки, и позволяет получать точные и надежные результаты.

Основные достоинства среды COMSOL:

1 Высокоточные результаты за счет мультифизического моделирования.

В среде моделирования COMSOL Multiphysics возможно сочетание любого числа физических явлений и настройка пользовательских параметров физических явлений, уравнений и выражений, используя графический пользовательский интерфейс.

Точные мультифизические модели берут в расчет широкий диапазон рабочих условий и позволяют использовать большое количество физических явлений. Это дает возможность моделировать и оптимизировать процессы и устройства с учетом реальных условий.

2 Множество интерфейсов и функций для физического моделирования

Различные физические явления, включая междисциплинарные мультифизические взаимодействия реализованы в программе COMSOL, как например, описание механики твердых тел, акустики, гидродинамики, теплопередачи, переноса химических веществ и электромагнетизма. Физические интерфейсы представляют собой специализированные пользовательские интерфейсы, позволяющие настраивать модель физического явления или явления — задавая исходные параметры модели, дискретизацию и анализ результатов.

Также программный пакет позволяет выбирать тип исследований, например, нестационарный или стационарный решатель. Среда моделирования автоматически подбирает для разработанной математической модели численную дискретизацию, конфигурацию решателя и настройки визуализации и постобработки.

3 Автоматизированное и ручное построение сетки

Среда моделирования использует различные методы и техники для дискретизации модели и построения сетки в зависимости от типа физического

процесса или сочетания физических явлений. Основным методом дискретизации базируется на методе конечных элементов.

Преимуществом среды COMSOL является возможность изменения сетки - измельчения, повторного построения или адаптивного построения сетки, в процессе решения или специального этапа исследования для любого типа сетки.

#### 4 Параметрический анализ, оптимизация и оценка

Также существует возможность расчета параметров модели: геометрии, настройки в граничных условиях, по различным материалам и их свойствам, и по перечню заданных функций.

Задачи оптимизации и обратные задачи решаются на основе модуля Оптимизация, которая включает в себя градиентные и безградиентные алгоритмы оптимизации и позволяет реализовать топологическую оптимизацию, оптимизацию формы или оценку параметров мультифизической модели.

#### 5 Современные численные методы для получения точных решений

Все библиотеки программного пакета имеют связанные системы дифференциальных уравнений в частных производных для стационарных и нестационарных исследований, исследований в частотной области и исследований на собственные значения. Дискретизация по пространственным координатам проводится с помощью интерпретатора уравнений программного пакета COMSOL Multiphysics методом конечных элементов, граничных элементов, методом прямых с получением системы обыкновенных дифференциальных уравнений.

Численные методы, реализованные в COMSOL Multiphysics:

- решение нелинейных стационарных задач – метод Ньютона с затуханием;
- решение линейных задач – за счет прямых (для задач малого и среднего размера) и итерационных решателей (для больших систем линейных уравнений).

#### 2.8.2 Создание модели в программной среде COMSOL Multiphysics

Моделирование в программной среде COMSOL Multiphysics представляет собой последовательную настройку модели начиная от глобальных определений, выбором физического явления процесса и заканчивая определением метода дискретизации и настройкой решателя.

Первым этапом необходимо определить все глобальные параметры и переменные (Рисунок 2.3), которые будут использоваться для расчета модели. Настройка производится в разделе *Global Definitions*, где возможно задать исходные параметры в виде цифр (Приложение А, рисунок А.1), математических выражений (Приложение А, рисунок А.2), кривых, как например, step (единичный скачок) (Приложение А, рисунок А.3), а также задать параметры в виде таблицы (Приложение А, рисунок А.4-А.7). Глобальные параметры и переменные задаются в случае, если при моделировании используется несколько процессов или говоря на языке COMSOL создаются несколько компонент, не связанных между собой. В данном случае разрабатывается 2 различные модели с использованием физического закона теплопередачи между твердым и газовыми средами и теплопередачи в пористых средах.

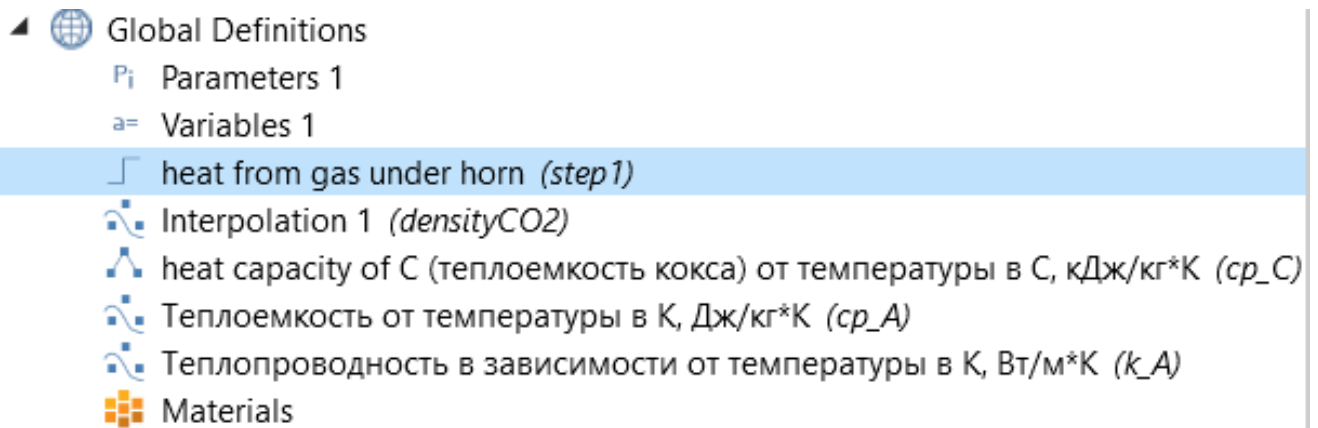


Рисунок 2.3 – Настройка глобальных параметров и переменных

Каждый процесс (компонента) (Рисунок 2.4) в программной среде COMSOL Multiphysics настраивается следующим образом:

1 Определяются параметры и переменные процесса в разделе *Definitions* (Рисунок 2.5). Здесь также как в разделе *Global Definitions* переменные можно задавать как с помощью математических выражений, так и кривых.

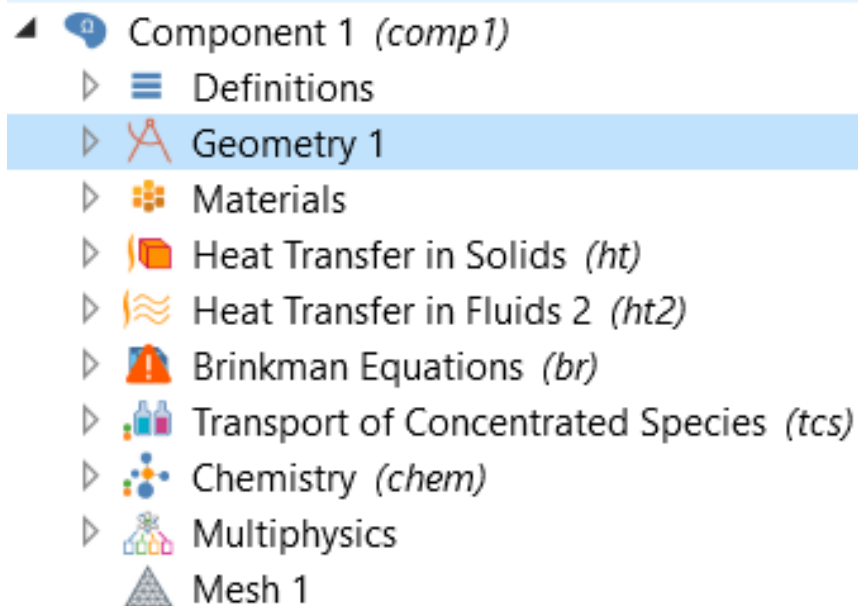



Рисунок 2.4 – Настройка процесса (компоненты) в COMSOL

Variables

Label:

Geometric Entity Selection

Geometric entity level:



▼ Variables

Name	Expression	Unit	Description
Pr1	$(\text{mat1.def.mu} * \text{mat1.def.Cp} / \text{mat1.def.k\_iso})^{0.333}$		
alfags	$\text{mat1.def.k\_iso} / \text{ds} * (2 + 0.6 * \text{Pr1}^{0.333} * \text{abs}(\text{br.cellRe})^{0.5})$	W/(m <sup>2</sup> ·K)	
cp1	$0.9 * \text{cp\_P} + 0.1 * \text{cp\_C} (T[1/\text{degC}]) [\text{kJ}/(\text{kg} * \text{K})]$	J/(kg·K)	
qsf	$\text{alfags} * 6 * (1 - \text{material.epsilon}) / \text{ds}$	W/(m <sup>3</sup> ·K)	
Qgs	$\text{qsf} * (T2 - T)$	W/m <sup>3</sup>	

Рисунок 2.5 – Переменные процесса

2 Настраивается геометрия процесса (Рисунок 2.6), причем предусмотрена возможность построения множества фигур, их объединения, вырезания и прочие операции с геометрическими фигурами как в двумерной так и трехмерной плоскости, что позволяет точно смоделировать процесс. В данной работе для ускорения расчетов плоскость по координате z была опущена, в виду допущения однородности шихты.

3 Следующим важным пунктом является описание материала, участвующего в процессе. В качестве материала в процессе агломерации определены уходящие газы (Рисунок 2.7) и шихта (Рисунок 2.8). Причем свойства материала описываются математическими выражениями, значения которых изменяются в зависимости от изменения температуры, плотности, давления и прочее. Параметры кислорода, кокса, воды и другие взяты из основных справочников, встроенных в COMSOL.

4 После идет непосредственно выбор библиотек, описывающих физические явления процесса (Рисунок 2.9). Процесс агломерации описывается теплообменом между твердым и газообразными средами, что предполагает использование модулей теплообмена в твердых телах (*Heat transfer in solids*), теплообмена в газовой среде или жидкости (*Heat transfer in fluids*), модуля движения газа, выраженное через уравнение Бринкмана (*Brinkman equations*), физических законов переноса частиц (*Transport of concentrated species*), модуля химических реакций (*Chemistry*) и мультифизического интерфейса (*Multiphysics*), позволяющего объединить выбранные модули.

Rectangle

Build Selected Build All Objects

Label: Rectangle 1

Object Type

Type: Solid

Size and Shape

Width: 7 m

Height: 260[mm] m

Position

Base: Corner

x: 0 m

y: 0 m

Rotation Angle

Rotation: 0 deg

Layers

Selections of Resulting Entities

Resulting objects selection

Show in physics: Domain selection

Color: None

Рисунок 2.6 – Настройка геометрии процесса

Material

Label: CO2 [gas]

Geometric Entity Selection

Geometric entity level: Domain

Selection: Manual

Override

Material Properties

Material Contents

Property	Variable	Value	Unit	Property group
<input checked="" type="checkbox"/> Thermal conductivity	k_iso ; kii =...	k(T[1/K])[W/(m*K)]	W/(m*K)	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Heat capacity at constant pressure	Cp	C_gas_2(T[1/K])[J/(kg*K)]	J/(kg*K)	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Dynamic viscosity	mu	eta(T[1/K])[Pa*s]	Pa*s	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Density	rho	densityCO2(T[1/K])	kg/m <sup>3</sup>	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Ratio of specific heats	gamma	1.28	1	Basic
Local property HC	HC	HC_gas_2(T[1/K])[J/(mol*K)]	J/(mol-K)	Local properties

Рисунок 2.7 – Настройка свойств уходящих газов



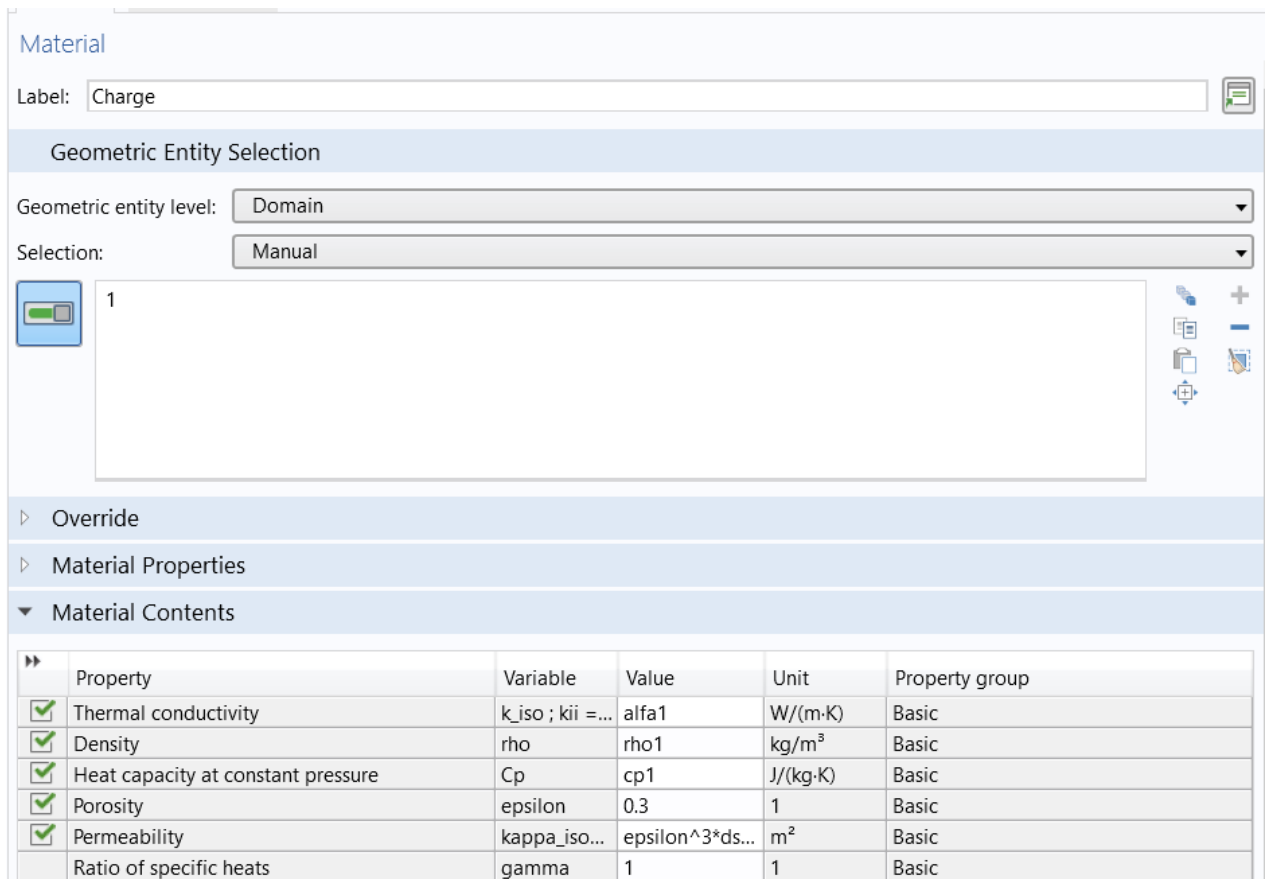


Рисунок 2.8 – Настройка свойств шихты

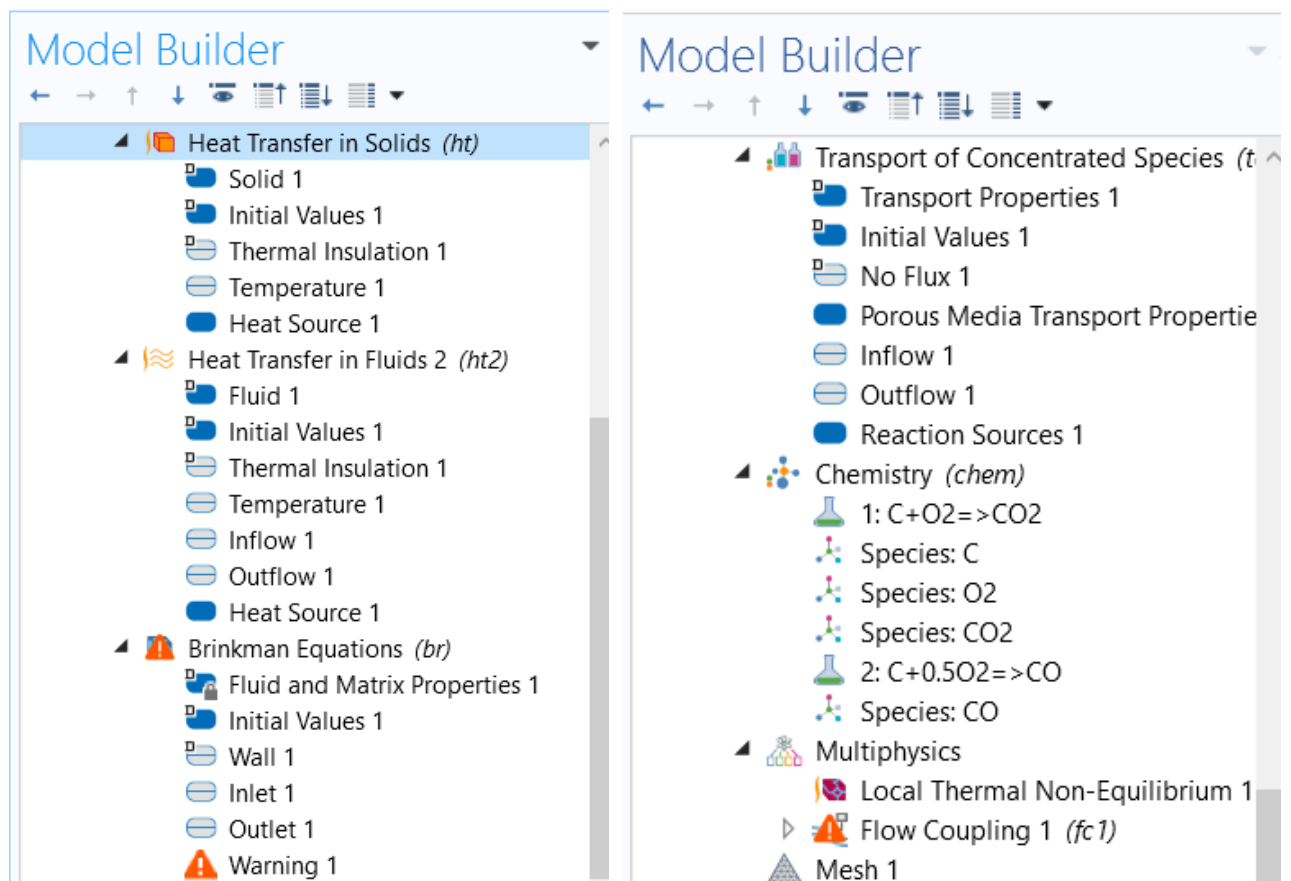


Рисунок 2.9 – Выбор библиотек для описания физических явлений процесса

5 В свойствах каждого модуля физического процесса производится настройка параметров, граничных условий и уравнений входящих в состав модуля.

а) Для модуля теплообмена в твердых телах *Heat transfer in solids* (Рисунок 2.10) и модуля теплообмена в жидкостях *Heat transfer in fluids* (Рисунок 2.11) настраивается толщина модели для расчета дифференциальных уравнений и исходная температура, также устанавливается флажок на параметре *Heat transfer in porous media*, чтобы включить в расчет пористую структуру агломерата.

б) Для настройки уравнений Бринкмана *Brinkman Equations* отключили рассмотрение потока Стокса и определили пористую структуру материала (Рисунок 2.12). Для настройки коэффициентов уравнения Бринкмана с учетом уравнения Эргуна (формулы 2.8 и 2.9) подключили параметр *Equation View* (Рисунок 2.13). В свойствах любых модулей, описывающих физический процесс есть возможность изменить вид уравнения, так для уравнения Бринкмана в свойствах параметра *Equation View* (Рисунок 2.14) изменены значения переменных *br*.

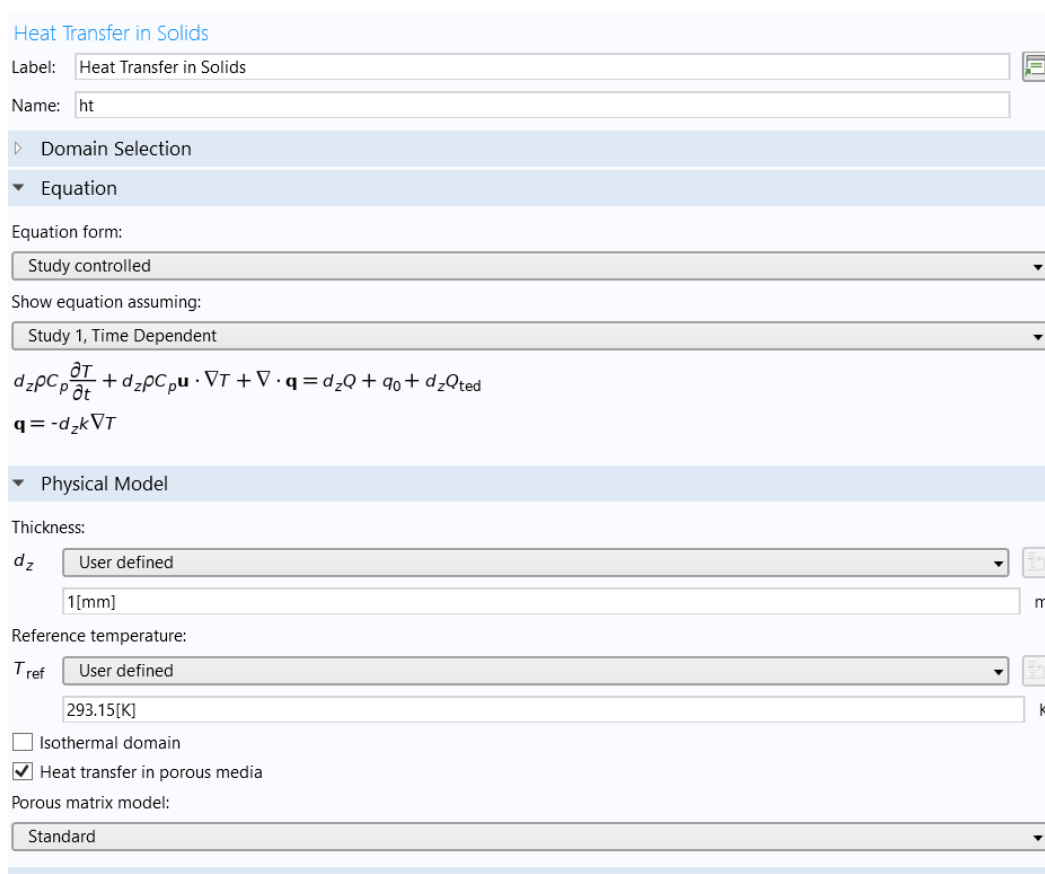


Рисунок 2.10 – Настройка библиотеки теплообмена в твердых телах

Heat Transfer in Fluids

Label: Heat Transfer in Fluids 2

Name: ht2

Domain Selection

Equation

Equation form:  
Study controlled

Show equation assuming:  
Study 1, Time Dependent

$$d_z \rho C_p \frac{\partial T_2}{\partial t} + d_z \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T_2 + \nabla \cdot \mathbf{q} = d_z Q + q_0 + d_z Q_p + d_z Q_{vd}$$

$$\mathbf{q} = -d_z k \nabla T_2$$

Physical Model

Thickness:  
 $d_z$  User defined  
1[mm] m

Reference temperature:  
 $T_{ref}$  User defined  
293.15[K] K

Isothermal domain  
 Heat transfer in porous media

Porous matrix model:  
Standard

Рисунок 2.11 – Настройка библиотеки теплообмена в жидкостях или газах

Brinkman Equations

Study controlled

Show equation assuming:  
Study 1, Time Dependent

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = \nabla \cdot [-p \mathbf{I} + \mathbf{K}] - \left( \mu \kappa^{-1} + \beta \epsilon_p \rho |\mathbf{u}| + \frac{Q_m}{\epsilon_p^2} \right) \mathbf{u} + \mathbf{F}$$

$$\frac{\partial \epsilon_p \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = Q_m$$

Physical Model

Compressibility:  
Compressible flow (Ma < 0.3)

Neglect inertial term (Stokes flow)  
 Enable porous media domains  
 Include gravity

Reference pressure level:  
 $p_{ref}$  1[atm] Pa

Reference temperature:  
 $T_{ref}$  User defined  
293.15[K] K

Turbulence

Turbulence model type:  
None

Discretization

Рисунок 2.12 – Настройка библиотеки уравнения Бринкмана

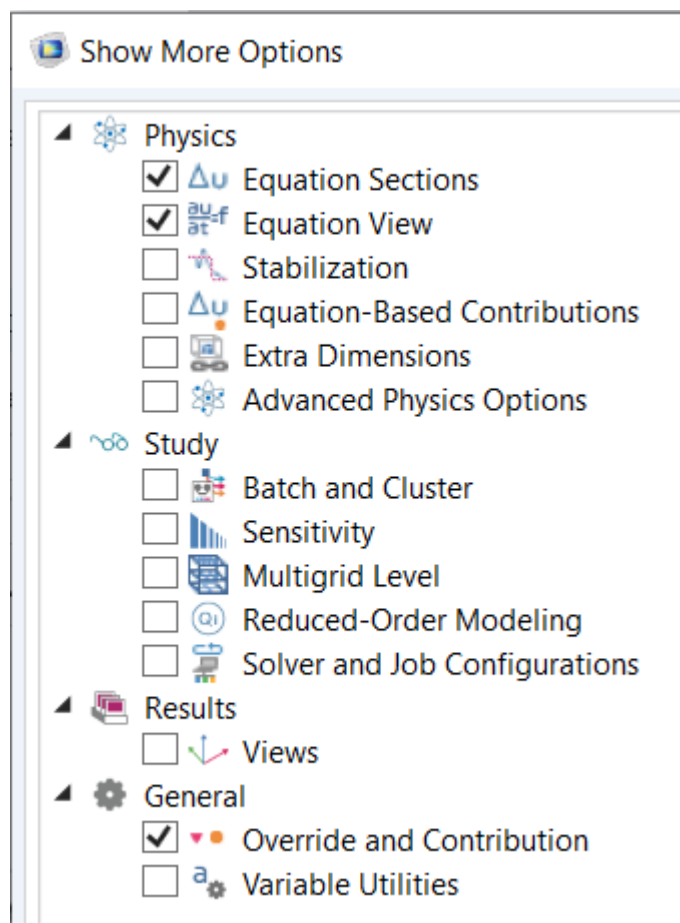


Рисунок 2.13 – Настройка возможности изменения уравнений

Equation View

Variables


Name	Expression	Unit	Description	Selection
br.Tref	model.input.Tref	K	Reference temperature	Global
br.dz	1	m	Thickness	Domain 1
br.pref	1[atm]	Pa	Reference pressure le...	Domain 1
br.pA	p+br.pref	Pa	Absolute pressure	Domain 1
br.hasWF	0		Help variable	Boundaries 1–4
br.dt_CFL	1/max(br.maxOp(sqrt(emetri...))	s	Time step, CFL=1	Global
br.usePseu...	0	1	Help variable	Global
br.nx	dnx	1	Normal vector, x com...	Boundaries 1–4
br.ny	dny	1	Normal vector, y com...	Boundaries 1–4
br.nz	0	1	Normal vector, z com...	Boundaries 1–4
br.nxmesh	dnxmesh	1	Normal vector, x com...	Boundaries 1–4

Рисунок 2.14 – Настройка уравнения Бринкмана

в) Чтобы смоделировать процесс горения кокса являющийся основным для спекания исходной шихты и получения готового агломерата в работе использованы 2 физических закона из пакета моделирования COMSOL

Multiphysics – *Transport of Concentrated Species* (Рисунок 2.15) и *Chemistry* (Рисунок 2.16 - Рисунок 2.18). Они позволяют смоделировать все реакции (превращения), происходящие при агломерации, вычислить тепло выделяемое при реакции горения кокса, и представить движение газов внутри шихты.

**Transport of Concentrated Species**

Label:  

Name:

▷ Domain Selection

▼ Equation

Equation form:

Show equation assuming:

$$\rho \frac{\partial \omega_i}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{j}_i + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\omega_i = R_i$$

$$\mathbf{j}_i = -\left(\rho D_i^m \nabla \omega_i + \rho \omega_i D_i^m \frac{\nabla M_n}{M_n} - \mathbf{j}_{c,i} + D_i^T \frac{\nabla T}{T}\right)$$

$$D_i^m = \frac{1 - \omega_i}{\sum_{k \neq i} \frac{x_k}{D_{ik}}}, \quad M_n = \left(\sum_i \frac{\omega_i}{M_i}\right)^{-1}, \quad \mathbf{j}_{c,i} = \rho \omega_i \sum_k \frac{M_i}{M_n} D_k^m \nabla x_k$$

▷ Transport Mechanisms

▼ Species


From mass constraint:

▷ Discretization

▷ Dependent Variables

Рисунок 2.15 – Настройка библиотеки движения частиц

Chemistry

Label:  

Name:

▸ Domain Selection



▼ Equation



Equation form:

Show equation assuming:

$$R_i = \sum_j R_{ij}$$

▼ Model Input

Temperature:  
 $T$      
 K

Pressure:  
 $P$    

Enable electrode reactions

Рисунок 2.16 – Настройка библиотеки химических реакций (начало)

г) Модули мультифизик подгружаются системой автоматически для установления связи между различными физическими процессами. Так мультифизика теплового неравновесия *Local thermal nonequilibrium* (Рисунок 2.19) устанавливает связь между теплообменом в твердых *Heat transfer in solids* и газообразных средах *Heat transfer in fluids*. Интерфейс *Flow coupling* (Рисунок 2.20) передает значение течения потока тепла от уравнения Бринкмана *Brinkman equations* к течению в газообразных средах *Heat transfer in fluids*.

## Chemistry

### Calculate Transport Properties

Calculate mixture properties

Heat capacity:

Automatic

$$C_p = \sum w_i \frac{C_{p,i}}{M_i}, w_i = \frac{c_i M_i}{\sum c_i M_i}$$

Thermal conductivity:

Automatic

$$k = 0.5 \left( \sum_i x_i k_i + \left( \sum_i x_i / k_i \right)^{-1} \right), x_i = \frac{c_i}{\sum_i c_i}$$

Dynamic viscosity:

Automatic

$$\mu = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_i}{1 + \frac{1}{x_i} \sum_{j=1, j \neq i}^n x_j \phi_{ij}}, \quad \phi_{ij} = \frac{\left(1 + (\mu_i / \mu_j)^{0.5} (M_j / M_i)^{0.25}\right)^2}{(4/\sqrt{2})(1 + M_i / M_j)^{0.5}}$$

$$\mu_i = 2.669 \cdot 10^{-6} \frac{\sqrt{T M_i \cdot 10^3}}{\sigma_i^2 \Omega_D}$$

$$\Omega_D = \frac{b_1}{(T^*)^{b_2}} + \frac{b_3}{\exp(b_4 T^*)} + \frac{b_5}{\exp(b_6 T^*)} + \frac{4.998 \cdot 10^{-40} \mu_{Di}^4}{k_b^2 T^* \sigma_i^6}, T^* = \frac{T k_b}{\epsilon_i}$$

Рисунок 2.17 – Настройка библиотеки химических реакций (продолжение)

Chemistry

▼ Mixture Properties

Thermodynamics

Phase:

Gas

Mixture density:

Automatic

$$\rho = \frac{pM_N}{RT}$$

▼ Species Matching

Mixture type:

Concentrated species

Species concentration input

»	Specie	Species type	Mass fraction (1)	Reaction rate
	C	Variable, from Reaction	0.1	chem.Rw_C
	CO	Variable, from Reaction	wCO	chem.Rw_CO
	CO2	Variable, from Reaction	wCO2	chem.Rw_CO2
	O2	Variable, from Reaction	wO2	chem.Rw_O2

Рисунок 2.18 – Настройка библиотеки химических реакций (конец)

6 После определения и настройки всех физических процессов выбирается сетка, в узлах которой будет происходить расчет дифференциальных уравнений.

Определение температуры в вакуум-камере представляет собой 2-мерную задачу, поэтому необходимо построить сетку (Рисунок 2.21):

- шаг сетки – 1 мм;
- тип сетки – неструктурированная сетка, 3-узловой треугольник (рисунок 2.22).



## Local Thermal Nonequilibrium

Label:

Name:

▸ Domain Selection

▼ Equation

Show equation assuming:

$$Q_s = \frac{q_{sf}}{\theta_p}(T_f - T_s)$$

$$Q_f = \frac{q_{sf}}{1 - \theta_p}(T_s - T_f)$$

▼ Coupled Interfaces

Heat transfer in solids:

Heat transfer in fluids:

▼ Local Thermal Nonequilibrium Settings

Solid volume fraction:

$\theta_p$   1

Interstitial convective heat transfer coefficient:

$q_{sf}$   W/(m<sup>3</sup>·K)

Рисунок 2.19 – Мультифизика теплового неравновесия

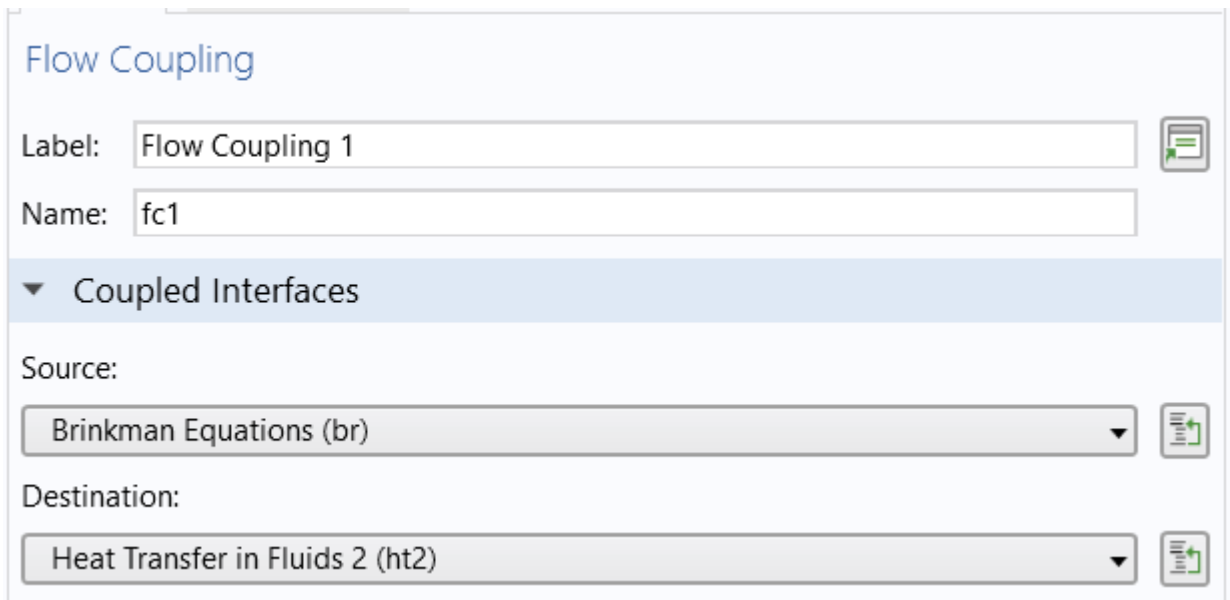


Рисунок 2.20 – Мультифизика для уравнения потока

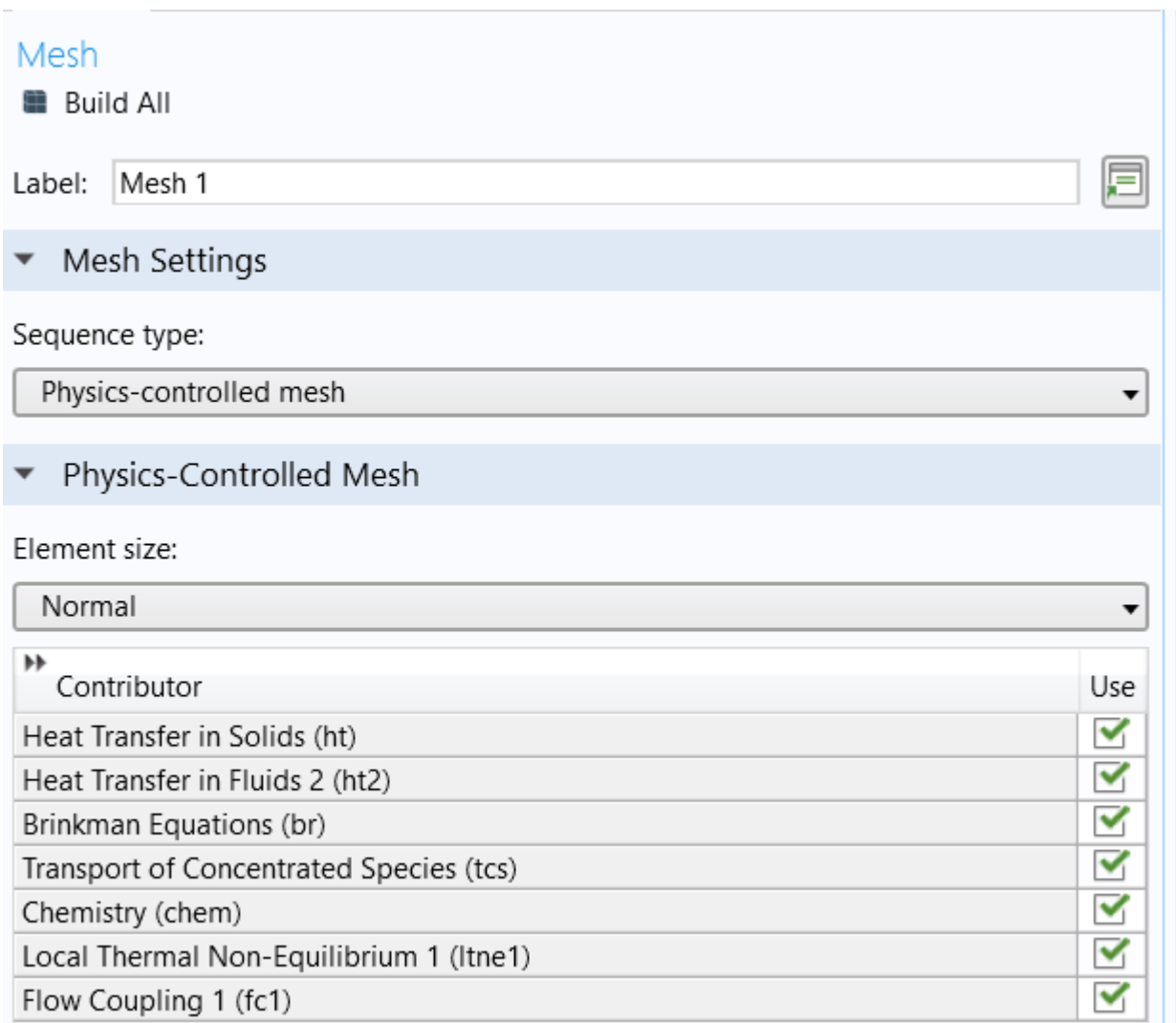


Рисунок 2.21 – Настройка сетки

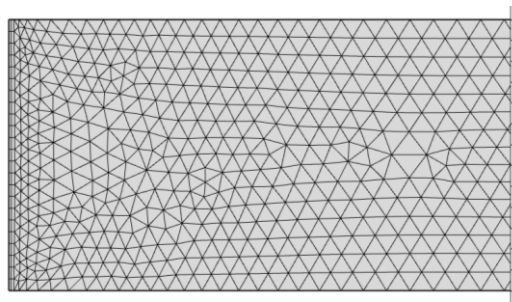


Рисунок 2.22 – Пример сетки

7 Решение модели представляет собой нестационарную задачу, поэтому модель решается в зависимости от времени:

- шаг – 0,5 мин;
- общее время моделирования – не превышает 25 мин;
- остановка моделирования – при достижении температуры в нижней точке 1623 К.

Для настройки системы дифференциальных уравнений в частных производных используется модуль *Study* (Рисунок 2.23). В разделе *Solver Configurations* (Рисунок 2.24) настраиваются граничные условия и выбирается тип решателя.

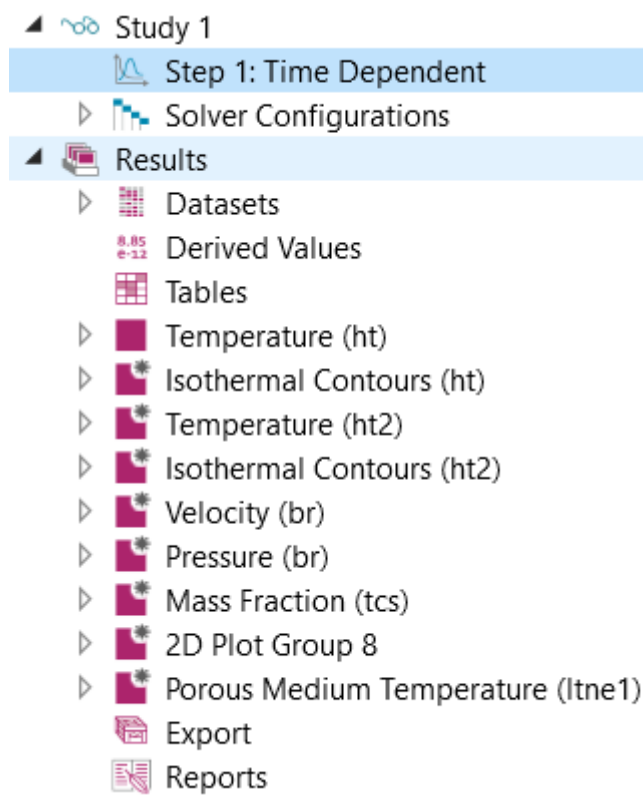


Рисунок 2.23 – Модули расчета и результатов моделирования

Решение уравнений в COMSOL Multiphysics основано на методе конечных элементов, который превращает систему дифференциальных уравнений в систему линейных алгебраических уравнений. В COMSOL Multiphysics

реализовано несколько различных алгоритмов решения системы линейных алгебраических уравнений, которые можно разделить на два класса: прямые и итерационные [50]. В среде моделирования COMSOL существуют встроенные по умолчанию настройки решателя для любой физической задачи, что позволяет системе автоматически определять раздел физического явления решаемой задачи, ее размер, и тип ее решателя.

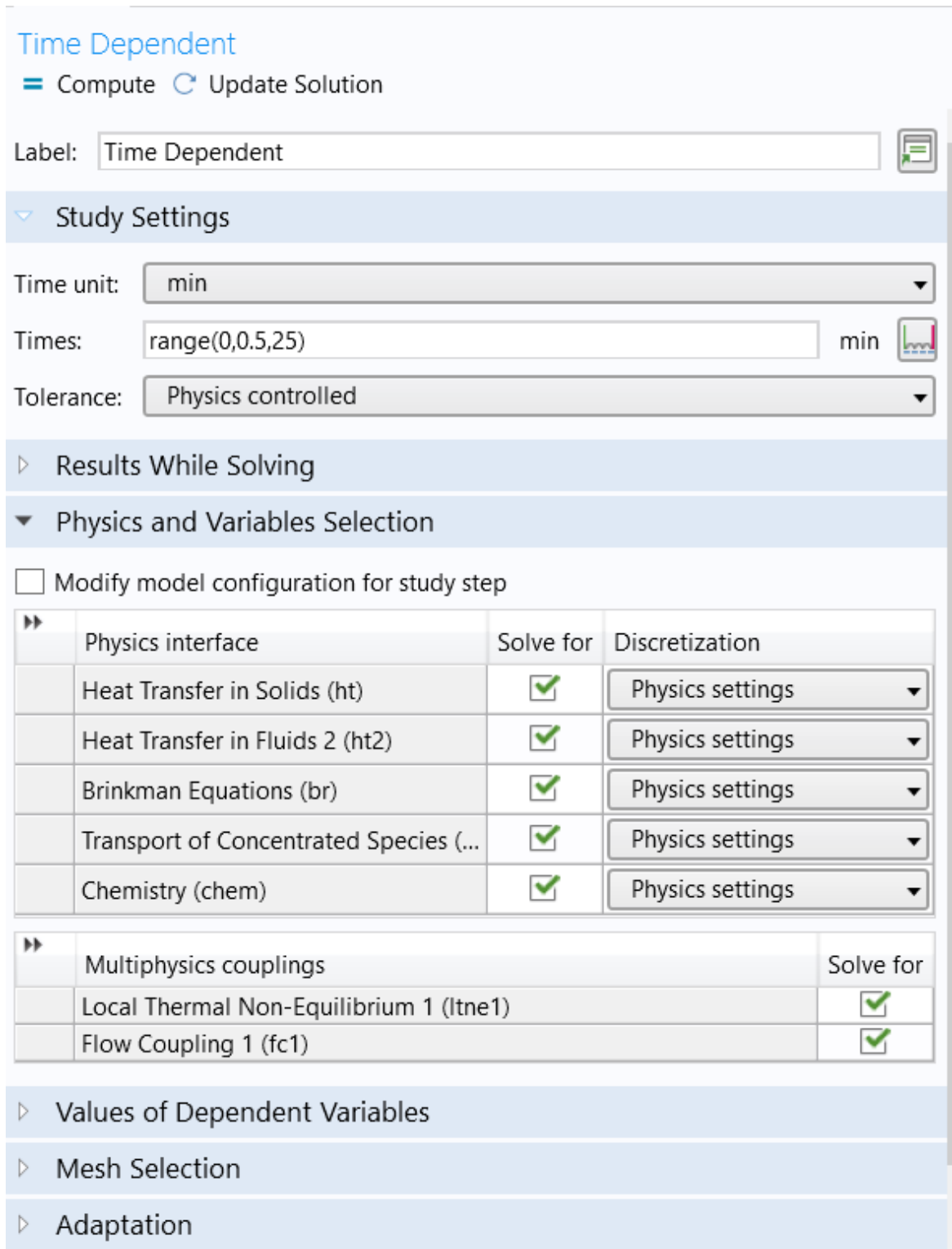
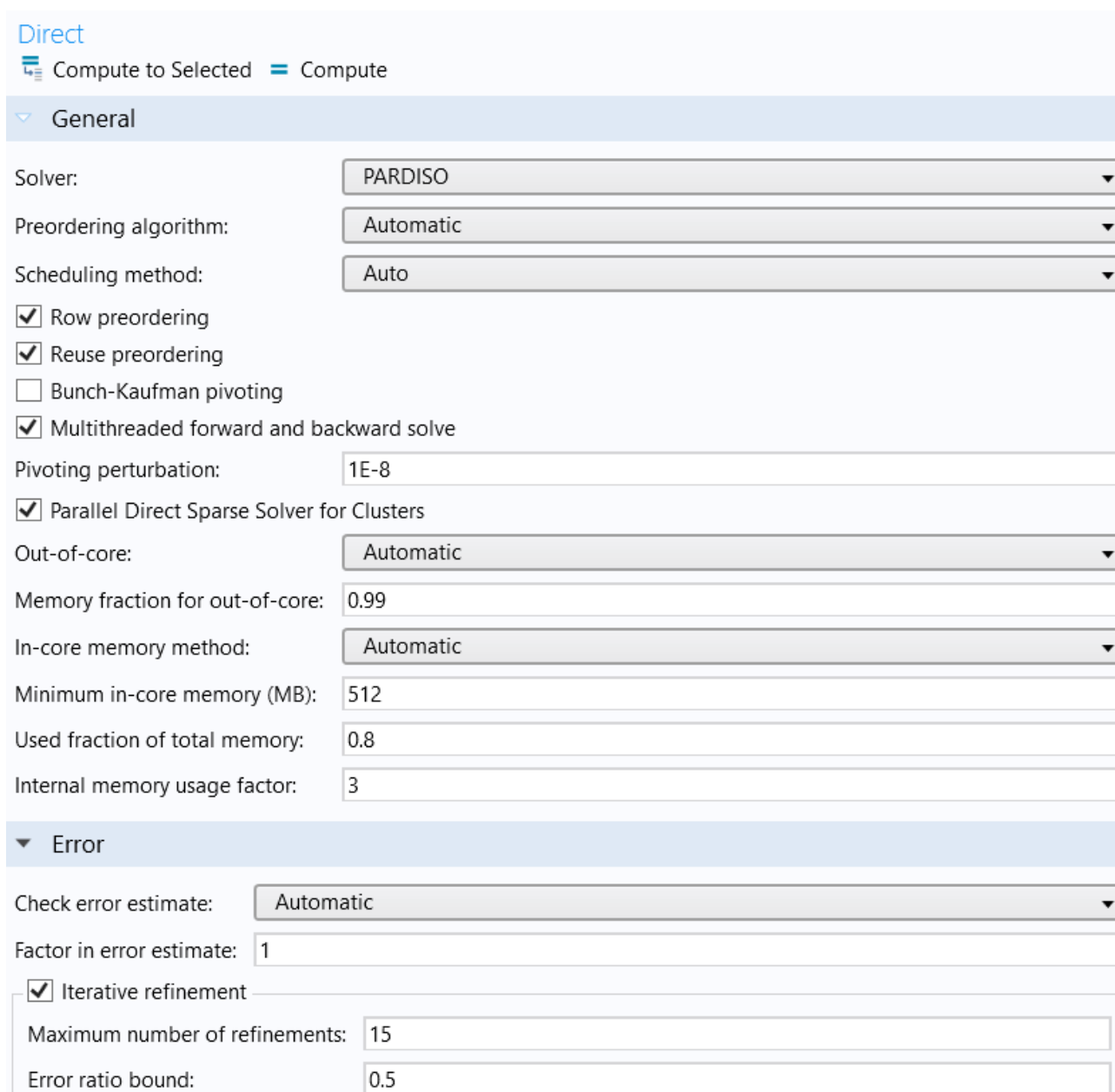


Рисунок 2.24 – Настройка граничных условий решателя

Виды решателей прямого алгоритма: MUMPS, PARDISO и SPOOLES, используют метод LU-разложение и отличаются друг от друга относительной скоростью исполнения. В данной работе использован прямой алгоритм для решения задачи PARDISO (Рисунок 2.25).



Direct

Compute to Selected = Compute

General

Solver: PARDISO

Preordering algorithm: Automatic

Scheduling method: Auto

Row preordering

Reuse preordering

Bunch-Kaufman pivoting

Multithreaded forward and backward solve

Pivoting perturbation: 1E-8

Parallel Direct Sparse Solver for Clusters

Out-of-core: Automatic

Memory fraction for out-of-core: 0.99

In-core memory method: Automatic

Minimum in-core memory (MB): 512

Used fraction of total memory: 0.8

Internal memory usage factor: 3

Error

Check error estimate: Automatic

Factor in error estimate: 1

Iterative refinement

Maximum number of refinements: 15

Error ratio bound: 0.5

Рисунок 2.25 – Выбор решателя и его настройки

#### Характеристики PARDISO:

- хранение решения вне ядра - использование при решении некоторых задач жесткого диска (создание файла-подкачки);
- быстрота нахождения решения за счет использования всех ядер процессора на одной машине.

### 2.8.3 Результаты моделирования

Возможность использования физического закона теплопередачи пористого материала для процесса агломерации проверяется через стандартные модели теплообмена в газовой и твердой фазе, представленные во множестве работ по исследованию процесса спекания. В первую очередь определяется вид кривых температуры в точках шихты А, В и С (Рисунок 2.1) и скорости газовой фазы внутри агломерата. Так как основным параметром характеризующим спекание агломерата является температура, то необходимо произвести расчет температуры для моделей теплообмена между твердой и газообразной средой, и теплопередачи в пористом материале в точках А, В и С (рисунок 2.26 - рисунок 2.29). Скорость движения газа внутри агломерационного пирога в точке В представлена на рисунке 2.30.

Так как температура при агломерационном процессе движется сверху вниз за счет вакуум-камер, расположенных под аглолентой, то основным параметром, отвечающим за пропекание слоя, является температура в вакуум-камере (точка С). Поэтому расчет среднеквадратической ошибки между 2 моделями целесообразно проводить в точке С:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=0}^n (T_g^t - T^t)^2}{n}} = 3.85 \text{ C}$$

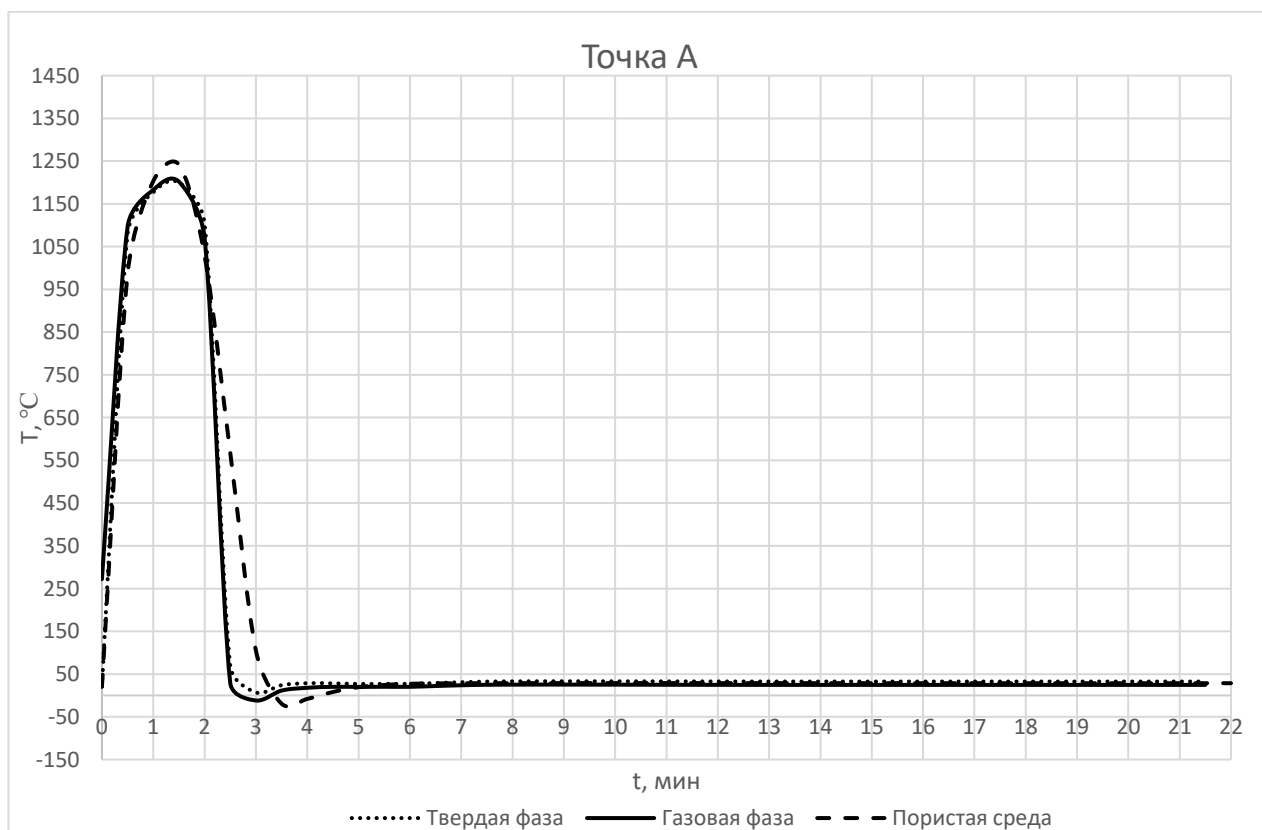


Рисунок 2.26 – Температура в точке А

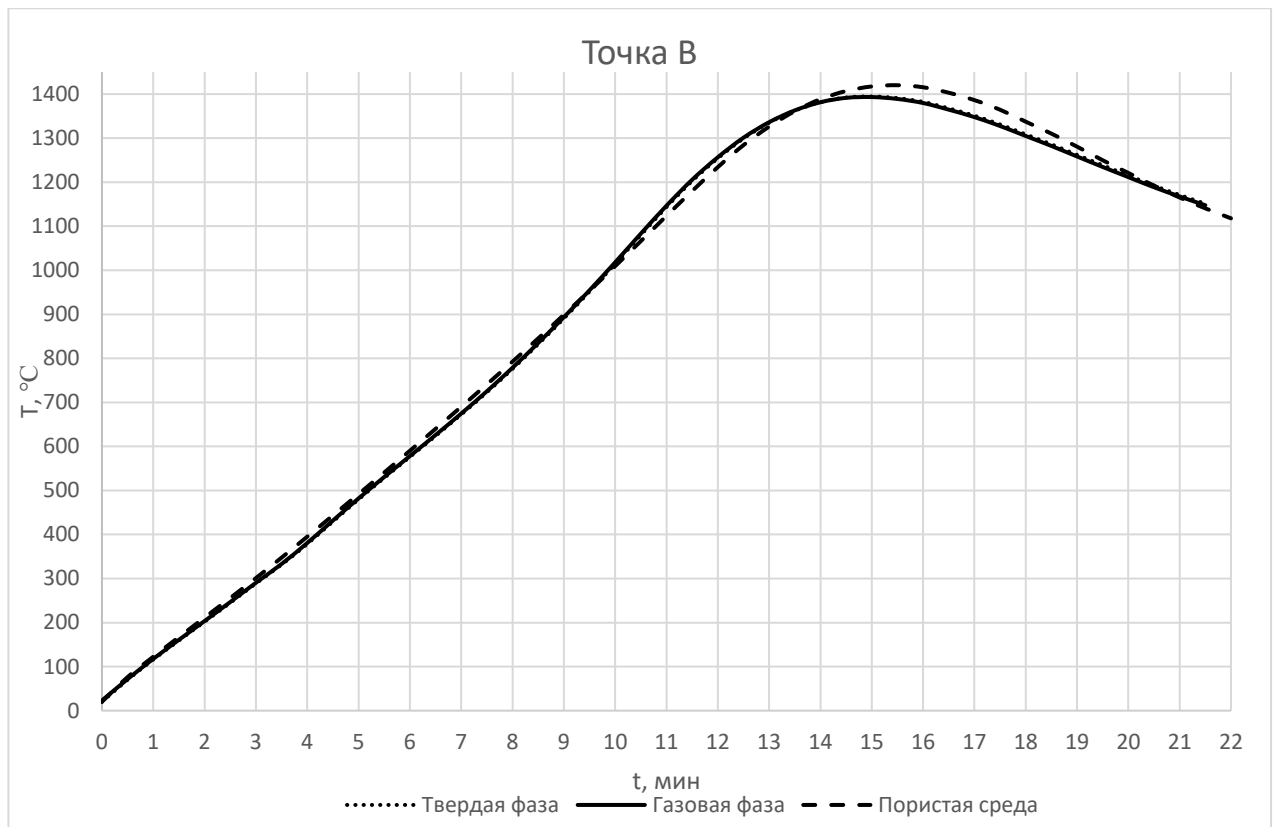


Рисунок 2.27 – Температура в точке В

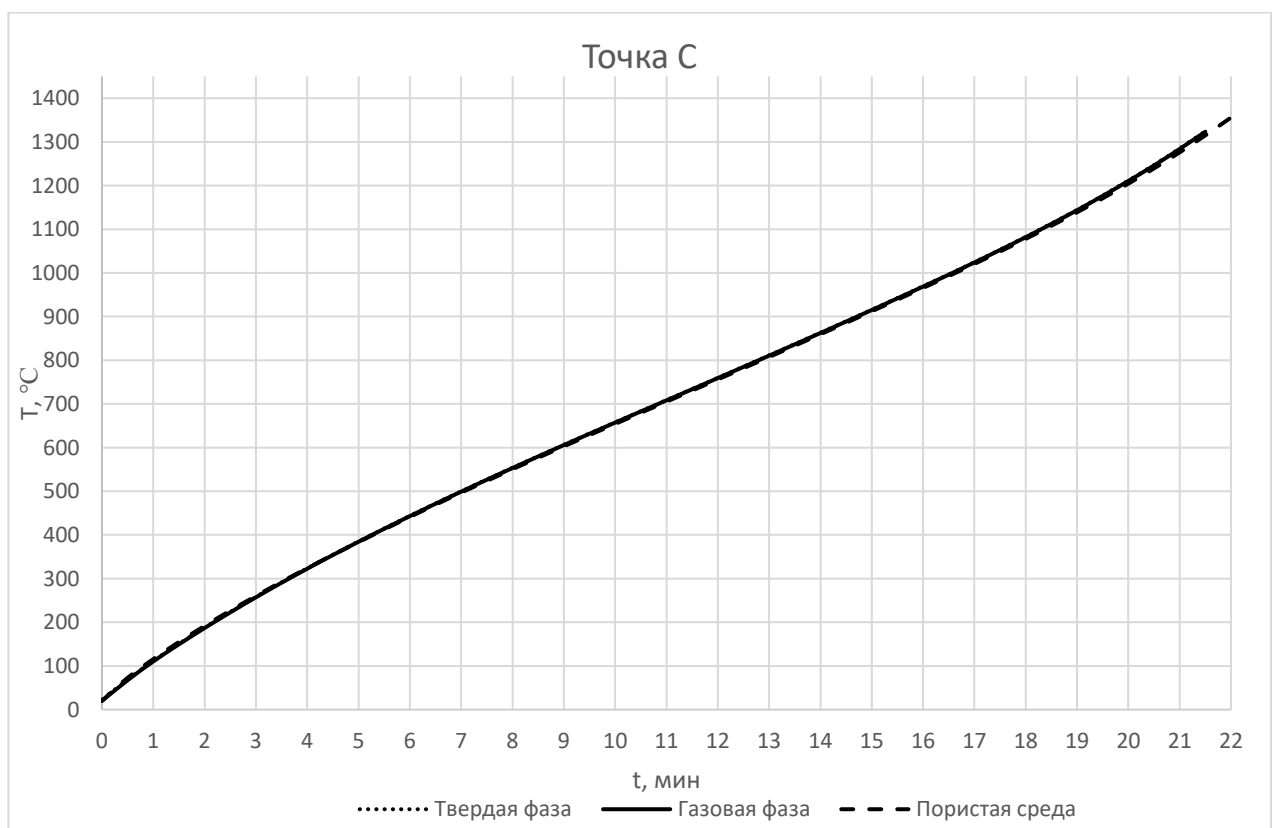


Рисунок 2.28 – Температура в точке С

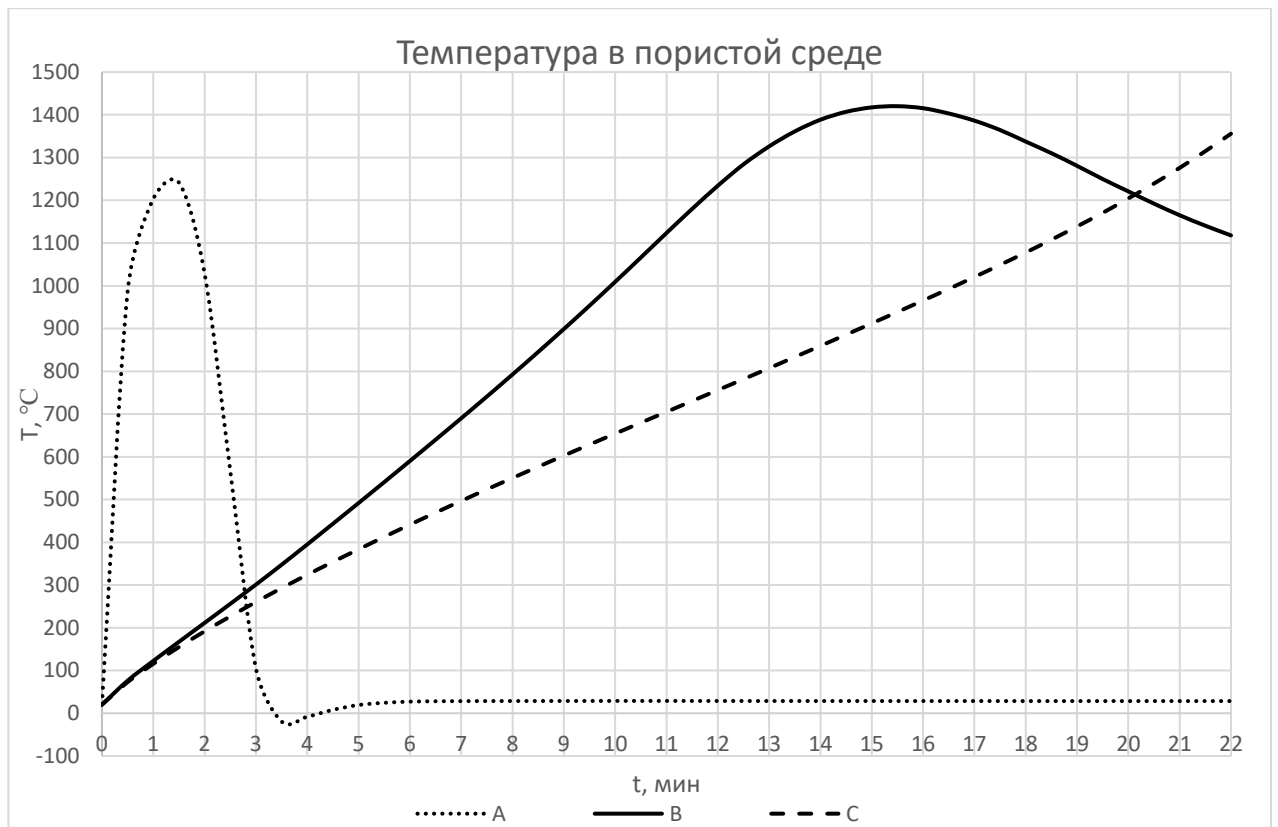


Рисунок 2.29 – Температура в разных точках пористой среды

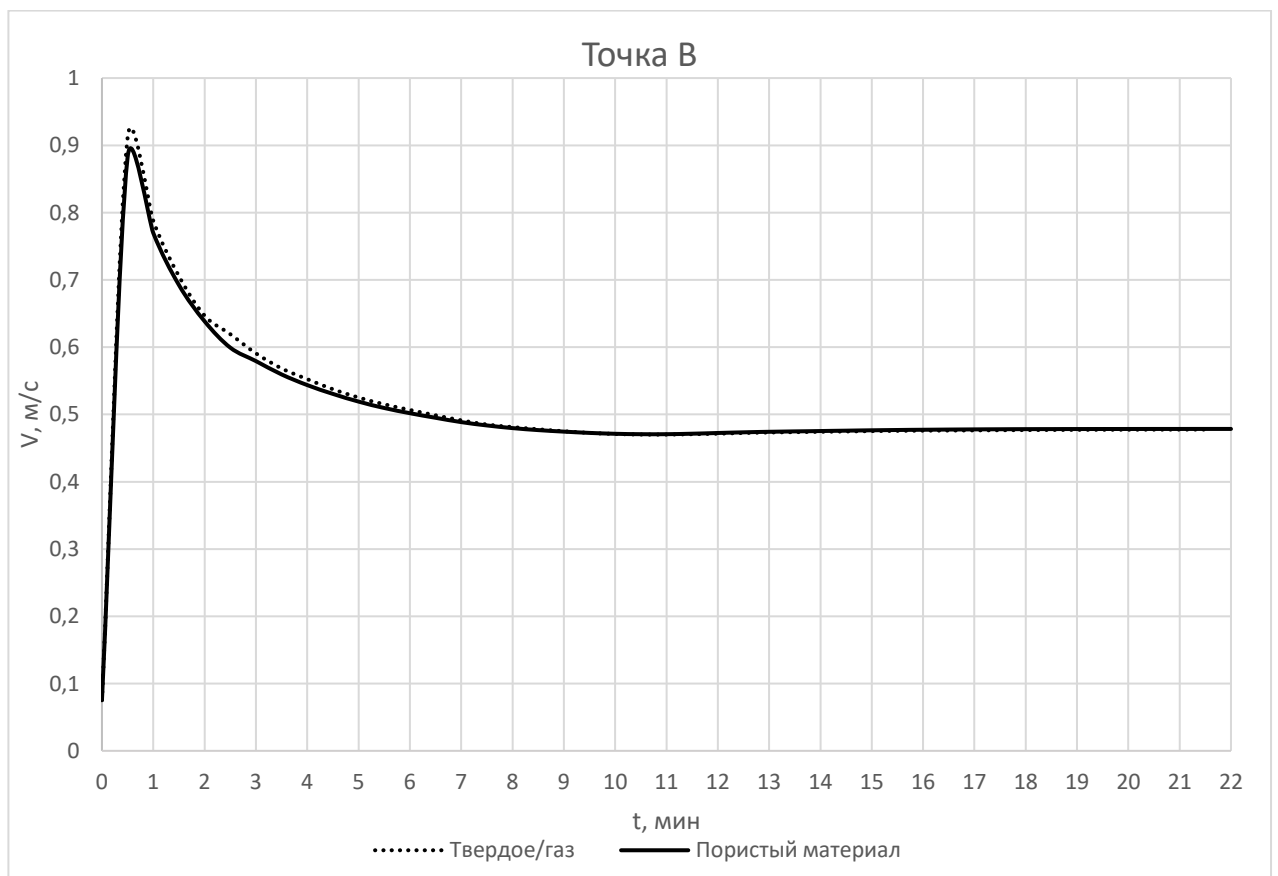


Рисунок 2.30 – Скорость газовой фазы в точке В



Как видно из графиков (Рисунок 2.26 - Рисунок 2.30) использование физических законов теплопередачи в пористом материале для моделирования процесса агломерации практически не отличается от моделирования теплообмена между твердым и газообразными средами. Среднеквадратическая ошибка при температуре 1350°C составляет менее 4°C при одних и тех же исходных параметрах шихты. Также использование модели теплопередачи в пористых материалах позволяет уменьшить размерность системы дифференциальных уравнений в частных производных, что приводит к облегчению модели и сокращению ресурсов для моделирования, как настройки модели и связей с другими физическими процессами, так и ресурсов вычисления (решения) модели.

#### 2.8.4 Исследование продолжительности спекания

Разработанная модель процесса агломерации может использоваться в качестве модели для обучения физического явления процесса агломерации, моделирования различных режимов работы процесса путем изменения переменных, определения оптимальных значений переменных процесса и параметров шихты, а также изучения влияния изменения состава шихты и даже размера гранул на результат спекания. Промоделируем процесс изменения переменных процесса, а именно разряжения, создаваемого в вакуум-камере и изменения доли (концентрации) кокса в исходной шихте и проверим как это позволяет изменить продолжительность спекания шихты. Продолжительность спекания шихты можно определить по точке спека, то есть достижение в точке С температуры спекания.

Таблица 2.2 содержит результаты исследования разработанной модели при:

- разряжение: от 70кПа до 79 кПа с шагом 3 кПа;
- массовая доля углерода: 0,1 до 0,2 с шагом 0,05.

Таблица 2.2 – Продолжительность спекания при различных параметрах

Разряжение газа, Па	Массовая доля С	Продолжительность спекания, мин
70 000	0,1	16,174
73 000	0,1	17,058
76 000	0,1	18,388
79 000	0,1	20,839
70 000	0,15	15,141
73 000	0,15	16,492
76 000	0,15	17,893
79 000	0,15	19,458
70 000	0,2	15,643
73 000	0,2	16,976
76 000	0,2	18,435
79 000	0,2	19,934

Рисунок 2.31 представляет результаты исследования модели при различных значениях переменных модели, время достижения точки спекания агломерата практически линейно зависит от изменения разряжения газа.

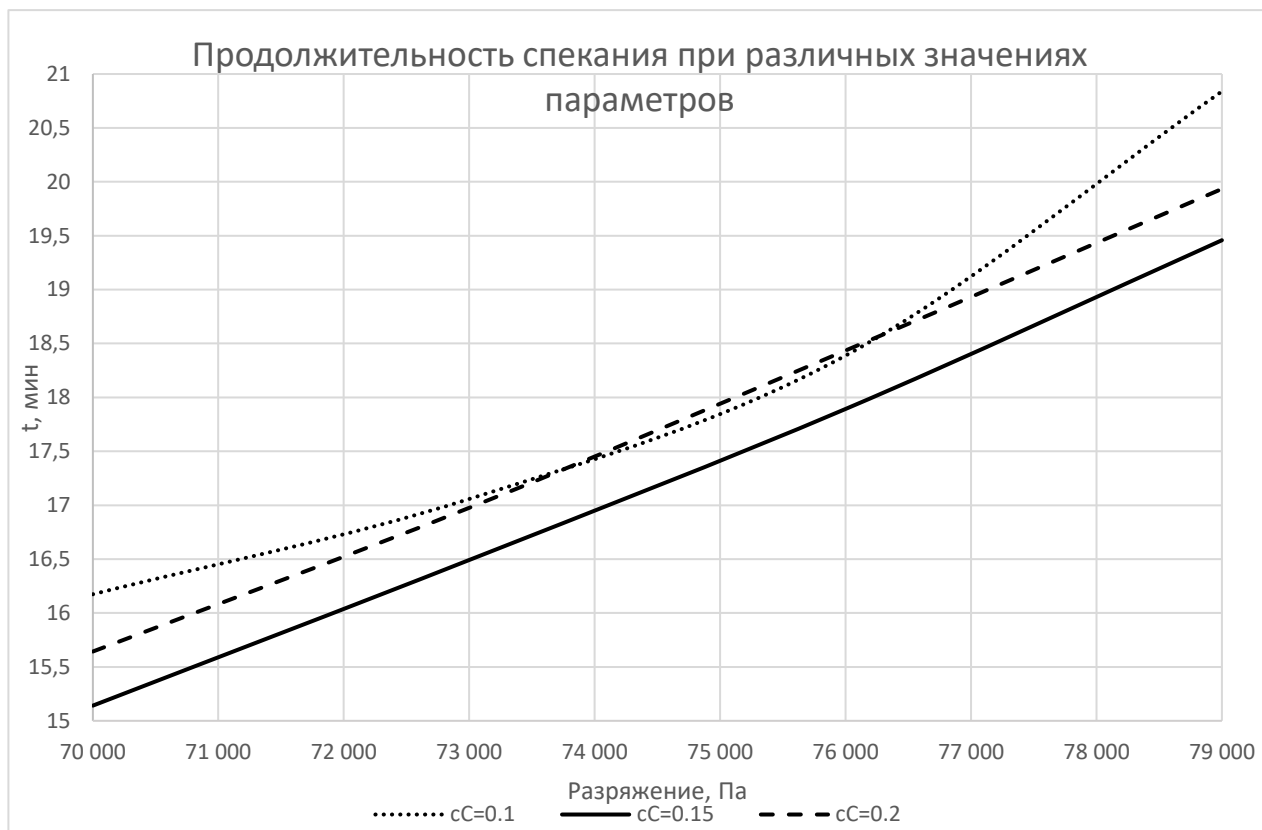


Рисунок 2.31 – Продолжительность спекания при различных значениях входных переменных

Зависимость времени спекания от массовой доли кокса носит нелинейный характер, что позволяет исследовать процесс на поиск оптимального значения содержания кокса в исходной шихте. Полученные кривые также позволят исследовать возможность построения модели для прогнозирования точки спекания агломерата на основе нескольких переменных, контролируемых в процессе.

### Выводы по второму разделу

Существует огромное количество математических моделей процесса агломерации, описывающих динамику процесса через физические процессы теплообмена между твердым и газообразными средами. Также большинство моделей относятся к агломерации железных руд как одного из самых распространенных процессов. Математические модели, описывающие агломерацию цветных руд, цинковой, свинцовой, фосфоритовой и других практически не раскрыты. В данной главе была синтезирована модель обжига фосфоритовых руд НДФЗ. Построенная модель основана на физическом явлении теплообмена пористого материала, которым является готовый агломерат, вместо классической модели теплообмена между твердой и газовой фазой. Это

позволяет упростить модель для расчетов и сократить время моделирования, проведения изменений (опытов) и оптимизации параметров и переменных. При этом для проверки адекватности модели использовалась классическая модель теплообмена между твердым и газообразными средами. Скорость движения газа внутри слоя шихты представлена через уравнение Бринкмана, коэффициенты которой выражены с помощью уравнения Эргуна. В модель включены процессы горения кокса, изменения концентрации металлов в результате реакции, а также учтены теплофизические свойства шихты.

Моделирование было произведено в программном продукте COMSOL Multiphysics, который предоставляет готовые библиотеки различных физических процессов, позволяет четко определить геометрию процесса и проводит расчеты дифференциальных уравнений в частных производных, используя различные методы решения. Простота настройки, возможность изменения исходных уравнений, выбора метода решения, возможность использования трехмерного моделирования, предоставляемые в COMSOL Multiphysics позволяют сократить время на создание модели и получить точные вычисления для исследовательских и инженерных целей.

Выведенная модель позволяет определить значение температуры в каждой точке агломерационного процесса, скорость движения аглогазов, содержание кокса, воды, параметры разряжения и самое главное определить температуру в вакуум-камерах (температура в нижней части агломерационного пирога), т.е. определять точку спекания агломерата.

Также на основе данной модели можно проводить эксперименты по изменению входных переменных процесса, таких как разряжение в шихте, изменение высоты шихты, скорости движения паллеты, изменения содержания кокса и концентрации фосфорита в шихте, изменять температуру зажигания под горном, длительность нахождения под горном и средний размер гранул шихты. Такие эксперименты позволят сократить время и ресурсы для проведения реальных опытов на установке.

Полученный в результате моделирования график изменения температуры спекания агломерата необходим для построения прогнозной модели точки спека. Прогноз точки спекания позволит построить систему управления процессом в режиме реального времени, а не управлять процессом после получения агломерата. Дальнейшее исследование будет заключаться в построении прогнозной модели на основе измеряемых переменных во время процесса агломерации – скорости агломашины, разряжения в вакуум-камерах, температуры в вакуум-камерах. Точность прогноза будет проверяться исходя из полученных в результате моделирования кривых температуры.

Результаты работы, приведенные в данном разделе, были опубликованы в работах [51, 52].

### **3 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТОДОВ СИНТЕЗА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТОЧКОЙ СПЕКАНИЯ ПРИ АГЛОМЕРАЦИОННОМ ОБЖИГЕ**

*В предыдущем разделе была разработана модель агломерационного процесса фосфоритовых руд и получены кривые спекания в вакуум-камерах аглоленты. Данные кривые необходимы для построения прогнозных моделей процесса агломерации и создания системы управления на основе прогнозных моделей. Прежде чем строить прогнозную модель, необходимо проанализировать имеющиеся модели и методы их построения. Данный раздел посвящен оценке современного состояния прогнозных моделей и их применения.*

Агломерация в металлургии представляет собой тепловой процесс, при котором происходит спекание металлургической шихты, составленной из гранул руды, концентратов и топлива (кокса). В виду нелинейности процесса, управление качеством в реальном режиме времени представляет собой сложную задачу. На практике часто воздействие на процесс происходит уже после получения готового продукта, что приводит к большому количеству возврата и ресурсам на повторное спекание. В связи с этим возникает необходимость заранее прогнозировать качество агломерата, и проводить управление на основе данных прогноза.

Одним из ключевых показателей качества спекания агломерата является точка спекания, указывающая на завершение процесса агломерации, и представляющая собой точку с наивысшей температурой. Часто точка спекания определяется оператором и на основе этого прогноза определяется необходимость изменения выходных переменных процесса. С быстрым развитием методов прогнозирования появилось огромное количество систем, позволяющих проводить прогноз точки спекания агломерата на основе исторических данных и данных текущего процесса, в результате чего повышается производительность процесса и улучшается качество готового продукта.

#### **3.1 Прогнозные модели точки спекания агломерационной шихты**

Проблема прогнозирования и управления точкой спекания изучена во многих работах с использованием различных алгоритмов, таких как, нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткое управление. В связи с развитием и широким распространением нейронных сетей большое количество работ, связанных с прогнозированием, использует данный метод в различных областях исследований. В проблеме управления точкой спекания агломерационного процесса *нейронным сетям* отведен огромный пласт работ. Так, например, в работе [53], введенный авторами параметр – математическая точка изгиба температурной кривой агломерационных газов, измеряемом в середине аглоленты – в разные моменты времени подается на вход многослойной нейронной сети, выход которой прогнозирует значения точки спекания на 5 шагов вперед. Прогнозная ошибка данной модели составила 0.15, при обучении

сети на выборке из 600 групп данных. Нейронная сеть применяется и в работе [54], где на ее вход подаются значения скорости аглоленты и положения точки спекания в предыдущие моменты времени. Сеть, совместно с обучающим алгоритмом, используются для обновления параметров модели точки спекания, образуя при этом идентификатор нейронной сети, использующийся в адаптивном методе нахождения полюса (положения). В работе [55] для интеллектуального управления агломерационным процессом железных руд на вход нейронной сети подаются данные по текущему положению точки спекания, температуре в середине и конце процесса и скорости аглоленты, результатом является прогноз точки спекания. Нечеткие нейронные сети также используются для прогноза точки спекания в [56], где температуры в вакуум-камерах выбраны в качестве входных переменных, а точка спекания в качестве выхода модели. Нейронные сети, используемые авторами в работе [57] для синтеза модели точки спекания железных руд, обучены на наборе из 10 000 данных. Набор данных включает в себя параметры процесса (скорость аглоленты, температура зажигания, высота слоя, проницаемость слоя, доля возврата, топлива и влаги) и параметры соотношений (доля возврата, топлива и влаги, известняка, руды и т.д.). Результат прогноза и реальные значения точки спекания далее поданы на мультилинейную регрессионную модель для компенсации ошибки нейронной сети. При этом максимальная ошибка прогноза составила 1.3 м. Нейронная сеть, обучаемая с помощью нечетких множеств, представлена в работе [58] для прогноза точки спекания. На вход нейронной сети поданы выборка из 80 значений температуры под аглолентой, скорости аглоленты и параметра, связанного с ней. Первый слой сети представляет собой входы, второй слой отвечает за лингвистическое значение и применяется для расчета функции принадлежности каждого компонента, каждый узел третьего слоя представляет собой нечеткие правила, последний слой является выходом сети.

Некоторые работы используют *2 прогнозные модели* точки спекания: временную и технологическую. Так для прогноза проницаемости свинцово-цинковых руд в работе [59] на вход временной нейронной сети подаются 6 предыдущих значений по проницаемости, а для технологической нейронной сети входом являются температура огня, влажность, содержание серы, свинца, диоксида кремния, скорости. В работе [60] в качестве временной последовательности применяется серая модель GM(1,1) точки спекания свинцово-цинковых руд, а на вход технологической нейронной сети подаются параметры проницаемости шихты и скорости паллеты. В работе [61] для прогнозирования точки спекания железных руд, также используют интеграцию серой модели и нейронных сетей. Результат вычисления по серой модели (температура газа в вакуум-камерах) является одним из входов нейронной сети обратного распространения ошибки, наряду со скоростью аглоленты и позицией аглоленты в точке спекания в текущий момент времени. Авторы работ с двумя прогнозными моделями используют нечеткий экспертный контроллер, который поддерживает желаемое положение точки спекания в заданных границах.

В [62] представлена оптимизационная модель эффективности кокса и нечеткий контроллер точки спекания. Основная идея заключается в улучшении эффективности кокса с использованием стратегии интеллектуального интегрированного управления точкой спекания. Скорость аглоленты, получаемая в результате оптимизационной модели и выхода нечеткого контроллера точки спекания интегрирована с помощью метода нечеткой степени удовлетворенности, который рассчитывает конечную скорость аглоленты. Модель прогнозирования точки спекания разработанная в [63] также использует 2 модели. Значения температур в вакуум-камерах подаются на модель точки спекания (первая модель) для прогноза положения точки спекания. Прогнозная модель температуры точки спекания (вторая модель) использует значения температур точек спекания, полученные в предыдущие шаги. Результаты обеих моделей – положение и температура точки спекания – совместно со скоростью аглоленты используются в качестве входных переменных в нечеткий робастный контроллер, который основан на улучшенной модели изменения линейного параметра Такаги-Сугено.

Помимо стандартных алгоритмов обучения нейронной сети используются *генетические алгоритмы*, предназначенные для оптимизации значения весов нейронной сети. Так, в работе [64] для системы управления точкой спекания при агломерации железных руд использовался адаптивный генетический алгоритм, где входным слоем нейронной сети являются параметры исходного материала, плотности, скорости аглоленты и температуры зажигания, а выходной слой отвечает за значения температуры и давления агломерационных газов и газов в вакуум камере. Генетическая нейронная сеть использовалась для системы прогнозирования точки спекания железных руд и в работе [65], где на вход подавались 707 групп данных, полученных в результате *кластеризации* и классификации векторов температуры и разряжения от 18 вакуум-камер. Вся система адаптивной структурной кластеризации использовала методы пространственной кластеризации исходных данных, самоорганизующейся карты нейронной сети для извлечения свойств релевантности данных и карты Кохонена для обучения LVQ-сети.

Идея кластеризации была использована и в работе [66] для синтеза модели прогнозирования точки спекания железных руд. Модуль кластеризации K-средних, на вход которого подается модель проницаемости холодной шихты, значения температуры зажигания и коксового остатка, используется для формирования кластеров. Модель прогноза в данной работе *не использует алгоритмы нейронных сетей*, а полученные кластеры подаются на вход динамической модели температуры и разряжения. Динамическая модель построена с использованием алгоритма нового генетического программирования. Алгоритм, основанный на генетических алгоритмах для оптимизации модели прогнозирования конечного спекания на основе метода опорных векторов представлен и в работе [67].

Модели, не использующие для прогноза точки спекания нейронные сети, основываются на *уравнениях изменения температуры или времени спекания*. Так, например, в работе [68] прогнозное значение времени спекания,

определяется по методу наименьших квадратов на основе исторических данных и, в зависимости от сигнала событийной модели, которая определяет время до конца движения паллеты, осуществляется управление скоростью аглоленты. Событийная модель управления точкой спекания железных руд, представлена как линейная, постоянная по времени дискретная модель в пространстве состояний, использующая идею разбивки непрерывной модели на дискретные события. Авторы [69] используют метод подгонки кривой и представляют результат как кубическую кривую и кривую 5 степени вблизи положения точки спекания. В работе [70] используется параболическая модель изменения температуры управления точкой спекания, составленное по измеренным значениям в трех вакуум-камерах. Она используется для определения объема аглогазов и коррекции основного сигнала – объема агломерационных газов, вычисляемого из объема кислорода, влажности, данных по композиции шихты. В работе [71] рассмотрена двухуровневая иерархическая система управления точкой спекания и вертикальной скоростью спекания агломерационного процесса железных руд. Предложенная авторам модель точки спекания, представляет собой кусочно-квадратичную зависимость температуры от позиции на аглоленте, которая используется при нестабильном протекании процесса. При стабильном протекании процесса агломерации вертикальная скорость спекания рассчитывается с помощью исторических данных о скорости аглоленты и высоте шихты. В работе [72] точка спекания аппроксимирована с использованием квадратичной функции от температуры выходных газов. При этом строится динамическая модель пространства состояний для получения температуры выходных газов, которая использует 6 входных переменных: толщину слоя шихты, скорость движения паллет, разряжение в вакуум-камерах и температуры выходных газов в трех предыдущих вакуум-камерах. Поисковой сетчатый алгоритм оптимизирует переменные в заданных пределах с использованием оценочной функции, которая дает более точные результаты в прогнозировании температуры.

Не используется нейронная сеть и в работе [73], где управление положением точки спекания железных руд разделено на 2 части: замкнутая модель идентификации и обобщенная прогнозная модель управления. В первой части на основе авторегрессионной экзогенной модели, на вход которой подаются значения скорости аглоленты, количества влаги, высоты шихты, объема воздуха и разряжения, рассчитывается положение точки спекания. Здесь используется метод замкнутой системы идентификации, который служит для динамического определения параметров модели. Во второй части на основе передаточной функции, полученной с идентификационной модели, производится прогноз точки спекания, для управления скоростью аглоленты. В работе [74] степень влияния 4 параметров на точку спекания – разряжение в вакуум-камерах, количество воздуха, скорость аглоленты и температура зажигания – определяется с помощью оптимизационного алгоритма роя частиц.

Естественным является то, что текущее положение точки спекания зависит от его предыдущих значений. Данную идею использовали в исследовании [75] и провели анализ трендов временных рядов для точки спекания, что дало

возможность использовать глобальные и локальные переменные функции тренда. Эти переменные использовались в качестве входных в нечеткий контроллер, построенный на основе знаний оператора. Выходом контроллера выступает скорость аглоленты для поддержания точки спекания в требуемом положении. Положение точки спекания также было спрогнозировано с использованием алгоритма оптимизации «роя частиц» [76], где значение 4 влияющих параметров: разряжение, входящий поток воздуха, скорость аглоленты и температура зажигания определены при помощи алгоритма.

Исходя из проведенного литературного обзора можно сделать следующие выводы:

- для прогноза точки спекания используются данные по (1) вертикальной скорости спекания, определяемые по объему агломерационных газов, разряжению, свойствам исходного материала, проницаемости, высоте шихты и др.; (2) температуре в вакуум-камерах или агломерационных газов; (3) скорости движения аглоленты; (4) предыдущим значениям точек спека;
- для построения прогнозных моделей используется большой объем исходной выборки для получения точных моделей;
- управление точкой спекания осуществляется через изменение скорости движения аглоленты.

### **Выводы по третьему разделу**

Агломерация – это сложный нелинейный процесс, с длительным транспортным запаздыванием, с различными химическими превращениями на каждом этапе (под и над горном) и на различных слоях пирога, а также со множеством параметров являющихся взаимозависимыми. Поэтому процесс агломерации управляется с запаздыванием – по получению готового пирога и лишь после этого определяется необходимость в изменении скорости, исходного количества кокса и разряжения в вакуум-камерах.

Использование существующих моделей прогнозирования точки спекания имеет следующие недостатки. На практике, в виду отсутствия полной системы автоматизации, часто замеряются только основные параметры процесса, такие как температура в вакуум-камерах, разряжение, скорость аглоленты, высота шихты и основные массовые значения компонентов. При этом, значения таких свойств как проницаемость, объем агломерационных газов или свойств шихты получают только при лабораторных исследованиях. Поэтому возникает необходимость построения прогнозных моделей, используя основные измеряемые параметры – температуру в вакуум-камерах и разряжение.

Использование большого объема выборки для исследования требует длительного срока по сбору данных и их накоплению для улучшения точности прогноза. При этом изменение определенных условий протекания процесса (свойств исходной шихты, высоты шихты, размера гранул, газа для зажигания и др.) потребует переобучения прогнозных моделей для получения точных результатов. Таким образом, необходимо синтезировать такую прогнозную модель, которая будет адекватна при обучении на малом количестве исходных данных и будет строиться в режиме реального времени.



Для решения данной проблемы используется теория серых систем, разработанная Д. Денгом в 1982 году, которая направлена на решение проблем прогнозирования на основе малого объема исходной выборки и малого количества информации. Основная идея теории серых систем заключается в рассмотрении процесса как «обобщенной энергосистемы» и подчеркивает, что неотрицательные гладкие дискретные функции могут быть преобразованы в последовательность, имеющую приближенный экспоненциальный закон, так называемый серый экспоненциальный закон [77]. Применение серых моделей для целей прогнозирования точки спекания рассматривалось в работах [60, р.928, 61, р.5976]. В обоих случаях использовалась модель GM(1,1), в которой только предыдущие значения прогнозируемой переменной влияют на последующие. Недостаток данного подхода заключается в отсутствии рассмотрения влияющих факторов, которые могут улучшить точность прогнозируемой модели. Поэтому в данной диссертации необходимо рассмотреть непрерывные интегральные серые модели, которые используют  $(n-1)$  влияющих факторов.

Результаты работы, приведенные в данном разделе, были опубликованы в работах [78-80].

## 4 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОГНОЗА ТОЧКИ СПЕКАНИЯ ПРОЦЕССА АГЛОМЕРАЦИИ

*В предыдущем разделе были определены достоинства и недостатки существующих моделей прогноза точки спекания. На основе проведенного анализа в качестве модели для спекания выбрана теория серых систем. Данный раздел посвящен построению математической модели прогноза точки спекания, начиная от определения основных переменных прогнозной модели и заканчивая построением оптимальной серой модели. В подразделах представлены различные модели серых систем, а также их использование для процесса агломерации фосфоритовых руд.*

### 4.1 Основные параметры прогнозной модели точки спекания

Количество возврата при спекании достигает 40-50%, так как процесс контролируется только в конце агломерационной машины по решению оператора, основанному на визуальной оценке среза агломерата. Количество возврата необходимо уменьшить с помощью прогнозирования и управления точкой спекания на основе данных реального времени. Агломерационный процесс включает в себя множество параметров, которые оказывают влияние на точку спекания. Часть этих параметров может быть измерена и использована в лабораторных исследованиях, такие как: состав исходной шихты, размер гранул шихты, параметры процесса зажигания под горном, содержание кокса в шихте, процент возврата и его характеристики; другая часть может быть измерена в режиме реального времени: температура выходных газов в вакуум-камерах, давление слоя агломерата, скорость аглоленты, высота шихты; и наконец, часть параметров, которая может быть рассчитана или сохранена в базе, как например предыдущие значения точки спекания. В диссертации в качестве основных параметров для построения прогнозных моделей использовались данные, измеренные в режиме реального времени – температура в вакуум-камерах и скорость движения газа, определяемая через измеренное значение давления (разрежения) в вакуум-камерах.

Основной переменной для прогнозирования является температура в нижней части аглоленты (температура в вакуум-камерах). Температурные кривые (рисунок 4.1, Приложение Б, таблица Б.1) представляют собой выборки данных, взятых в разное время в разных начальных условиях: различный состав шихты, количество кокса, давление, но при постоянной скорости, поэтому на графике они отображаются только до тех пор, пока не будет достигнута желаемая температура, чтобы определить реальную продолжительность процесса.

Дополнительно, измеряется величина падения давления  $\Delta p$  (разница между давлением в верхней и нижней части шихты) и согласно уравнению Эргуна (2.6) рассчитывается скорость газа  $u$  (рисунок 4.2, Приложение Б, таблица Б.1) в верхней части шихты. Значение пористости рассчитывается согласно методу, предложенному в [13, р.3].

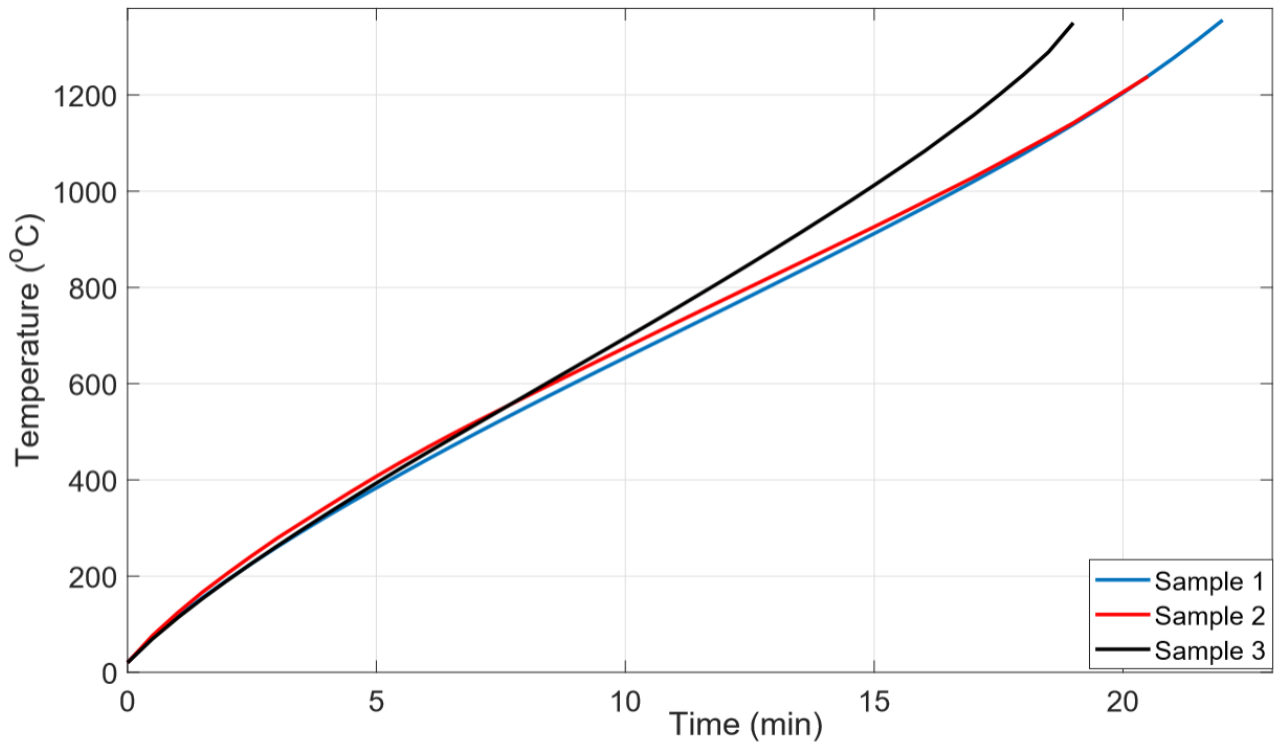


Рисунок 4.1 – 3 выборки температурных кривых измеренных в вакуум-камерах

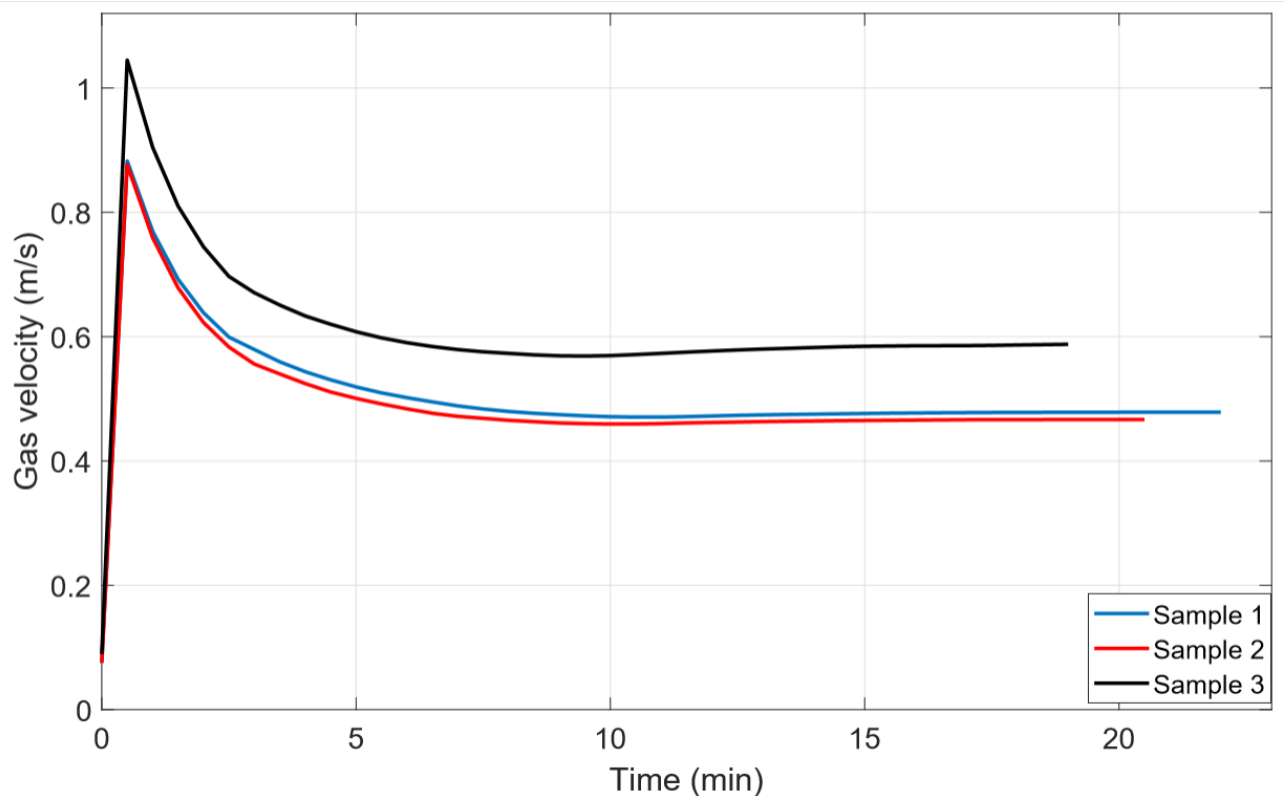


Рисунок 4.2 – Скорость газа 3-х выборок

Таким образом, постановка задачи моделирования прогноза точки спекания может быть сформулирована следующим образом: необходимо на основе малой выборки исходных данных по температуре и скорости газа,

разработать прогнозную модель точки спекания агломерата, среднеквадратичная ошибка которой не превышает 2%.

## 4.2 Проверка влияния параметров на температуру спекания

Для использования влияния скорости газа на температуру шихты, используются методы корреляции, которые показывают статическую взаимосвязь между двумя переменными. На данный момент разработано множество методов корреляции, используемые при статистическом анализе исходных выборок, поэтому для выбора конкретного метода выделим особенности и недостатки данных методов (таблица 4.3).

В результате проведенного анализа для определения степени корреляции возьмем ранговую корреляцию Спирмена, для которой распределение не играет роли, так как не все переменные рассматриваемых параметров имеют нормальное распределение

$$r = 1 - \frac{6 \sum d^2}{n(n^2-1)}, \quad (4.1)$$

где  $\sum d^2$  - сумма квадратов разностей рангов,  $n$  - число парных наблюдений.

Расчет корреляции произведен с помощью функции Matlab – *corr(x, y, Type, Spearman)*.

Кроме того, одним из новых направлений исследования методов корреляции вступает серый реляционный анализ (GRA [0; 1]):

$$r_j = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{\min_j |y(k)-x(k)| + \rho \max_j |y(k)-x(k)|}{|y(k)-x(k)| + |y(k)-x(k)|}, \quad (4.2)$$

где  $\rho=0.5$  – коэффициент дифференциации, который используется для увеличения наиболее заметных различий между двумя массивами  $x$  и  $y$ . Одной из особенностей серого реляционного анализа GRA является определение степени корреляции, но не его направления. Результаты корреляции Спирмана показывают отрицательный результат, поэтому в качестве анализа лучше использовать Двухнаправленную модель серого реляционного анализа [81].

Алгоритм Двухнаправленной модели серого реляционного анализа:

1 Нормализация последовательности данных с использованием оператора минимизации  $y_i(k)d_4 = \frac{y_i(k)}{\max_x y_i(k)}$ ,  $x_i(k)d_4 = \frac{x_i(k)}{\max_x x_i(k)}$ .

2 Генерация Зеркальной последовательности данных из  $\check{x} = (x(n)d_4, x(n-1)d_4, \dots, x(1)d_4)$ .

3 Расчет Двухнаправленного абсолютного серого реляционного коэффициента

$$\varepsilon_{yx}^{\pm} = \begin{cases} + \max(\varepsilon_{yx}, \varepsilon_{y\check{x}}), \varepsilon_{yx} - \varepsilon_{y\check{x}} > 0 \\ - \max(\varepsilon_{yx}, \varepsilon_{y\check{x}}), \varepsilon_{yx} - \varepsilon_{y\check{x}} < 0 \end{cases}, \quad (4.3)$$

где

$$\varepsilon_{yx} = \frac{1+|S_y|+|S_x|}{1+|S_y|+|S_x|+|S_y-S_x|},$$

$$|S_y| = \left| \sum_{k=2}^{n-1} y(k) d_4 + \frac{1}{2} y(n) d_4 \right|,$$

$$|S_x| = \left| \sum_{k=2}^{n-1} x(k) d_4 + \frac{1}{2} x(n) d_4 \right|,$$

$$|S_y - S_x| = \left| \sum_{k=2}^{n-1} (y(k) d_4 - x(k) d_4) + \frac{1}{2} (y(n) d_4 - x(n) d_4) \right|.$$

Как видно (таблица 4.1), для каждого образца для определения температуры шихты необходимо учитывать скорость газа, так как между ними существует сильная связь, близкая к |1|. Также для Двухнаправленной модели серого реляционного анализа разработана шкала Jave (таблица 4.2) – распределения по диапазонам абсолютного значения корреляции в зависимости от связи между последовательностями. Согласно шкале связь между последовательностями имеет 3 уровень корреляции.

Таблица 4.1 – Результаты корреляции между выборками температуры и скорости газа

Вид корреляции	Выборка 1	Выборка 2	Выборка 3
Спирман	-0.4072	-0.7715	-0.7430
GRA	0.6690	0.6757	0.6839
Двухнаправленный GRA	-0.7485	-0.7509	-0.7589

Таблица 4.2 – Шкала корреляции Jave

$ \varepsilon_{yx}^\pm $	(0.5;0.6)	(0.6;0.7)	[0.7;0.8)	[0.8;0.9)	[0.9;1]
Категории	Уровень 1	Уровень 2	Уровень 3	Уровень 4	Уровень 5
Интерпретация	Слабая связь	Умеренно сильная связь	Надлежащим образом сильная связь	Достаточно сильная связь	В высшей степени сильная связь

Таблица 4.3 – Методы корреляции

Название	Диапазон	Особенности	Недостатки	Matlab code
Bivariate (Pearson) Correlation Двумерная корреляция (Пирсона)	[-1;+1]	линейная связь между переменными, используется для данных непрерывного уровня, нормальное распределение измерены в интервальной шкале или шкале отношений	ошибка типа II, нулевая гипотеза не отвергается («две переменные независимы и не коррелированы во Вселенной»), переменные могут зависеть, но не линейно	corrcoef(x,y)
Canonical Correlation Каноническая корреляция	[-1;+1]	Измеряет силу связи между двумя каноническими вариациями	Канонические вариации не являются факторами, поскольку только первая пара канонических вариантов группирует переменные таким образом, что корреляция между ними максимизируется	canoncorr(X,Y)
Partial Correlation Частичная корреляция	[-1;+1]	выявляет и корректирует ложные корреляции, линейная связь между переменными	Полезно только в небольших моделях с тремя или четырьмя переменными, данные должны быть интервальными	partialcorr(x,y)
Point-Biserial Correlation Точечно-бисерная корреляция	[-1;+1]	Определяет степень корреляции между переменной непрерывного уровня (данные отношения или интервала) и двоичной переменной	Так как корреляционные анализы требуют, чтобы переменные были случайным образом независимы, Точечно-Бисериальная Корреляция не является лучшим выбором для анализа данных, собранных в экспериментах	
Kendall rank correlation Ранговая корреляция Кенделла	[-1;+1]	Непараметрический тест, который измеряет силу зависимости между двумя переменными	-	corr([x,y], 'Type', 'Kendall')
Spearman rank correlation Ранговая корреляция Спирмена	[-1;+1]	Непараметрический тест, который используется для измерения степени ассоциации между двумя переменными, распределение не важно	-	corr([x,y], 'Type', 'Spearman')
Correlation ratio Индекс корреляции	[0;1]	Коэффициент нелинейной ассоциации	Не может определить направление корреляции, как другие типы корреляций и ассоциаций	corr2(x,y)

### 4.3 Серые системы для прогнозирования точки спекания

Построение системы сбора данных с их хранением, анализом и постоянным переобучением требует огромных временных и финансовых ресурсов. Также, сбор исходной выборки, обучение и построение эффективной системы требует постоянного прерывания процесса производства, что влияет на его эффективность. В рассматриваемом процессе отсутствует полноценная система сбора данных, поэтому для получения данных использовались дополнительные системы измерения, не входящие в основной контур управления. В таких условиях становится необходимым использовать модели, которые требуют небольшого количества исходной выборки для обучения и построения прогнозной модели. Теория серых систем (Grey system) удовлетворяет этим требованиям.

Теория серых систем была разработана в 1982 году. Системы с недостаточной информацией или ее отсутствием, такие как структура сообщений, механизмы работы и поведения, относятся к Серым системам. Например, тело человека, агрокультуры, экономика и прочее являются Серыми системами. Обычно, исходя из существующих серых отношений, серых элементов, серых чисел, можно определить, что такое серая система, где «серый» означает неполный, неопределенный и т.д. Целью Серых систем и приложений является преодоление разрыва между общественными и естественными науками. Так можно сказать, что теория Серых систем является междисциплинарной, охватывающей множество специализированных областей. Теория серых систем относится к классу неопределенных систем, наряду с нечеткими алгоритмами (fuzzy logic) Л.Заде (1965), интервально-заданными системами, грубой теории множеств (Rough set theory) Pawlak (1982). Теория серых систем, представляет собой новую методологию, которая фокусируется на изучении проблем, связанных с малыми объемами выборки данных и недостаточной (poor) информацией. Теория разработана для работы с неопределенными системами с частично известной информацией путем генерации и извлечения полезной информации из того, что доступно. Таким образом, операционное поведение систем и их законы эволюции могут быть правильно описаны и эффективно отслежены. В естественном мире обычно существуют неопределенные системы с малыми выборками и скудной информацией. Этот факт определяет широкий диапазон применимости теории серых систем.

Базовые операции в серых системах:

1 Аккумулятивная генерирующая операция (AGO – Accumulated Generating Operation) является наиболее важной характеристикой теории серых систем, целью которой является уменьшение хаотичности данных. Операция 1-AGO над исходными данными используется в качестве промежуточной информации для серых прогнозных моделей. Принимая первое значение исходной выборки в качестве первого значения новой выборки, принимая сумму первого и второго значений исходной выборки в качестве второго значения новой выборки, принимая сумму первых трех значений исходной выборки в качестве третьего значения новой выборки и т. д. получают новую

выборку, названную выборкой 1-AGO исходной выборки. Математическая отношение 1-AGO выборки можно представить следующим образом. Если исходная выборка является неотрицательной и имеет вид [82]:

$$X^{(0)} = \{X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \dots, X^{(0)}(r)\}, \quad (4.4)$$

то 1-AGO выборка от  $X^{(0)}$ :

$$X^{(1)} = \{X^{(1)}(1), X^{(1)}(2), \dots, X^{(1)}(r)\}, \quad (4.5)$$

где

$$X^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k X^{(0)}(i)$$

и 2-AGO выборка от  $X^{(0)}$ :

$$X^{(2)} = \{X^{(2)}(1), X^{(2)}(2), \dots, X^{(2)}(r)\},$$

где

$$X^{(2)}(k) = \sum_{i=1}^k X^{(1)}(i).$$

С помощью операции AGO можно получить следующие важные результаты: неотрицательную гладкую дискретную функцию можно перевести в ряд, расширенный по приближенному экспоненциальному закону, который называется серым показательным законом. и с помощью которого создается подходящая основа для построения дифференциальной модели [77, p.12].

2 Обратная аккумулярованная генерирующая операция (IAGO – Inverse Accumulated Generating Operation) является обратной операции AGO. Принимая первое значение выборки в качестве первого значения новой выборки, принимая разность между вторым и первым значением выборки в качестве второго значения новой выборки, принимая разность между третьим и вторым значением выборки в качестве третьего значения новой выборки и т.д. получают новую выборку, называемую 1-IAGO выборкой. Математическая отношение 1-IAGO выборки можно представить следующим образом. Если  $j$ -AGO выборка имеет вид:

$$X^{(j)} = \{X^{(j)}(1), X^{(j)}(2), \dots, X^{(j)}(r)\}, \quad (4.6)$$

тогда 1-IAGO выборка от  $X^{(j)}$  будет определяться:

$$X^{(j-1)} = \{X^{(j-1)}(1), X^{(j-1)}(2), \dots, X^{(j-1)}(r)\}, \quad (4.7)$$

где



$$X^{(j-1)}(1) = X^{(j)}(1),$$

$$X^{(j-1)}(k) = X^{(j)}(k) - X^{(j)}(k-1).$$

#### 4.3.1 Серая модель GM(1,1)

Серая модель типа GM(1,1) является наиболее широко используемой моделью в литературе и называется серой моделью первого порядка с одной переменной. Модель представляет собой временную прогнозную модель с изменяющимися во времени коэффициентами. Другими словами, модель обновляется, когда новые данные становятся доступными для модели прогнозирования. Серая модель GM(1,1) может быть использована только с неотрицательными исходными выборками.

Для построения серой модели GM(1,1) на основе исходной выборки (4.4) и 1-AGO выборки (4.5) сгенерированная средняя последовательность имеет вид [83]:

$$Z^{(1)} = \{Z^{(1)}(1), Z^{(1)}(2), \dots, Z^{(1)}(r)\}, \quad (4.8)$$

где  $Z^{(1)}(k)$  - среднее значение смежных данных

$$Z^{(1)}(k) = 0.5X^{(1)}(k) + 0.5X^{(1)}(k-1).$$

Последовательность расчета наименьших квадратов серого дифференциального уравнения GM(1,1) определяется следующим образом:

$$X^{(0)}(k) + aZ^{(1)}(k) = b.$$

Тогда, отбеливающее уравнение имеет вид:

$$\frac{dX^{(1)}(t)}{dt} + aX^{(1)}(t) = b, \quad (4.9)$$

где  $[a, b]^T$  – последовательность параметров, которая может быть найдена следующим образом:

$$[a, b]^T = (B^T B)^{-1} B^T Y, \quad (4.10)$$

где

$$Y = [X^{(0)}(2), X^{(0)}(3), \dots, X^{(0)}(r)]^T,$$

$$B = \begin{bmatrix} -Z^{(1)}(2) & 1 \\ -Z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -Z^{(1)}(r) & 1 \end{bmatrix}.$$

Решение уравнения (4.8)  $X^{(1)}(t)$  в момент времени  $k$

$$X_p^{(1)}(k+1) = \left[ X^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right] e^{-ak} + \frac{b}{a}.$$

Для получения прогнозных значений в момент  $(k+1)$ , используется IAGO:

$$X_p^{(0)}(k+1) = \left[ X^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right] e^{-ak} (1 - e^a).$$

Большинство систем являются обобщенными энергетическими системами. Они будут следовать серому экспоненциальному закону, если они не будут нарушены какими-либо другими факторами, и затем они могут быть точно предсказаны серой прогнозной моделью GM(1,1). Фактические системы будут более или менее подвержены влиянию других факторов и никогда не будут полностью следовать серому экспоненциальному закону, поэтому важно рассматривать модели серых систем, которые берут во внимание другие влияющие факторы на прогноз.

Влияние нескольких факторов на прогнозируемое значение для серых моделей можно рассматривать только на основе модификаций модели GM(1,n), что четко продемонстрировано в работе [82]. Непрерывная интегральная серая модель свертки GMC(1,n) [84] является одной из основных моделей с (n-1) влияющими факторами. На основе этой модели были разработаны другие непрерывные линейные серые модели с (n-1) влияющими факторами. Например, интервальная модель с интегралом свертки IGDMC(1,n) [85] предназначена для прогнозирования интервала, в котором находится переменная. Модель FGMC(1,n) [86] разработана на основе идеи независимости прогноза от первой пары исходных данных выборки. Детерминированная серая модель с интегралом свертки DGDMC(1, n) [87] отличается от GMC(1,n) оценкой первой производной и параметров: первая производная оценивается численно кубической кривой сплайна и параметрами модели, в соответствии со схемой детерминированной сходимости. Ошибка в прогнозе прочности, рассматриваемая Тиеном, составляет 0,54% для FGMC(1, n), 1,25% для GMC (1, n), 1,85% для DGDMC(1, n) и 2,4% для IGDMC(1, n). Позже в [88] была показана оптимизированная модель GDMC(1, n) - OGDMC(1, n), в которой значение серой производной  $dX^{(1)}_i(t)/dt$  определяется не средневзвешенным значением  $X^{(1)}_i(t)$  и  $dX^{(1)}_i(t-1)$ , но через весовой коэффициент  $\rho_i$ , определенный с помощью алгоритма роя частиц [91]:

$$\rho_i X_i^{(1)}(t) - (1 - \rho_i) X_i^{(1)}(t). \quad (4.11)$$

Здесь значение среднеквадратичной ошибки в процентах к периоду априорной выборки (RMSPEPR) в OGDMC(1,n) уменьшилось в 3,8 раза - с 7,07% до 1,86%. Чтобы выбрать наиболее точную модель для прогнозирования точки спекания в вакуум камере, мы будем проводить эксперименты с использованием моделей FGMC(1,n), GMC(1,n) и GDMC(1,n), которые имеют наименьшее значение ошибки прогнозирования.

### 4.3.2 Непрерывная интегральная серая модель свертки GMC(1,2)

В качестве влияющего фактора была выбрана скорость газа, рассчитанная по известному давлению  $\Delta p$ , измеренному в режиме реального времени. Непрерывная интегральная серая модель GMC(1,2) с одним влияющим фактором является линейной дифференциальной моделью:

$$\frac{dY^{(1)}(t)}{dt} + b_1 Y^{(1)}(t) = b_2 X^{(1)}(t) + u, \quad (4.12)$$

где  $Y^{(1)}(t)$  и  $X^{(1)}(t)$  представляют собой 1-AGO данные:

$$Y^{(1)}(t) = \sum_{l=1}^t Y^{(0)}(l), X^{(1)}(t) = \sum_{l=1}^t X^{(0)}(l). \quad (4.13)$$

Серая производная для данных AGO первого порядка в (4.12) традиционно представляется как:

$$\frac{dY^{(1)}(t)}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{Y^{(1)}(t+\Delta t) - Y^{(1)}(t)}{\Delta t} = Y^{(1)}(t + \Delta t) - Y^{(1)}(t), \quad (4.14)$$

при  $\Delta t \rightarrow 1$ .

Параметры (4.12) определяются с помощью метода наименьших квадратов (4.9):

$$[b_1, b_2, u]^T = (B^T B)^{-1} B^T Y_R, \quad (4.15)$$

где  $t$  изменяется от 1 до  $r$ , представляющий собой объем начальной выборки для построения модели в (4.12),

$$B = \begin{bmatrix} -0.5(Y^{(1)}(1) + Y^{(1)}(2)) & 0.5(X^{(1)}(1) + X^{(1)}(2)) & 1 \\ -0.5(Y^{(1)}(2) + Y^{(1)}(3)) & 0.5(X^{(1)}(2) + X^{(1)}(3)) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -0.5(Y^{(1)}(r-1) + Y^{(1)}(r)) & 0.5(X^{(1)}(r-1) + X^{(1)}(r)) & 1 \end{bmatrix}, \quad (4.16)$$

$$Y_R = [Y^{(1)}(2), Y^{(1)}(3), \dots, Y^{(1)}(r)]. \quad (4.17)$$

Прогноз температуры агломерата  $\hat{Y}^0$  определяется следующим уравнением:

$$\hat{Y}^{(0)}(t) = \hat{Y}^{(1)}(t) - \hat{Y}^{(1)}(t-1), \quad (4.18)$$

$$\hat{Y}^{(1)}(t) = Y^{(0)}(1)e^{-b_1(t-1)} + \frac{1}{2}e^{-b_1(t-1)} \times (b_2 X^{(1)}(t) + u) + \frac{1}{2}(b_2 X^{(1)}(t) + u) + \sum_{i=2}^{t-1} e^{-b_1(t-i)} \times (b_2 X^{(1)}(i) + u). \quad (4.19)$$

Реализация модели GMC(1,n) на Matlab представлена в Приложении В.

4.3.3 Непрерывная интегральная серая модель свертки первой пары данных FGMC(1,n)

Дифференциальное уравнение серой модели прогнозирования FGMC(1,n), представленное в [86, p.1889], такое же, как для GMC(1,n), но моделируется данными, включающими информацию из первой пары исходных данных. Параметры (4.12) определяются методом наименьших квадратов (4.15), где

$$B = \begin{bmatrix} -0.5(Y^{(1)}(0) + Y^{(1)}(1)) & 0.5(X^{(1)}(0) + X^{(1)}(1)) & 1 \\ -0.5(Y^{(1)}(1) + Y^{(1)}(2)) & 0.5(X^{(1)}(1) + X^{(1)}(2)) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -0.5(Y^{(1)}(r-1) + Y^{(1)}(r)) & 0.5(X^{(1)}(r-1) + X^{(1)}(r)) & 1 \end{bmatrix}, \quad (4.20)$$

$$Y_R = [Y^{(1)}(1), Y^{(1)}(2), \dots, Y^{(1)}(r)]. \quad (4.21)$$

Прогноз температуры агломерата определяется согласно следующему уравнению:

$$\hat{Y}^{(0)}(t) = Y^{(0)}(0)e^{-b_1 t} + u(t-1) \sum_{i=1}^t \frac{1}{2} e^{-b_1(t-i+0.5)} \left( b_2 (X^{(1)}(i) - X^{(1)}(i-1)) \right). \quad (4.22)$$

Реализация модели FGMC(1,n) на Matlab представлена в Приложении В.

4.3.4 Оптимальная непрерывная динамическая интегральная серая модель свертки OGDMC(1,n)

Дифференциальное уравнение серой динамической модели с интегралом свертки:

$$\frac{dY^{(1)}(t)}{dt} + b_1 Y^{(1)}(t) = b_2 + \sum_{i=2}^n \left( b_{2i-1} \frac{dX^{(1)}(t)}{dt} + b_{2i} X^{(1)}(t) \right). \quad (4.23)$$

Параметры (4.23) для непрерывной динамической интегральной модели определяются с использованием метода наименьших квадратов (4.14), вектор  $Y_R$  рассчитывается по (4.21) и

$$B = \begin{bmatrix} -0.5(Y^{(1)}(1) + Y^{(1)}(2)) & 1 & X^{(0)}(1) & 0.5(X^{(1)}(1) + X^{(1)}(2)) & 1 \\ -0.5(Y^{(1)}(2) + Y^{(1)}(3)) & 1 & X^{(0)}(2) & 0.5(X^{(1)}(2) + X^{(1)}(3)) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -0.5(Y^{(1)}(r-1) + Y^{(1)}(r)) & 1 & X^{(0)}(r) & 0.5(X^{(1)}(r-1) + X^{(1)}(r)) & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.24)$$

Для получения параметров оптимальной модели значение серой производной  $dX^{(1)}(t)/dt$  и  $dY^{(1)}(t)/dt$  определяется не средневзвешенным значением  $X^{(1)}(t)$  и  $dX^{(1)}(t-1)$ ,  $Y^{(1)}(t)$  и  $dY^{(1)}(t-1)$  соответственно, а через весовой коэффициент  $\rho_i$ , определенный с помощью алгоритма роя частиц согласно уравнению (4.11).

Прогноз температуры агломерата определяется по (4.18), где:

$$\hat{Y}^{(1)}(t) = Y^{(0)}(1)e^{-b_1(t-1)} + u(t-2) \sum_{\tau=2}^t \frac{1}{2} e^{-b_1(t-i+0.5+0.5\lambda_1)} \times \left[ \frac{1}{2} (f(\tau) - f(\tau-1)) + \frac{1}{2} \lambda_1 (f(\tau) - f(\tau-1)) \right] + \frac{1}{2} e^{-b_1(t-i+0.5+0.5\lambda_2)} \times \left[ \frac{1}{2} (f(\tau) - f(\tau-1)) + \frac{1}{2} \lambda_2 (f(\tau) - f(\tau-1)) \right], \quad (4.25)$$

где  $\lambda_1 = -\frac{1}{\sqrt{3}}$ ,  $\lambda_2 = \frac{1}{\sqrt{3}}$  и

$$f(t) = b_2 + \sum_{i=2}^n (b_{2i-1} X^{(0)}(t) + b_{2i} X^{(1)}(t)). \quad (4.26)$$

Реализация модели OGDMC(1,n) на Matlab представлена в Приложении В.

#### 4.4 Определение объема исходной выборки для построения модели

Размер исходной выборки для построения прогнозной модели является важным параметром, оптимальный выбор которого приводит к уменьшению погрешности прогноза температуры. Также он позволяет определять вакуумные камеры, где в будущем должны устанавливаться термопары и возможность уменьшать их количество для экономии. Для каждой выборки проводилась серия экспериментов: построение модели (4.12) проводилось в точках, полученных от 0 до 5-10 мин каждые 0,5 мин. На рисунке 4.3 показаны прогнозные ошибки в зависимости от разных размеров выборки (от 5 до 10 минут), которые используются для получения модели в соответствии с уравнением (4.18).

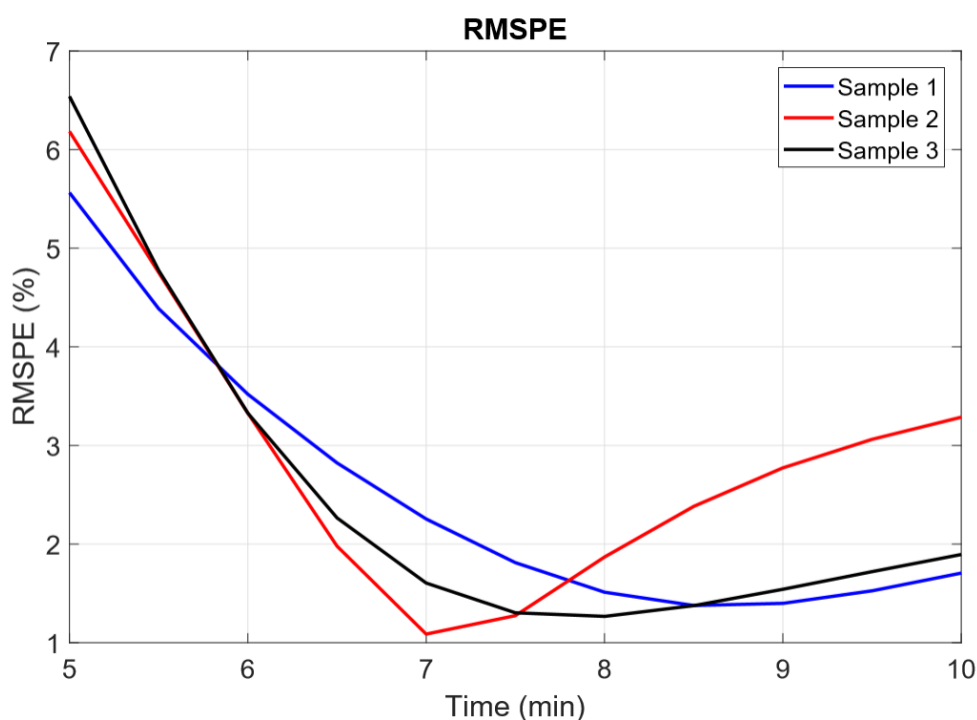


Рисунок 4.3 – Прогнозная ошибка при различных объемах выборки

Прогнозная ошибка серой модели минимальна для рассмотренных выборок, объем данных которых включает в себя значения, полученные до 7,5 мин (15 значений).

$$RMSPE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i \frac{(\hat{Y}_i - Y_i)^2}{Y_i^2}} \cdot 100\%. \quad (4.27)$$

#### 4.5 Результаты прогнозных моделей

Алгоритмы представленных серых моделей реализованы в среде моделирования Matlab с использованием m-файлов. MATLAB (Matrix Laboratory) представляет собой пакет прикладных программ и сочетает в себе настольную среду, настроенную на итеративный анализ и процессы проектирования, с языком программирования, который непосредственно выражает математику матриц и массивов.

Среднеквадратичная ошибка в процентах (RMSPE) прогнозирующих моделей для 3 выборок представлена в таблице 4.4, где объем начальной выборки  $r$  для построения модели включает данные от начала процесса спекания до 7,5 мин. (15 значений). Результаты прогнозных моделей для каждого образца показаны на рисунках 4.4-4.6.

Таблица 4.4 - RMSPE серых моделей

№	RMSPE, %		
	GMC(1,n)	FGMC(1,n)	GDMC(1,n)
1	2.2413	4.1062	2.6575
2	1.6697	3.4544	3.6921
3	1.0952	3.8123	4.1833

Наилучший результат прогнозирования точки спекания шихты был получен в результате использования модели GMC(1,n), наибольшая ошибка которой равна 2.2% против 4% для других типов моделей.

Прогнозные модели GMC(1,n) для 3 выборок представлены в таблице Таблица 4.5, где объем исходной выборки для построения модели включает данные с начала процесса спекания до 7,5 мин (15 значений). Параметры серой модели, которые были найдены с помощью уравнения (4.15), существенно различаются для каждой выборки. Это связано с тем, что каждая температурная кривая была получена в разных начальных условиях: содержание кокса, фосфоритной руды, количество возврата, влажность и другие параметры шихты, которые непосредственно не принимаются для построения прогнознй модели. Более того, при производстве в реальных условиях невозможно непрерывно контролировать состав шихты, что затрудняет использование модели, учитывающей все факторы. Поэтому необходимо построить прогнозную модель, в которой используются только параметры, измеренные в режиме реального времени и динамически строить прогнозную модель для определенной партии спекаемой руды.

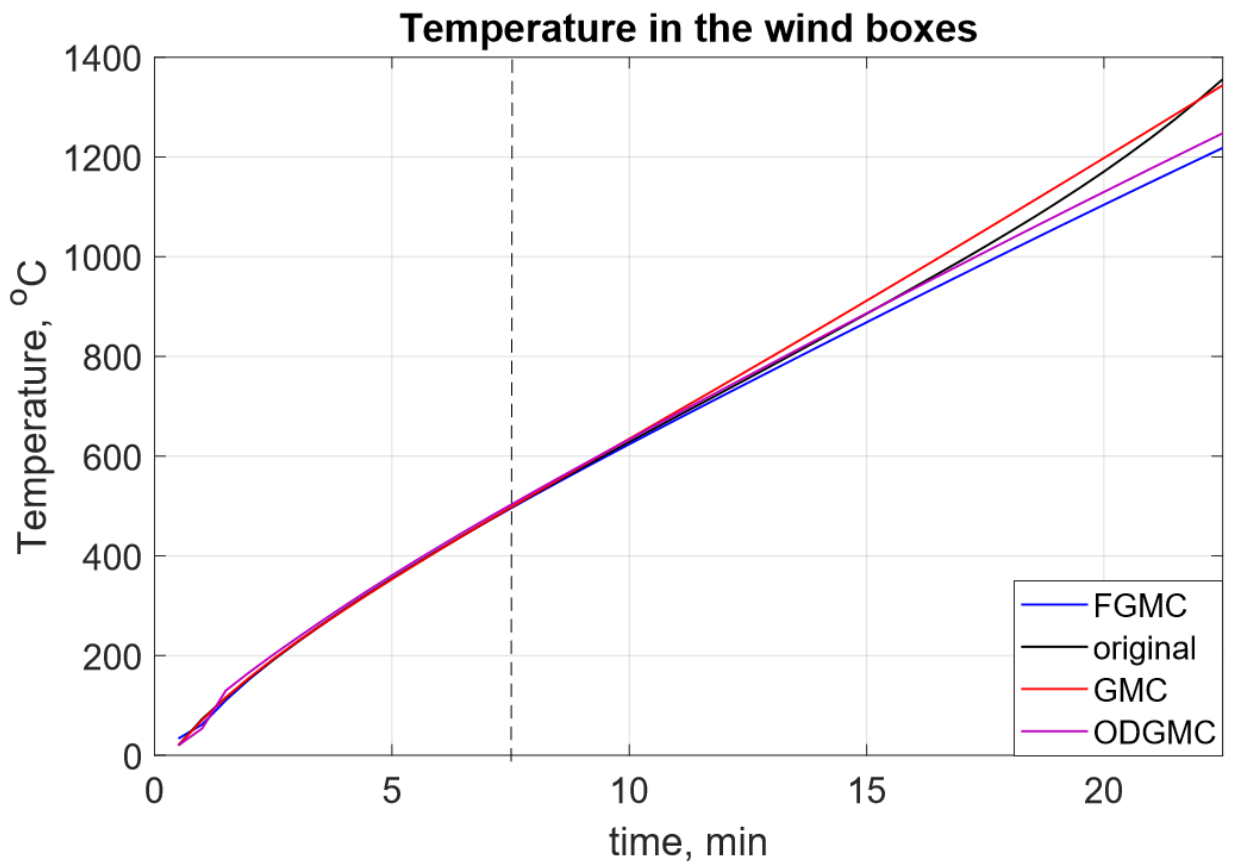


Рисунок 4.4 – Результаты моделирования 1 выборки

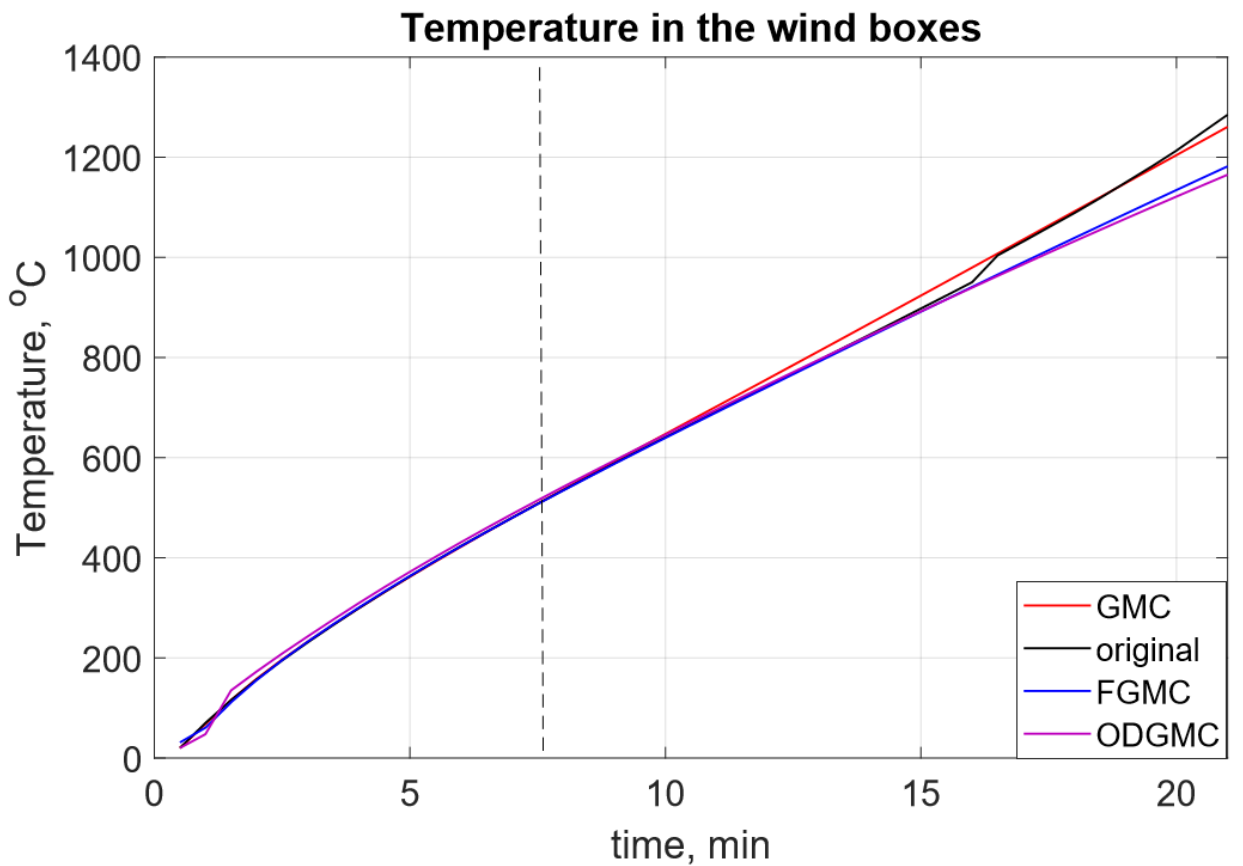


Рисунок 4.5 – Результаты моделирования 2 выборки

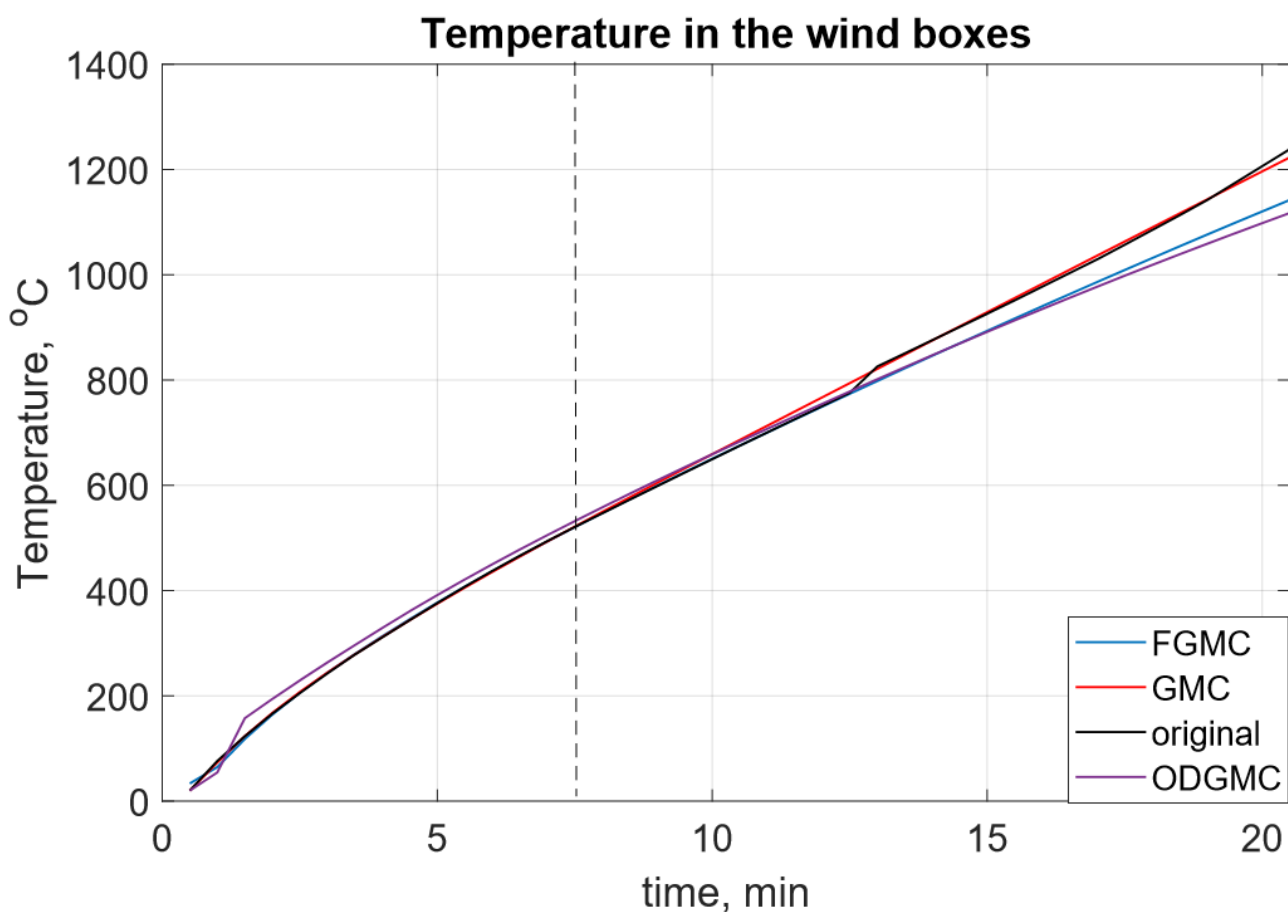


Рисунок 4.6 – Результаты моделирования 3 выборки

Таблица 4.5 – Построенные модели GMC

№ выборки	GMC(1,n)	RMSPE, %
1	$\frac{dY^{(1)}(t)}{dt} - 0.00176248Y^{(1)}(t) = 55.0012859X^{(1)}(t) + 41.90354212$	2.2413
2	$\frac{dY^{(1)}(t)}{dt} - 0.0030327Y^{(1)}(t) = 62.1579506X^{(1)}(t) + 41.27688268$	1.6697
3	$\frac{dY^{(1)}(t)}{dt} - 0.00575793Y^{(1)}(t) = 47.8204758X^{(1)}(t) + 36.486036$	1.0952

Результаты прогноза на основе серых систем не улучшают точность по сравнению с другими моделями, представленными в литературе ранее (**Ошибка! Неверная ссылка закладки.**), но позволяет построить адекватную прогнозную модель точки спекания в отсутствии большого количества исторических данных. Дополнительным преимуществом модели является сокращение времени на сбор исходных данных и обучении модели.



Таблица 4.6 – Прогнозная ошибка различных моделей

Модель	Исходный объем выборки	Прогнозная ошибка
Адаптивная прогнозная система	600	MSE = 0.15
Прогнозирование, основанное на нейронных сетях и регрессионного анализа	10 000	RMSPE = 1.2%
Интеллектуальная интегрированная прогнозная модель	3 000	Кол-во прогнозных точек с ошибкой / общий объем выборки = 7.5%
Нечеткие нейронные сети на основе Мамдани	80	2.17% (уравнение для прогнозной ошибки не представлено)
Прогнозная модель на основе адаптивной кластеризации шаблонов и карты объектов	707	MSE = 0.0057
Прогнозная модель на основе серой модели	15	RMSPE = 1.42%

#### 4.6 Оптимальная серая прогнозная модель точки спекания OGMC(1,n)

Чтобы повысить точность прогнозной модели GMC(1,n) вместо взвешенного среднего для определения серой производной, введем коэффициент  $\rho \in [0; 1]$ , тогда (4.16) принимает следующий вид:

$$B = \begin{bmatrix} -(1 - \rho)Y^{(1)}(1) + \rho Y^{(1)}(2) & (1 - \rho)X^{(1)}(1) + \rho X^{(1)}(2) & 1 \\ -(1 - \rho)Y^{(1)}(2) + \rho Y^{(1)}(3) & (1 - \rho)X^{(1)}(2) + \rho X^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -(1 - \rho)Y^{(1)}(r - 1) + \rho Y^{(1)}(r) & (1 - \rho)X^{(1)}(r - 1) + \rho X^{(1)}(r) & 1 \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

Коэффициент  $\rho$  определяется методом оптимизации роя частиц [91, p.1945]. В 1995 году Д. Кеннеди (J. Kennedy) и Р. Эберхарт (R. Eberhart) разработали алгоритм оптимизации непрерывных нелинейных функций или алгоритм роя частиц [91, p.1945]. Основой разработанного алгоритма является имитационная модель Рейнольдса, а также работа Хеппнера (Heppner) и Гренадера (Grenader) [89, p.234]. Текущее состояние частицы описывается координатами в пространстве решений (то есть, собственно, связанным с ними решением) и вектором скорости перемещения. При запуске алгоритма данные параметры выбираются случайным образом. Помимо этого, каждая частица сохраняет координаты лучшего из найденных ей решений, а также лучшее из пройденных всеми частицами решений.

На каждой итерации алгоритма роя частиц направление и длина вектора скорости каждой из частиц рассчитываются исходя из сведений о найденных

оптимумах. Алгоритм роя частиц представляет собой систему частиц, которые перемещаются к оптимальным решениям, каждая частица содержит координаты найденного наилучшего решения ( $pbest$ ) и наилучшего решения из всех частиц в рое ( $gbest$ ). Направление и длина вектора скорости частицы определяется по следующей формуле:

$$v_i = v_i + a_1 rnd() (pbest_i - x_i) + a_2 rnd() (gbest_i - x_i), \quad (4.29)$$

где  $v_i$  - вектор скорости частицы,  $a_1, a_2$  - постоянные ускорения, а  $x$  - текущее положение частицы. В этом случае текущее положение частицы определяет значение коэффициента  $\rho$ . В качестве критерия оптимальности используется минимум (4.27). Полученные прогнозные модели и  $RMSPE$  для периода после обучающей выборки представлены в таблице 4.7, где видно, что точность серой модели улучшена. Реализация модели OGMC(1,n) с коэффициентом  $\rho$  на Matlab представлена в Приложении В.

В [88, p.2] коэффициенты интерполяции  $\rho_i$  вводятся в значения каждой из переменных в GDMC(1,n). Применение этого алгоритма к модели GMC(1,n) будет иметь следующие изменения в (4.15):

$$B = \begin{bmatrix} -(1 - \rho_1)Y^{(1)}(1) + \rho_1 Y^{(1)}(2) & (1 - \rho_2)X^{(1)}(1) + \rho_2 X^{(1)}(2) & 1 \\ -(1 - \rho_1)Y^{(1)}(2) + \rho_1 Y^{(1)}(3) & (1 - \rho_2)X^{(1)}(2) + \rho_2 X^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -(1 - \rho_1)Y^{(1)}(r - 1) + \rho_1 Y^{(1)}(r) & (1 - \rho_2)X^{(1)}(r - 1) + \rho_2 X^{(1)}(r) & 1 \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

Реализация модели OGMC(1,n) с коэффициентами  $\rho_i$  на Matlab представлена в Приложении В. Прогнозные результаты изменились незначительно (Таблица 4.7), но время нахождения оптимальных значений коэффициентов  $\rho_i$  увеличилось. Увеличение (n-1) зависимых переменных приводит к получению времени оптимизации, которое увеличивается в геометрической прогрессии, и затрудняет использование алгоритма с разными коэффициентами для каждой переменной в управлении в реальном времени. Поэтому для повышения точности моделирования и прогнозирования коэффициент  $\rho$  используется для задачи управления. Результаты прогнозирования для OGMC(1,n) представлены на рисунках 4.7-4.9 в сравнении с GMC(1,n) и оригинальной выборкой.

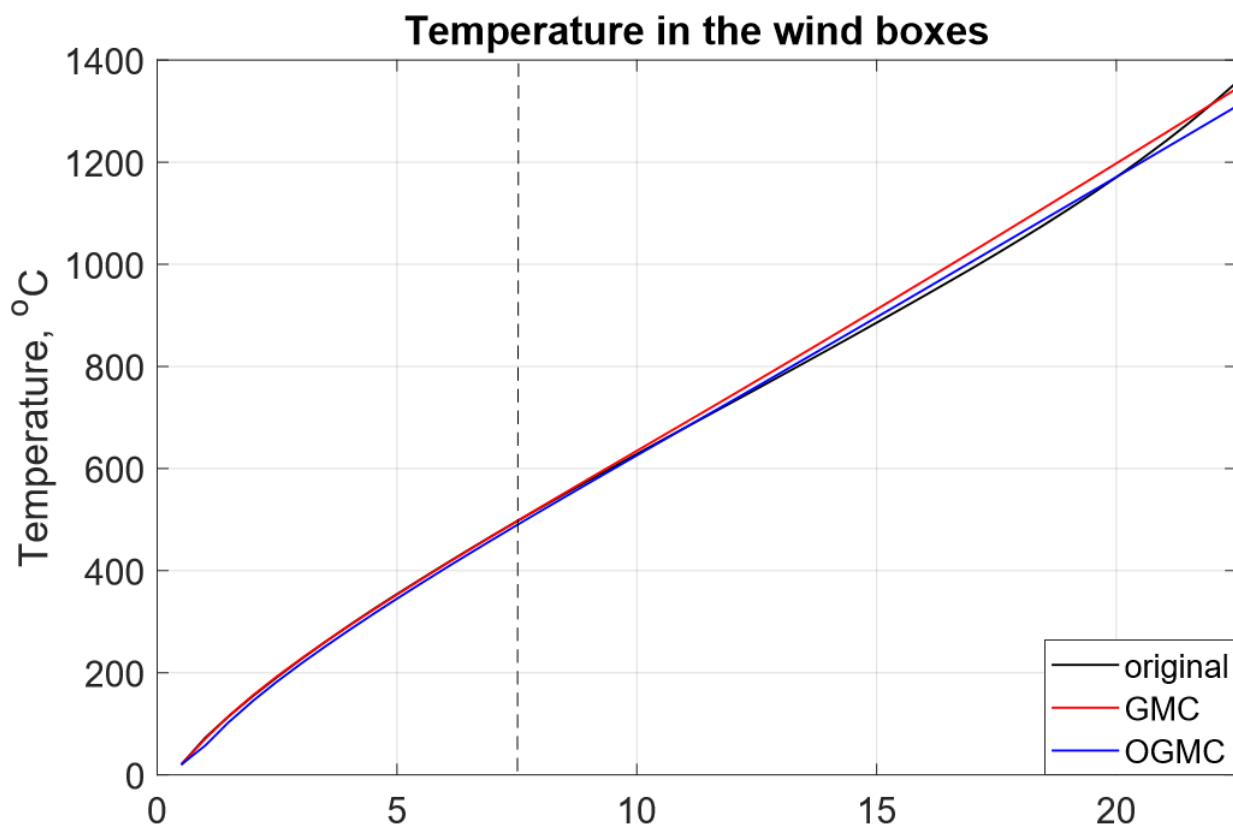


Рисунок 4.7 – Результаты моделирования 1 выборки OGMC

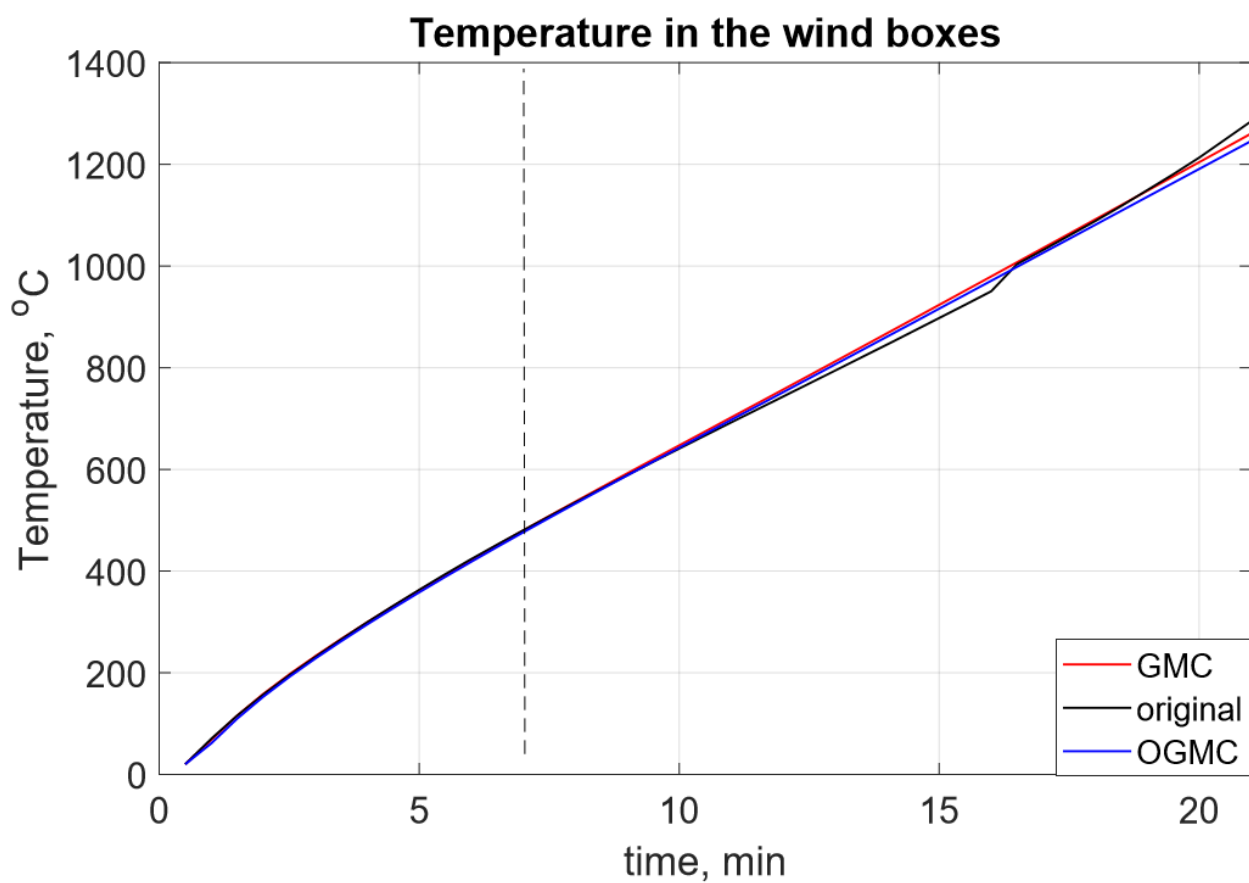


Рисунок 4.8 – Результаты моделирования 2 выборки OGMC

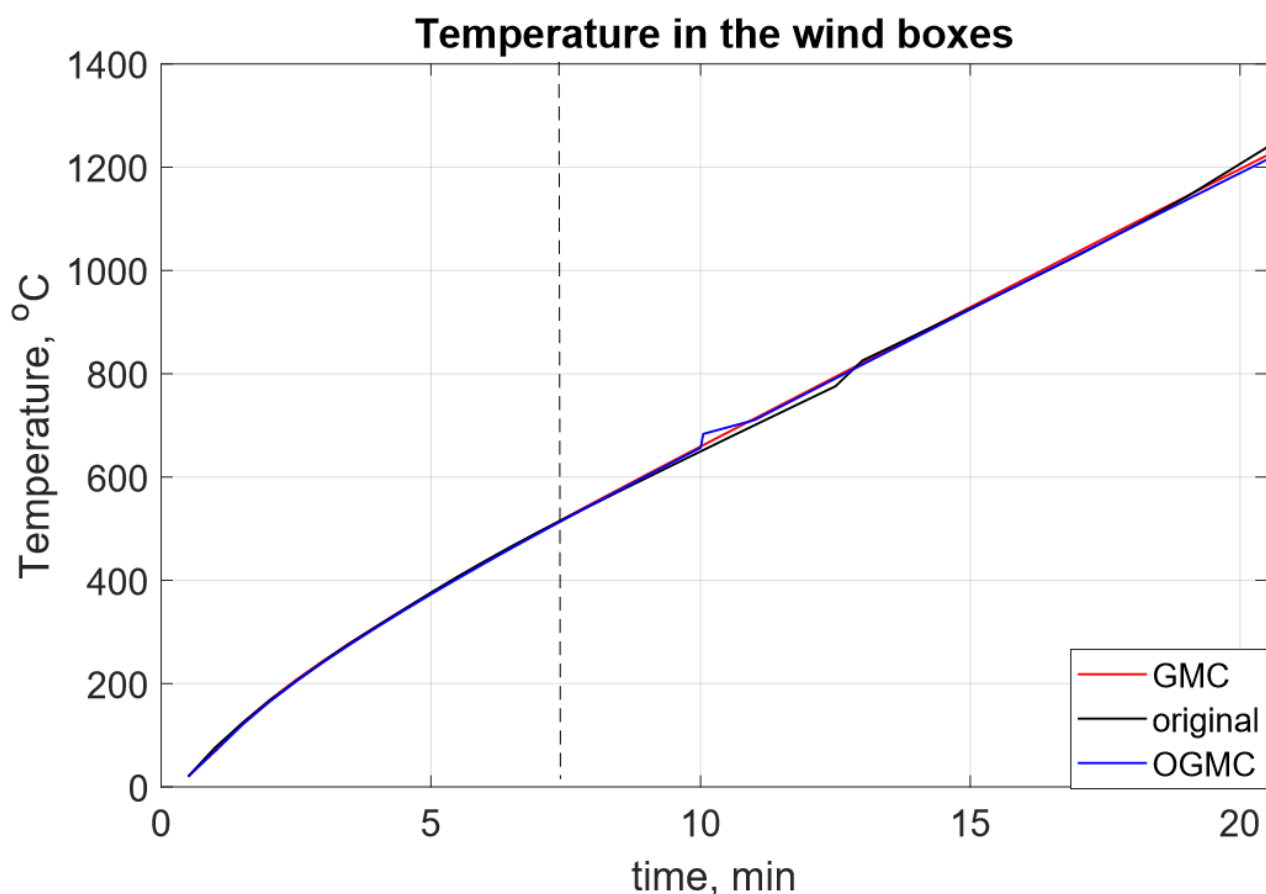


Рисунок 4.9 – Результаты моделирования 3 выборки OGMC

Таблица 4.7 – Результаты оптимальной GMC(1,n) модели

No	Коэффициенты	GMC(1,n) $\rho$	RMSPE $\rho$ , %	GMC(1,n) $\rho_i$	RMSPE $\rho_i$ , %
1	$\rho$	0.2261	1.2120	0&0.2283	1.2110
	$b_1$	-0.0005		-0.0005	
	$b_2$	56.3769		56.3554	
	$u$	28.3447		28.4573	
2	$\rho$	0.3669	1.4266	1&0.3683	1.4249
	$b_1$	0.0003		0.0003	
	$b_2$	58.9057		58.8892	
	$u$	30.6943		30.7584	
3	$\rho$	0.4193	0.9756	1&0.4384	0.9588
	$b_1$	0.0025		0.0023	
	$b_2$	62.1686		61.9513	
	$u$	37.5064		38.5224	

Коэффициенты серой модели (Таблица 4.7), которые были найдены по (4.15), существенно различаются для каждой выборки. Это связано с тем, что каждая температурная кривая была получена при различных начальных условиях: содержании кокса, фосфоритовой руды, величине возврата, влажности и других параметрах шихты, которые непосредственно не взяты для построения

прогнозной модели. Более того, при производстве в реальных условиях невозможно непрерывно контролировать состав шихты, что затрудняет использование модели, учитывающей все факторы. Поэтому необходимо построить такую прогнозную модель, которая использует только измеренные факторы реального времени и динамически создает прогнозную модель для определенной партии агломерационной руды.

#### **Выводы по четвертому разделу**

Для синтеза прогнозной модели изначально были выбраны переменные, влияющие на точку спекания – скорость газа, определяемая через уравнение Эргуна и непосредственно температура спекания в вакуум-камерах. Для определения степени влияния скорости газа на температуру, рассчитаны степени корреляции: Спирмана, серого реляционного анализа и двунаправленная модель серого реляционного анализа, в результате которых была определена сильная взаимосвязь выбранных параметров. Построение математической модели прогноза точки спекания на основе теории серых систем дает следующие преимущества:

- динамическое построение модели в режиме реального времени;
- синтез модели на основе малой выборки данных;
- малое количество измеряемых параметров, что удешевляет систему.

В результате построения систем на основе различных серых моделей: GMC(1,n), FGMC(1,n), OGDMC(1,n) была выявлена наиболее точная модель. На основе данной модели, вместо взвешенного среднего для определения серой производной, был введен коэффициент дифференциации, который позволяет менять вес влияемых параметров на прогноз. Данный коэффициент определяется путем использования алгоритма «роя частиц» в процессе построения модели. Также для повышения точности модели был определен объем исходной выборки для обучения модели.

Результаты работы, приведенные в данном разделе, были опубликованы в работах [78-80, 90].

## 5 МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ АГЛОМЕРАЦИИ ФОСФОРИТНЫХ РУД

*В предыдущем разделе была построена математическая модель прогноза точки спекания агломерата на основе теории серых систем, позволяющая на основе малой выборки данных получать результаты высокой точности. Данный раздел посвящен описанию системы управления на основе динамической модели прогноза, что позволит изменять переменные процесса в режиме реального времени с целью достижения точки спекания агломерата.*

Динамическое построение серой модели предполагает использование только фактических данных, полученных в реальном режиме времени о процессе спекания, при этом модель не зависит от исторических данных и позволяет получить прогноз значения температуры шихты в конце аглоленты. В случае, если прогнозная температура шихты в крайней точке не достигает заданного значения, процессом агломерации необходимо управлять. Управление может быть выполнено путем изменения количества топлива в исходной шихте, скорости аглоленты и разряжения, создаваемого в вакуум-камерах. Изменение количества топлива влияет только на часть шихты, которая еще не была подана в агломерат, поэтому данный эффект не учитывается в работе.

Идея построения прогнозной модели точки спекания в реальном режиме времени была также рассмотрена в работе [73, р.1068], в которой параметры модели определяются с помощью метода идентификации с обратной связью. Высокая точность прогнозной модели была достигнута за счет измерения в реальном режиме времени дополнительных параметров: количество воды, объем воздуха и изменения высоты шихты, что делает предложенную модель более дорогой.

*Постановка задачи* синтеза системы управления процессом агломерации необходимо на основе разработанной прогнозной модели точки спекания (4.12) синтезировать систему управления процессом агломерации, доставляющую минимум критерию среднеквадратичной ошибки между прогнозным ( $\hat{Y}_i^{(0)}$ ) и желаемым ( $Y_i$ ) значением точки спекания, при ограничениях по переменным скорости аглоленты ( $v = \frac{L}{t}$ , где  $L$  – длина аглоленты) и разряжения в вакуум-камерах ( $\Delta p$ ):

$$RMSPE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i \frac{(\hat{Y}_i^{(0)} - Y_i)^2}{Y_i^2}} \rightarrow \min \quad (5.1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dY^{(1)}(t)}{dt} + b_1 Y^{(1)}(t) = b_2 X^{(1)}(t) + u \\ X^{(0)} \in [f(\Delta p_{min}), f(\Delta p_{max})] \\ t \in [t_{min}, t_{max}] \end{array} \right. ,$$

Коэффициенты дифференциального уравнения определяются следующим образом:

$$[b_1, b_2, u]^T = (B^T B)^{-1} B^T Y_R,$$

где матрица  $B$  и вектор  $Y_R$ , определяется согласно алгоритму нахождения оптимальной серой прогнозной модели точки спекания OGMC(1,n):

$$B = \begin{bmatrix} -(1 - \rho)Y^{(1)}(1) + \rho Y^{(1)}(2) & (1 - \rho)X^{(1)}(1) + \rho X^{(1)}(2) & 1 \\ -(1 - \rho)Y^{(1)}(2) + \rho Y^{(1)}(3) & (1 - \rho)X^{(1)}(2) + \rho X^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -(1 - \rho)Y^{(1)}(r - 1) + \rho Y^{(1)}(r) & (1 - \rho)X^{(1)}(r - 1) + \rho X^{(1)}(r) & 1 \end{bmatrix},$$

$$Y_R = [Y^{(1)}(2), Y^{(1)}(3), \dots, Y^{(1)}(r)].$$

Прогнозное значение  $\hat{Y}_i^{(0)}$  точки спекания для расчета критерия оптимизации (5.1) определяется согласно формуле (4.18). Значения  $X^{(0)}$  определяется согласно базовой операции 1-IAGO (4.7). Разряжение в вакуум-камерах  $\Delta p$  определяется через уравнение Эргуна для пористых сред (1.1).

Предлагаемая структура управления для точки спекания (рисунок 5.1) включает в себя:

- 1 Сбор данных о температуре и разряжении в вакуум-камерах с начала процесса до определенной точки.
- 2 Построение оптимальной серой прогнозной модели OGMC(1,n) на основе накопленных данных.
- 3 Прогнозирование температуры до конца аглоленты.
- 4 Оптимизация параметров управления технологическим процессом (скорость и разряжение в вакуум-камерах) для достижения желаемой температуры в конце процесса.
- 5 Изменение параметров управления для рассматриваемой партии для получения хорошего качества агломерата и минимального возврата.

Структура управления имеет следующий алгоритм: после попадания шихты под горн, система начинает сбор данных по температуре, разряжению в вакуум-камерах и скорости аглоленты. На основе собранных данных, строится оптимальная серая прогнозная модель OGMC(1,n), которая прогнозирует значение температуры в конце аглоленты. Если температура не соответствует точке спекания агломерата, то алгоритм прогнозной оптимизации рассчитывает необходимые значения скорости аглоленты и разряжения в вакуум-камерах в заданных пределах. Пределы значений скорости аглоленты и разряжения в вакуум-камерах позволяют при поиске оптимальных значений рассчитывать изменение только одного из параметров. Данные расчеты подаются на соответствующие контроллеры управления. После того как шихта достигает конца аглоленты, цикл повторяется.

Метод роя частиц используется [91, p.1946] в качестве метода прогнозной оптимизации. Его отличительная особенность от многих других методов заключается в том, что для метода роя частиц рассчитывается только значение

оптимизируемой функции, но не ее градиент. С точки зрения эффективности он может конкурировать с другими методами глобальной оптимизации, а его низкая алгоритмическая сложность способствует простоте его реализации.

Алгоритм роя частиц реализован следующим образом:

1 Генерируются  $m$ -частиц ( $m=2$ ) в  $n$ -мерном пространстве. Позиция и скорость частицы представлены как  $x_i = (x_{i1}; x_{i2}; \dots; x_{in})$  и  $\vartheta_i = (\vartheta_{i1}; \vartheta_{i2}; \dots; \vartheta_{in})$ , где  $i = 1; \dots; m$ . Текущая позиция частицы  $x$  (4.27) включает в себя две переменные: объем выборки, из которого рассчитывается продолжительность процесса агломерации и скорость газа.

2 Начальная позиция частицы  $x_i$  и скорость частицы  $\vartheta_i$  генерируется случайным образом и в заданных пределах:  $t_{min} \leq x_1 \leq t_{max}$ ,  $X_{min} \leq x_2 \leq X_{max}$ , где  $t$  – временной шаг,  $X$  – разряжение в вакуум-камерах.

3 Согласно (4.14)  $x_2$  подставляется в матрицу  $B$  и согласно (4.17)  $x_1$  подставляется в качестве параметра  $t$ .

4 Производится расчет фитнес функции (4.27) для каждой частицы

5 Производится сравнение значения фитнес функции каждой частицы с наилучшим решением из всех частиц в рое  $pbest$  для корректировки значения, если значение оптимальное, то оно берется в качестве лучшей позиции частицы, если нет, то происходит переход на следующий шаг.

6 Рассчитываются значения скорости и позиции частиц согласно уравнению (4.27).

7 При достижении критерия окончания алгоритма, определяется результат и его фитнес функция, которые соответствуют оптимальным параметрам и RMSPE, иначе происходит переход на шаг 3.

С помощью полученного значения времени оптимального процесса спекания определяется скорость аглоленты, а через оптимальное значение скорости газа - разряжение в вакуум-камерах, согласно уравнению Эргуна (2.6).

Результаты моделирования системы управления точкой спекания для первой выборки представлены на рисунке Рисунок 5.2. Структура системы управления выглядит следующим образом: с начала процесса система накапливает 15 значений (для рассматриваемого примера до 7,5 минут процесса спекания), на в основе которых строится серая модель. Серая модель прогнозирует температуру в конце аглоленты при заданных начальных значениях скорости и разряжения. Разница между прогнозируемым и заданным значением запускает процесс прогнозирования. Результаты оптимизации прогноза 1-й выборки: значения скорости изменяются от 3,5 м/мин до 4,5 м/мин и разряжение в вакуум-камерах от 800 мм рт. ст. до 760 мм рт.ст. Следовательно, точку спекания можно достичь за 17,5 мин вместо 22 мин, при изменении скорости газа от 0,48 м/с до 0,52 м/с. Как видно из второй выборки (рисунок 5.3), согласно прогнозной модели точка спекания не достигается в конце аглоленты, поэтому в результате прогнозной оптимизации определяется значение, подаваемое на вакуум-камеры, при которых возможно достижение точки спекания. В третьем случае (рисунок 5.4), в результате прогнозной оптимизации скорость аглоленты и разряжение в вакуум-камерах увеличено, чтобы позволить достичь оптимальных значений температуры за 19 мин.



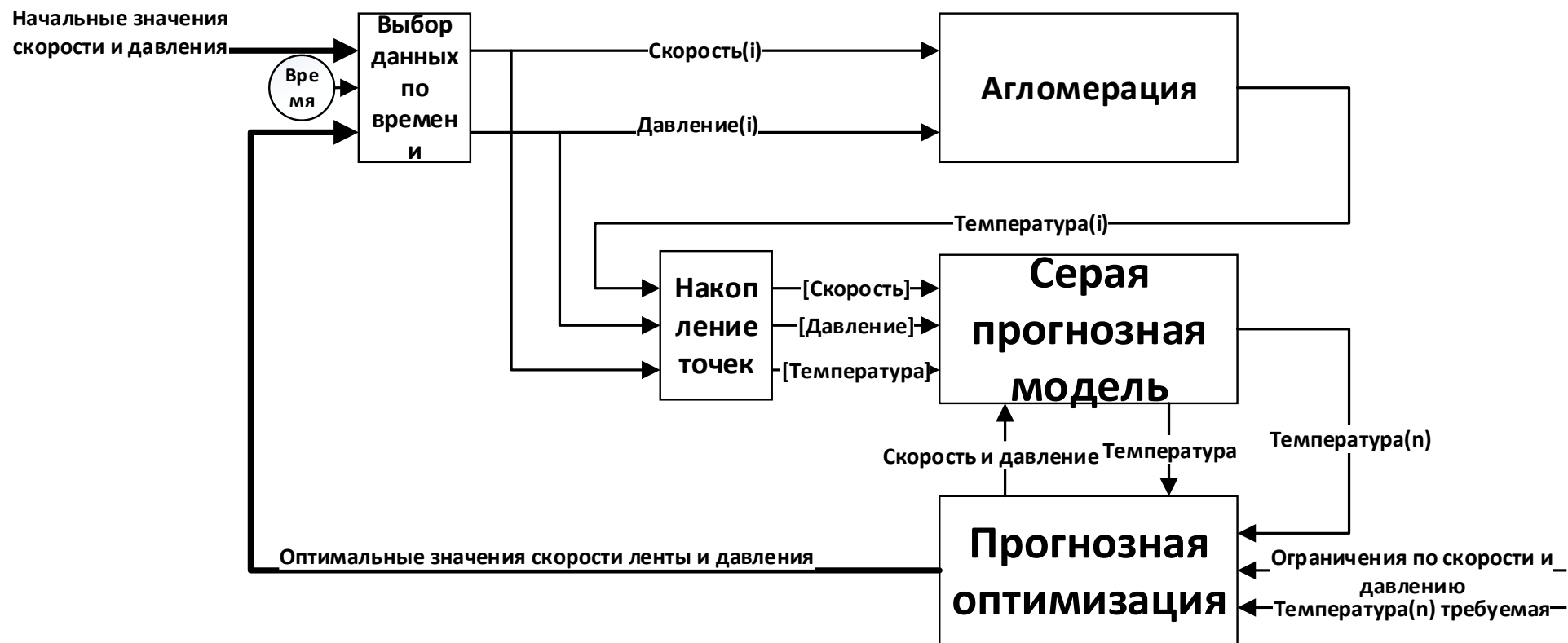


Рисунок 5.1 – Система управления точкой спека

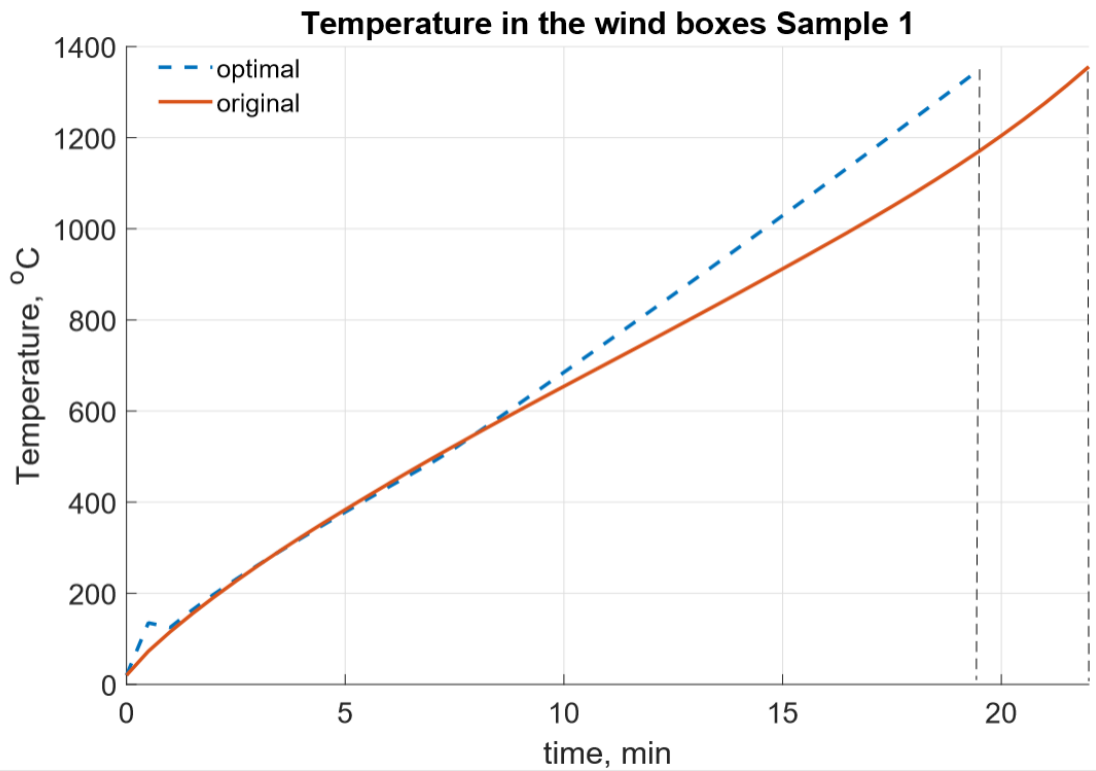


Рисунок 5.2 – Результаты моделирования структуры управления для 1-й выборки

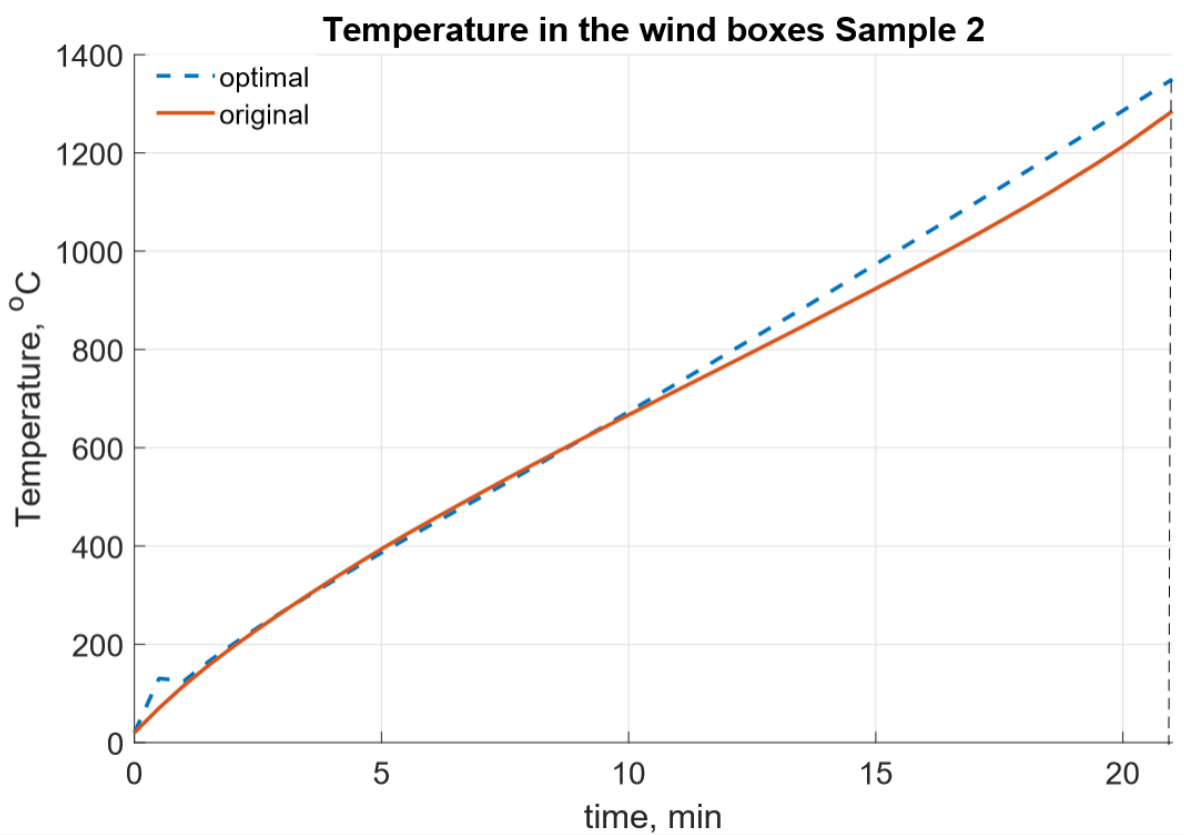


Рисунок 5.3 – Результаты моделирования структуры управления для 2-й выборки

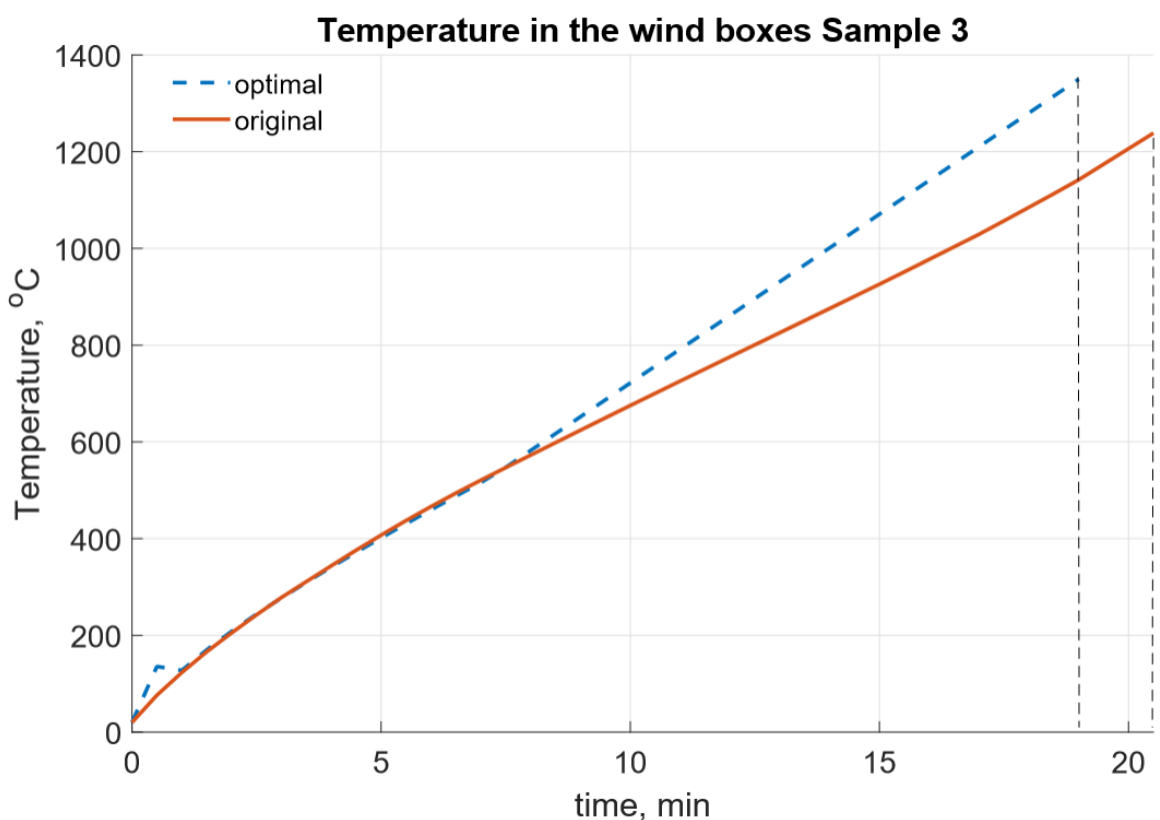


Рисунок 5.4 – Результаты моделирования структуры управления для 3-й выборки

В соответствии с тем что алгоритм оптимизации минимизирует среднеквадратичную ошибку между желаемым и реальным значением управляемой величины в рамках проведения исследования системы управления предложенная структура удовлетворяет требованию к точности.

#### Выводы по пятому разделу

Предложенная структура управления процессом спекания фосфоритной руды, рассмотренная в данной работе, предназначена для улучшения качества продукта и снижения количества возврата. В качестве индикатора, отвечающего за качество спекания, была выбрана точка спекания, то есть положение, при котором процесс достигает самой высокой температуры. Прогнозирование этой переменной осуществлялось с помощью серой прогнозной модели и имеет следующие достоинства:

- 1) динамическое построение прогнозной модели с использованием небольшого размера выборки, полученного с начала процесса, что сокращает время сбора данных и обучения системы;
- 2) контроль процесса спекания не только на основе скорости аглоленты, но также и с помощью разряжения в вакуум-камерах;
- 3) использование серой модели с  $(n-1)$  влияющими факторами, которая учитывает не только эффект прогнозируемой переменной, но и другие переменные процесса;
- 4) использование алгоритма прогнозной оптимизации для определения оптимальных параметров процесса. В рамках данной работы также был

определен начальный объем данных для построения модели, в результате чего стоимость затрат на создание системы сбора данных снижается, а ошибка прогнозной модели не превышает 1.5%.

С использованием разработанных моделей были проведены ее испытания в промышленных условиях НДСЗ, которые показали вполне удовлетворительные результаты (Приложение Г).

Результаты работы, приведенные в данном разделе, были опубликованы в работах [78-80].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**Краткие выводы по результатам диссертационных исследований.** В данной работе описаны методика и основные алгоритмы для моделирования процессов агломерации начиная от попадания шихты в агломашину и заканчивая получением годного агломерата. Полученные кривые разработанной математической модели температуры в вакуум-камерах послужили основой для проверки модели прогноза на основе использования теории серых систем и оптимизационного алгоритма «роя частиц». На основе разработанной математической модели построена система прогноза точки спекания, являющейся основой для определения качества агломерата. Также предложена общая структура системы управления агломашинной на основе динамической прогнозной модели. В рамках исследования получены следующие результаты:

1) исследован процесс агломерации фосфоритовых руд как объекта управления, выявлены основные черты процесса и недостатки. Проведен обзор методов моделирования процесса для решения задач улучшения качества конечного продукта, обоснована актуальность темы исследования (раздел 1);

2) разработана двумерная математическая модель агломерации в среде COMSOL Multiphysics на основе физико-химических превращений, происходящих при спекании (раздел 2). Для описания использован процесс теплопередачи в пористых материалах (раздел 2.3) вместо классической модели теплообмена в твердых и газообразных средах, что позволило уменьшить сложность математической модели и увеличить скорость расчета. В основу математической модели также вошли алгоритмы движения газа на основе уравнений Бринкмана и Эргуна (раздел 2.4), уравнения горения топлива с использованием уравнения Аррениуса (раздел 2.5), модели изменения концентрации веществ (раздел 2.6) и изменения теплофизических свойств шихты (раздел 2.7);

3) проведен обзор существующих моделей для прогноза точки спекания различных агломерационных руд (раздел 3), определены их основные характеристики, особенности и недостатки, обоснована необходимость создания математической модели прогноза на основе малой выборки данных;

4) разработана оптимальная модель прогноза точки спекания на основе теории серых систем и алгоритма оптимизации «роя частиц» (раздел 4.3). Теория серых систем, представляет собой новую методологию, которая фокусируется на изучении проблем, связанных с малыми объемами выборки данных и недостаточной (poor) информацией. Модель прогноза проверена на базе полученных кривых математической модели (раздел 2.8). Описанный алгоритм прогноза включает в себя выбор влияющих параметров при помощи метода корреляции (раздел 4.2), определение минимального объема исходной выборки для обучения модели (раздел 4.4) и обеспечения необходимой точности, а также непосредственно алгоритм построения серой модели (раздел 4.3);

5) разработана и исследована система управления процессом агломерации на базе разработанной модели прогноза, позволяющая в режиме

реального времени построить динамическую модель прогноза на основе данных, полученных в процессе агломерации и синтезировать необходимые значения для управления.

**Оценка полноты решения поставленных задач.** Поставленные перед диссертантом задачи были решены:

- выполнен анализ математических моделей агломерационного процесса: основные направления, методы моделирования, используемые физико-химические процессы и задачи моделирования. Определены наиболее важные черты математических моделей;

- разработана математическая модель процесса агломерации и проверена ее адекватность: описаны основные физико-химические процессы, выбрана среда моделирования, представлены результаты исследования;

- проведен анализ прогнозных моделей точки спекания: определены основные алгоритмы, используемые для прогноза, выявлены достоинства и недостатки, выбран оптимальный алгоритм для построения прогноза;

- разработана динамическая математическая модель прогноза точки спекания: существующие модели проверены на адекватность и точность, точность моделей улучшена за счет выбор оптимального размера исходной выборки для обучения, а также использования алгоритмов нахождения оптимума;

- разработана и исследована система управления на основе прогнозной модели.

**Рекомендации и исходные данные по конкретному использованию результатов.**

Практическая значимость разработанной математической модели на основе физико-химических превращений заключается в следующем:

- в исследовании процесса агломерации: изменение состава, параметрического анализа и решения задач оптимизации, выполнения математических экспериментов для улучшения конечного продукта;

- математическую модель возможно использовать в качестве обучающей платформы (тренажера) процессов агломерации и использования физических законов теплообмена в пористых материалах.

Практическая значимость разработанной прогнозной модели на основе теории серых систем заключается в следующем:

- прогноз значения точки спекания агломерата и синтез управляющего воздействия на основе прогноза;

- алгоритм построения математической модели прогноза возможно использовать для любого процесса, имеющего характер «серого экспоненциального закона».

**Оценка экономической эффективности технологии.** Разработанная математическая модель в среде COMSOL Multiphysics предоставляет возможность проведения исследований по изменению параметров процесса и их влиянию на важные характеристики конечного продукта. Математическая модель позволяет увидеть изменение температуры, давления, влажности,

содержания топлива, скорости движения газа внутри агломерационного пирога. Это дает значительное сокращение временных и финансовых ресурсов для проведения исследований. Также разработка математической модели на основе уравнений теплообмена в пористых материалах уменьшает время моделирования и затрачивает меньше вычислительных ресурсов по сравнению с использованием классической модели теплообмена в твердых и газообразных средах.

Разработанная математическая модель прогноза точки спекания позволит спрогнозировать температуру в вакуум-камерах агломашины, которая является необходимым параметром для управления процессом. Также предложенная структура управления позволяет синтезировать необходимые значения скорости агломашины и разряжения в вакуум-камерах для достижения заданного качества агломерата, что повышает количество годного агломерата в конце агломашины, которое в данный момент достигает 40%, за счет управления во время процесса, а не после получения продукта.

**Оценка научного уровня выполненной работы в сравнении с лучшими достижениями в данной области.** На основании выполненных исследований получены следующие новые результаты:

- выполнен анализ существующих математических моделей процесса агломерации и разработана модель агломерации фосфоритовых руд на основе физических законов теплообмена в пористых материалах вместо классического теплообмена в твердых и газообразных средах;
- выполнен анализ существующих прогнозных моделей и разработана новая оптимальная прогнозная серая модель;
- на основе разработанной оптимальной прогнозной серой модели предложен алгоритм получения прогноза точки спекания агломерата;
- разработана и исследована система управления процессом агломерации, включающая в себя разработанную динамическую модель прогноза.

Таким образом, полученные в ходе выполнения диссертационной работы результаты подтверждены публикациями и апробированы в материалах и сборниках международных научно-практических конференций, что обосновывает достоверность полученных результатов, их научную и практическую значимость, которая подтверждается актом передачи алгоритмов (Приложение Г).

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Majumder S., Natekar P. V., Runkana V. Virtual indurator: A tool for simulation of induration of wet iron ore pellets on a moving grate // Computers and Chemical Engineering. – 2009. – №33. – P. 1141–1152.
- 2 Muller J., Vries T.L., Dippenaar B.A., Vreugdenburg J.C. Development of an iron ore sinter process model to predict sinter strand operating parameters using the finite difference method // Pyrometallurgical Modelling. – 2015. – P. 61-78.
- 3 Сайт предприятия: <http://www.kpp.kz/>
- 4 Егорова Е. Оперативное управление процессом производства железорудного агломерата: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – СПб., 2016. – 133 с.
- 5 Постоянный технологический регламент №3 по производству фосфоритного агломерата для получения желтого фосфора / ЖФ ТОО «Казфосфат» (НДФЗ). – 2010. – 115 с.
- 6 Cumming M.J., Thurlby J.A. Developments in modeling and simulation of iron ore sintering // Ironmaking and Steelmaking. – 1990. – №17. – P. 245-254.
- 7 Nath N.K., Silva A.J., Chakraborti N. Dynamic process modeling of iron ore sintering // Steel Research. – 1997. - №68. – P. 285-292.
- 8 Oyama N., Iwami Y., Yamamoto T., Machida S., Yguchi T., Sato H. Development of secondary-fuel injection technology for energy reduction in the iron ore sintering process // ISIJ International. – 2011. – №51. – P. 913-921.
- 9 Mitterlehner J., Loeffler G., Winter F., Hofbauer H., Schmid H., Zwittag E., Buergler T. H., Pammer O. and Stiasny H. Modeling and Simulation of Heat Front Propagation in the Iron Ore Sintering Process // ISIJ International. – 2004. – Vol. 44, №.1 – P. 11-20.
- 10 H. Yamaoka, T. Kawaguchi. Development of a 3-D Sinter Process Mathematical Simulation Model // ISIJ International. – 2005. – Vol.45, №4. – P.522-531.
- 11 Castro J. A., Sazakb Y., Yagi J. Three Dimensional Mathematical Model of the Iron Ore Sintering Process Based on Multiphase Theory // Materials Research. – 2012. – Vol.15, №6. – P. 848-858.
- 12 Suman S., Giri B. K., Roy G. G. Mathematical modelling of iron ore sintering process using genetic algorithm: effect of moisture evaporation and condensation on the temperature profile // Computer methods in materials science. – 2013. – Vol. 13, №1. – P. 142-146.
- 13 Kaymak Y., Hauck T., Hillers M. Iron Ore Sintering Process Model to Study Local Permeability Control // Excerpt from the Proceedings of the 2017 COMSOL Conference in Rotterdam. –2017. – P. 1-7.
- 14 Rojek J., Nosewicz S., Maździarz M., Kowalczyk P., Wawrzyk K., Lumelskyj D. Modeling of a sintering process at various scales // Procedia Engineering XXI International Polish-Slovak Conference “Machine Modeling and Simulations 2016. – 2017. – Vol.177. – P. 263- 270.



- 15 Wu M., Chen X., Chao W., She J., Wang C. An intelligent integrated optimization system for the proportioning of iron ore in a sintering process // Journal of Process Control. – 2014. – №24. – P.182-202.
- 16 Chen X., Chen X., Wu M., She J. Modeling and optimization method featuring multiple operating modes for improving carbon efficiency of iron ore sintering process // Control Engineering practice. – 2016. – №54. – P.117-128.
- 17 Wang C., Wu M., She J., Cao W., He Y. Qualitative and Quantitative Synthetic Methodology for Blending Optimization in Lead-zinc Sintering // IFAC Proceedings Volumes. – 2008. - Vol. 41, Issue 2. – P. 10977-10982.
- 18 Francisco M., Molina M., Castelán J.M. Control Optimization of a lead Sintering Process // IFAC Proceedings Volumes. – 2013. – Vol. 46, Issue 16. – P.263-270.
- 19 Zhang J., Xie A., Shen F..Multi-Objective Optimization and Analysis Model of Sintering Process Based on BP Neural Network // Journal of Iron and Steel Research, International. – 2007. – Vol. 14, Issue 2. – P. 1-5.
- 20 Song Q., Wang A. Simulation and Prediction of Alkalinity in Sintering Process Based on Grey Least Squares Support Vector Machine // Journal of Iron and Steel Research, International. – 2009. – Vol. 16, Issue 5. – P. 1-6.
- 21 Ramos M. V., Kasai E., Kano J., Nakamura T. Numerical simulation model of the iron ore sintering process directly describing the agglomeration phenomenon of granules in the packed bed // ISIJ Int. – 2000. – №40. – P. 448-454.
- 22 Yang W., Ryu C., Choi S. M., Choi E. S., Lee D., Huh W. Modeling of Combustion and Heat Transfer in an Iron Ore Sintering Bed with Considerations of Multiple Solid Phases // ISIJ Int. – 2004. – №44. – P. 492-499.
- 23 Nath N. K., Mitra K. Mathematical modeling and optimization of two-layer sintering process for sinter quality and fuel efficiency using genetic algorithm // Materials and Manufacturing Processes. – 2000. – №3. – P. 335-349.
- 24 Zhou H., Zhao J. P., Loo C. E., Ellis B. G., Cen K. F. Numerical Modeling of the Iron Ore Sintering Process // ISIJ International. – 2012. – Vol. 52, №9. – P.1550–1558.
- 25 Zhang B., Zhou J., Li M. Prediction of Sinter Yield and Strength in Iron Ore Sintering Process by Numerical Simulation // Applied Thermal Engineering. – 2017. – P. 1-24.
- 26 Токтасынова Н., Сулейменов Б., Болеева Л. Современное состояние методов синтеза систем управления точкой спека при агломерационном обжиге // Вестник КазНУ. – 2018. – №5. – С. 134-137.
- 27 Токтасынова Н., Сулейменов Б., Болеева Л. Основные направления моделирования агломерационного процесса // Вестник КазНУ. – 2019.– №1. – С. 428-434.
- 28 Азнабаев Д.А. Совершенствование теории твердофазных химических реакций и интенсификация процесса агломерации: ил РГБ ОД 61:85-5/4899: <http://www.dslib.net/cvetn-metallurgia/sovershenstvovanie-teorii-tverdofaznyh-himicheskikh-reakcij-i-intensifikacija.html>.

- 29 Gibson L.J., Ashby M.F. Thermal, electrical and acoustic properties of foams. In Cellular Solids: Structure and Properties, 2nd ed // Cambridge University Press: Cambridge, UK, 1997. – P. 283-308.
- 30 Vu J. Modelling of Convective Heat Transfer in Porous Media: Electronic Thesis and Dissertation Repository. 4852. – 2017: <https://ir.lib.uwo.ca/etd/4852>.
- 31 Howard J.B., Williams G.C., Fine D. H. Kinetics of Carbon Monoxide Oxidation in Post Flame Gases // Proc. Int. Symp. On Combustion, The Combustion Institute. – Pittsburgh, 1973 – №14. – P. 975-986.
- 32 Hansen J. F. Nusselt, Rayleigh, Grashof, And Prandtl: Direct Calculation of A Userdefined Convective Heat Flux // Excerpt from the Proceedings of the 2015 COMSOL Conference in Grenoble. – 2015 – P. 1-5: [https://www.comsol.com/paper/download/291661/hansen\\_paper.pdf](https://www.comsol.com/paper/download/291661/hansen_paper.pdf).
- 33 Ergun S. Fluid flow through packed columns // Chemical Engineering Progress. – 1952. – Vol.48, №2. – P. 89-94.
- 34 Rankin W.J., Roller P.W., Batterham R.J. Analysis of the permeability of iron ore sinter feeds using the Ergun equation //Min. Met. Proc. – 1985. – №2 – P.53-59.
- 35 Hinkley J., Waters A.G., Litster J.D. An investigation of pre-ignition air flow in ferrous sintering // Int. J. Miner. Process. – 1994. – №42. – P.37-52.
- 36 Bhagat R.P. Modeling of air flow through sinter mix bed // Proc.: Inter. Conf. on Mathematical Model-ling and Application to Industrial Problems (MMIP-2011). – 2012. – P. 79-87.
- 37 Kasai E., Rankin W.J., Gannon J.F. The effect of raw mixture properties on bed permeability during sintering // ISIJ International. – 1989. – Vol.29, No.1. – P.33-42.
- 38 Вегман Е.Ф. Теория и технология агломерации. //Металлургия. – М., 1974. – 285 с.
- 39 Ramsin L. K. //Warme. – 1928. – №51. – PP.301 – 303.
- 40 Voice E.W., Brooke S.H., Gledhill P.K. // J.Iron and Steel Inst. – 1953. – №74. – p. 136.
- 41 Menuet-Guilband B., Auxenefans M., Folie P. // Paris: Second Symposium International L'agglomeration des minerals de fer, IRSID. – 1957. – p. 58.
- 42 Comsol: Модуль течения в грунтах: <https://www.comsol.ru/subsurface-flow-module>.
- 43 Howard J. B., Williams G. C., Fine D. H. Kinetics of carbon monoxide oxidation in postflame gases // Proc. Int. Symp. On Combustion. – 1973. – Vol. 14., Issue 1 - P. 975-986.
- 44 Богатырев А.Ф., Панченко С.В., Скуратова Н.А. Обобщение зависимостей теплофизических свойств твердых материалов с реагирующими компонентами: <http://www.rusnauka.com/NIO/Phisica/bogatyrev%20a.f..doc.htm>.
- 45 Сайт: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_29203591\\_49686410.PDF](https://elibrary.ru/download/elibrary_29203591_49686410.PDF)
- 46 Справочник химика 21: <http://chem21.info/page/100228120038234192086243212149241006093157114160/>.
- 47 Удельные теплоемкости твердых веществ, жидкостей и газов (газов - при постоянном давлении 1 бар абс) + справочные плотности. Сайт:

<http://tehtab.ru/guide/guidephysics/guidephysicsheatandtemperature/specifichheat/specifichheatable/>.

48 Бобков В.И. Модели для описания свойств фосфатного сырья // Успехи современной науки и образования. – 2017. – Т. 4, №4 – С.73-77.

49 Продукты COMSOL: <https://www.comsol.ru/products>

50 Вебинар COMSOL: <https://www.comsol.ru/video/intro-to-solvers-in-comsol-webinar-ru>

51 Toktassynova N., Suleimenov B. Modeling the temperature in the wind box of sintering process // The 16th International scientific conference information technologies and management 2018. – ISMA University, Riga, Latvia, April 26-27 2018. — P.70-72.

52 Токтасынова Н., Сулейменов Б., Болева Л. Основные виды уравнений движения газовой фазы в агломерационном процессе // Вестник КазНУ. – 2019. – №3. – С. 218-223.

53 Feng Q., Li T., Fan X., Jiang T. Adaptive prediction system of sintering through point based on self-organize artificial neural network // Trans. Nonferrous Met. Soc. China. – 2000. – Vol. 10, №6. – P. 804-807.

54 Peng L., Ji Z., Tan J. Sintering Finish Point Intelligent Control // Proceedings of the 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Monterey, California, USA, July 24-28 2005 – P.1385-1388.

55 Du S., Wu M., Chen X., Lai X., Cao W. Intelligent Coordinating control between burn-through point and mixture bunker level in an iron ore sintering process // Journal of advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics. – 2017. – Vol. 21, №1 – P.139-147.

56 Wang J. et al. BTP prediction of sintering process by using multiple models // 26th Chinese Control and Decision Conference (CCDC 2014), Changsha, China, 2014 – P.4008-4012.

57 Wang B., Fang Y., Sheng J., Gui W., Sun Y. BTP Prediction Model Based on ANN and Regression Analysis // Second International Workshop on Knowledge Discovery and Data Mining. – 2009. – P.108-111.

58 Wang J., Li X., Li Y., Wang K. BTP prediction of sintering process by using multiple models // 26th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). – 2014. – P.4008-4012.

59 Wu M., Xu C., Du Y. Intelligent optimal control for lead-zinc sintering process state // Trans. Nonferrous Met. Soc. China. – 2006. – №16. – P. 975-981.

60 Wu M., Xu C., She J., Cao W. Neural-network-based integrated model for predicting burn-through point in lead-zinc sintering process // Journal of Process Control. – 2012. – Vol.22. – P. 925– 934.

61 Wu M., Duan P., Cao W., She J., Xiang J. An intelligent control system based on prediction of the burn-through point for the sintering process of an iron and steel plant // Expert Systems with Applications. – 2012. – Vol.39, №5. – P. 5971-5981.

62 Du S. et al. A Fuzzy Control Strategy of Burn-Through Point Based on the Feature Extraction of Time Series Trend for Iron Ore Sintering Process // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2019. – P. 1–9.

63 Chen X. et al. T-S Fuzzy Logic Based Modeling and Robust Control for Burning-Through Point in Sintering Process // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2017. – №64. – P. 9378–9388.

64 Cheng W. An application of adaptive genetic-neural algorithm to sinter's BTP process // Proceedings of the Third International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Shanghai, August 26-29, 2004. – P.1748-1753.

65 Cheng W. Prediction system of burning through point (BTP) based on adaptive pattern clustering and feature map // Proceedings of the Fifth International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Dalian, August 13-16, 2006. – P.3089-3094.

66 Shang X., Lu J., Sun Y., Liu J., Ying Y. Data-Driven Prediction of Sintering Burn-Through Point Based on Novel Genetic Programming // Journal of iron and steel research, International. – 2010. – Vol.17, №12. – P. 1-10.

67 Wang D. et al. Application Research Based on GA-FWA in Prediction of Sintering Burning Through Point // International Conference on Computer, Communications and Mechatronics Engineering. – 2018. – P. 378-385.

68 Kwon W. H., Kim Y. H., Lee S. J., Paek K. Event-Based Modeling and Control for the Burnthrough Point in Sintering Processes // IEEE Transactions On Control Systems Technology. – 1999. – Vol. 7, №1. – P. 31-41.

69 Kim B. et al. Estimation of Burn-Through Point in the Sinter Process // 14th International Conference on Control. Automation and Systems (ICCAS 2014). – 2014 – P. 1531-1533.

70 Terpak J., Dorcak L., Kostial I., Pivka L. Control of burn-through point for agglomeration belt // Metalurgia. – 2005. – Vol.44, №4. – P.281-284.

71 Wang C., Wu M. Hierarchical Intelligent Control System and Its Application to the Sintering Process // IEEE Transactions On Industrial Informatics. – 2013. – Vol. 9, №1. – P. 190-196.

72 Cao W. et al. A dynamic subspace model for predicting burn-through point in iron sintering process // Information Sciences. – 2018. – P. 1-12.

73 Wu M., Wang C., Cao W., Lai X., Chen X. Design and application of generalized predictive control strategy with closed-loop identification for burn-through point in sintering process // Control Engineering Practice. – 2012. – Vol.20. – P.1065-1074.

74 Shi J. et al. Soft sensing of the burning through point in iron-making process. // IEEE International Conference on Cognitive Informatics & Cognitive Computing (ICCI\*CC 2016), Palo Alto, CA, USA, 2016. – P.415-418.

75 Du S. et al. Intelligent Integrated Control for Burn-Through Point to Carbon Efficiency Optimization in Iron Ore Sintering Process // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 2019. – P.2497-2505.

76 Shi J., Wu Y., Liao L., Yan X., Zeng J. and Yang R. Soft sensing of the burning through point in iron-making process // Proceedings of 2016 IEEE 15th International Conference on Cognitive Informatics and Cognitive Computing, ICCI\*CC. – 2016 – P.415-418.

77 Deng J. Introduction to grey system // Journal of Grey System – 1989. – №1. – P. 1–24.

- 78 Toktassynova N., Fourati H., Suleimenov B. Grey Forecasting Model and Particle Swarm based Control of a Phosphorite Sinter Process // 2019 International Conference on Control, Automation and Diagnosis (ICCAD). – 2019.
- 79 Toktassynova N., Fourati H., Suleimenov B. Application of grey system theory to phosphorite sinter process: From modeling to control // Asian Journal of Control. – 2020 – Vol. 23, Issue 1. – P. 13-22.
- 80 Toktassynova N., Fourati H., Suleimenov B. Modelling and Control Structure of a Phosphorite Sinter Process with Grey System Theory // The Journal of Grey System. – 2020. – Vol. 32, No.2. – P. 150-166.
- 81 Javed S.A., Liu S. Bidirectional Absolute GRA/GIA model for Uncertain Systems: Application in Project Management // IEEE Access. – 2019. – P. 60885–60896.
- 82 Tien T. A research on the grey prediction model GM(1,n) // Applied Mathematics and Computation. – 2012. – №218. – P. 4903-4916.
- 83 Kayacan E., Ulutas B., Kaynak O. Grey system theory-based models in time series prediction // Expert Systems with Applications. – 2010. – Vol.37, №2. – P. 1784–1789.
- 84 Tien T. L. The indirect measurement of tensile strength of material by the grey prediction model GMC(1, n) // Measurement Science and Technology. – 2005. – 16. – P.1322–1328.
- 85 Tien T. The indirect measurement of tensile strength for a higher temperature by the new model IGDMC(1,n) // Measurement. – 2008. – №41. – P. 662-675.
- 86 Tien T. The indirect measurement of tensile strength by the new model FGMC (1,n) // Measurement. – 2011 – №44. – P. 1884-1897.
- 87 Tien T. The deterministic grey dynamic model with convolution integral DGDMC(1,n) // Applied Mathematical Modelling. – 2009. – №33. – P. 3498-3510.
- 88 Wang Z. X., Pei L.L. An optimized grey dynamic model for forecasting the output of high-tech industry in China // Mathematical Problems in Engineering. – 2014.
- 89 Heppner F., Grenander U. A stochastic nonlinear model for coordinated bird flocks // The Ubiquity of Chaos. – 1990. – P. 233–238.
- 90 Токтасынова Н., Сулейменов Б. Прогнозирование точки спека при помощи оптимальной серой модели свертки // "Integration of the Scientific Community to the Global Challenges of Our Time" Materials of the International Student Scientific Conference. Sapporo, Japan, February 13-15, 2019. – С. 48-56.
- 91 Kennedy J., Eberhart R. C. Particle swarm optimization // In Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. – 1995. – P. 1942–1948.

## Приложение А

### Виды заданий исходных параметров модели

Parameters			
Name	Expression	Value	Description
ds	$10^{(-2)}$ [m]	0.01 m	particle size
tetas	0.7	0.7	solid volume fraction
f	300	300	shrinkage %

Рисунок А.1 – Задание исходных параметров модели

Variables			
Name	Expression	Unit	Description
alfa1	$(2.82-0.3 \cdot 10^{(-2)} \cdot \text{comp1.T}[\dots])$	W/(m·K)	теплопроводность
cp_P	$(0.788+0.061 \cdot 10^{(-2)} \cdot \text{com}[\dots])$	J/(kg·K)	теплоемкость
rho1	$2.7986 \cdot 10^3$ [kg/m <sup>3</sup> ]	kg/m <sup>3</sup>	плотность

Рисунок А.2 – Задание математических выражений переменных

Step

Plot Create Plot

Label:

Function name:

Parameters

Location:

From:

To:

Рисунок А.3 – Задание функции, моделирующей нахождение шихты под горном

Interpolation

Plot Create Plot

Label: Interpolation 1

▼ Definition

Data source: Local table

Function name: densityCO2

t	f(t)
273	1.913
373	1.3940
573	0.9053
773	0.6712
973	0.5333
1273	0.4077

Рисунок А.4 – Задание кривой интерполяции для плотности CO<sub>2</sub>

Piecewise

Plot Create Plot

Label: heat capacity of C (теплоемкость кокса) от температуры в

Function name: cp\_C

▼ Definition

Argument: t

Extrapolation: Constant

Smoothing: No smoothing

— Intervals —

Start	End	Function
0	100	0.84
100	1000	1.13

Рисунок А.5 – Кусочно-линейной кривой изменения теплоемкости кокса от температуры

Interpolation

Plot Create Plot

Label: Теплоемкость от температуры в К, Дж/кг\*К

▼ Definition

Data source: Local table

Function name: cp\_A

t	f(t)
270	700
1700	750

Рисунок А.6 – Задание кривой интерполяции для изменения теплоемкости

Interpolation

Plot Create Plot

Label: Теплопроводность в зависимости от температуры в К, Вт/м\*К

▼ Definition

Data source: Local table

Function name: k\_A

t	f(t)
270	0.25
1700	0.95

Рисунок А.7 – Задание кривой интерполяции для изменения теплопроводности



## Приложение Б

### Исходные Данные

Таблица Б.1 – Исходные данные по температуре (y) и скорости газа (x)

Sample 1		Sample 2		Sample 3	
y	x	y	x	y	x
20,178	0,075294	20,18	0,075294	20,182	20,182
72,871	0,88249	70,2555	0,88621	76,4095	76,4095
115,63	0,7697	115,8425	0,76921	123,2425	123,2425
154,85	0,69239	157,1175	0,689593	166,2325	166,2325
191,66	0,63848	195,23	0,63322	205,2588	205,2588
226,68	0,59935	231,1367	0,594301	242,5869	242,5869
260,29	0,57933	265,8522	0,57159	278,4093	278,4093
292,71	0,55951	299,4536	0,552759	311,2645	311,2645
323,98	0,54366	331,8084	0,536016	343,988	343,988
354,19	0,53055	363,2904	0,522892	376,2741	376,2741
383,57	0,51914	393,986	0,511528	407,4144	407,4144
412,64	0,5096	423,6874	0,501888	437,4323	437,4323
441,21	0,50188	452,0936	0,49378	466,3269	466,3269
469,27	0,49504	480,0988	0,486933	494,165	494,165
496,8	0,48864	507,7149	0,481427	520,8768	520,8768
523,85	0,48367	535,1048	0,476668	546,8515	546,8515
550,5	0,47973	562,0962	0,473162	572,814	572,814
576,8	0,47673	588,727	0,470229	598,5332	598,5332
602,81	0,47449	615,1193	0,467746	624,2198	624,2198
628,61	0,47258	641,0877	0,466575	649,7711	649,7711
654,23	0,47128	666,8797	0,465865	675,2334	675,2334
679,71	0,47065	692,5236	0,465543	700,5228	700,5228
705,12	0,47066	717,9754	0,465922	725,7122	725,7122
730,57	0,47138	743,4423	0,466528	750,8114	750,8114
756,07	0,47245	768,9313	0,467423	775,8321	775,8321
781,69	0,47345	794,4997	0,46817	825,8002	825,8002
807,46	0,47422	820,125	0,468876	850,7832	850,7832
833,38	0,47482	845,8457	0,469539	875,8218	875,8218
859,46	0,47535	871,8297	0,47001	900,8902	900,8902
885,72	0,47592	897,8915	0,470425	926,039	926,039
912,14	0,47645	923,9532	0,470841	951,5448	951,5448
938,78	0,47691	950,4829	0,471147	977,4765	977,4765
965,68	0,47727	1004,016	0,471649	1003,408	1003,408
992,8	0,47756	1031,678	0,471833	1029,34	1029,34
1020,6	0,47781	1060,057	0,471965	1057,033	1057,033
1049	0,47801	1088,435	0,472097	1085,093	1085,093
1077,9	0,47815	1118,096	0,472182	1113,152	1113,152
1107,9	0,47826	1149,338	0,472207	1142,033	1142,033
1138,8	0,47832	1180,58	0,472233	1174,2	1174,2
1170,8	0,47836	1213,368	0,472249	1206,366	1206,366
1204,4	0,4784	1249,156	0,472246	1238,533	1238,533
1239,3	0,47844	1284,943	0,472242	-	-
1276	0,47846	-	-	-	-
1315	0,47849	-	-	-	-
1355,8	0,4785	-	-	-	-

## Приложение В

### Реализация алгоритмов на Matlab

#### *Реализация алгоритма GMC(1,N) и FGMC(1,N) на Matlab*

Функция получения 1-AGO данных из исходной выборки согласно уравнению (4.12), значений  $B$ ,  $Y_R$  согласно уравнению (4.15) и (4.16) соответственно. В качестве исходных данных выступает матрица исходной выборки, содержащая 3 столбца: 1 – номер значения, 2 – величина для прогнозирования, 3 – влияющий фактор. Значение *TrainingValue* определяется в разделе 4.4.

```
function [MatrixAGO, Y, B, X101] = AGO(MatrixNew, TrainingValue)
```

```
% to find out AGO data B and Y
```

```
%Training value is quantity of initial sample to train
```

```
Y = MatrixNew(:,2); %Temp value
```

```
X101 = Y(1);
```

```
Y([1])=[];
```

```
MatrixNew(:,[1])=[];
```

```
[stroka, stolbec] = size(MatrixNew);
```

```
MatrixAGO = zeros(stroka, stolbec);
```

```
sum = 0;
```

```
for i=1:stroka
```

```
MatrixAGO(i,:)=sum+MatrixNew(i,:);
```

```
sum = MatrixAGO(i,:);
```

```
end
```

```
B = zeros(stroka-1, stolbec);
```

```
for i=2:stroka
```

```
B(i-1,:)=(MatrixAGO(i-1,:)+MatrixAGO(i,:))*0.5;
```

```
end
```

```
B(:,1) = -B(:,1);
```

```
B(:,stolbec+1)=1;
```

```
%B and Y for coefficient calculation
```

```
B=B(1:TrainingValue,:);
```

```
Y=Y(1:TrainingValue);
```

```
end
```

Функция прогнозирования (прогноз температуры агломерата) согласно уравнению (4.17), для которого рассчитываются параметры согласно уравнению метода наименьших квадратов (4.14). На вход функции подаются значения количества точек для прогнозирования *PointForPrediction*. Параметр *name* – отвечает за название кривой прогнозирования. Для использования алгоритма FGMC(1,n) в теле программы необходимо убрать знак комментария % со строки после %FGMC.

```
function [X10, b] = prediction(Y, X101, B, MatrixAGO, PointForPrediction, name)
```

```
%calculation of coefficient
```

```
% function called after AGO.m file
```

```
%Point for prediction is number of point that should be predicted
```

```
b = (B'*B)^(-1)*B'*Y;
```

```
X11(1) = X101;
```

```
for t=2:PointForPrediction
```

```
    ftau = 0;
```

```
    for tau = 2:t-1
```

```
        ftau = ftau+exp(-b(1)*(t-tau))*ft(b, MatrixAGO, tau);
```

```
    end
```

```
    X11(t) = X101*exp(-b(1)*(t-1))+0.5*exp(-b(1)*(t-1))*ft(b, MatrixAGO, 1)+0.5*ft(b, MatrixAGO, t)+ftau;
```

```
end
```

```
X11=X11';
```

```
for t=2:size(X11)
```

```
    X10(t) = X11(t)-X11(t-1);
```

```
end
```

```
X10(1) = X101;
```

```
X10=X10';
```

```
%for using FGMC algorithm delete % after this row
```

```
%X10([1])=[];
```

```
xAxes=0:0.5:PointForPrediction/2-0.5;
```

```
plot(xAxes,X10, 'DisplayName', name)
```

```
hold on
```

```
title('Temperature in the wind boxes')
```

```
xlabel('t, min')
```

```
ylabel('T, degC')
```

```
end
```

Функция  $ft$  вызывается функцией прогнозирования.

```
function [ft] = ft(b, MatrixAGO, t)
```

```
%called from prediction.m to count ft
```

```
%b - is coefficient array
```

```
f1 = 0;
```

```
coeffCount = length(b);
```

```
for i = 2:coeffCount-1
```

```
    f1 = f1 + b(i)*MatrixAGO(t,i);
```

```
end
```

```
ft = f1+b(coeffCount);
```

```
end
```

Реализация алгоритма  $OGDMC(1,N)$

Алгоритм роя частиц для реализации уравнения (4.22), для которого параметр  $B$  определяется согласно (4.23).

```
ObjFun = @(x) fitfunDGMC(x, MatrixNew, TrainValue, PointForPrediction);
```

```
nvars = 2;
```

```
options = optimoptions('particleswarm','SwarmSize', 100);
```

```
[x, fval] = particleswarm(ObjFun, nvars, [0 0], [1 1], options);
```

Фитнес функция для реализация алгоритма роя частиц для определения значения  $ro$  в уравнение (4.22).

```
function y = fitfunDGMC(x, MatrixNew, TrainValue, PointForPrediction)
```

```
%x - vector of input variables - ro
```

```
[MatrixAGO, Y, B, X101] = AGOD(MatrixNew, TrainValue, x)
```

```
[X10, b] = predictionD(Y, X101, B, MatrixAGO, MatrixNew,  
PointForPrediction, 'DGMC')
```

```
[MSE, y] = errorMSE(MatrixNew(:,2), X10, 15)
```

```
end
```

Функция получения 1-AGO данных из исходной выборки согласно уравнению (4.12), значений  $B$ ,  $Y_R$  согласно уравнению (4.23) и (4.16) соответственно. В качестве исходных данных выступает матрица исходной выборки, содержащая 3 столбца: 1 – номер значения, 2 – величина для прогнозирования, 3 – влияющий фактор. Значение  $TrainingValue$  определяется в разделе 4.4.

```

function [MatrixAGO, Y, B, X101] = AGOD(MatrixNew, TrainingValue, ro)

% to find out AGO data B and Y for GDMC
%Training value is quantity of initial sample to train

Y = MatrixNew(:,2); %Output value or predicitive value
X101 = Y(1);
Y([1])=[];
MatrixNew(:,[1])=[];
[stroka, stolbec] = size(MatrixNew);
MatrixAGO = zeros(stroka, stolbec);
sum = 0;

for i=1:stroka
    MatrixAGO(i,:)=sum+MatrixNew(i,:);
    sum = MatrixAGO(i,:);
end

W = zeros(stroka-1, stolbec);

for i=1:stroka-1
    for j = 1:stolbec
        W(i,j)=ro(j)*MatrixAGO(i+1,j)+(1-ro(j))*MatrixAGO(i,j);
    end
end

B = zeros(stroka-1, stolbec*2);
B(:,1) = -W(:,1);
B(:,2) = 1;

for j = 3:stolbec*2

    if(mod(j,2)==1)
        B(:,j) = MatrixNew(2:stroka,(j+1)/2);
    else
        B(:,j)=W(:,j/2);
    end

end

%B and Y for coefficient calculation
B=B(1:TrainingValue,:);
Y=Y(1:TrainingValue);
end

```

Функция прогнозирования (прогноз температуры агломерата) согласно уравнению (4.17) для решения уравнения (4.22), для которого рассчитываются параметры согласно уравнению метода наименьших квадратов (4.14). На вход функции подаются значения количества точек для прогнозирования *PointForPrediction*. Параметр *name* – отвечает за название кривой прогнозирования.

```
function [X10, b] = predictionD(Y, X101, B, MatrixAGO, MatrixNew,
PointForPrediction, name)
    %calculation of coefficient
    %function called after AGOD.m file
    %Point for prediction is number of point that should be predicted

    b = (B'*B)^(-1)*B'*Y;
    X11(1) = X101;

    for t=2:PointForPrediction
        ftau = 0;

        for tau = 2:t
            ftau1 = ftD(b, MatrixAGO, MatrixNew, tau-1);
            ftau2 = ftD(b, MatrixAGO, MatrixNew, tau);
            k1 = 0.5*(ftau1+ftau2);
            k2 = 0.5*(ftau2-ftau1);
            ftau = ftau+0.5*exp(-b(1)*(t-tau+0.5-0.5/sqrt(3)))*(k1-k2/sqrt(3))+0.5*exp(-
b(1)*(t-tau+0.5+0.5/sqrt(3)))*(k1+k2/sqrt(3));
            end

            X11(t) = X101*exp(-b(1)*(t-1))+ftau;
            end

        X11=X11';

        for t=2:size(X11)
            X10(t) = X11(t)-X11(t-1);
            end

        X10(1) = X101;
        X10=X10';
        plot(X10, 'DisplayName', name)
        hold on
        title('Temperature in the wind boxes')
        xlabel('2t, min')
        ylabel('T, degC')
        end
```

Функция *ftD* вызывается функцией прогнозирования.

```
function [ft] = ftD(b, MatrixAGO, MatrixNew, t)
%called from prediction.m to count ft
%b - is coefficient array
MatrixNew(:,[1])=[];
f1 = 0;
[stroka, stolbec] = size(MatrixNew);
for i = 2:stolbec
    f1 = f1 + b(2*i-1)*MatrixNew(t,i)+b(2*i)*MatrixAGO(t,i);
end
ft = f1+b(2);
end
```

Функция определения ошибки прогнозирования согласно уравнению (4.26)

```
function [MSE, RMSE] = errorMSE(Y, Y1, number)
%Y - initial
%Y1 - predictive
Y = Y(number+1:length(Y));
Y1 = Y1(number+1:length(Y1));
errorInDot = Y-Y1;
MSE=1/(length(Y))*sum((errorInDot).^2);
RMSE = sqrt(1/(length(Y))*sum((errorInDot).^2./Y.^2))*100;
end
```

Реализация алгоритма оптимальной серой прогнозной модель точки спекания *OGMC(1,N)*

Алгоритм роя частиц для реализации уравнения (4.11), для которого параметр *B* определяется согласно (4.29). При использовании только одного значения  $\rho$  следует значение *nvars* принять равным 1. Все необходимые изменения представлены в комментариях.

```
ObjFun = @(x) fitfunGMC(x, MatrixNew, TrainValue, PointForPrediction);
nvars = 2;
%for eq. (4.27) with 1 ro
%nvars = 1;
options = optimoptions('particleswarm','SwarmSize', 100);
[x, fval] = particleswarm(ObjFun, nvars, [0 0], [1 1], options);
%for eq. (4.27) with 1 ro
%[x, fval] = particleswarm(ObjFun, nvars, [0], [1], options);
```

Фитнес функция для реализация алгоритма роя частиц для определения значения *ro* в уравнение (4.27).

```

function y = fitfunGMC(x, MatrixNew, TrainValue, PointForPrediction)
%x - vector of input variables - ro
[MatrixAGO, Y, B, X101] = AGO(MatrixNew, TrainValue, x)
[X10, b] = prediction(Y, X101, B, MatrixAGO, PointForPrediction, 'GMC')
[MSE, y] = errorMSE(MatrixNew(:,2), X10, 15)
end

```

Функция получения 1-AGO данных из исходной выборки согласно уравнению (4.12), значений  $B$ ,  $Y_R$  согласно уравнению (4.27) и (4.16) соответственно. В качестве исходных данных выступает матрица исходной выборки, содержащая 3 столбца: 1 – номер значения, 2 – величина для прогнозирования, 3 – влияющий фактор. Значение *TrainingValue* определяется в разделе 4.4. Значение *ro* определяется согласно алгоритма роя частиц

```

function [MatrixAGO, Y, B, X101] = AGO(MatrixNew, TrainingValue, ro)

```

```

%to find out AGO data B and Y
%Training value is quantity of initial sample to train

```

```

Y = MatrixNew(:,2); %Temp value
X101 = Y(1);
Y([1])=[];
MatrixNew(:,[1])=[];
[stroka, stolbec] = size(MatrixNew);
MatrixAGO = zeros(stroka, stolbec);
sum = 0;

```

```

for i=1:stroka
    MatrixAGO(i,:)=sum+MatrixNew(i,:);
    sum = MatrixAGO(i,:);
end

```

```

B = zeros(stroka-1, stolbec);

```

```

for i=2:stroka

```

```

    for j = 1:stolbec
        B(i-1,j)=ro(j)*MatrixAGO(i-1,j)+(1-ro(j))*MatrixAGO(i,j);
        %for eq. (4.27) with 1 ro
        %B(i-1,j)=ro*MatrixAGO(i-1,j)+(1-ro)*MatrixAGO(i,j);
    end
end

```

```

end

```

```

B(:,1) = -B(:,1);

```



```

B(:,stolbec+1)=1;
%B and Y for coefficient calculation
B=B(1:TrainingValue,:);
Y=Y(1:TrainingValue);
end

```

Функция прогнозирования (прогноз температуры агломерата) согласно уравнению (4.17), для которого рассчитываются параметры согласно уравнению метода наименьших квадратов (4.14). На вход функции подаются значения количества точек для прогнозирования *PointForPrediction*. Параметр *name* – отвечает за название кривой прогнозирования.

```

function [X10, b] = prediction(Y, X101, B, MatrixAGO, PointForPrediction,
name)

```

```

%calculation of coefficient
%function called after AGO.m file
%Point for prediction is number of point that should be predicted

```

```

b = (B'*B)^(-1)*B'*Y;
X11(1) = X101;

```

```

for t=2:PointForPrediction
ftau = 0;

```

```

for tau = 2:t-1
ftau = ftau+exp(-b(1)*(t-tau))*ft(b, MatrixAGO, tau);
end

```

```

X11(t) = X101*exp(-b(1)*(t-1))+0.5*exp(-b(1)*(t-1))*ft(b, MatrixAGO,
1)+0.5*ft(b, MatrixAGO, t)+ftau;
end

```

```

X11=X11';

```

```

for t=2:size(X11)
X10(t) = X11(t)-X11(t-1);
end

```

```

X10(1) = X101;
X10=X10';
%X10([1])=[]; %FGMC
xAxes=0:0.5:PointForPrediction/2-0.5;
plot(xAxes,X10, 'DisplayName', name)
hold on

```

```

title('Temperature in the wind boxes')
xlabel('t, min')
ylabel('T, degC')
end

```

Функция  $ft$  вызывается функцией прогнозирования.

```
function [ft] = ft(b, MatrixAGO, t)
```

```

%called from prediction.m to count ft
%b - is coefficient array

```

```

f1 = 0;
coeffCount = length(b);

for i = 2:coeffCount-1
    f1 = f1 + b(i)*MatrixAGO(t,i);
end

```

```
ft = f1+b(coeffCount);
```

```
end
```

Функция определения ошибки прогнозирования согласно уравнению (4.26)

```
function [MSE, RMSE] = errorMSE(Y, Y1, number)
```

```

%Y - initial
%Y1 - predictive

```

```

Y = Y(number+1:length(Y));
Y1 = Y1(number+1:length(Y1));
errorInDot = Y-Y1;
MSE=1/(length(Y))*sum((errorInDot).^2);
RMSE = sqrt(1/(length(Y))*sum((errorInDot).^2./Y.^2))*100;

```

```
end
```

Реализация структуры системы управления на основе прогнозной модели GMC(1,N)

Функция получения 1-AGO данных из выборки, полученной в результате сбора данных, согласно уравнению (4.12), значений  $B$ ,  $Y_R$  согласно уравнению (4.15) и (4.16) соответственно. В качестве исходных данных выступает матрица исходной выборки, содержащая 3 столбца: 1 – номер значения, 2 – величина для прогнозирования, 3 – влияющий фактор.

```
function [MatrixAGO, Y, b, X101] = OptAGO(MatrixNew)

% to find out AGO data B and Y
% Training value is quantity of initial sample to train
% MatrixNew:(1) - Time; (2) - Y (temperature); (3) - X (velocity)
```

```
Y = MatrixNew(:,2);
X101 = Y(1);
Y([1])=[];
MatrixNew(:,[1])=[];
[stroka, stolbec] = size(MatrixNew);
MatrixAGO = zeros(stroka, stolbec);
sum = 0;

for i=1:stroka
    MatrixAGO(i,:)=sum+MatrixNew(i,:);
    sum = MatrixAGO(i,:);
end
```

```
B = zeros(stroka-1, stolbec);
```

```
for i=2:stroka
    B(i-1,:)=(MatrixAGO(i-1,:)+MatrixAGO(i,:))*0.5;
end
```

```
B(:,1) = -B(:,1);
B(:,stolbec+1)=1;
b = (B'*B)^(-1)*B'*Y;
end
```

Функция оптимального прогнозирования результатов

```
function [X10] = OptPrediction(Y, X101, b, MatrixAGO, PointForPrediction)
%calculation of coefficient
%function called after AGO.m file
%Point for prediction is number of point that should be predicted
```

```
X11(1) = X101;
```

```
for t=2:PointForPrediction
    ftau = 0;
```

```
for tau = 2:t-1
    ftau = ftau+exp(-b(1)*(t-tau))*ft(b, MatrixAGO, tau);
end
```

```

X11(t) = Y(1)*exp(-b(1)*(t-1))+0.5*exp(-b(1)*(t-1))*ft(b, MatrixAGO,
1)+0.5*ft(b, MatrixAGO, t)+ftau;
end

```

```

X11=X11';

```

```

for t=2:size(X11)
X10(t) = X11(t)-X11(t-1);
end

```

```

X10(1) = X101;
X10=X10';
end

```

Функция *ft* вызывается функцией прогнозирования

```

function [ft] = ft(b, MatrixAGO, t)
%called from prediction.m to count ft
%b - is coefficient array

```

```

f1 = 0;
coeffCount = length(b);

```

```

for i = 2:coeffCount-1
f1 = f1 + b(i)*MatrixAGO(t,i);
end

```

```

ft = f1+b(coeffCount);
end

```

Алгоритм роя частиц для определения оптимальной скорости и разряжения согласно главе **Ошибка! Источник ссылки не найден..**

```

ObjFun = @(x) myfitfun(x, Y, X101, b, MatrixAGO);
nvars = 2;
options
optimoptions('particleswarm', 'SwarmSize', 100, 'HybridFcn', @fmincon);
[x, fval] = particleswarm(ObjFun, nvars, [35 0.5], [45 0.7], options);
x(1) = round(x(1));

```

Фитнес функция

```

function y = myfitfun(x, Y, X101, b, MatrixAGO)

```

```

%x - vector of input variables

```

```

%k - x(1)
%v - x(2)
%b - from OptAGO
x(1)=round(x(1));

for j=16:x(1)
MatrixAGO(j,2) = MatrixAGO(j-1,2)+ x(2);
end

Y0 = OptPrediction(Y, X101, b, MatrixAGO, x(1));
y = (Y0(x(1)) - 1350)^2;
hold on
xAxes=0:0.5:x(1)/2-0.5;
plot(xAxes,Y0,'Displayname', 'optimal')

end

```

## Приложение Г

### Акт передачи алгоритмов

 **УТВЕРЖДАЮ**  
Директор ЖФ ТОО "Казфосфат"  
"НДФЗ"  
\_\_\_\_\_ Керембаев А.Б.  
« 18 » \_\_\_\_\_ марта 2019 г.

### АКТ

#### передачи алгоритмов прогнозирования точки спекания и системы моделирования агломерационного процесса

Мы, нижеподписавшиеся, составили настоящий акт о том, что разработанные алгоритмы прогнозирования точки спекания фосфоритовой агломерационной шихты и система моделирования процесса агломерации прошли имитационные испытания и показали удовлетворительные для практического применения результаты.

Настоящие алгоритмы переданы в ТОО "Казфосфат" "НДФЗ" для дальнейшего использования при разработке и внедрении системы прогнозирования и управления процессом спекания фосфоритовых руд цеха агломерации.

От КазНИТУ имени К.И. Сатпаева  
Докторант PhD кафедры  
Автоматизация и управление  
\_\_\_\_\_ Н.Р. Токтасынова  
« 18 » \_\_\_\_\_ марта 2019г

От ТОО "Казфосфат" "НДФЗ"  
Главный инженер ЖФ ТОО  
"Казфосфат" "НДФЗ"  
\_\_\_\_\_ Мыктыбаев С.С.  
« 18 » \_\_\_\_\_ марта 2019 г.

Профессор, д.т.н., зав.кафедры  
Автоматизация и управление  
\_\_\_\_\_ Б.А. Сулейменов  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019г

Главный менеджер ПТО  
ЖФ ТОО "Казфосфат" "НДФЗ",  
магистр технических наук  
\_\_\_\_\_ Турымбетов Н.Ш.  
« 18 » \_\_\_\_\_ марта 2019 г.

## Приложение Д

### Список опубликованных работ

СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ  
 Докторагта РнD Sabdurav University  
 по специальности 6D070200 – «Автоматизация и управление»  
 Тоқтаёвнайой Нигитиы Рипатвайной

№ п/п	Наименование	Характер издания	Выходные данные	Кол-во страниц	Соавторы
1	2	3	4	5	6
Статьи в международных рецензируемых научных журналах (SCOPUS) (Journal Citation Reports) Asian Journal of Control, 2020, Volume 23, Issue 1, pp. 13-22.					
1	Application of grey system theory to phosphorite sinter process: From modeling to control	Электронное	Publisher: Wiley, 111 River St, Hoboken, USA, Nj, 07030-5774 ISSN: 1934-6093 <b>Science Citation Index Expanded</b> Journal Impact Factor: 2.005 (2018) CiteScore: 4.1 Quartile: Q2 Percentile: 67%	10	Hassen Fouzati Baturbek Suleimenov
Статьи в изданиях, рекомендуемых Комитетом по контролю в сфере образования и МОН РК					
2	Modelling and Control Structure of a Phosphorite Sinter Process with Grey System Theory	Печатное	(Journal Citation Reports) <b>The Journal of Grey System</b> , 2020, Volume 32, No.2, pp. 150-166 Publisher: Research Information Ltd , Greenville Court, Britwell Rd, Wipham, England, Bucks, SH1 8df ISSN: 0957-3720 <b>Science Citation Index Expanded</b> Journal Impact Factor: 1.111 (2018) CiteScore: 1.8 Quartile: Q2 Percentile: 59%	17	Hassen Fouzati Baturbek Suleimenov
3	Современное состояние методов синтеза систем управления точкой спека при агломерационном обжиге	Печатное	<b>Вестник КазНИТУ</b> , №5(129), сентябрь 2018г., стр.134-137 ISSN: 1680-9211 Издатель: КазНИТУ им. К.И.Сатпаева	4	Суллейменов Б., Болаева Л.
4	Основные направления агломерационного моделирования агломерационного процесса	Печатное	<b>Вестник КазНИТУ</b> , №1(131), январь 2019г., стр.428-434 ISSN: 1680-9211 Издатель: КазНИТУ им. К.И.Сатпаева	7	Суллейменов Б., Болаева Л.

5	Основные виды уравнений движения газовой фазы в агломерационном процессе	Печатное	Вестник КазНУТУ, №3(133), июль 2019г., стр.218-223 ISSN: 1680-9211 Издатель: КазНУТУ им. К.И.Сатпаева	6	Сүлейменов Б., Болсая Д.
Международные научно-практические конференции. Всемирные Конгрессы, Глобальный Форум					
6	К вопросу о повышении эффективности внедрения MES системы завода	Печатное	Международная научно-практическая конференция «Математические методы и информатические технологии макроэкономического анализа и экономической политики», Апрель 2017, стр.532-538 Издатель: КазНУТУ им. К.И.Сатпаева	7	Сүлейменов Б.А.
7	Modeling the temperature in the wind box of sintering process	Печатное	The 16 <sup>th</sup> International Scientific Conference Information Technologies and Management, April 2018, pp.70-72 ISSN: 1691-2489 Publisher: ISMA University, Riga, Latvia	3	Suleimеноv B. A.
8	Прогнозирование точки спекания при помощи оптимальной серой модели свертки	Печатное	International Student Scientific Conference "Integration of the Scientific Community to the Global Challenges of Our Time", February 2019, pp.48-56 ISBN 978-601-267-055-4 Publisher: Sapporo, Japan: Regional Academy of Management	9	Сүлейменов Б.А.
9	Grey Forecasting Model and Particle Swarm based Control of a Phosphorite Sinter Process	Электронное	(SCOPUS) International Conference on Control, Automation and Diagnosis (ICCAD), Grenoble, France, July 2019, pp.1-6 ISBN: 978-1-7281-2293-9 Publisher: IEEE	6	Hassen Fougati Batyrbek Suleimеноv

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 г.

Автор работ

Н.Р. Токтасынова

Главный ученый секретарь

Д.К. Наурызбаева

