

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(Научно-исследовательский университет)»
Высшая школа электроники и компьютерных наук
Кафедра «Автоматика и управление»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент

_____/_____
_____ 2017 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

_____/Л.С. Казаринов
_____ 2017 г.

Автоматизированная система управления потреблением энергетических
ресурсов в процессе обжига цементного клинкера

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ

ЮУрГУ - 270304.2017.151 ПЗ ВКР

Руководитель работы
доцент кафедры АиУ
_____/Барбасова Т.А.

« ____ » _____ 2017 г.

Автор проекта
студент группы КЭ-442:
_____/Габитова Д.Д.
« ____ » _____ 2017 г.

Нормоконтролер
_____/Абдуллин В.В.
« ____ » _____ 2017 г.

Челябинск
2017

АННОТАЦИЯ

Габитова Д.Д. Автоматизированная система управления потреблением энергетических ресурсов в процессе обжига цементного клинкера. – Челябинск: ЮУрГУ (НИУ), ВШЭКН; 2017, 70 с. 30 ил., библиогр. список – 53 наим.

В этом дипломном проектировании была описана конструкция цементной вращающейся печи и ее технологический процесс. Реализована оптимизация по технологическому параметру – температура отходящих газов методом нелинейного программирования с целью нахождения оптимального технологического параметра для улучшения работы печи.

Цементная печь была представлена как многосвязный объект. Разработана структурная схема управления цементной печью как многосвязным объектом. Так же в ходе работы были рассчитаны регуляторы для прямых каналов связи и компенсаторы для перекрестных каналов связи.

В результате работы была смоделирована система управления печи обжига клинкера по двум переменным, получены переходные характеристики системы.

					<i>270404.2017.382 ПЗ ВКР</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>	<i>Автоматизированная система управления потреблением энергетических ресурсов в процессе обжига цементного клинкера</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Разраб.</i>	<i>Габитова Д.Д.</i>					3	70	
<i>Провер.</i>	<i>Барбасова Т.А</i>							
<i>Н. Контр.</i>	<i>Абдуллин В.В.</i>					<i>ЮУрГУ (НИУ) Кафедра АиУ</i>		
<i>Утверд.</i>	<i>Казаринов Л.С.</i>							

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
1. ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ЦЕМЕНТНОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА	10
1.1 Получение цементного клинкера	10
1.2 Способы производства цементного клинкера	11
1.3 Вращающиеся печи для обжига клинкера	15
2. ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ОБЖИГА КЛИНКЕРА ВО ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧАХ	23
2.1 Методы оптимизации	23
2.2 Экономический критерий оптимизации работы печи	31
2.3 Изменение характеристик вращающейся печи	32
2.4 Изменение температуры отходящих газов	33
3. АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОБЖИГА И УПРАВЛЕНИЕ ОБЖИГОМ ВО ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧАХ	38
3.1 Понятие АСУ	38
3.1.1 Функциональные подсистемы	39
3.1.2 Обеспечивающие подсистемы	40
3.1.3 Организационно-функциональные подсистемы	41
3.2 Автоматизация технологического процесса обжига во вращающихся печах	44
3.3 Представление математической модели цементной печи обжига клинкера как модели многосвязного объекта	46
3.4 Разработка системы управления процессом обжига клинкера	52
3.5 Структурная схема управления печи обжига клинкера по двум переменным	54
3.6 Расчет компенсаторов	56
3.7 Определение настроек ПИ – регулятора	59
3.8 Моделирование системы управления печи обжига клинкера по двум переменным	62
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	64
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	65

					270404.2017.382 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		6

ВВЕДЕНИЕ

Любое предприятие стремится максимизировать результат при определенных затратах, либо же снизить затраты для достижения наилучшего результата. Т.е. каждое предприятие стремится

Таким образом, главной целью любого предприятия является максимизация результата при определенных заданных затратах, либо минимизация затрат для достижения заданного результата. То есть получение максимально возможной прибыли при минимальном расходовании ресурсов.

Для любого развитого региона мира основной для строительной промышленности является производство цемента. Производство цемента довольно энергоемкий и ресурсозатратный процесс, но, несмотря на все это, промышленная сфера быстрыми темпами развивается в России, а так и за рубежом.

На сегодняшний день производство цемента в России осуществляется в основном во вращающихся обжиговых печах, которые работают по мокрому способу. Самое главное в таком способе производства это обжиг клинкера, от общих энергозатрат на него приходится около 80 % [1, 2]. Поэтому в настоящее время очень актуальными задачами являются интенсификация и оптимизация процесса обжига цементного клинкера.

При выборе набора используемых агрегатов и метода производства большую роль играет сырьевая составляющая в местности. Поэтому в России в основном и используется вращающиеся печи, работающие по мокрому способу, т.к. географический набор сырья, который сложился в России, а так же в Евразийском континенте (в центральной и северной части близко расположенных регионов) изначально имеет довольно высокую влажность. Другой же способ производства извести будет содержать лишние этапы, что увеличит затраты на весь процесс производства. Помимо всего этого важной причиной является так же

					270404.2017.382 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		7

то, что получаемый цемент по мокрому способу по качеству выше, чем аналогично получаемый цемент по сухому и комбинированному способу.

Поэтому попытки осуществить автоматизацию вращающейся печи обжига цементного клинкера, работающей по мокрому способу, ведутся с 1960-х годов. Но, не смотря на это, применение к разработке системы управления традиционных методов автоматического не привели к устойчивому регулированию, а значит и к удовлетворительным результатам. Это показывает насколько сложна цементная печь, как объект автоматизации. Сложность состоит в большом количестве сложных физико – химических процессов, их многостадийности. Еще одна сложность заключается в том, что стадии распределены по длине печи, в которых присутствует большое количество возмущений, все технологические параметры влияют тем или иным образом друг на друга, а так же ряд других причин.

Подтвердить это может статистика, так допустим в России где общее число заводов вращающимися печами, работающих по мокрому способу производства, около 45, а в США, примерно таких же заводов 48, практически нигде нет автоматизированных систем управления процессом обжига. При этом по прогнозом экспертов, использование данных печей будет вестись еще как минимум 30 лет. Поэтому можно с уверенностью говорить об актуальности разработки автоматизированной системы управления вращающейся цементной печи, работающей по мокрому способу.

Так как производство цемента энергозатратный процесс, то еще одной центральной проблемой является энергосбережение. Поэтому можно говорить и об актуальности интенсификации и оптимизации технологических параметров и всего процесса производства цемента.

Целью работы является повышение эффективности процесса обжига клинкера за счет оптимизации управления обжигом, а так же с помощью разработанной автоматизированной системы управления.

Задачи работы:

					270404.2017.382 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		8

- описать конструкцию цементной вращающейся печи и технологический процесс;
- произвести оптимизацию технологического параметра вращающейся цементной печи;
- представить цементную печь как многосвязный объект;
- разработать автоматизированную систему управления обжига цементного клинкера, удовлетворяющую заданным требованиям.

					<i>270404.2017.382 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		9

1 ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ЦЕМЕНТНОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

В настоящее время в России около 80 % печей обжига извести работают по мокрому способу, в отличие от развитых стран. В них преобладают комбинированный и сухой способы обжига извести. В печах сухого способа производства гораздо меньше затраты на топливо, но не смотря на все это существует ряд причин, почему не целесообразно экономически использовать именно этот способ производства извести, а такой способ как мокрый делают более эффективным.

Основными из этих причин являются:

– географически так сложилось, что в России преобладает сырье с естественной влажностью, что характерно для отечественных заводов, и на сушку сырьевой смеси уходило бы лишние затраты на топливо, а значит и увеличение затрат [3];

– зарастание настылями из-за большого количества хлоридов и щелочей в сырье, преимущественно зарастают циклонический теплообменник, газоотход и в связи с этим возникают большие трудности с использованием печного агрегата [4];

– необходимость в значительных капитальных затратах при переводе печей с мокрого на сухой способ производства;

– лучшая степень экологической безопасности мокрого способа производства;

– простота и высокое качество измельчения и усреднения сырьевой смеси при мокром способе.

1.1 Получение цементного клинкера

Процесс получения клинкера достаточно сложные со стороны химических процессов. Его суть состоит в том, что при достаточно высоких температурах, начинают появляться некоторые компоненты, которые в дальнейшем обеспечат

					270404.2017.382 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		10

требуемые свойства цемента. Завершением цементного клинкера можно считать полное связывание извести, все это происходит при температуре около 1450 °С.

Основная и самая главная часть портландцемента клинкера – алит – и она достигает в клинкере 40 – 65 %. Его содержание зависит от вида самого клинкера. Используемые в реакции оксиды: $\text{Ca}_2\text{O} - \text{K}$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{F}$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{F}$, $\text{Na}_2\text{O} - \text{N}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{A}$, $\text{CaO} - \text{C}$.

Трехкальциевый силикат C_3S очень близок к алиту, но в ряде случаев содержит так же и другие соединения. Они проявляются в виде твердых растворов.

Еще одна очень важная составляющая это белит. К ее составу близок двухкальциевому силикату C_2S . Он проявляется в виде твердых растворов магния, натрия, калия и т.д.

Так же существует третья составляющая цементного клинкера – это промежуточное вещество. Оно образуется из расплава и только при высоких температурах.

Цементный клинкер принято характеризовать соотношением между модулями иначе говоря основными оксидами или также между содержанием минералов.

К модульным характеристикам цементного клинкера относятся:

- основной $m = \text{C/S} + \text{A} + \text{F}$;
- алюминатный $p = \text{A/F}$;
- силикатный $n = \text{S/A} + \text{F}$.

1.2 Способы производства цементного клинкера

Всего выделяют четыре способа производства цемента это сухой, полусухой, полумокрый и мокрый способы. Рассмотрим каждый более подробно:

Сухой способ: материалы сначала измельчаются, далее в сырьевой мельнице они просушиваются до вида подвижного порошка. Для питания печи с

					270404.2017.382 ПЗ ВКР	Лист
						11
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

циклоническим теплообменником или кальцинатором используется так называемая сухая сырьевая шахта. А всего реже для длинной сухой печи.

Полусухой способ: в длинную печь с ячейковыми теплообменниками или колосниковый подогреватель подаются сгранилированный с водой сырьевая шихта при полусухом способе сухая сырьевая шихта.

Полумокрый способ: при этом способе шлам изначально обезвоживается фильтрацией. При этом образуется так называемый кек, который методом экструзии гранулируется и подается в сушилку сырьевого века или же в колосниковый подогреватель и в итоге получается сырьевая шихта.

Мокрый способ: при данном способе часто с высокой влажностью сырьевые материалы измельчаются с водой до создания сырьевого шлама. А он в свою очередь подается сразу же в во вращающуюся печь или сначала в сушилку шлама.

На сегодняшний день применяются несколько видов печей обжига цементного клинкера. Это печи сухого, мокрого и комбинированного способа. Технологические схемы трех способов представлены на рисунке 1 [5].

					270404.2017.382 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		12



Рисунок 1 – Технологические схемы обжига клинкера

Различают несколько видов вращающихся печей обжига цементного клинкера. Это длинные и короткие вращающиеся печи. Длинные печи достигают в длину 185 м и даже более, а короткие всего от 40 до 85 м.

Длинные вращающиеся печи предназначены для мокрого и сухого способа производства цемента, а короткие могут работать с сухим или комбинированным способами [6, 7].

Длинные печи производства цементного клинкера классифицируются не только по длине и по диаметру, но и по такому важному принципу как внутреннее устройство барабана. Длинные печи бывают с теплообменными устройствами, а также и без них и др.

Так же для предварительной подготовки сырьевой смеси к самому непосредственно обжигу применяют запечные установки. Это осуществляется для полного использования тепла дымовых газов, которые образуются при сгорании топлива.

Для лучшего теплообмена между самим обжигаемым материалом и дымовыми газами применяют так называемые теплообменные устройства. Эти устройства устанавливаются внутри самого барабана данной печи. Конструкция таких теплообменников отличается незначительно, только в зоне сушки для вращающихся печей, работающих по мокрому и сухому способу производства. Для печей, работающих по мокрому способу применяют так называемые корабельные стальные цепи и фильтры т.е. подогреватели. В итоге идет улучшение поглощения тепла самим материалом из дымовых газов и соответственно ускоряется сушка шлама.

Необходимо отметить, что гранулы или сырьевая мука не способны обладать налипающими свойствами. Поэтому применяют различные встроенные теплообменники. Они могут быть лопастные, ячейковые и т.д. Это служит для ускорения процесса подсушки гранул или сырьевой муки в холодном конце обжиговой печи, работающей по сухому способу производства. Такие встроенные

					270404.2017.382 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		14

теплообменники так же служат для улучшения пересыпания материала в обжиговой печи при вращении самого непосредственно барабана.

Существует еще одно различие между печами, работающих по сухому и мокрому способам – это отношение длины барабана к его диаметру. Печи работающие по сухому способу производства имеют более меньшее отношение от 30 до 35, а печи мокрого способа производства обладают более высоким отношением от 34 до 42 [8].

1.3 Вращающиеся печи для обжига клинкера

Вращающаяся печь – это пустотелый барабан, который изнутри покрыт футеровкой (огнеупорным кирпичом), так же он открыт с торцов и установлен под наклоном $3 - 4^\circ$ к горизонту. Скорость вращения печи $1 - 1,5$ об/мин, но она зависит от таких показателей как диаметр и производительность печи обжига цементного клинкера. Сама печь работает по принципу противотока, т.е. сырье подают со стороны холодного конца (это верхний конец печи), а топливо (воздушную смесь) подают со стороны горячего конца (это нижний конец печи).

В печи сырьевая смесь движется к разгрузочной части из-за вращения печи и наклону барабана. Далее после того как клинкер прошел все стадии обжига он через соединительную камеру попадает в холодильник, где заключительная часть производства цемента, охлаждение цементного клинкера. При этом отработанные газы направляются в атмосферу через специальные устройства – пылеуловители [9].

В основном вращающаяся печь состоит из одних и тех же элементов, независимо для какого она способа производства. Состав вращающейся печи: уплотнительных устройств мест сочленения вращающегося корпуса печи с неподвижными головками, горелочных устройств с приспособлениями для перемещения и регулирования положения горелки в печи, привода, опорных бандажей, устройств для контроля температуры корпуса и его охлаждения

					270404.2017.382 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		15

воздухом, загрузочной и разгрузочной головок, роlikоопор, корпуса и других узлов.

Итак, с холодного конца печи подается топливная смесь, а с горячей топливно-воздушная смесь, все это приводит к тому, что при горении образуется факел. При горении все этих смесей образуются горячие газы, которые нагревают материал, который в свою очередь движется навстречу. Процесс обжига длится 2 – 4 часа. Время пребывания смесь в печи зависит от угла наклона печи, скорости вращения и занимает в печи только лишь 6 – 15 % от объема, поскольку термическое сопротивление материалы очень высокое, это связано с тем, что сам материал обладает низкой степенью перемешивания в движущемся слое и низкой теплопроводностью [10].

Горячие газы двигаясь в печи нагревают не только материал, но и саму футеровку печи, а она в свою очередь отдает тепло закрытой поверхности материала через непосредственный контакт, а открытой поверхности передает тепло посредством лучеиспускания. Получается, что сырьевая смесь получает тепло когда соприкасается непосредственно с футеровкой печи, либо когда находится на поверхности слоя материала. Вращающаяся печь делится на сектора и в каждом из них разная температура, в нижнем секторе происходит контакт с материалом, поэтому температура там снижается, а при прохождении в верхнем секторе происходит контакт с газами, поэтому температура футеровку в этой части печи высокая. Из-за этого возникает сложность в установке приборов, которые будут измерять температуру внутри печи, так же сложность возникает в том, что печь вращается и происходит пересыпание сырьевой смеси. Решение заключается в использовании принципа периодического измерения температуры, он заключается в том, чтобы измерять температуру в нижней точке траектории вращения, когда установленная термопара касается контактов. Так же на корпус вращающейся печи устанавливается так называемый карман, который имеет конусообразную форму. При вращении печи в верхнем положении карман

					270404.2017.382 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		16

опустошается, а в нижнем наоборот, засыпается материалом. Все это говорит о сложности процесса обжига и определении его параметров.

Рассмотрим основные особенности процесса обжига, которые требуется учитывать при управлении печью [11]. Устройство и материальные потоки в цементной вращающейся печи представлены на рисунке 2.

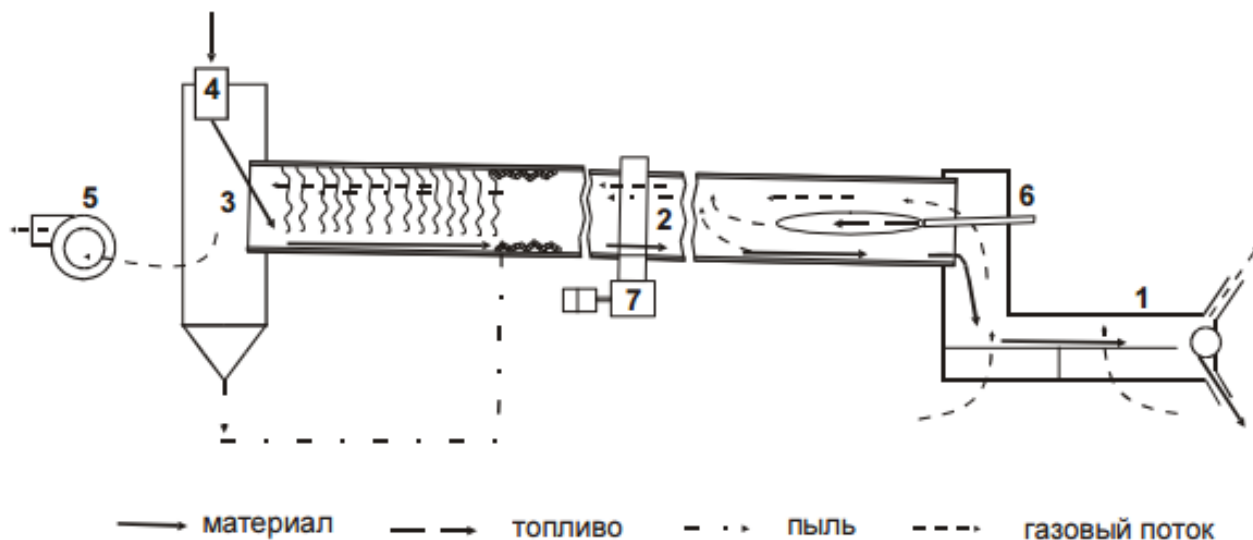


Рисунок 2 – Материальные потоки в цементной вращающейся печи

На рисунке изображены колосниковый холодильник (1), вращающаяся печь (2), пыльная камера и электрофильтр (3), шламовый питатель(4), дымосос (5), топливная форсунка (6), привод печи (7).

Главные параметры вращающейся печи – диаметр и длина. В таблице 1 представлены технические характеристики вращающихся печей мокрого способа производства [12].

Таблица 1 – Технические характеристики вращающихся печей мокрого способа

Показатели	Печи размерами (диаметр x длина), м			
	4 x 150	4,5 x 170	5 x 185	7x 230
Число опор	6	7	7	8
Уклон, %	4	3,5	3,5	3,5
Частота вращения от главного	0,7-1,44	0,55-1,1	0,6-1,24	0,47-0,94

привода, об/ мин				
Мощность электродвигателя главного привода, кВт	150 x 2	200 x 2	250 x 2	630 x 2
Масса, т	1430	1950	2500	5700

Печь мокрого способа условно разделяется на шесть технологических зон, выделенных Юнгом (табл. 2) [13 – 17]. Приблизительный характер изменения массы материалов и температур по длине печи показан на рисунке 3.

Реально в промышленных печах нет четкой границы между соседними зонами. Деление печи и процессов клинкерообразования на конкретные зоны можно делать весьма условно, так как отдельные процессы часто накладываются друг на друга. Влияние примесных компонентов (щелочей и сульфатов) усложняет химические реакции.

Таблица 2 – Технологические зоны цементной вращающейся печи

№	Зона	Температура материала, °С	Длина зоны, %	Основные процессы, происходящие в зоне
1	Сушки	70-80 °С, к концу зоны 200 °С	20...25	Испарение физической влаги. Частичная конденсация щелочных соединений. Существует два варианта протекания процессов: 1) цепная завеса с низкой плотностью (как правило, гирляндная), влажность материала после цепной завесы не менее 8...10 %,

					270404.2017.382 ПЗ ВКР			Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата				18

				<p>количество гранул 60 – 95 %;</p> <p>2) цепная завеса свободновисящая высокой плотности, влажность после цепей практически отсутствует, количество гранул 10 – 40 %.</p> <p>Второй вариант предпочтителен для сырья, несклонного к образованию гранул. Тепло в зоне затрачивается на испарение и нагрев материала, потери через корпус печи очень малы.</p>
2	Подогрева	200...750 °С	25...35	<p>Выгорают органические примеси, удаляется гидратная влага из глинистых минералов с частичным разложением их на отдельные составляющие.</p>

Продолжение таблицы 2

№	Зона	Температура материала, °С	Длина зоны, %	Основные процессы, происходящие в зоне
				<p>Материал движется вдоль печи, теплообмен идет в основном между газом и материалом. Теплообмен конвективный. Тепло затрачивается на дегидратацию и нагрев материала, потери через корпус печи незначительны.</p>
3	Декарбо-	750...1100	30...35	Происходит завершение дегидрата-

	низации	°C		<p>ции, диссоциация карбонатов с выделением технологического CO_2, образование C_2F и C_2S, появление $2\text{C}_2\text{S} \cdot \text{CaCO}_3$ (спуррита).</p> <p>Декарбонизация является наиболее энергоемкой реакцией клинкерообразования. Тепло в зоне тратится на диссоциацию и нагрев материала, здесь наибольшие потери через корпус. Теплообмен лучистый и конвективный.</p>
4	Экзотермических реакций	1100...1300 °C	3...5	<p>Насыщение известью СА до C_{12}A_7 и далее до C_3A (трехкальцевого алюмината), образование C_4AF (алюмоферритов кальция) и C_2S,</p>

Продолжение таблицы 2

№	Зона	Температура материала, °C	Длина зоны, %	Основные процессы, происходящие в зоне
				<p>завершается процесс твердофазового спекания материала.</p> <p>Преобладает лучистый теплообмен. Расход тепла идет на нагрев материала и потери через корпус печи, затраты тепла компенсируются экзотермическими реакциями.</p>
5	Спекани	1300...145	10...15	Появляется расплав (при

	я	0...1300°C		<p>температуре 1450 °С количество расплава 20-30 % от массы смеси [11]), заканчивается образование клинкерных минералов, происходит растворение в жидкой фазе свободного оксида кальция и образование C₃S (алита), происходит агломерация клинкера.</p> <p>Теплообмен в основном лучистый. Тепло тратится на образование расплава и образование алита.</p>
6	Охлаждения	1300...120 0 °С	2...4	<p>Кристаллизация минералов и застывание расплава. Длительное нахождение клинкера при высоких температурах сопровождается клинкерным пылением.</p>

Реакции клинкерообразования многостадийные, то есть исходное сырье в клинкерные минералы превращается через ряд промежуточных соединений [18]. Эти химические процессы могут значительно варьироваться в зависимости от вида сырьевых компонентов. Дополнительно на процессы клинкерообразования большое влияние оказывают примеси, содержащиеся в сырьевых компонентах и топливе [19 – 20]. Наиболее распространены добавки щелоче – и серосодержащих соединений. Накоплению этих веществ в материале способствует их внешняя и внутренняя циркуляция.

2 ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ОБЖИГА КЛИНКЕРА ВО ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧАХ

2.1 Методы оптимизации

Оптимизация это выбор наиболее подходящего варианта из всех предложенных.

В настоящее время инженеры часто используют оптимизацию, т.к. это позволяет находить оптимальные параметры, наилучшие варианты конструкций или наиболее выгодное распределение ресурсов.

Главной задачей методов оптимизации является необходимость найти такое значение некоторых параметров, которое было бы наиболее выгодно в условиях данной задачи. В качестве таких параметров могут выступать масса, температура, значения размеров объектов (линейные). Число (n) таких параметров показывает x_1, x_2, \dots, x_n насколько сложна задача оптимизации.

Выбор наилучшего решения, а так же возможно сравнение двух решений проводится с помощью так называемой функции (некоторой зависимой величины), которая определяется параметрами. Такая величина называется целевой функцией. Так же ее можно назвать критерием качества. При решении задачи оптимизации процесс сводится к нахождению минимума или максимума целевой функции. Таким образом, можно сказать, что различные экономические задачи или инженерные могут быть описаны глобальным критерием оптимальности т.е. целевой функцией [21].

Целевую функцию можно записать в виде:

$$u=f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (1)$$

где u – целевая функция;

f – критерий оптимальности;

x_n – проектный параметр.

					270404.2017.382 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		23

Целевой функцией могут быть разные технологические параметры: масса конструкции, стоимость перевозок грузов, прибыль, объем выпуска и т.д.

Функцией одной переменной называют такую целевую функцию (1) в которой только один проектный критерий. Графиком такой целевой функции является кривая на некоторой плоскости. А если же проектных критерия 2, то целевая функция будет уже называться функцией двух переменных. Графиком такой функции является поверхность в трехмерном пространстве.

Следует помнить, что целевая функция может быть как в виде простой формулы, а иногда принимает только дискретные значения, которые могут задаваться только в таблице. В любом случае она должна быть однозначной для всех проектных параметров.

Так же следует отметить, что целевая функция может быть как одна, так и несколько, когда требуется обеспечить сразу несколько критериев качества. И порой такие целевые функции могут и вовсе оказаться несовместимыми. В данном случае вводят приоритет.

Всего выделяют несколько типов оптимизационных задач – это условные и безусловные. Условная задача или как ее по другому называют, задача с ограничениями, это такая задача, которая формирует некоторые условия на множестве a . Все такие ограничения задаются неравенствами. А безусловная это такая оптимизация, целью которой является нахождения максимума или минимума функции (1) от реальных переменных.

Зависимость между проектными параметрами, которая учитывается при нахождении параметров, выражается в виде ограничений. Эти ограничения должны отражать законы природы, финансовые требования или же наличие ресурсов.

В итоге получается, что область проектирования, которая определяется всеми параметрами, может быть значительно меньше, а число ограничений-равенств может быть произвольным.

Их можно записать в виде [23]:

					270404.2017.382 ПЗ ВКР	Лист
						24
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

$$\begin{aligned}
g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0 \\
g_2(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0 \\
&\dots\dots\dots \\
g_m(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0,
\end{aligned}
\tag{2}$$

где g_m – ограничения равенства.

С помощью математический преобразования можно выразить одни параметры через другие. Это позволяет значительно сократить процесс оптимизации, что приводит к облегчению задачи. Так же могут вводиться и ограничения-неравенства, имеющие вид:

$$\begin{aligned}
a_1 \leq \varphi_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq b_1 \\
a_2 \leq \varphi_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq b_2 \\
&\dots\dots\dots \\
a_k \leq \varphi_k(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq b_k,
\end{aligned}
\tag{3}$$

где a_k – нижнее ограничение неравенства;

φ_k – критерий оптимальности;

b_k – верхнее ограничение неравенства.

Существует одна особенность в том, чтобы найти решение при наличии ограничений. Оптимальное решение может оказаться либо экстремумом функции в области проектирования. А может оказаться и на границе области. А если ограничений и вовсе нет, то ищется решение внутри все области проектирования, т.е. ищется глобальный экстремум.

Задачи математического программирования в наиболее общем виде классифицируются по следующим признакам [24-26]:

1)

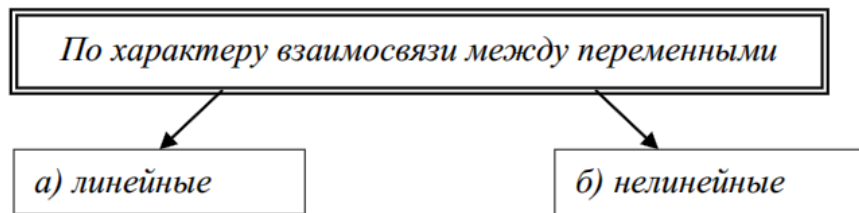


Рисунок 4 – Классификация задач математического программирования

В случае а) все функциональные связи в системе ограничений и функция цели – линейные функции; наличие нелинейности хотя бы в одном из упомянутых элементов приводит к случаю б).

2)

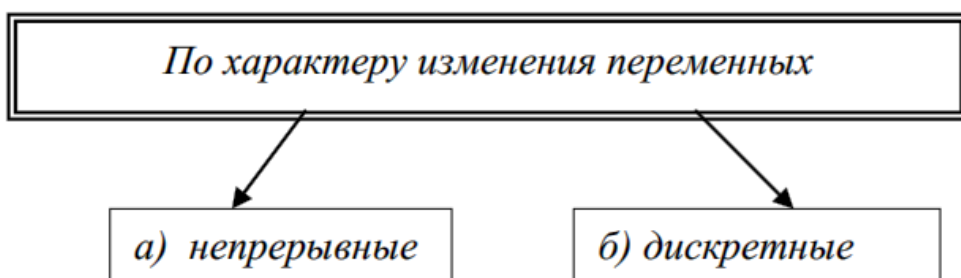


Рисунок 5 – Классификация задач математического программирования

В случае а) значения каждой из управляющих переменных могут заполнять сплошь некоторую область действительных чисел; в случае б) все или хотя бы одна переменная могут принимать изолированные числовые значения из некоторого множества.

3)

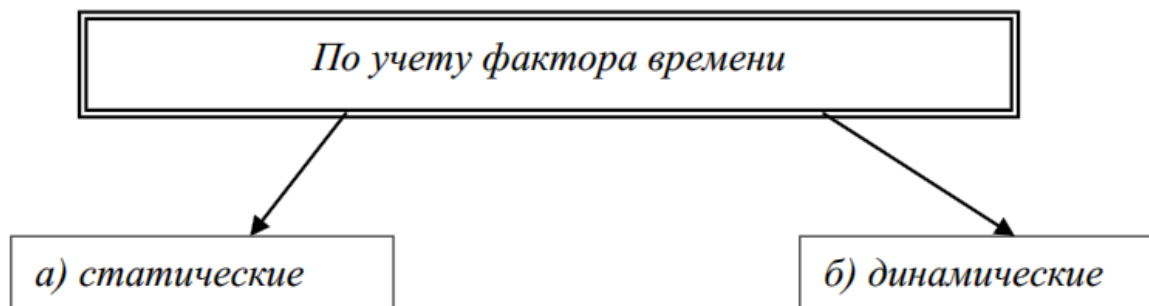


Рисунок 6 – Классификация задач математического программирования

В задачах а) моделирование и принятие решений осуществляются в предположении о независимости от времени элементов модели в течение периода времени, на который принимается планово – управленческое решение. В случае б) необходимо учитывать фактор времени.

4)

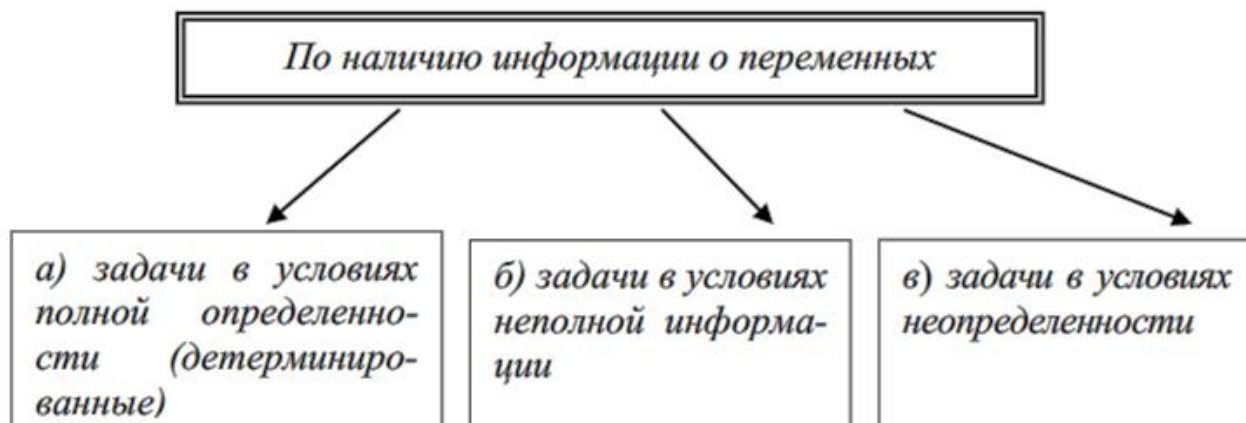


Рисунок 7 – Классификация задач математического программирования

В задачах б) отдельные элементы являются вероятностными величинами, однако известны или дополнительными статистическими исследованиями могут быть установлены их законы распределения. В случае в) можно сделать предположение о возможных исходах случайных элементов, но нет возможности сделать вывод о вероятностях исходов.

5)

исполнителям, при размещении заказов между исполнителями, при определении наилучшего ассортимента выпускаемой продукции, при планировании грузопотоков, определении плана товарооборота и его распределении; в задачах развития и размещения производительных сил, баз и складов систем обращения материальных ресурсов и т. д. Особенно широкое применение методы и модели линейного программирования получили при решении задач экономии ресурсов, производственно-транспортных и других задач [27].

Линейное программирование характеризует линейные взаимосвязи элементов рассматриваемой системы. Однако при более глубоком исследовании в ряде задач появляются и связи нелинейного характера, когда с изменением одного элемента другие изменяются непропорционально первому. Поэтому вслед за разработкой моделей линейного программирования начались интенсивные исследования нелинейных моделей. Задачи математического программирования, в которых целевая функция $f(X)$ и (или) хотя бы одна из функций системы ограничений $\varphi_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$ нелинейна, являются предметом изучения раздела математического программирования с названием нелинейное программирование (НЛП). В частности, если указанные функции обладают свойствами выпуклости, то полученная задача является задачей выпуклого программирования. Методы и модели нелинейного программирования могут применяться при решении перечисленных выше задач, когда хотя бы одна из функций $f(X)$, $\varphi_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$ нелинейна.

Если, исходя из содержательного смысла задачи, на все или некоторые переменные x_j наложено условие дискретности, например целочисленности ($x_j = 0, 1, 2, \dots$), то такие задачи рассматриваются в разделе математического программирования, называемом дискретным, в частности целочисленным (ЦП) программированием. Методами ЦП решается широкий круг задач оптимизации с неделимостями, комбинаторного типа, с логическими условиями, с разрывной целевой функцией и т. д., в частности, задачи выбора (о назначениях), о

контейнерных перевозках (о рюкзаке), о маршрутизации (коммивояжера), теории расписаний, комплектных поставок и комплектования и т. п [28].

Если параметры целевой функции и (или) системы ограничений изменяются во времени или целевая функция имеет аддитивный либо мультипликативный вид, или сам процесс выработки решения имеет многошаговый характер, то такие задачи решаются методами динамического программирования (ДП). Методами ДП могут решаться задачи перспективного и текущего планирования, управления производством, поставками и запасами в условиях изменяющегося спроса, распределения ограниченных ресурсов, в частности размещения капитальных вложений, замены оборудования и т. д.

В перечисленных выше разделах математического программирования предполагается, что вся информация о протекании процессов заранее известна и достоверна. Такие методы оптимизации называются детерминированными или методами обоснования решений в условиях определенности. Если параметры, входящие в функцию цели, или ограничения задачи являются случайными, недостоверными величинами или если приходится принимать решения в условиях риска, неполной или недостоверной информации, то говорят о проблеме стохастической оптимизации, а соответствующий раздел называется стохастическим программированием (СП). К нему в первую очередь следует отнести методы и модели выработки решений в условиях конфликтных ситуаций (математическая теория игр), в условиях неполной информации (экспертные оценки), в условиях риска (статистические решения) и др [29].

Если функции $f(x)$ и $\varphi_i(x_1, x_2, \dots, x_n), i=(1, m)$ зависят от параметров, то получаем задачу параметрического программирования.

Если точный оптимум найти алгоритмическим путем невозможно из-за чрезмерно большого числа вариантов решения, то прибегают к методам эвристического программирования, которые позволяют существенно сократить просматриваемое число вариантов и найти если не оптимальное, то достаточно хорошее, удовлетворительное с точки зрения практики решение.

					270404.2017.382 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		30

Позднее появились другие типы задач, учитывающих специфику целевой функции и системы ограничений, в связи с чем возникли дробно-линейное, блочное, сетевое (потокосное), многоиндексное, булевское, комбинаторное и другие типы программирования.

Отметим, наконец, что реальные ситуации настолько сложны, что нередко приходится одновременно учитывать комплекс целей, стоящих перед моделируемым объектом. Это приводит к нескольким целевым функциям, которые должны принимать экстремальные значения. Например, дать продукции больше, высокого качества и с минимальными затратами. Задачи, где находят решение по нескольким целевым функциям, относятся к векторной оптимизации – это так называемые многокритериальные задачи.

Из перечисленных методов математического программирования наиболее распространенными и разработанными являются линейное и динамическое программирование. В рамки этих методов укладывается широкий круг задач математического программирования [30 – 33].

2.2 Экономический критерий оптимизации работы печи

При интенсификации одновременно изменяются два параметра – производительность и расход топлива. Для оценки режима работы необходим обобщенный критерий оптимизации, включающий эти параметры, которым может быть только экономический показатель. Поэтому в качестве критерия предлагается использовать прибыль D , определяемую как разность денежных средств, полученных при реализации выпущенной за единицу времени продукции, к затратам на ее производство.

При сравнении различных вариантов режимов работы цементной вращающейся печи более удобно использовать не значение прибыли D , а ее изменение по сравнению с базовым вариантом:

					270404.2017.382 ПЗ ВКР	Лист
						31
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

$$\Delta D = D - D_{\text{баз}}, \quad (4)$$

где ΔD – изменение прибыли;

D – прибыль;

$D_{\text{баз}}$ – базовый вариант прибыли.

Наилучший вариант будет соответствовать максимальной величине этого показателя.

Задача интенсификации процесса обжига путем изменения теплового режима работы вращающейся печи будет заключаться в определении условий, при которых достигается наименьшая себестоимость, с учетом соблюдения заданных технологических условий. При этом расчеты необходимо проводить на основе базового варианта, соответствующего известному режиму работы печи [34].

2.3 Изменение характеристик вращающейся печи

Для исследования влияния теплового режима процесса обжига на производительность рассматривалась печь мокрого способа производства размером 4,5 x 170 м с колосниковым холодильником. В качестве базового варианта приняты следующие исходные данные (таблица 3) [35]:

Таблица 3 – Исходные данные

Параметр	Значение
Производительность, т/ч	50
Температура отходящих газов, °С	200
Температура воздуха, топлива и шлама, °С	0
Температура возвращаемого пылеуноса, °С	50
Время одного оборота, с	45

Расход условного топлива на обжиг 219,7 кг/т. В качестве экономического критерия использовалось изменение прибыли ΔD .

2.4 Изменение температуры отходящих газов

Увеличение температуры отходящих газов $T_{ог}$ приводит к увеличению расхода топлива, а значит, к повышению теплонапряжения в горячей части печи. В холодной части печи температурный напор также возрастает. Производительность печи в результате этого увеличивается. Вследствие этого, несмотря на увеличение абсолютного расхода топлива, удельный расход топлива снижается.

Оптимизируем температуру отходящих газов в зоне, изменяя показатель температуры от 180 °С до 240 °С, с целью уменьшения себестоимости продукции.

Используем следующую целевую функцию:

$$F(x) = П \cdot a_1 - РТ \cdot a_2 \rightarrow \max, \quad (5)$$

где П – функция производительности;

РТ – функция расхода топлива;

a_1 – стоимость 1 т извести в руб.;

a_2 – стоимость топлива.

Имея экспериментальные данные, получим зависимость производительности от температуры отходящих газов.

Таблица 4 – Экспериментальные данные по производительности [36]

Параметр	Значение параметра			
Производительность, т/ч	42	42,5	44,8	48
Температура отходящих газов, °С	180	200	220	240

Построим график зависимости производительности от температуры отходящих газов.

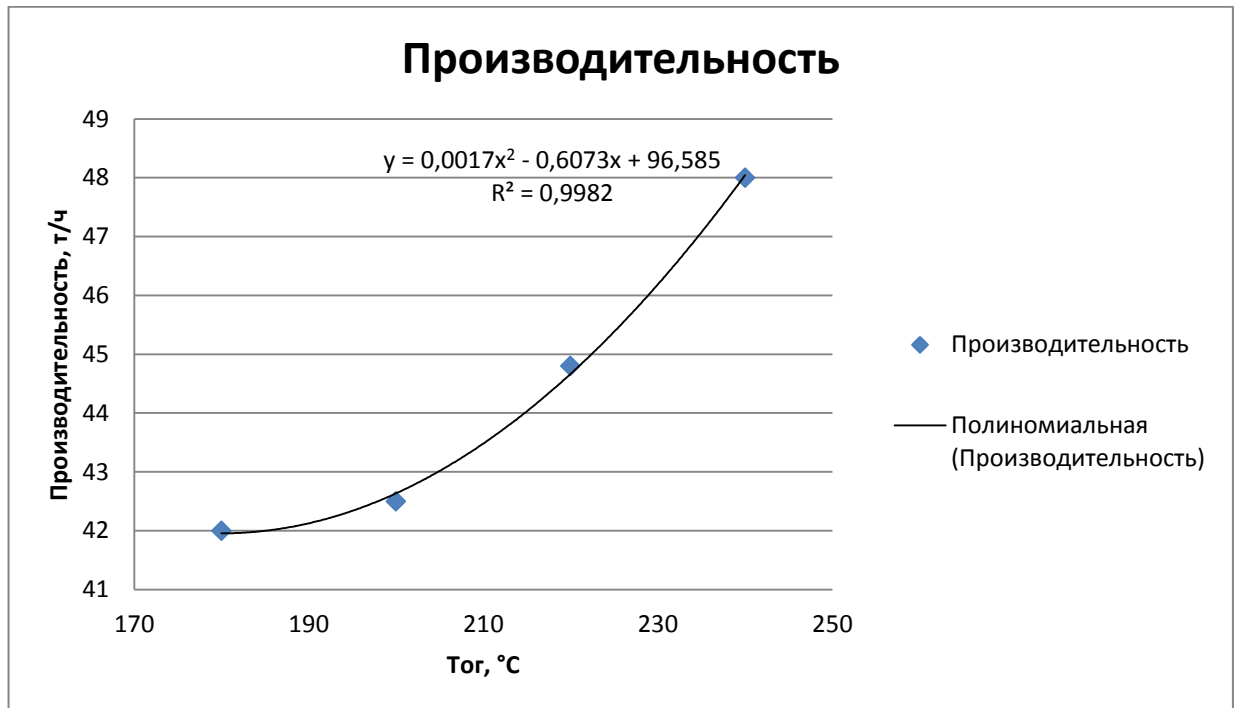


Рисунок 10 – Зависимость производительности от температуры отходящих газов

Полученная зависимость:

$$П = 0,0017 \cdot T_{ог}^2 - 0,6073 \cdot T_{ог} + 96,585. \quad (6)$$

При этом величина достоверности аппроксимации составляет 0,9982.

Также имея экспериментальные данные, получим зависимость расхода топлива от температуры отходящих газов.

Таблица 5 – Экспериментальные данные по расходу топлива

Параметр	Значение параметра			
	Расход топлива, т/ч	226	216	209
Температура отходящих газов, °C	180	200	220	240

Построим график зависимости расхода топлива от температуры отходящих газов.

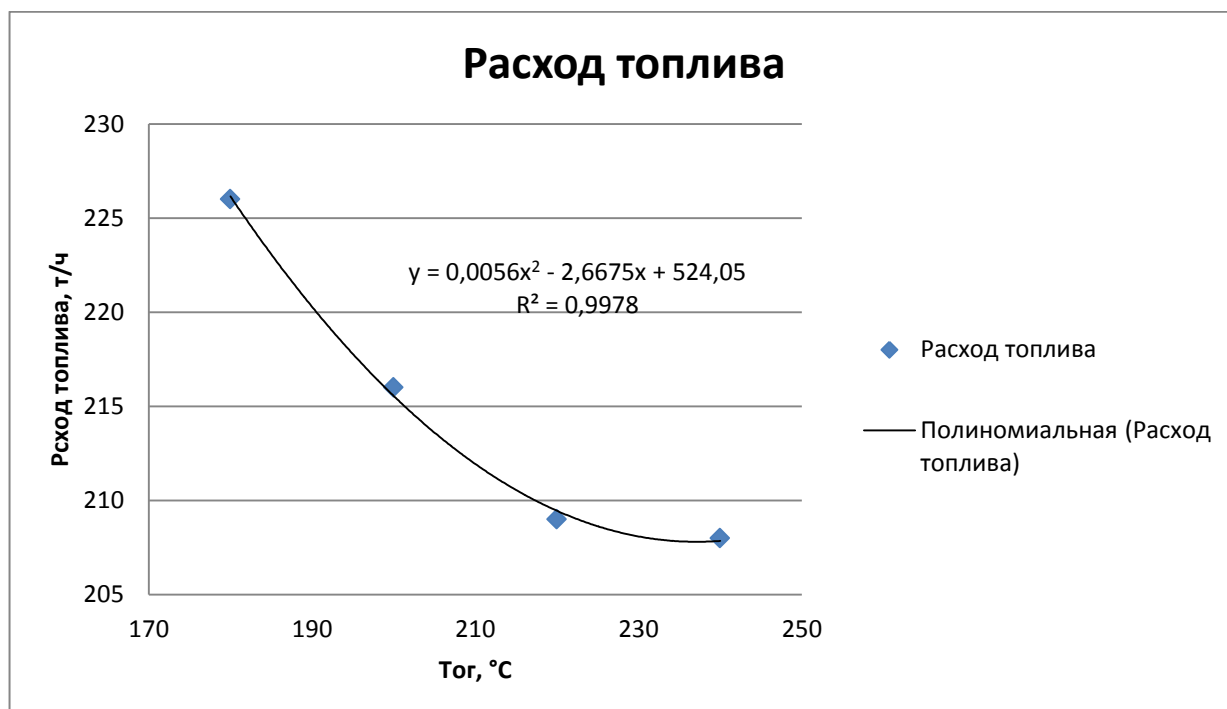


Рисунок 11 – Зависимость расхода топлива от температуры отходящих газов

Полученная зависимость:

$$PT = 0,0056 \cdot T_{ог}^2 - 2,6675 \cdot T_{ог} + 524,05. \quad (7)$$

При этом величина достоверности аппроксимации составляет 0,9978.

Тогда целевая функция примет вид:

$$F(x) = (0,0017 \cdot T_{ог}^2 - 0,6073 \cdot T_{ог} + 96,585) \cdot 4500 - (0,0056 \cdot T_{ог}^2 - 2,6675 \cdot T_{ог} + 524,05) \cdot 219,7 \rightarrow \max, \quad (8)$$

Ограничения на технологические параметры:

$$\left\{ \begin{array}{l} 0,0017 \cdot T_{ог}^2 - 0,6073 \cdot T_{ог} + 96,585 \geq 42 \\ 0,0017 \cdot T_{ог}^2 - 0,6073 \cdot T_{ог} + 96,585 \leq 48 \\ 0,0056 \cdot T_{ог}^2 - 2,6675 \cdot T_{ог} + 524,05 \geq 209 \\ 0,0056 \cdot T_{ог}^2 - 2,6675 \cdot T_{ог} + 524,05 \leq 224 \\ T_{ог} \geq 180 \\ T_{ог} \leq 240 \end{array} \right. , \quad (9)$$

			Ограничения	
Целевая функция, руб:	D	155676,2		
Изменяемый параметр, °C:	T _{ог}	216,5867	180	240
Стоимость изготавливаемой продукции, руб:	a1	201593,5		
Стоимость топлива, затраченного на изготовление продукции, руб:	a2	45917,27		
Производительность, т/ч:	П	44,79856	42	48
Расход топлива, т/ч:	PT	208,9998	209	224

Рисунок 12 – Реализация оптимизации температуры отходящих газов

Построим график зависимости стоимости производимой продукции от температуры отходящих газов и стоимости топлива на производимую продукцию от температуры отходящих газов.

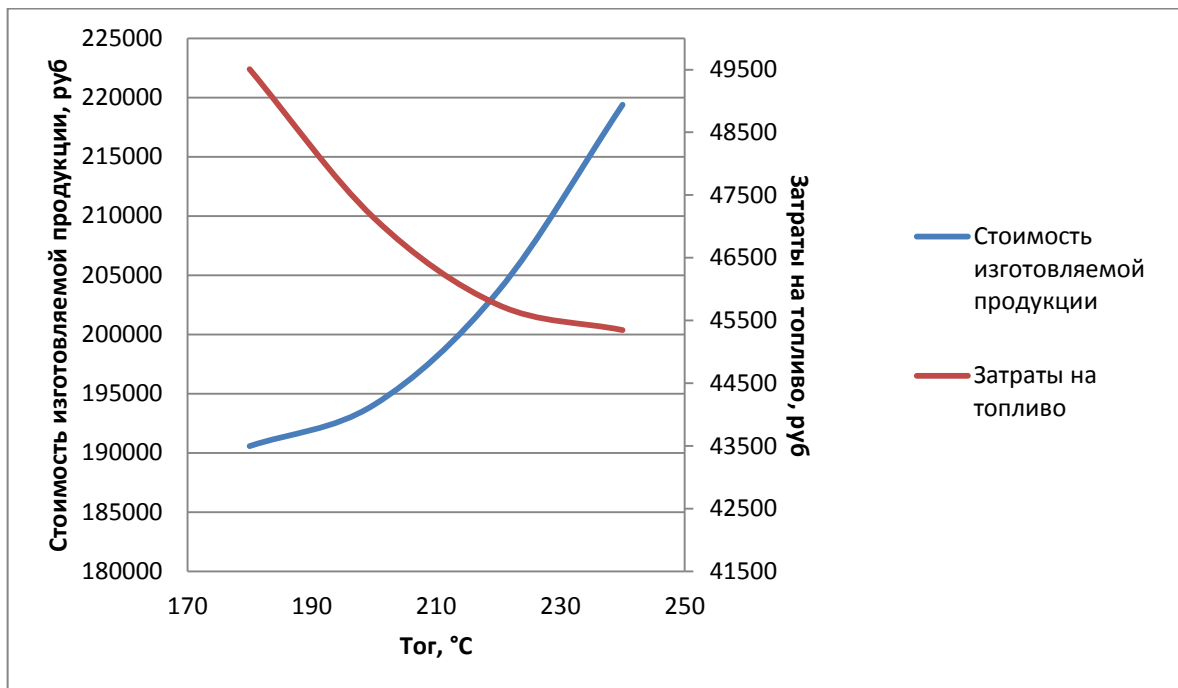


Рисунок 13 – Зависимости стоимости производимой продукции от температуры отходящих газов и стоимости топлива на производимую продукцию от температуры отходящих газов

Построим график прибыли от температуры отходящих газов.

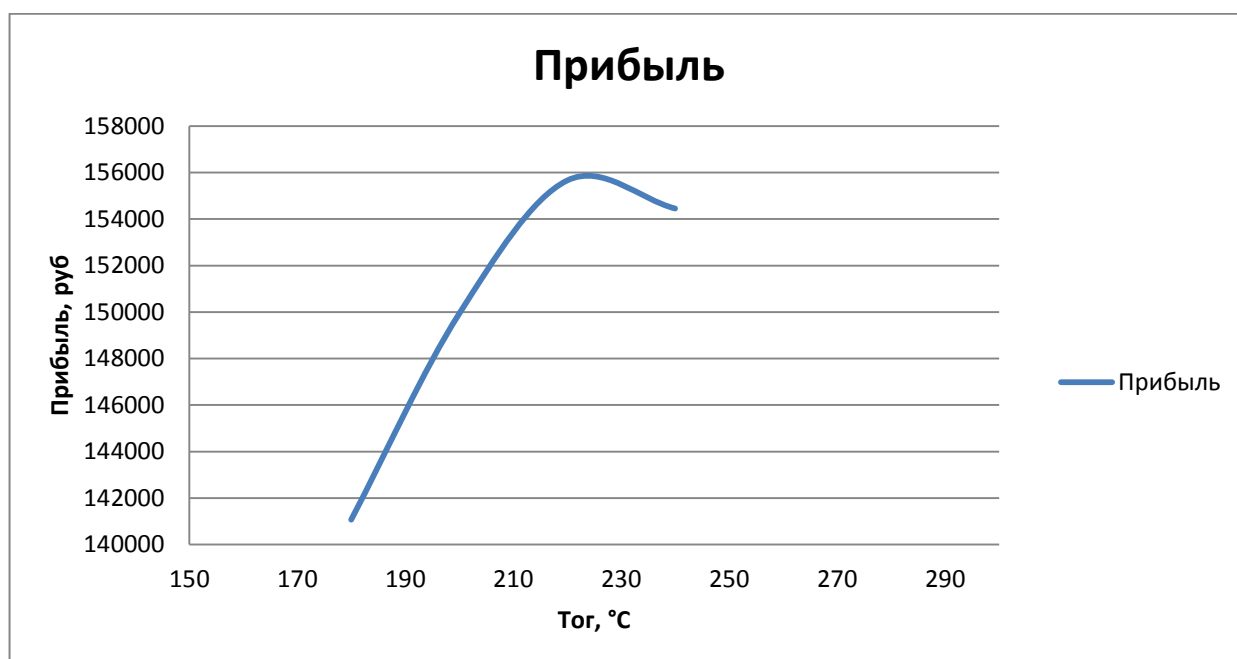


Рисунок 14 – Зависимость прибыли от температуры отходящих газов

3 АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОБЖИГА И УПРАВЛЕНИЕ ОБЖИГОМ ВО ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧАХ

3.1 Понятие АСУ

Автоматизированная система управления (АСУ) – комплекс аппаратных и программных средств, а также персонала, предназначенный для управления различными процессами в рамках технологического процесса, производства, предприятия. АСУ применяются в различных отраслях промышленности, энергетике, транспорте и т. п. Термин «автоматизированная», в отличие от термина «автоматическая», подчёркивает сохранение за человеком-оператором некоторых функций, либо наиболее общего, целеполагающего характера, либо не поддающихся автоматизации.

Автоматизированные системы управления включают разнообразные элементы, играющие различную роль в решении задач управления. Выделение подсистем, в свою очередь, осуществляется в соответствии с ролью составляющих их элементов в решении собственно задач управления предприятием и обуславливает формирование двух типов подсистем: функциональных и обеспечивающих [37].

					270404.2017.382 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		38

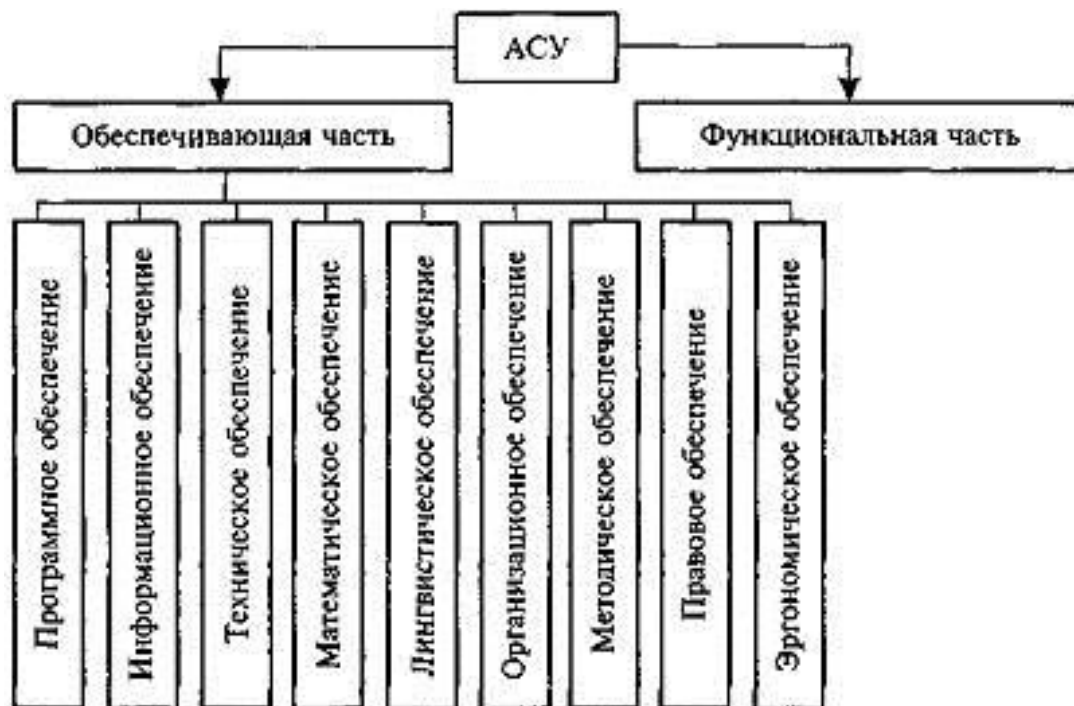


Рисунок 15 – Подсистемы АСУ

3.1.1 Функциональные подсистемы

В совокупности они дают модель функционирования управляемой системы. По производственному признаку выделяются следующие типы моделей [38]:

- управления научно-исследовательскими и опытно-конструкторскими работами;
- управления формированием производственной структуры данного объекта; управления производством основной продукции;
- управления вспомогательно-обслуживающими производствами данного объекта;
- управления транспортными процессами;
- управления производственными мощностями и процессом использования основных фондов;
- управления материально-техническим обеспечением; управления трудовыми ресурсами; управления сбытом продукции;
- управления финансами и денежными средствами данного объекта;

– управления развитием и функционированием самой управляющей системы.

Комплекс из моделей обоих типов образует функциональную подсистему.

Составные элементы функциональных подсистем. Функциональная подсистема, состоящая из комплекса моделей, дополняется следующими составными частями:

– инструкциями для персонала (коллектива специалистов) по порядку использования моделей;

– графиками применения отдельных моделей комплекса; положениями по поведению аппарата управления в различных производственных ситуациях (при различных альтернативных результатах применения моделей, а также в не предвиденных моделями событиях);

– положениями взаимодействия комплекса моделей с другими элементами АСУ;

– условиями взаимодействия комплекса моделей системы управления деятельностью данного объекта с вышестоящими органами управления.

3.1.2 Обеспечивающие подсистемы

Обеспечивающие подсистемы АСУ включают набор элементов, которые обуславливают решение задач управления, т. е. оперирование функциональными подсистемами.

Обеспечивающая часть представляет собой комплекс методов, объединенных в соответствии с их спецификой и обеспечивающих решение задач во всех функциональных подсистемах АСУ [39].

Программное обеспечение АСУ – совокупность системных и прикладных программ, реализующих нормальное функционирование АСУ.

Информационное обеспечение АСУ – совокупность системно-ориентированных данных, описывающих принятый в системе словарь базовых описаний (классификаторы, типовые модели, элементы автоматизации и т.д.), и

					270404.2017.382 ПЗ ВКР	Лист
						40
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

актуализируемых данных о состоянии информационной модели объекта автоматизации (объекта управления) на всех этапах его жизненного цикла (ЖЦ).

Техническое обеспечение АСУ – совокупность средств реализации управляющих воздействий, средств получения, ввода, отображения, использования и передачи данных.

Математическое обеспечение АСУ – совокупность математических методов, моделей и алгоритмов обработки информации, используемых при функционировании системы.

Лингвистическое обеспечение АСУ – совокупность языковых средств для формализации естественного языка, построения и сочетания информационных единиц, используемых в АС при функционировании системы для общения с КСА.

Эргономическое обеспечение АСУ – совокупность взаимосвязанных требований, направленных на согласование технических характеристик КСА, параметров рабочей среды на рабочем месте с психологическими, психофизиологическими, антропометрическими, физиологическими характеристиками и возможностями человека-оператора [40 – 42].

3.1.3 Организационно – функциональные подсистемы

В АСУ элементы функциональных и обеспечивающих подсистем распределяются по отдельным подразделениям предприятий. Положение отдельных элементов в иерархической организационной структуре обуславливает выделение в АСУ третьего типа подсистем – организационно – функциональных. В настоящее время организационно –функциональные подсистемы АСУ, формируемые по производственным подразделениям, представляются следующими службами:

- конструкторско-технологическими;
- планово-экономическими;
- производственно-диспетчерскими;
- материального обеспечения производства;

					270404.2017.382 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		41

- регулирования трудовыми ресурсами;
- поддержания основных фондов;
- бухгалтерского учета;
- сбыта продукции;
- финансовых расчетов;
- обеспечивающими процесс обработки данных и обслуживание других подразделений.

Достижение целей осуществляется посредством решения следующих задач:

- Улучшение качества регулирования;
- Повышение коэффициента готовности оборудования;
- Улучшение эргономики труда операторов процесса;
- Обеспечение достоверности информации о материальных компонентах, применяемых в производстве (в т.ч. с помощью управления каталогом);
- Хранение информации о ходе технологического процесса и аварийных ситуациях.

Современная система автоматического управления технологическим процессом представляет собой сложный комплекс оборудования и программного обеспечения. Как правило, различают два уровня АСУ ТП: верхний и нижний [43].

Нижний уровень состоит из системы контроллеров, которые собирают информацию обо всех технологических процессах, которые происходят на производстве, и передают на верхний уровень.

Верхний уровень АСУ ТП осуществляется на серверах и рабочих станциях. Он представлен специализированным ПО, в обязанности которого входит обеспечить обратную связь элементами нижнего уровня АСУ ТП и диспетчером.

Порой нижний уровень АСУ ТП разделяют на сам нижний уровень, а так же средний уровень. Нижний уровень реализуется на микроконтроллерах, а средний на контроллерах. Но, не смотря на это, обычно между ними не делают различия.

Нижний уровень АСУ ТП обеспечивает контроль параметров технологических процессов и непосредственное управление оборудованием.

Кроме этого, именно на нижнем уровне реализуются такие возможности современных АСУ ТП, как автоматический пуск и остановка оборудования с целью предотвращения аварийных ситуаций.

Верхний уровень автоматической системы управления обеспечивает широкие возможности визуализации и взаимодействия системы АСУ ТП с человеком (диспетчером или оператором).

В первую очередь программное обеспечение и оборудование верхнего уровня реализует информационные функции (сбор, обработку, хранение и выдачу информации по требованию оператора). При этом в систему поступает не только информация о параметрах технологических процессов, и моментах срабатывания автоматики безопасности, но также информация о внешнем вмешательстве персонала в работу установки.

Кроме этого, с помощью программного обеспечения верхнего уровня осуществляется дистанционное управление оборудованием БСУ и настройка параметров системы управления.

Субстратом визуализации технологических процессов, которые происходят на предприятии, является система компьютеров и специализированных мониторов. На мониторах отображаются изменения параметров и этапы срабатывания оборудования.

Количество параметров, которые выводятся на мониторы, частота изменения данных на мониторах и другие параметры программируются индивидуально, в зависимости от потребностей конкретного производства.

Разработка программного обеспечения верхнего и нижнего уровней АСУ ТП представляет собой комплексный процесс, который начинается на этапе изучения объекта автоматизации.

В процессе разработки учитываются все необходимые параметры, возможные величины их изменения и структура логических цепочек

					270404.2017.382 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		43

технологических процессов. Затем происходит сложный процесс комплексной интеграции программного обеспечения верхнего и нижнего уровня АСУ ТП, в результате чего обе системы функционируют как единое целое [44].

3.2 Автоматизация технологического процесса обжига во вращающихся печах

Производство цемента является непрерывным технологическим процессом, для которого нежелательны остановки любого из агрегатов, для вращающейся печи такая остановка вызывает дополнительный расход топлива, связанный с последующим запуском печи, поэтому данную процедуру проводят как можно реже, при ремонте корпуса и обновлении футеровки внутри корпуса. Целью производства при этом является получения цемента заданного качества с определенной производительностью. Возможным и желательным является механизация и автоматизация производства цемента, при этом возникает задача организации слаженной работы технологического оборудования. Полная автоматизация трудно осуществима, поскольку агрегаты входящие в технологический процесс, являются сложными с точки зрения протекающих процессов. Для печи обжига трудность автоматизации заключается в большом количестве протекающих химико – физических процессов и протяженностью в пространстве. Однако развитие микропроцессорных средств автоматизации и приборов контроля технологических параметров позволяет в настоящее время решать задачи автоматического управления и для таких сложных объектов, как вращающаяся цементная печь.

Различают следующие методы автоматизированного контроля и управления производством в зависимости от целей управления и возможности автоматизации [45]:

- автоматизированный контроль технологического процесса;

					270404.2017.382 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		44

- дистанционное диспетчерское управление технологическими процессами и агрегатами;
- автоматическое регулирование и автоматизированное управление.

Проблемы контроля процесса обжига состоят в следующих технологических операциях: приготовление однородного сырья заданного качества, непрерывная подача шлама в печь и дозирование компонентов, обеспечение подачи заданного количества топлива и воздуха для процесса обжига. Для контроля и управления указанными операциями измеряют влажность, плотность и тонкость помола шлама, температуру материала, давление, состав и температуру газов.

Дистанционное диспетчерское управление технологическим процессом и агрегатами подразумевает контроль технологических процессов и оборудования по приборам пульта оператора, которые установлены на щите, а также дает возможность производить действия по управлению технологическими процессами: закрывать и открывать задвижки на подаче шлама и топлива, изменять положение шиберов дымососов для изменения тягодутьевого режима печи, управлять работой приводов вращающихся цементную печь.

Автоматическое регулирование и автоматизированное управление служит для автоматического поддержания технологических величин в заданных пределах, тем самым позволяет поддерживать рациональные режимы работы оборудования и технологических агрегатов.

Применение современных технических средств автоматизации и приборов контроля технологических величин, и разработка на их основе автоматизированных систем управления процессом обжига с применением методов теории управления, увеличивает объем производимой продукции, повышает энергоэффективность производства, улучшая тем самым конкурентоспособность предприятия [46].

Структурная схема автоматизации цементной обжиговой печи изображена на рисунке 16.



Рисунок 16 – Структурная схема автоматизации цементной обжиговой печи

На рисунке объектом управления является цементная обжиговая печь. В блок оптимизации вводятся желаемые оптимизируемые технологические параметры ($T_{ог}$). Также частично информация о значении этого параметра поступает с выхода печи. Далее мастер может согласиться или скорректировать решение системы. Далее полученные оптимизируемые параметры поступают на вход объекта управления. Блок R включает вся автоматическую настройку ПИ-регуляторов и компенсаторов, для их автоматической настройки подаются выходные значения технологических параметров с объекта управления и оптимизируемый технологический параметр.

3.3 Представление математической модели цементной печи обжига клинкера как модели многосвязного объекта

Вращающаяся печь по обжигу цементного клинкера это очень сложный объект, в котором огромное количество входных и выходных параметров, а так же параметров которые взаимодействуют и влияют друг на друга, т.к. внутри печи происходят сложные физико-химические превращения и процессы [47].

Существуют так называемые многосвязные объекты, это такие объекты которые имеют несколько входов и выходов, и при этом все параметры взаимосвязаны рисунок 17, а. Так же наряду с ними существуют и односвязные объекты, это такие объекты в которых нет перекрестных связей и один входной параметр может влиять только на один выходной параметр рисунок 17, б. Однако

					270404.2017.382 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		46

Продолжение таблицы 6

Сигналы печи	Расшифровка обозначений
$T_{вт}, P_{вт}$	Температура и давление вторичного воздуха
$Q_{шл}$	Количество подаваемого шлама
$t_{об}$	Время оборота печи

Также необходимо учитывать, что параметры и сам холодильник очень сильно влияют на обжиг клинкера и непосредственно на сам режим работы печи [49]. АА оператору при этом необходимо одновременно управлять и тем и другим, а значит, есть все обоснования считать печь и холодильник как единый объект управления.

Главная задача холодильника не только в том, чтобы охлаждать клинкер, но и для постоянного притока горячего воздуха в печь. Все это обеспечивается за счет поддержания постоянной температуры вторичного воздуха, а так же разряжения в головке печи. Для реализации необходимо использовать такие технологические параметры как температура вторичного воздуха, давление под первой камерой, температура клинкера, разрежение в головке печи, избыточного воздуха. А с помощью изменений частоты колебаний колосниковых решеток, а так же положение шиберов вентиляторов общего дутья можно осуществлять управление [50].

Но не смотря на все это при различных исследованиях, которые служат для разработки систем управления разграничивают обжиговую печь и холодильник, как два отдельные объекта управления. Так для управления обжигом используется технологические параметры только печи, потому для получения математической модели можно использовать только параметры печи, которые будут отражать процессы происходящие только в печи, но при этом примем что $T_{вт}$ и $P_{вт}$ стабилизируются оператором печи самостоятельно, либо для этого используется отдельный контур.

Далее рассмотрим, какие и как технологические параметры влияют на процесс обжига цементного клинкера. Главная задача машиниста обеспечить и проследить за готовностью обжига в каждой зоне, учитывая, что основное количество теплоты должно отдаваться зоне сушки и подогрева, поэтому он должен одному правилу – что печь необходимо заранее готовить, причем с холодного конца. Необходимо знать по каким параметрам оценивается материал в зоне сушки. Это температура отходящих газов и в зоне подогрева, разрежение в пыльной камере. Как говорилось ранее, печь это сложный объект со взаимосвязанными переменными, одни из эти переменных температура отходящих газов и разрежение в пыльной камере. Если газодинамическое сопротивление печи увеличится без открытия дымососов, то это говорит об увеличении разрежения в пыльной камере, все это связано с активным налипанием шлама на цепях и в дальнейшем будет сопровождаться снижением температуры отходящих газов. И наоборот, если же температура сама будет подниматься, то это значит, что количество шлама на цепях снижается, и значит, что происходит снижение разрежения в пыльной камере.

Так нам необходима оценка о степени обжига клинкера в зоне спекания, ее нам может дать нагрузка на главном приводе печи. Если же материал перегрет, то будет увеличиваться наклон, чтобы увеличить скорость прохождения материала, т.к. будет увеличен момент сопротивления и это в свою очередь увеличит нагрузку на двигатель.

Еще один параметр, оценка которого необходима – это степень подготовки материала в зоне декарбонизации. Ее дать может состав отходящих газов. Если будет происходит увеличение неподготовленного материала в зоне декарбонизации, то это говорит о том, что происходит увеличение CO_2 и как правило его объема в отходящих газах. Объем отходящих газов на время сушки остается неизменным, поэтому увеличение такого параметра как CO_2 приводит к уменьшению так называемого «засасываемого» из холодильника вторичного

					270404.2017.382 ПЗ ВКР	Лист
						49
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

воздуха, и как следствие снижение другого показателя – содержания O_2 в отходящих газах.

Еще одной очень важной переменной для управления процесса является температура вторичного воздуха. Нам уже известно, что количество и состав сырья на неизменны, поэтому так происходит, что температура вторичного воздуха совершает наибольшее возмущение в режим работы печи. Именно поэтому допустим снижая температуру на $50\text{ }^\circ\text{C}$, величина теплообмена уменьшится на 17% , а это в свою очередь приведет к увеличению расхода топлива и снижению другого важного фактора – производительности.

Таким образом, выделены следующие переменные, отражающие процесс обжига: $T_{ог}$, $P_{ог}$ – температура и давление отходящих газов; CO_2 - концентрация углекислого газа в отходящих газах; T_1 , T_2 – температура материала в зоне подогрева и кальцинирования; $I_{нагр}$ – нагрузка на главном приводе печи; $T_{вт}$, $P_{вт}$ – температура и давление вторичного воздуха.

Таким образом печь обжига можно представить как объект с двумя входами и несколькими выходами, изображенный на рисунке 18.

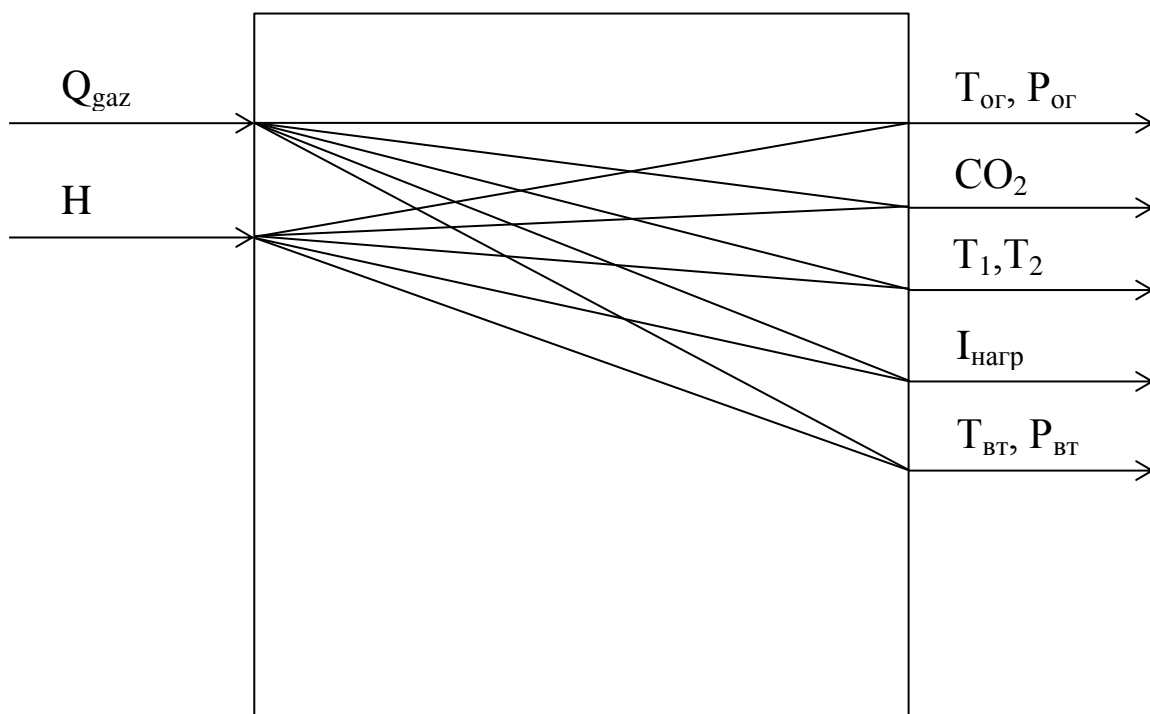


Рисунок 18 – Представление печи обжига как модели многосвязного объекта

Бывают критические ситуации, когда изменение процесса обжига резко снижается, например неподготовленный материал будет слишком близко к зоне спекания, а имеющееся возмущение не удастся скомпенсировать за счет дымососов и расхода газа. Тогда оператор, работая вручную, уменьшает расход шлама и ставит печь на так называемый тихий ход, чтобы материал при низкой его скорости прохождения в печи смог обжечься. В данном случае в представлении печи как многосвязный объект можно дополнить двумя управляющими сигналами, а именно скорость вращения печи и расход шлама. Данное представление изображено на рисунке 19.

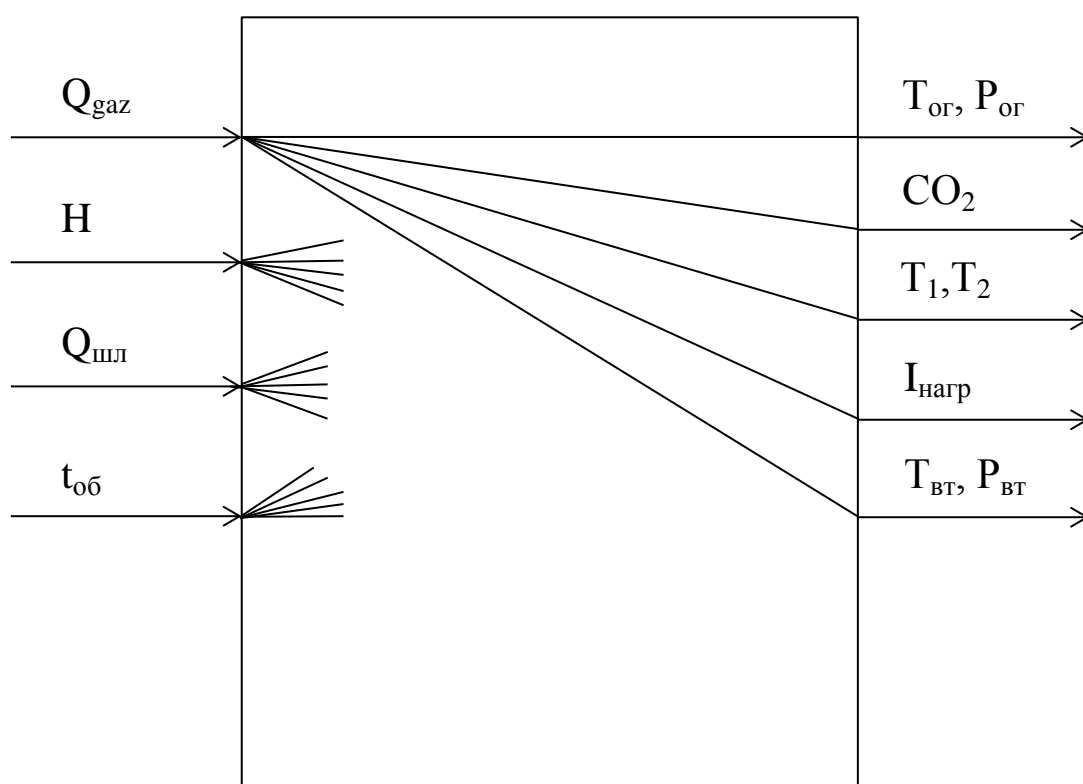


Рисунок 19 – Представление печи обжига как модели многосвязного объекта в критическом режиме

Управляемые и управляющие переменные: $Q_{\text{газ}}$ – количество газа (топлива), подаваемого в печь; H_1, H_2 – положение шиберов дымососов; $T_{\text{ог}}, P_{\text{ог}}$ – температура и давление отходящих газов; CO_2 – концентрация углекислого газа в

отходящих газах; T_1, T_2 – температура материала в зоне подогрева и кальцинирования; $I_{нагр}$ – нагрузка на главном приводе печи; $T_{вт}, P_{вт}$ – температура и давление вторичного воздуха; $Q_{шл}$ – количество подаваемого шлама; $t_{об}$ – время оборота печи.

3.4 Разработка системы управления процессом обжига клинкера

Для разработки и построения автоматических систем для сложных многосвязных объектов применяют следующие подходы, а именно: связанное регулирование и несвязное регулирование. В связанном регулировании применяют многоконтурные системы, и в этом случае внешними компенсаторами и отдельными контурами регулирования будут компенсироваться перекрестные связи. А при несвязном регулировании отдельными переменными, идет применение так называемых одноконтурных АСР [51].

Если же будет учитываться только основные каналы регулирования, т.е. когда идет несвязное управление печью, то в данном случае следует рассчитывать регуляторы как для одноконтурных систем. На рисунке 20 изображен пример несвязной систем управления. Данный метод следует применять только тогда, когда влияние перекрестных связей очень слабо, по сравнению с основными связями. Если же ситуация обратная, то качество системы управления может резко ухудшиться, и система вовсе может оказаться неустойчивой из-за влияния контуров друг на друга.

Здесь $W_{Q-T}(s)$ отражает взаимосвязь между входной $Q_{\text{газ}}$ и выходной переменной $T_{\text{ог}}$, $W_{H-\text{CO}_2}(s)$ взаимосвязь между положением шибер дымососа H и содержанием в отходящих газах CO_2 . Передаточные функции $W_{Q-\text{CO}_2}(s)$ и $W_{H-T}(s)$ отражают перекрестные каналы соответственно их обозначениям, также введены регуляторы для прямых $R_{Q-T}(s)$, $R_{H-\text{CO}_2}(s)$ и компенсаторы для перекрестных каналов $R_{Q-\text{CO}_2}(s)$, $R_{H-T}(s)$.

Ниже представлены передаточные функции по каналам управления- количество газа подаваемого в печь ($Q_{\text{газ}}$) и положение шибер дымососа (H_1), для измеряемых сигналов – температура отходящих газов ($T_{\text{ог}}$) и содержание CO_2 :

$$W_{H_1-\text{CO}_2}(s) = \frac{7.76}{21.9s^2+8.6s+1}, \quad (10)$$

$$W_{Q_{\text{газ}}-\text{CO}_2}(s) = \frac{0.019}{0.92s^2+1.149s+1}, \quad (11)$$

$$W_{Q_{\text{газ}}-T_{\text{ог}}}(s) = \frac{0.0098}{19.98s^2+5.423s+1}, \quad (12)$$

$$W_{H_1-T_{\text{ог}}}(s) = \frac{0.00017}{21.37s+1}. \quad (13)$$

Система автоматизированного управления должна удовлетворять следующим требованиям: перерегулирование $< 15\%$, время регулирования < 40 с.

3.6 Расчет компенсаторов

Управление многосвязной системой представляет серьезные сложности, так как изменение в процессе управления одной из координат влечет за собой изменение остальных координат. Для практической управляемости подобной системой необходимо, чтобы изменение управляющего воздействия влияло лишь на выделенные целевые координаты, оставляя неизменными другие. С этой целью необходимо тем или иным способом обеспечить независимое прохождение действия от отдельных управляющих сигналов к соответствующим целевым координатам [52].

В технике этот принцип с достаточной полнотой можно обеспечить для линейных систем, так как сам принцип линейности предполагает суперпозицию различных воздействий. Например, при использовании спектральных и частотных методов анализа сигналы и характеристики линейных стационарных систем на определенных частотах независимы друг от друга, что существенно облегчает конструирование систем управления.

Суть проблемы независимого управления состоит в том, что управление каждым выходом объекта должно осуществляться независимо от других выходов. Для многосвязного объекта это осуществить трудно, так как подача управляющего воздействия на один вход объекта в силу наличия связей в общем случае влечет за собой изменения на всех выходах объекта.

Решение состоит в наложении компенсирующих перекрестных связей на входах объекта управления. Данный метод можно показать на примере двухмерного объекта управления, схема которого представлена на рисунке 23. Здесь $R_{1,2}$, $R_{2,1}$ – компенсирующие связи, которые выбираются из условия независимости управления по каждому каналу.

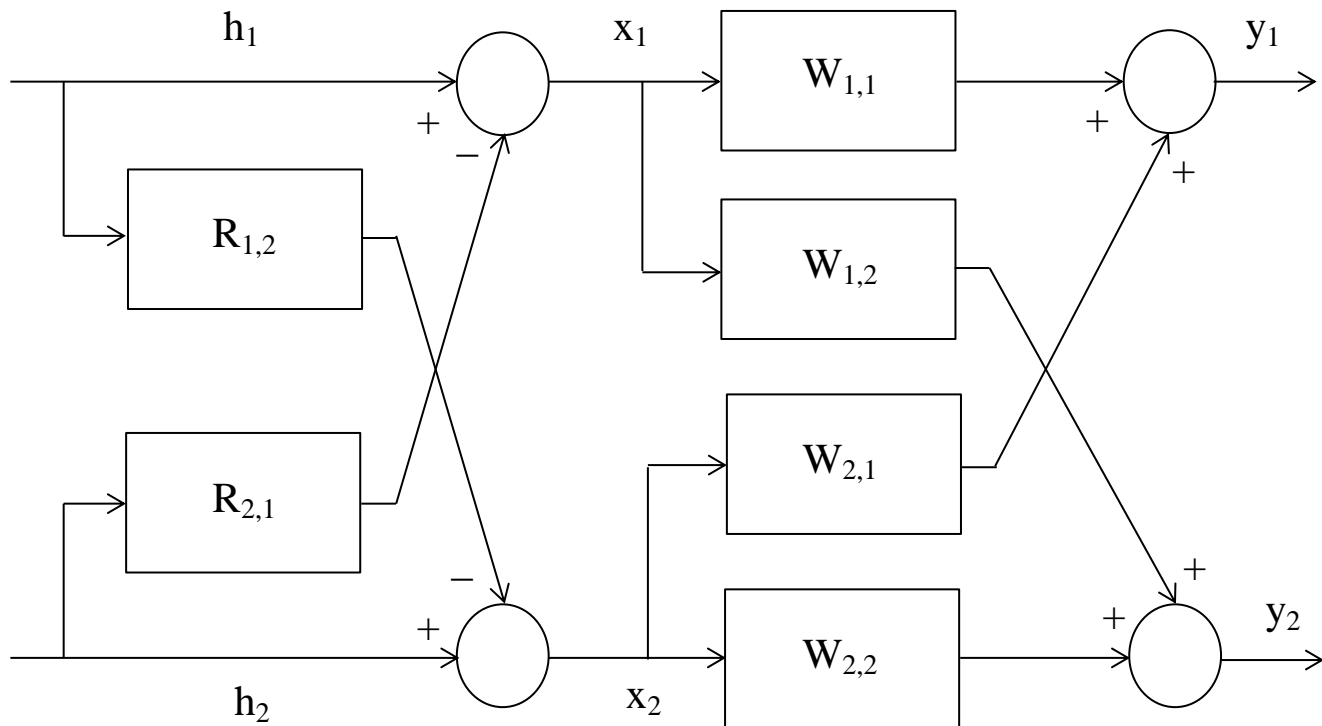


Рисунок 23 – Компенсация перекрестных связей

Так как для линейных систем соблюдается принцип суперпозиции действий от разных источников, то для схемы необходимым условием компенсации перекрестных действий входов объекта управления является выполнение следующих равенств:

$$\begin{cases} R_{1,2} \cdot W_{2,2} = W_{1,2} \\ R_{2,1} \cdot W_{1,1} = W_{2,1} \end{cases}, \quad (14)$$

где $R_{1,2}, R_{2,1}$ – передаточные функции компенсаторов;

$W_{1,1}, W_{1,2}, W_{2,1}, W_{2,2}$ – передаточные функции объекта управления.

Из (12) формально следует:

$$\begin{cases} R_{1,2} = W_{1,2}/W_{2,2} \\ R_{2,1} = W_{2,1}/W_{1,1} \end{cases}, \quad (15)$$

Условия (12) получены на основе двухканальной передачи действий с целью их компенсации. Так, для схемы рисунке 22 по входному воздействию h_1 имеются два канала передачи воздействия: $R_{1,2}W_{2,2}$ и $W_{1,2}$. Аналогично по входному воздействию h_2 имеются два канала передачи: $R_{2,1}W_{1,1}$ и $W_{2,1}$. По каналам $R_{1,2}W_{2,2}$, $R_{2,1}W_{1,1}$ воздействия передаются с отрицательным знаком, а по каналам $W_{1,2}$, $W_{2,1}$ – с положительным. При равенстве переданных действий (12) суммирование их на выходах приводит к компенсации действий.

Имея передаточные функции объекта управления можно рассчитать передаточные функции компенсаторов:

$$R_{1,2}(s) = \frac{W_{Q-CO_2}}{W_{H-CO_2}} = \frac{\frac{0,019}{0,92 \cdot s^2 + 1,149 \cdot s + 1}}{\frac{7,76}{21,9 \cdot s^2 + 8,6 \cdot s + 1}}, \quad (16)$$

$$R_{2,1}(s) = \frac{W_{H-T_{ог}}}{W_{Q-T_{ог}}} = \frac{\frac{0,00017}{21,37 \cdot s + 1}}{\frac{0,0098}{19,98 \cdot s^2 + 5,423 \cdot s + 1}}. \quad (17)$$

3.7 Определение настроек ПИ – регулятора

По основным контурам включены ПИ – регуляторы, настройки по каждому контуру были получены с помощью пакета расширения MATLAB Control System Toolbox. Это пакет для анализа, проектирования и разработки систем автоматического управления. С его помощью можно настраивать параметры регулятора при помощи инструмента автоматической настройки регуляторов [53].

Регуляторы по основным каналам регулирования рассчитывают как для одноконтурных систем. На рисунке 21 для $R_{Q-T}(s)$ настройки будут определяться из одноконтурной системы с передаточной функцией отражающей связь между входной $Q_{газ}$ и выходной переменной $T_{ог}$. А настройки для $R_{H-CO_2}(s)$ будут определяться из одноконтурной системы с передаточной функцией отражающей связь между положением шиберы дымососа H и содержанием в отходящих газах CO_2 .

						270404.2017.382 ПЗ ВКР	Лист
							59
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата			

Настройка для регулятора $R_{Q-T}(s)$:

Листинг настройки регулятора:

```
>> s=tf('s');  
>> sys=0.0098/(19.98*s^2+5.423*s+1)
```

```
sys =
```

```
      0.0098  
-----  
19.98 s^2 + 5.423 s + 1
```

Continuous-time transfer function.

```
>> pidtool(sys)
```

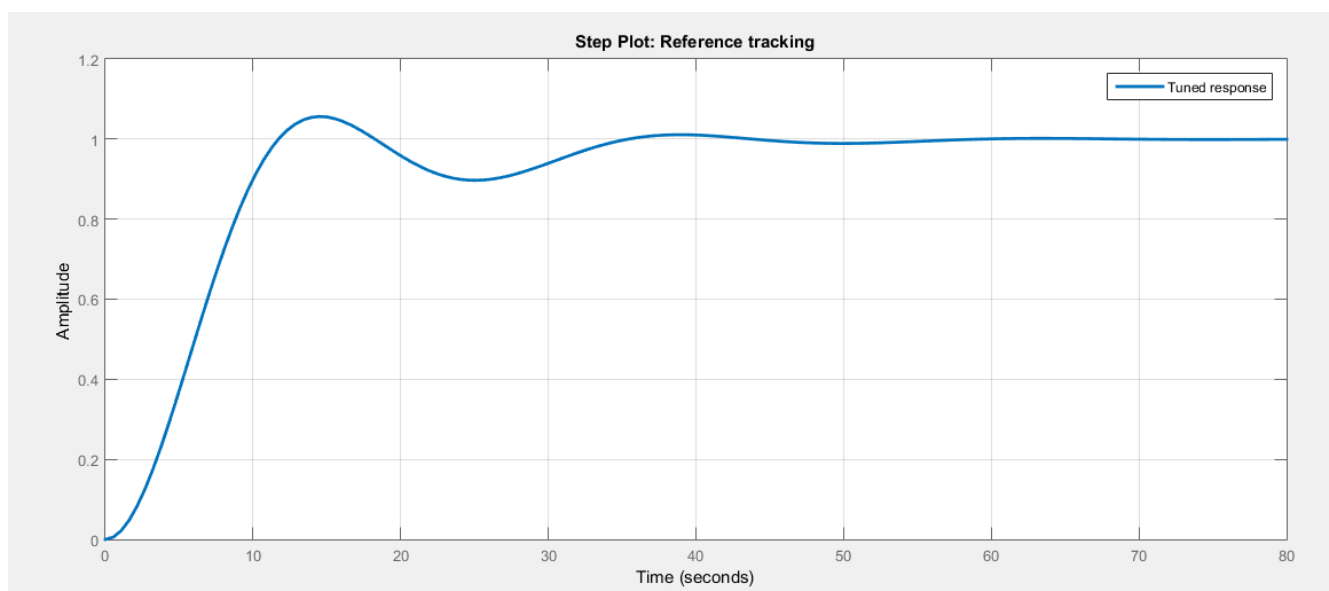


Рисунок 24 – Настройка ПИ-регулятора $R_{Q-T}(s)$

Controller Parameters	
	Tuned
Kp	80.182
Ki	8.1218
Kd	
Tf	

Рисунок 25 – Параметры настройки ПИ-регулятора $R_{Q-T}(s)$

Настройка для регулятора $R_{H-CO_2}(s)$:

Листинг для настройки регулятора:

```
>> s=tf('s');  
>> sys=7.76/(21.9*s^2+8.6*s+1)  
  
sys =  
  
      7.76  
-----  
21.9 s^2 + 8.6 s + 1  
  
Continuous-time transfer function.  
  
>> pidtool(sys)
```

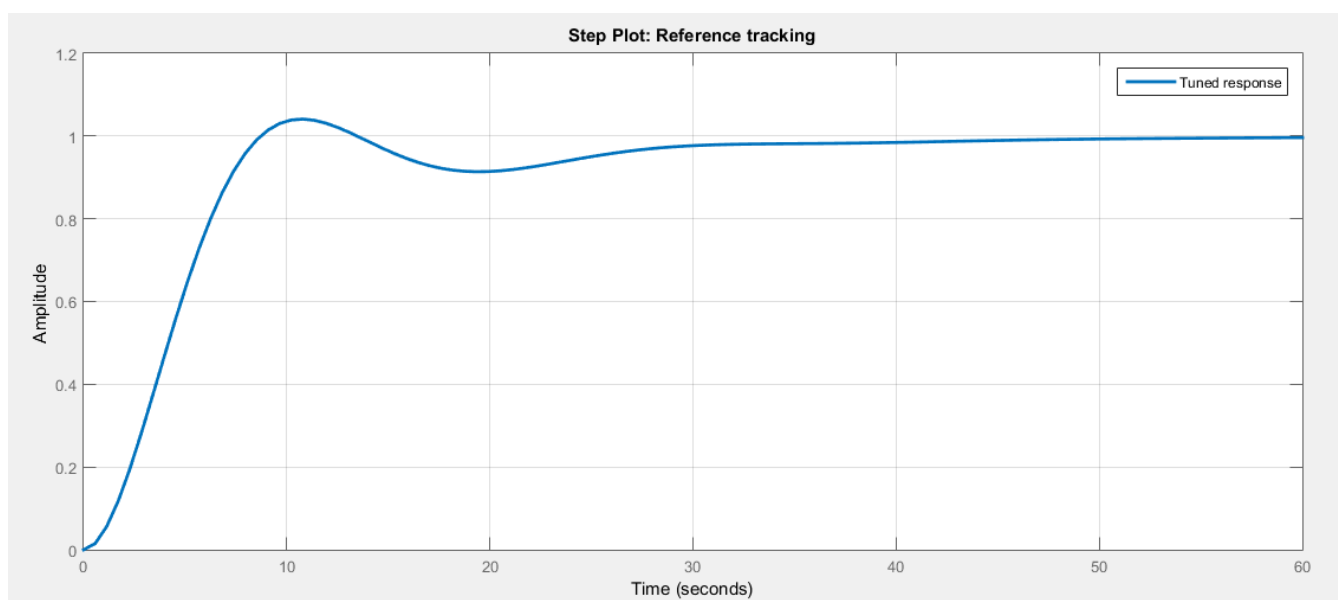


Рисунок 26 – Настройка ПИ-регулятора $R_{H-CO_2}(s)$

Controller Parameters	
	Tuned
Kp	7.0907
Ki	0.12278
Kd	
Tf	

Рисунок 27 – Параметры настройки ПИ-регулятора $R_{H-CO_2}(s)$

3.8 Моделирование системы управления печи обжига клинкера по двум переменным

Система управления была сконструирована в MATLAB среде Simulink (рис.27). По основным контурам включены ПИ-регуляторы. Для регулятора $R_{Q-T}(s)$: $K_p=80$, $K_i=8$; для регулятора $R_{H-CO_2}(s)$: $K_p=7$, $K_i=0,12$. Для перекрестных контуров рассчитаны компенсаторы (16 – 17).

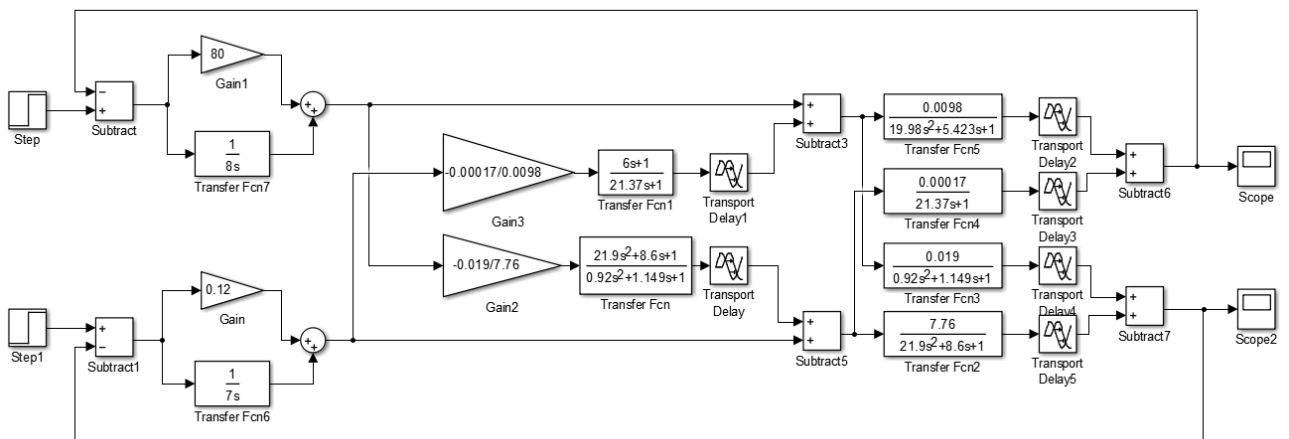


Рисунок 28 – Система управления печью в среде Simulink пакета MATLAB

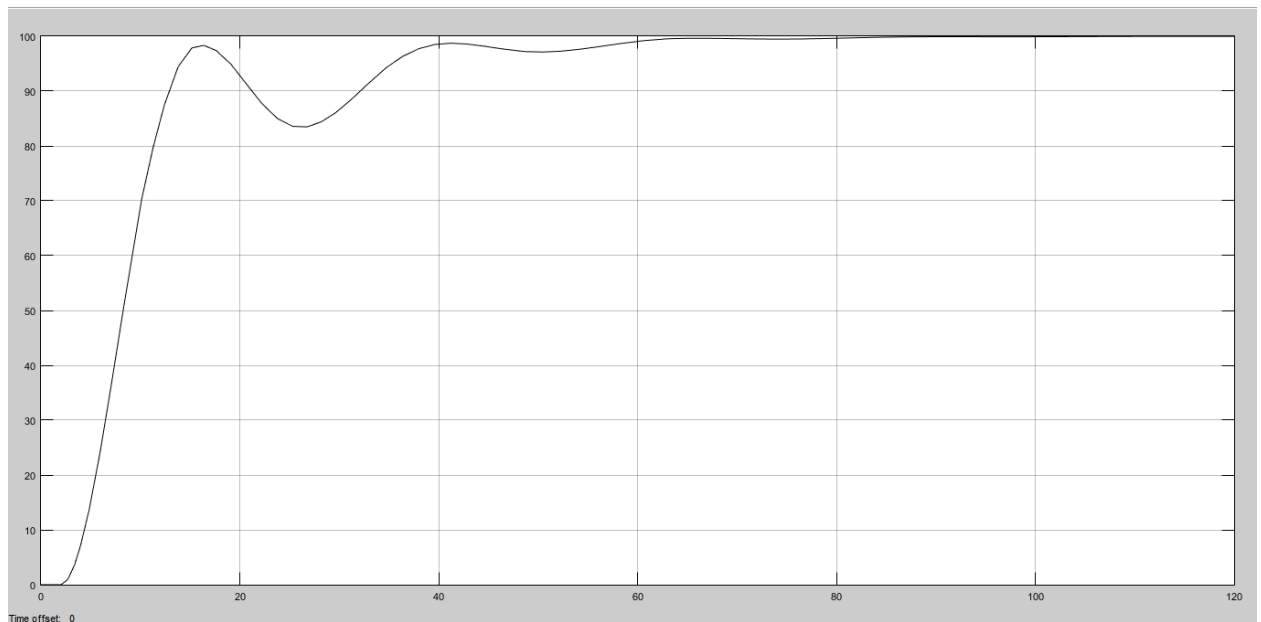


Рисунок 29 – График переходной характеристики системы по каналу регулирования: « $Q_{\text{газ}}$ – температура отходящих газов $T_{\text{от}}$ »

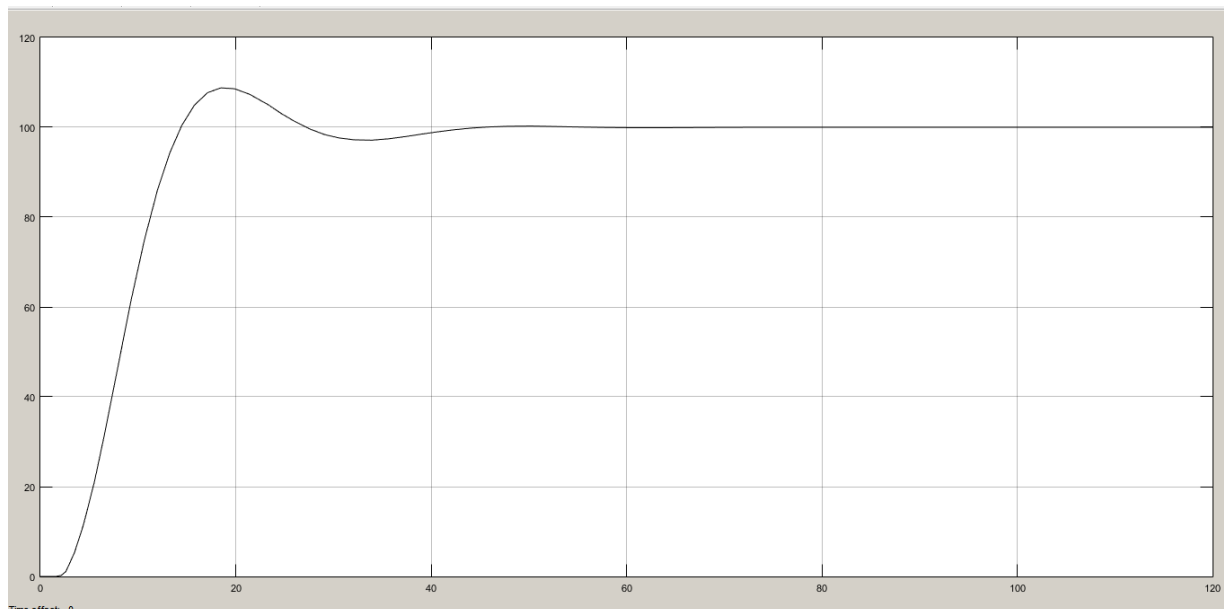


Рисунок 30 – График переходной характеристики системы по каналу регулирования: «Н₁ – содержание CO₂»

Исследование модели осуществлялось путем возмущения по двум каналам регулирования: «Q_{газ} – температура отходящих газов T_{ог}» и «Н₁ – содержание CO₂». Как видно, предложенная двусвязная система является устойчивой. В системе в достаточной степени компенсируются перекрестные связи, что иллюстрируют переходные процессы на рис.29, 30, полученные при подаче возмущающих воздействий. Приведенные результаты дают основание рекомендовать предложенную систему для управления обжигом клинкера. По переходным характеристикам системы определим, выполнены ли требования для автоматизированной системы управления.

Таблица 7 – Оценка системы на заданные требования

Параметр	Канал регулирования: «Q _{газ} – температура отходящих газов T _{ог} »	Канал регулирования: «Н ₁ – содержание CO ₂ »	Требования
Время регулирования, с	36	14	≤ 40
Перерегулирование, %	–	6	≤ 15

Данная система управления цементной обжиговой печью удовлетворяет заданным требованиям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном дипломном проекте была совершена работа по автоматизации технологического процесса обжига и управление обжигом во вращающихся печах.

Была описана работа цементной вращающейся печи и технологические процессы, происходящие в ней.

Была реализована оптимизация методом нелинейного программирования технологического параметра – температуры отходящих газов по экономическому критерию.

Цементная вращающаяся печь была рассмотрена как многосвязный объект. Разработана структурная схема управления цементной печью как многосвязным объектом. Так же в ходе работы были рассчитаны регуляторы для прямых каналов связи и компенсаторы для перекрестных каналов связи.

В результате работы была смоделирована система управления печи обжига клинкера по двум переменным, получены переходные характеристики системы.

					270404.2017.382 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		64

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Дуда, В. Цемент, электрооборудование, автоматизация, хранение, транспортирование. Справочное пособие / В. Дуда. – М.: Стройиздат, 1987. – 374 с.
- 2 Силенок, С. Г. Печные агрегаты цементной промышленности / С.Г. Силенок, Ю. С. Гризак, В. Н. Лямин и др. – М.: Машиностроение, 1984. – 168 с.
- 3 Беседин, П. В. Энерготехнологический анализ процессов в технологии цементного клинкера / П. В. Беседин, П. А. Трубаев. – Белгород: Изд-во БелГТАСМ: БИЭИ, 2005. – 456 с.
- 4 Гольдштейн, Л. Я. Комплексные способы производства цемента / Л. Я. Гольдштейн. – Л.: Стройиздат, 1985. – 160 с.
- 5 Зозуля, П. В. Проектирование цементных заводов / Ред. П. В. Зозуля, Ю. В. Никифоров. – СПб.: Синтез, 1995. – 446 с.
- 6 Классен, В. К. Обжиг цементного клинкера / В. К. Классен. – Красноярск: Стройиздат, 1994. – 322 с.
- 7 Хинт И.А., Кузьминов В.А. Производство силикальцита и его применение в жилищном строительстве Таллин: 1958. – 215 с.
- 8 Кочетков, В. С. Автоматизация производственных процессов и АСУП промышленности строительных материалов / В. С. Кочетков, Л. Р. Немировский и др. – Л.: Стройиздат, 1981. – 456 с.
- 9 Ходоров, Е. И. Печи цементной промышленности / Е.И. Ходоров. – Л.: Стройиздат, 1968. – 456 с.
- 10 Юнг, В. Н. Основы технологии вяжущих веществ / В.Н. Юнг. – М.: Госстройиздат, 1961. – 232 с.
- 11 Монастырев А. В., Галиахметов Р. Ф. Печи для производства извести. – Воронеж : Истоки, 2011. – 391 с.
- 12 Болдырев А. С, Добужинский В. И., Рекитар Я. А. Технический прогресс в промышленности строительных материалов. М.: Стройиздат, 1980. – 399 с.

					270404.2017.382 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		65

13 Рульников А.А., Егоров А.В. Основные процессы и оборудование в технологии строительных материалов. – М.: МГСУ, 1998. – 80 с.

14 Табунщиков Н.П. Производство извести. – М.: Стройиздат, 1984. – 239 с.

15 Гамей, А. И. Освоение технологии обжига известняка во вращающихся печах / [А. И. Гамей и др. // ОАО «Черметинформация». Бюл. НТИ «Черная металлургия». – 2002. – 462 с.

16 Меркер, Э. Э. Совершенствование методики контроля параметров режима сжигания топлива во вращающихся печах / Э. Э. Меркер, Д. А. Харламов, А. А. Ансимов // ОАО «Черметинформация». Бюл. НТИ «Черная металлургия». – 2011. – 264 с.

17 Колбасов, В. М. Технология вяжущих материалов / В. М. Колбасов, И. И. Леонов, Л. М. Сулименко. – М.: Стройиздат, 1987. – 432 с.

18 Острейковский, В. А. Теория систем / В. А. Острейковский. – М.: Высшая школа, 1997. – 240 с.

19 Афанасьев, В. Н. Математическая теория конструирования систем управления / В. Н. Афанасьев, В. Б. Колмановский, В. Р. Носов. – М.: Высшая школа, 2003. – 615 с.

20 Антонов, Г. Л. Особенности эксплуатации коротких вращающихся печей обжига известняка / [Г. Л. Антонов и др.] // Сталь. – 2008. – 423 с.

21 Кафаров, В. В. Автоматизация управления цементным производством / В. В. Кафаров, В. И. Сатарин, В. Б. Шифрин. – Киев: Будвельник, 1982. – 320 с.

22 Гельфанд, Я. Е. Управление цементным производством с использованием вычислительной техники. / Я. Е. Гельфанд. – Л.: Стройиздат, 1973. – 178 с.

23 Гофман, Г. М. Система автоматической стабилизации процесса обжига во вращающейся печи 4,5x170 м // труды НИИцемент. – 1971. – 165 с.

					270404.2017.382 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		66

24 Сапожников М.Я., Дроздов Н.Е. Справочник по оборудованию заводов строительных материалов, М.: Издательство литературы по строительству, 1970. – 487с.

25 Аттетков, А.В. Введение в методы оптимизации / А.В. Аттетков, В.С. Зарубин, А.Н. Канатников. – М.: Финансы и статистика, 2008. – 272 с.

26 Андреева, Е.А. Вариационное исчисление и методы оптимизации. / Е.А. Андреева. – М.: Высшая школа, 2006. – 584 с.

27 Измаилов, А.Ф. Численные методы оптимизации / А.Ф. Измаилов, М.В. Солодов. – М.: Физматлит, 2008. – 320 с.

28 Островский, Г.М. Методы оптимизации химико–технологических процессов: уч.пос. / Г.М. Островский. – М.: КДУ , 2009. – 424 с.

29 Щитов, И.Н. Введение в методы оптимизации. / И.Н. Щитов. – М.: Высшая школа, 2008. – 206 с.

30 Супрун, Д.Г. Методы оптимизации. Задачи линейного программирования / Д.Г. Супрун. – М.: МГИУ, 2008. – 82 с.

31 Корнеенко, В.П. Методы оптимизации. / В.П. Корнеенко. – М.: Высшая школа, 2007. – 664 с.

32 Емельянов, С.В. Методы нелинейного анализа в задачах управления и оптимизации / С.В. Емельянов, С.К. Коровин, Н.А. Бобылев. – М.: УРСС, 2002. – 120 с.

33 Абчук, В. А. Интенсификация: принятие решений : научно-практическое пособие для руководителей / В. А. Абчук, В. А. Бункин. – Ленинград : Лениздат, 1987. – 174 с.

34 Интенсификация – <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-intensifikatsii-tehnologicheskikh-protsessov-ekstragirovaniya-biologicheskii-aktivnykh-veschestv-iz-rastitelnogo-syrya>.

35 Интенсификация технологических параметров – <http://www.studfiles.ru/preview/3189060/>.

					270404.2017.382 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		67

36 Интенсификация – <http://teploobmennye-apparaty.ru/ratsionalnoe-ispolzovanie-energii-ekonomicheskaya-effektivnost-proizvodstva/intensifikatsiya-tehnologicheskikh-protsessov-kozhevennom-proizvodstve>.

37 Габасов, Р. Методы линейного программирования. Ч.1: Общие задачи / Р. Габасов, Ф.М. Кириллова. – М.: КД Либроком, 2010. – 176 с.

38 Юдин, Д.Б. Задачи и методы линейного программирования: Конечные методы / Д.Б. Юдин, Е.Г. Гольштейн. – М.: КД Либроком, 2010. – 264 с.

39 Кузнецов, В. А. Математическое моделирование тепловой работы цементной вращающейся печи: учебн. Пособие / В.А. Кузнецов. – Белгород: БелГТАСМ, 1994. – 78 с.

40 Холин, И. И. Справочник по производству цемента / И. И. Холин. – М.: Госстройиздат, 1963. – 853 с.

41 Ицелев, Р. И. Автоматизированное управление обжигом при производстве клинкера / Р. И. Ицелев, А. Д. Кацман, В. И. Шидлович. – Л.: Стройиздат, 1978. – 151 с.

42 Болдырев А.С., Золотова П.П.. Строительные материалы: Справочник/ – М.: Стройиздат, 1989. – 567 с.

43 Журавлёв М.И., Фоломеев А.А. Механическое оборудование предприятий вяжущих материалов и изделий на базе их: Учебник для вузов. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Высш. школа А, 2005. – 232 с.

44 Нусе, М. В. Автоматизация процесса обжига цементного клинкера во вращающихся печах на основе нечеткой модели / М. В. Нусс, П. А. Трубаев, В. К. Классен // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. XXIII Междунар. науч. конф., Саратов, 22-25 июня 2010 г. / Саратов. гос. техн.ун-т. – Саратов, 2010. – 456 с.

45 Бессекерский, В. А. Теория систем автоматического управления / В. А. Бессекерский, Е. П. Попов. – Спб.: Профессия, 2003. – 757 с.

46 Рубанов, В. Г. Статистическая динамика систем управления / Рубанов В. Г. – Белгород.: БелГТАСМ, 2000. – 113 с.

					270404.2017.382 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		68

47 Воронов, А.А. Основы теории автоматического управления: Особые линейные и нелинейные системы / А.А. Воронов. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 230 с.

48 Симою, М. П. Определение коэффициентов передаточных функций по временным характеристикам линеаризованных систем / М 77. Симою И «Автоматика и телемеханика». – 1957. – 265 с.

49 Бутт, Ю. М. Портландцементный клинкер / Ю.М. Бутт, В.В. Тимашев. – Стройиздат, 1967. – 340 с.

50 Классен, В. К. Основные принципы и способы управления вращающейся цементной печью // Цемент и его применение. – 2004. – 487 с.

51 Гинзбург, И. Б. Автоматизация цементного производства. Справочное пособие. / И. Б. Гинзбург, А. Б. Смолянский. – Л.: Стройиздат, 1986. – 192 с.

52 Кафаров, В. С. Математическое моделирование основных процессов химических производств / В. С. Кафаров, М. Б. Глебов. – М.: Высшая школа. – 346 с.

53 MATLAB – <http://matlab.exponenta.ru/controlsystem/index.php>.

					270404.2017.382 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		69