

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»
Политехнический институт
Заочный факультет
Кафедра «Промышленная теплоэнергетика»
Направление подготовки 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»

ВЫПУСКНАЯ
КВАЛИФИКАЦИОННАЯ
РАБОТА ПРОВЕРЕНА
Рецензент, начальник отдела
«Газоснабжение и металлургические
печи» проектно-конструкторского
центра ПАО «ЧМК»
_____ Е.Ю. Глазырина
« _____ » _____ 2020 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой
«Промышленная теплоэнергетика»,
к.т.н., доцент
_____ К.В. Осинцев
« _____ » _____ 2020 г.

**Модернизация трехзонной методической печи ПАО «ЧМК»
с целью ресурсосбережения**

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
ПО ПРОГРАММЕ МАГИСТРАТУРЫ
«ОПТИМИЗАЦИЯ ТОПЛИВОИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ»
ЮУрГУ–13.04.01.2020.125.18.ПЗ ВКР

Руководитель магистерской
программы, к.т.н., доцент
_____ К.В. Осинцев
« _____ » _____ 2020 г.

Руководитель работы,
к.т.н., доцент
_____ Т.Б. Жиргалова
« _____ » _____ 2020 г.

Автор работы,
магистрант группы ПЗ-389
_____ Р.М. Хафизова
« _____ » _____ 2019 г.

Челябинск 2020

АННОТАЦИЯ

Хафизова Р.М. Модернизация трехзонной методической печи ПАО «ЧМК» с целью ресурсосбережения. – Челябинск: ЮУрГУ, ПИ, ЗФ; 2020, 106 с., 23 ил., библиогр. список – 65 наим., 6 листов чертежей ф. А1, А1+А2, 2 демонстрационных листа ф. А1.

В выпускной квалификационной работе (ВКР) магистранта предложена модернизация трехзонной методической печи с целью ресурсосбережения на ПАО «ЧМК» в связи с большими потерями теплоты с отходящими газами.

Целью ВКР является обеспечение надежной и эффективной работы методической трехзонной нагревательной печи путем ввода в эксплуатацию металлического петлевого рекуператора.

ВКР состоит из введения, 10-ти глав, заключения и библиографического списка.

В работе дается обоснование и актуальность необходимости модернизации трехзонной методической печи для обеспечения прокатного стана нагретыми заготовками, сравнение отечественных и зарубежных передовых разработок. Также выполнены расчеты методической печи по трем зонам с подогревом воздуха отходящими газами и без подогрева, расчет металлического петлевого рекуператора с определением площади теплообмена.

В ВКР предложены решения энергосбережения и повышения энергетической эффективности методической печи и рекуператора, произведен расчет дымовой трубы. В завершении работы приведены разделы «Автоматизация», «Экономика и управление» и «БЖД».

Графическая часть выполнена с применением AutoCAD – системы автоматизированного проектирования на 8 листах формата А1 и А1+А2.

					<i>13.04.01.2020.125.18 ПЗ</i>							
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>	<i>Модернизация трехзонной методической печи ПАО «ЧМК» с целью ресурсосбережения</i>			<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>		
<i>Выполнил</i>	<i>Хафизова Р.М.</i>							В	К	Р	3	106
<i>Руковод.</i>	<i>Жиргалова Т.Б.</i>							<i>ЮУрГУ</i>				
<i>Н.контр.</i>	<i>Жиргалова Т.Б.</i>							<i>Кафедра «Промышленная теплоэнергетика»</i>				
<i>Зав.каф.</i>	<i>Осинцев К.В.</i>											

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 АКТУАЛЬНОСТЬ МОДЕРНИЗАЦИИ ТРЕХЗОННОЙ МЕТОДИЧЕСКОЙ ПЕЧИ.....	8
2 СРАВНЕНИЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ЗАРУБЕЖНЫХ ПЕРЕДОВЫХ РАЗРАБОТОК И РЕШЕНИЙ ПО ТЕМЕ ВКР	10
2.1 Выбор варианта модернизации методической печи	12
3 РАЗРАБОТКА ДВУХСТУПЕНЧАТОЙ СИСТЕМЫ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛА ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ	14
3.1 Расчет трехзонной методической печи с подогревом воздуха	15
3.1.1 Расчет горения топлива, воздуха и продуктов сгорания	16
3.1.2 Температурный режим нагрева металла	19
3.1.3 Методическая зона.....	19
3.1.4 Сварочная зона.....	26
3.1.5 Томильная зона	30
3.1.6 Длина печи и напряжение пода	30
3.1.7 Тепловой баланс печи.....	32
3.2 Выбор вспомогательного оборудования	44
4 РАСЧЕТ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПЕТЛЕВОГО РЕКУПЕРАТОРА	49
5 ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ДЕТАНДЕР-ГЕНЕРАТОРНОГО АГРЕГАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ.....	56
5.1 Определение режимов работы детандер-генераторного агрегата на газорегуляторных пунктах	56
5.2 Расчет детандер-генераторного агрегата.....	65
6 ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ	71
7 ВОПРОСЫ ЭКОЛОГИИ	74
8 КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И АВТОМАТИКА	79
9 БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ	84
10 ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ	87
10.1 Смета капитальных затрат реализации проекта	87
10.2 Смета текущих затрат реализации проекта.....	88
10.3 Обоснование экономической эффективности проекта	92
10.4 Качественный анализ проектных решений	93
10.5 Оценка движущих и сдерживающих сил реализации проекта	94
10.6 Модель пирамиды целеполагания ПАО «ЧМК»	96

10.7 Планирование проекта в дереве целей	97
10.8 Планирование мероприятий по реализации проекта	98
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	100
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	102

					<i>13.04.01.2020.125.18 ПЗ</i>	лист
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		5

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в металлургической промышленности широко используются нагревательные печи, которые предварительно прогревают прокатный материал перед его обработкой. Обработка металла происходит в прокатных цехах металлургического комбината.

На прокатных станах получают широкий сортамент продукции металлургического производства, который используется в атомной энергетике, в тяжелом, химическом, энергетическом и автомобильном машиностроении, а также в строительстве. В связи с этим к качеству продукции предъявляются высокие требования, которые можно достичь только тогда, когда технологические процессы будут построены на безотказной, безопасной и автоматизированной работе оборудования.

Прокатные цеха являются важным звеном в металлургии, а значит и подготовка металла перед подачей на прокатный стан играет большую роль.

Прокатываемый материал должен соответствовать определенным требованиям, которые достигаются в нагревательных печах. Большое распространение получили методические нагревательные печи.

Методическая печь – проходная печь, предназначенная для нагрева заготовок из металла перед их прокаткой на прокатном стане. В таких печах степень использования тепла, которое подается в печь, высока, поскольку в печи создается противоточное движение нагреваемого металла и продуктов сгорания топлива. Данные нагревательные печи относят к проходным печам, поскольку нагреваемые заготовки движутся вдоль пода за счет движений толкателя. Заготовки располагают в один или два ряда, заполняя весь под.

Не изменяется во времени температурный, а также тепловой режимы данных печей. Однако температура в промышленной печи по длине ее изменяется. В зависимости от того, какое назначение у зон, каково их количество, будет зависеть направленность изменения температуры по длине методической печи. По количеству зон печи разделяют на двухзонные, трехзонные и т.д.

Преимущества методической печи:

– методическая печь является агрегатом непрерывного действия, благодаря чему облегчается достижение ритмичности питания агрегата (стана или прессы) нагретым металлом;

– методические печи позволяют наиболее просто организовать подачу в печь нагреваемых изделий и выдачу их из печи;

– при сгорании топлива, тепло продуктов сгорания в рабочем пространстве печи используется намного полнее, чем в печах других конструкций. Это позволяет работать на методических печах (при прочих равных обстоятельствах) с более низким удельным расходом топлива.

Указанные преимущества обеспечили широкое внедрение методических печей в прокатное производство, где они наиболее распространены, также печи применяются в кузнечно-прессовом производстве. Иногда потребность в методическом нагреве диктуется качеством металла.

										лист
										6
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	13.04.01.2020.125.18 ПЗ					

Поэтому мероприятие требует осторожного и замедленного ведения процесса в начальный период нагрева.

Поскольку температура отходящих газов после трехзонной методической печи довольно высока, ее необходимо понизить, чтобы устранить негативное воздействие на окружающую среду, а также в полной мере использовать всю теплоту в рабочем пространстве, т.е. экономить сжигаемое топливо. Это достигается путем установки утилизирующего теплообменника – рекуператора. Как правило, рекуператоры устанавливаются над печью либо в борове печи. При нагреве заготовок в методических печах устанавливают керамические и металлические рекуператоры.

Все чаще работа нагревательных методических печей протекает без использования рекуператора, поскольку устаревшие рекуператоры не заменяют, а лишь демонтируют, а значит, неиспользованное тепло дымовых газов будет влиять на ресурсосбережение нагревательной печи. Именно поэтому, в выпускной квалификационной работе предлагается модернизация трехзонной методической печи прокатного цеха №1 ПАО «ЧМК» с установкой металлического петлевого рекуператора. Определив из расчета методической трехзонной печи необходимые параметры, можно подобрать и рассчитать тот рекуператор, который будет иметь необходимую площадь теплообмена для утилизации теплоты дымовых газов, а рассчитав срок окупаемости, определить экономический эффект мероприятия.

Целью работы является модернизация трехзонной методической печи прокатного цеха №1 на ПАО «ЧМК» для ресурсосбережения предприятия. Для достижения данной цели необходимо выполнить такие задачи, как: изучение существующего металлургического оборудования, предназначенного для нагрева и утилизации тепла; выполнение тепловых расчетов основного оборудования до и после модернизации; определение экономической эффективности модернизированной методической печи; выявление негативного экологического воздействия тепловых установок, а также выявление и устранение режимов и параметров их неэффективной работы [10, 19, 49].

					<i>13.04.01.2020.125.18 ПЗ</i>	<i>лист</i>
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		7

2 СРАВНЕНИЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ЗАРУБЕЖНЫХ ПЕРЕДОВЫХ РАЗРАБОТОК И РЕШЕНИЙ ПО ТЕМЕ ВКР

За все время эксплуатации нагревательных печей в металлургических производствах данные агрегаты не раз модернизировались. Проводят модернизацию печи по улучшению конструкции приборов для сжигания топлива, по повышению надежности работы

На многих промышленных предприятиях за длительный период эксплуатации нагревательных печей данные конструкции неоднократно модернизировались: улучшались конструкция приборов для сжигания топлива, повышалась надежность работы за счет применения новых материалов, уменьшения износа стенок теплообменных поверхностей. К таким мероприятиям также относится уменьшение потери тепла в окружающую среду благодаря лучшей герметизации печей, улучшение использования тепла уходящих топочных газов в воздухоподогревателях, снижение трудоемкости отдельных ремонтных работ. Большой экономический эффект дает модернизация, направленная на повышение теплопроизводительности печей и их мощности по сырью, повышение КПД печей.

Для снижения топливопотребления нагревательных печей металлургического производства целесообразно увеличивать длину методической зоны (конструктивный метод).

При помощи автоматизированных систем управления тепловыми процессами можно осуществлять контроль над нагревом заготовок в таких случаях, когда небольшие нагревательные печи имеют короткую методическую зону либо нестабильный режим работы.

При неплановых остановках необходимо закрывать заслонки окна посада, а также выдачи. Отключают либо понижают мощность горелок в отапливаемых зонах до определенных минимальных значений. При совершенствовании режима нагрева можно получить очень эффективные результаты. Этот способ применяют в печах с большой длиной и печах, которые работают в стационарном режиме. При перераспределении тепловой мощности между зонами нагревательного агрегата можно достичь эффективный результат. В этом случае температура первых зон уменьшается, а последних – увеличивается.

К организационным мероприятиям относят такие действия, которые сократят диапазон снижения производительности номинальных значений агрегата. Эти действия применительны для предприятий с большими объемами производства.

Такие мероприятия смогут повысить коэффициент использования топлива и сам КПД оборудования.

В случае замены нагревательных печей из-за их низкой эффективности можно не достичь желаемых результатов, поскольку необходим комплексный подход для производства, который бы включал также модернизацию автоматизацию других взаимосвязанных тепловых агрегатов.

Рассмотрим нагревательную печь прокатного стана 850 сортопрокатного цеха РУП Белорусского металлургического завода. Данная печь является примером модернизации, при которой достигли эффективных показателей за счет установки

										лист
										10
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	13.04.01.2020.125.18 ПЗ					

рекуператора для подогрева воздуха на горение топлива в горелочных устройствах. Схема нагревательной печи показана на рисунке 2.1, где показаны направления движения отходящих газов.

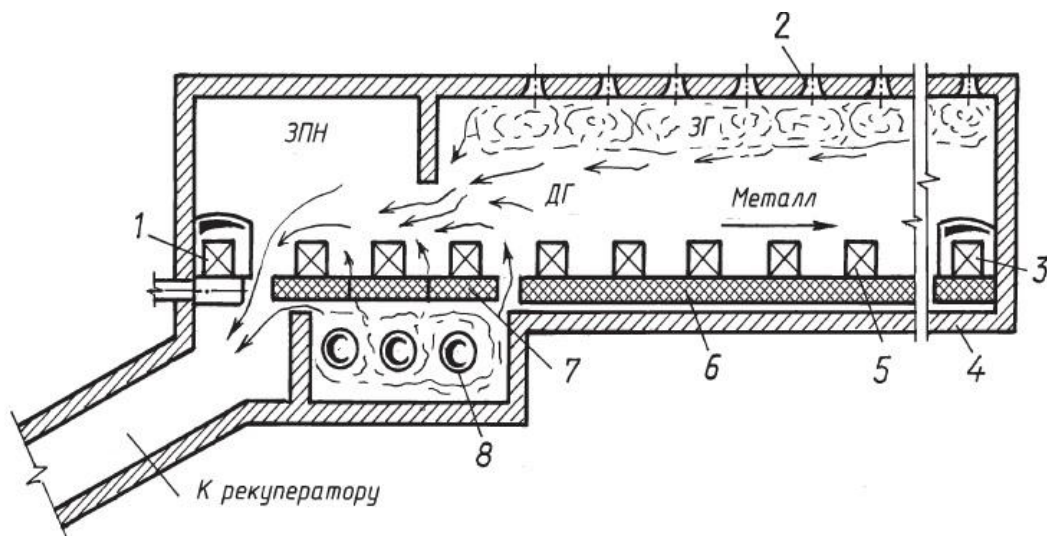


Рисунок 2.1 – Схема нагревательной печи стана 850:

- 1 – боковой посад металла; 2 – горелочное устройство;
 3 – боковая выдача металла; 4 – обмуровка агрегата; 5 – нагреваемый металл;
 6 – участок шагающего пода; 7 – шагающие балки;
 8 – боковая длиннофакельная горелка; ЗПН – зона предварительного нагрева;
 ЗГ – зона горения; ДГ – отходящие газы

При вводе в эксплуатацию печь представляла собой такой агрегат, который имел шагающие балки и участок шагающего пода. Данная печь имеет рекуперативный теплообменник для подогрева воздуха, температура которого может достигать 450 °С. Температурный режим нагрева заготовок в нагревательной печи стана 850 в зависимости от профиля проката приведен в таблице 2.1. Минимальная продолжительность нагрева непрерывнолитых заготовок устанавливается в зависимости от сечения блюма и вида посада (числитель – «холодный», знаменатель – «горячий» посад): 2 ч 30 мин / 1 ч 40 мин. Максимальная продолжительность нагрева заготовок без снижения температур по зонам печи: 4 ч 30 мин / 3 ч 40 мин. Выдача металла из печи на раскатной рольганг прокатной клети осуществляется поштучно в автоматическом или ручном режиме [52, 53].

Таблица 2.1 – Тепловой баланс нагревательной печи стана 850

Приход теплоты	МВт	%	Расход теплоты	МВт	%
1. Химическая теплота топлива	27,79	82,61	1. Теплота, затраченная на нагрев металла	15,81	47,61

Продолжение таблицы 2.1

Приход теплоты	МВт	%	Расход теплоты	МВт	%
2. Теплота, вносимая подогретым воздухом	4,66	13,86	2. Потери теплоты с уходящими газами	12,26	36,92
3. Теплота экзотермических реакций	1,19	3,54	3. Потери теплоты теплопроводностью через кладку	2,32	7,00
			4. Потери теплоты излучением	0,6	1,81
			5. Потери теплоты с окалиной	0,35	1,06
			6. Потери теплоты с охлаждающей водой	1,35	4,07
Приход теплоты	МВт	%	Расход теплоты	МВт	%
			7. Неучтенные потери	0,53	1,60
Всего	33,64	100,0	Всего	33,21	100,0
Расход топлива – 2885 м ³ /ч (0,801 м ³ /с), производительность печи – 69 т/ч, удельный расход условного топлива – 49,5 кг у.т./т, КПД – 0,57.					

В таблице 2.2 приведены режимы нагрева заготовок.

Таблица 2.2 – Режимы нагрева непрерывнолитых заготовок в нагревательной печи стана 850

Размер непрерывнолитой заготовки, мм	Производительность, шт/ч	Температура в печи по зонам, °С				
		1,2	3	4	5	6
300x400x4000-5150	12/17	1200/ 1185	1280/ 1260	1300/ 1280	1270/ 1250	1290/ 1270

Примечание. Допустимые отклонения значений температур в зонах печи +20 °С/ – 50 °С (для зон 1, 2 – +30 °С / – 60 °С). Числитель «холодный», знаменатель – «горячий» посад [25, 29].

2.1 Выбор варианта модернизации методической печи

Чтобы достичь эффективного использования топлива в методических печах, необходимо обеспечить полное сгорание топлива с минимумом избыточного воздуха в комплексе рекуперации отходящих газов. Повышение тепловой эффективности агрегата является главным мероприятием и подразумевает подогрев возду-

ха в печи. Ведь это позволит повысить термический КПД агрегата, также увеличить удельную производительность агрегата и снизить расход топлива.

Подобрав оптимальную температуру подогрева топлива, можно установить такой рекуператор, работа которого не приведет к увеличению больших затрат на покупку.

Известно, что потеря тепла происходит больше всего при отводе дымовых газов, она составляет 50-70 % всего расходуемого тепла на агрегат. Установив рекуператор мы достигнем понижения расхода топлива и повышения КПД агрегата.

В связи с тем, что методическая трехзонная печь прокатного цеха №1 ПАО «ЧМК» работает в режиме перерасхода топлива, при неэффективной работе агрегата следует выбрать вариант модернизации методической печи с установкой рекуператора.

					<i>13.04.01.2020.125.18 ПЗ</i>	<i>лист</i>
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		<i>13</i>

3.1 Расчет трехзонной методической печи с подогревом воздуха

Методическая печь прокатного цеха №1 работает на газовом топливе, печь однорядная 3-х зонная с торцевым всадом и выдачей. Сорты нагреваемого металла: углеродистые, легированные и высоколегированные марки стали. Производительность промышленной печи при холодном посаде на легированном сортаменте 80 т/час; температура посада металла – 20 °С; температура выдачи металла 1150–1200 °С; площадь пода – 90 м².

В методических печах (Рисунок 3.1) нагреваются слитки и заготовки круглого, квадратного и прямоугольного сечения. Развес слитков, нагреваемых в методических печах, колеблется в пределах 250–1500 кг. Толщина изделий, нагреваемых в методических печах, колеблется от 50 до 400 мм, а длина от 1000 до 10000 мм. Производительность печей достигает 50–60 т /час и выше.

Сначала металл поступает в первую зону – методическую, в данной зоне температура меняется по длине. Перед тем, как поступить в сварочную зону, также ее называют зоной высоких температур, заготовка в первой зоне постепенно нагревается. В первой зоне обеспечивается безопасный режим благодаря медленному нагреву и диапазону температур от 0 °С до 550 °С, что позволяет устранить температурные напряжения.

Методическая зона в связи с теплообменом между отходящими газами и нагреваемыми заготовками похожа на противоточный теплообменник. Отходящие газы и металл движутся навстречу друг другу и находятся в состоянии теплообмена. Остывающая дымовая газы нагревают металл благодаря энергии тепла, то есть благодаря металлическим заготовкам утилизируется тепло отходящих газов, которые отходят из зоны, которая имеет высокие температуры. В конце данной зоны температура может достигать диапазон от 850 °С до 1000 °С, а если рассматривать всю печь, то в местах высоких температур печной установки температуры достигают 1350–1450 °С. Благодаря методической зоне увеличивается коэффициент использования топлива.

Вторую по счету зону называют сварочной зоной, также ее именуют зоной высоких температур. Данная зона предназначена, безусловно, для быстрого нагрева металла до нужной температуры. В данной зоне заготовки нагревают до температур 1150–1250 °С. Интенсификация нагрева достигается только тогда, когда температура зоны превышает температуру нагрева заготовки на 150–250 °С. Таким образом, сварочная зона имеет диапазон температур 1350–1450 °С.

Дополнительный нагрев заготовок осуществляется в третьей зоне, которая именуется томильной зоной и зоной выдержки. Предназначена эта зона для выравнивания температуры по всему сечению металлической заготовки. Если в сварочной зоне необходимая температура достигается только на поверхности металла, то в томильной зоне и середина заготовки прогревается. Ведь непрогретая часть заготовки означает большой перепад температур по сечению, что недопустимо по технологическим требованиям.

В зоне выдержки температура не изменяется, то есть поддерживается постоянной и соответствует диапазону, который на 50–70 °С выше диапазона темпера-

									лист
									15
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	13.04.01.2020.125.18 ПЗ				

тур самой заготовки. Благодаря данным особенностям зоны выдержки, тот перепад температур, с которым поступает металл в данную зону, устраняется и выравнивается [42–43].

Если возникает достаточно большой температурный перепад, если заготовка достаточно крупная, то важно применять такой трехступенчатый режим, который позволит получить необходимую температуру заготовки на выходе из печи. Такой трехступенчатый режим нагрева имеется в трехзонных методических печах.

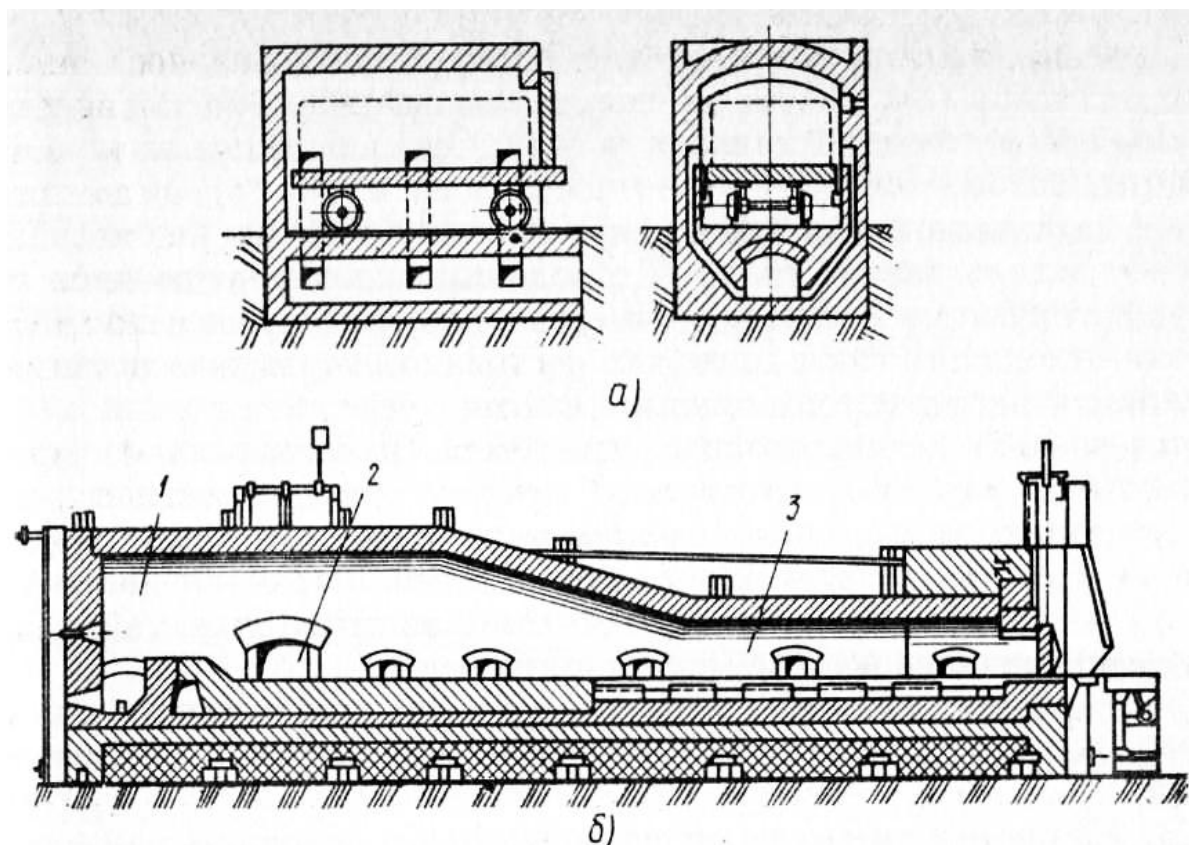


Рисунок 3.1 – Методическая печь

Заготовочные, листопрокатные и сортовые станы получают заготовки с определенными параметрами, которые были нагреты в методических печах. В этих агрегатах как правило используют противоточную схему. Двусторонний обогрев с использованием глассажных труб позволяет достигнуть таких температур и распределение температур по сечению заготовки, которые соответствуют технологическим требованиям. Поэтапный расчет нагрева металла позволит получить температуры в характерных точках агрегата. Сначала необходимо провести расчет горения топлива с определением объема воздуха и топлива на горение, а также определить состав продуктов сгорания газообразного топлива для дальнейших расчетов нагревательной печи.

Выполним расчет трехзонной методической печи прокатного цеха №1 ПАО «ЧМК» [22, 40, 48].

3.1.1 Расчет горения топлива, воздуха и продуктов сгорания

1) Для выполнения расчета методической трехзонной печи необходимо провести расчет горения топлива, воздуха и продуктов сгорания, который позволит определить объем воздуха, продуктов сгорания и состав продуктов сгорания.

Химический состав природного газа:

Метан $\text{CH}_4 = 95,82 \%$;

Этан $\text{C}_2\text{H}_6 = 1,97 \%$;

Пропан $\text{C}_3\text{H}_8 = 0,475 \%$;

Изобутан $\text{C}_4\text{H}_{10} = 0,151 \%$;

Пентан $\text{C}_5\text{H}_{12} = 0,0374 \%$;

Гексан $\text{C}_6\text{H}_{14} = 0,131 \%$;

Азот $\text{N}_2 = 1,28 \%$;

Кислород $\text{O}_2 = 0,0095 \%$;

Водород $\text{H}_2 = 0,0015 \%$;

Углекислый газ $\text{CO}_2 = 0,244 \%$.

Целью расчета является определение расхода воздуха, количества и состава продуктов сгорания.

2) Рассчитаем теплоту сгорания природного газа (3.1):

$$Q_n^p = 0,127 \cdot \text{CO} + 0,108 \cdot \text{H}_2 + 0,358 \cdot \text{CH}_4 + 0,59 \cdot \text{C}_2\text{H}_4 + 0,555 \cdot \text{C}_2\text{H}_2 + \quad (3.1)$$

$$+ 0,636 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 0,913 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 + 1,185 \cdot \text{C}_4\text{H}_{10} + 1,465 \cdot \text{C}_5\text{H}_{12} + 0,234 \cdot \text{H}_2\text{S}$$

$$Q_n^p = 0,358 \cdot 95,82 + 0,636 \cdot 1,97 + 0,913 \cdot 0,475 + 1,185 \cdot 0,151 + 1,465 \cdot 0,0374 =$$

$$= 36255 \frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$$

3) Расход кислорода на горение природного газа (3.2):

$$V_{\text{O}_2} = 0,01 \cdot \left[0,5(\text{CO} + \text{H}_2) + \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) \text{C}_m\text{H}_n - \text{O}_2 \right] \quad (3.2)$$

$$V_{\text{O}_2} = 0,01 \cdot \left[0,5 \cdot 0,0015 + 2 \cdot 95,82 + 2,5 \cdot 1,97 + 5 \cdot 0,475 + \right. \\ \left. + 6,5 \cdot 0,151 + 8 \cdot 0,0374 + 9,5 \cdot 0,131 - 0,0095 \right] = 2,034 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$$

4) Действительный расход воздуха (3.3):

$$V_g = \alpha \cdot (1 + k) \cdot V_{\text{O}_2}, \quad (3.3)$$

где $\alpha = 1,05 \dots 1,15$ – коэффициент расхода воздуха (табл. 1.3 [48]);

$k = 3,762$ – отношение объёмных содержаний N_2 , O_2 в дутье для воздуха.

										лист
										17
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	13.04.01.2020.125.18 ПЗ					

$$V_g = 1,05 \cdot (1 + 3,762) \cdot 2,034 = 10,171 \frac{\text{M}^3}{\text{M}^3}$$

5) Объем компонентов продуктов сгорания (3.4–3.7):

$$V_{CO_2} = 0,01 \cdot (CO_2 + CO + H_2S + \sum m \cdot C_m H_n) \quad (3.4)$$

$$V_{CO_2} = 0,01 \cdot (0,244 + 1 \cdot 95,82 + 2 \cdot 1,97 + 3 \cdot 0,475 + 4 \cdot 0,151 + 5 \cdot 0,0374 + 6 \cdot 0,131) = 1,03 \frac{\text{M}^3}{\text{M}^3}$$

$$V_{H_2O} = 0,01 \cdot (H_2O + H_2 + H_2S + 0,5 \cdot \sum n \cdot C_m H_n) \quad (3.5)$$

$$V_{H_2O} = 0,01 \cdot (0,0015 + 0,5 \cdot (4 \cdot 95,82 + 6 \cdot 1,97 + 8 \cdot 0,475 + 10 \cdot 0,151 + 12 \cdot 0,0374 + 14 \cdot 0,131)) = 2,0134 \frac{\text{M}^3}{\text{M}^3}$$

$$V_{N_2} = 0,01 \cdot N_2 + \alpha \cdot k \cdot V_{O_2} \quad (3.6)$$

$$V_{N_2} = 0,01 \cdot 1,28 + 1,05 \cdot 3,762 \cdot 2,034 = 8,048 \frac{\text{M}^3}{\text{M}^3}$$

$$V'_{O_2} = (\alpha - 1) \cdot V_{O_2} \quad (3.7)$$

$$V'_{O_2} = (1,05 - 1) \cdot 2,034 = 0,102 \frac{\text{M}^3}{\text{M}^3}$$

6) Общий объем продуктов сгорания (3.8):

$$V_d = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V'_{O_2} = \sum V_i \quad (3.8)$$

$$V_d = 1,03 + 2,013 + 8,048 + 0,102 = 11,1936 \frac{\text{M}^3}{\text{M}^3}$$

7) Состав продуктов сгорания (3.9):

$$x_i = 100 \cdot \frac{V_i}{V_d} \% \quad (3.9)$$

										лист
										18
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	13.04.01.2020.125.18 ПЗ					

Из таблиц ПЗ и П4 получим $\varepsilon_{H_2O} = 0,205$, где $\varepsilon_{CO_2}, \varepsilon_{H_2O}$ – определены при температуре уходящих газов (900 °С).

5) Определим интегральный коэффициент излучения (3.14):

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{CO_2} + \beta \varepsilon_{H_2O} \quad (3.14)$$

$$\varepsilon_2 = 0,151 + 1,085 \cdot 0,205 = 0,373$$

6) Определим угловой коэффициент излучения кладки на металл (3.15):

$$\phi_{км} = \frac{F_M}{F_{кл}} = \frac{l}{(2h + B)} \quad (3.15)$$

$$\phi_{км} = \frac{5}{(2 \cdot 1,15 + 5,6)} = 0,633$$

7) Определим приведённый коэффициент излучения от продуктов сгорания на металл с учётом тепла, отражённого от кладки печи на металл (3.16):

$$c_{зкм} = c_0 \varepsilon_M \varepsilon_2 \frac{\phi_{км} (1 - \varepsilon_2) + 1}{\phi_{км} (1 - \varepsilon_2) [\varepsilon_M + \varepsilon_2 (1 - \varepsilon_M)] + \varepsilon_2}, \quad (3.16)$$

где $\varepsilon_M = 0,85$ – коэффициент теплового излучения материала (табл. П2 [48]);
 $c_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ – коэффициент излучения абсолютно чёрного тела, полученный из таблицы П2 [48].

$$\begin{aligned} c_{зкм} &= 5,67 \cdot 0,85 \cdot 0,373 \cdot \frac{0,633 \cdot (1 - 0,347) + 1}{0,633 \cdot (1 - 0,347) [0,85 + 0,373 \cdot (1 - 0,85)] + 0,373} = \\ &= 3,43 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \end{aligned}$$

8) Удельный тепловой поток (3.17):

$$q_l = c_{зкм} \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_M}{100} \right)^4 \right], \quad (3.17)$$

где T_M – температура поверхности металла, К;

T_2 – температура уходящих газов, К;

$T_M = t_- + 273 = 20 + 273 = 293 \text{ К}$;

$T_2 = 900 + 273 = 1173 \text{ К}$.

									лист
									21
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	13.04.01.2020.125.18 ПЗ				

$$q_l = 3,43 \cdot \left[\left(\frac{1173}{100} \right)^4 - \left(\frac{293}{100} \right)^4 \right] = 64688 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

9) Определим коэффициент теплоотдачи в начале методической зоны (3.18):

$$\alpha_{нач}^{мет} = \frac{q_l}{t_2 - t_0} \quad (3.18)$$

$$\alpha_{нач}^{мет} = \frac{64688}{900 - 20} = 73,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

10) При температуре в конце методической зоны 1300 °С: (По табл.ПЗ и П4 [48]) получим $\varepsilon_{CO_2} = 0,097$ и $\varepsilon_{H_2O} = 0,121$.

Коэффициент теплоотдачи в конце методической зоны (3.19):

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{CO_2} + \beta \varepsilon_{H_2O} \quad (3.19)$$

$$\varepsilon_2 = 0,097 + 1,085 \cdot 0,121 = 0,228$$

11) Определим приведённый коэффициент излучения от продуктов сгорания на металл с учётом тепла, отражённого от кладки печи на металл (3.16):

$$c_{ски} = 5,67 \cdot 0,85 \cdot 0,228 \cdot \frac{0,633 \cdot (1 - 0,228) + 1}{0,633 \cdot (1 - 0,248) \cdot [0,85 + 0,228 \cdot (1 - 0,85)] + 0,228} =$$

$$= 2,481 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

12) Удельный тепловой поток по формуле (3.17):

$$q_l = 2,481 \cdot \left[\left(\frac{1573}{100} \right)^4 - \left(\frac{878}{100} \right)^4 \right] = 137126 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

13) Определим коэффициент теплоотдачи в конце методической зоны (3.20):

$$\alpha_{кон}^{мет} = \frac{q_l}{t_2 - t_0} \quad (3.20)$$

									лист
									22
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	13.04.01.2020.125.18 ПЗ				

$$\alpha_{\text{кон}}^{\text{мет}} = \frac{137126}{1300 - 605} = 197,304 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

14) Определим средний коэффициент теплоотдачи по крайним значениям в начале и в конце зоны (3.21):

$$\alpha_{\text{ср}} = \sqrt{\alpha^{\text{нач}} \cdot \alpha^{\text{кон}}} \quad (3.21)$$

$$\alpha_{\text{ср}} = \sqrt{73,5 \cdot 197,304} = 120,432 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Выполним расчет нагрева металла в методической зоне.

1) Определим среднюю температуру газов в методической зоне (3.22):

$$\bar{t}_g = 0,5(t_g^{\text{нач}} + t_g^{\text{кон}}) \quad (3.22)$$

$$\bar{t}_g = 0,5(900 + 1300) = 1100 \text{ } ^\circ\text{C}$$

2) Средняя температура металла в зоне и в конце зоны (3.23–3.24):

$$\bar{t}_m = 0,5(t_m^{\text{нач}} + t_m^{\text{кон}}) \quad (3.23)$$

$$\bar{t}_m^{\text{нач,кон}} = t_{\text{нов}} - \frac{2}{k_1 + 2}(t_{\text{нов}} - t_{\text{сеп}}), \quad (3.24)$$

где $t_{\text{нов}}$ – температура поверхности металла (20 °С – в начале, 605 °С – в конце зоны);

$k_1 = 1$ – для пластины;

$t_{\text{сеп}}$ – температура середины металла (20 °С – в начале, 475 °С – в конце зоны);

$t_m^{\text{нач}} = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$.

$$\bar{t}_m^{\text{кон}} = 605 - \frac{2}{3} \cdot (605 - 475) = 518,333 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\bar{t}_m = 0,5 \cdot (20 + 518,333) = 269,167 \text{ } ^\circ\text{C}$$

3) По этой температуре находим коэффициент теплопроводности материала (по таблице I – 51 [22]). Коэффициент теплопроводности $\lambda = 50,693 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$.

4) коэффициент температуропроводности (3.25):

									лист
									23
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	13.04.01.2020.125.18 ПЗ				

$$a = \frac{\lambda}{C_{cp} \cdot \rho}, \quad (3.25)$$

где $C_{cp} = 0,514 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$ (по таблице I – 52 [22]);

$\rho = 7776 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ (по таблице I – 55 [22]).

$$a = \frac{50,693}{514 \cdot 7776} = 1,2681 \cdot 10^5 \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$$

5) Вычислим число Био (3.26):

$$Bi = \frac{\alpha}{\lambda} \cdot \delta, \quad (3.26)$$

где $\delta = 0,5S$;

$S = 300$ мм – толщина заготовки.

$$Bi = \frac{120,431}{50,693} \cdot 0,15 = 0,356$$

6) Определим температурный коэффициент на поверхности пластины в начале зоны (3.27):

$$\Theta_{нов} = \frac{\bar{t}_2 - t_{нов}^{кон}}{\bar{t}_2 - t_0} \quad (3.27)$$

$$\Theta_{нов} = \frac{1100 - 605}{110 - 20} = 0,458$$

7) Определяем число Фурье: (по рис.П.1.[48]): $F_0 = 1,85$.

8) По Bi и F_0 используя номограмму П2 [48], находим $\Theta_{сер} = 0,56$.

9) Используя номограммы П3 и П4 [48], определим температурный критерий: $\Phi'_{нов} = 0,33$; $\Phi'_{сер} = 0,21$.

10) Температурный коэффициент внизу пластины в начале зоны (3.28)

$$\Theta_0 = \frac{t_2^{нач} - t_0}{t_2^{кон} - t_0} \quad (3.28)$$

										лист
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	13.04.01.2020.125.18 ПЗ					24

$$\Theta_0 = \frac{900 - 20}{1300 - 20} = 0,688$$

11) Температурный коэффициент в низу пластины в конце зоны (3.29):

$$\Theta'_0 = \frac{t_2^{кон} - t_0^{нач}}{t_2^{кон} - t_0} \quad (3.29)$$

$$\Theta'_0 = \frac{1300 - 900}{1300 - 20} = 0,313$$

12) Температурный коэффициент на поверхности пластины в конце зоны (3.30):

$$\Theta'_{нов} = \Theta_0 \cdot \Theta_{нов} + \Theta'_0 (1 - \Phi'_{нов}) \quad (3.30)$$

$$\Theta'_{нов} = 0,688 \cdot 0,458 + 0,313 \cdot (1 - 0,33) = 0,524$$

13) Температурный коэффициент в середине пластины в конце зоны (3.31):

$$\Theta'_{сеп} = \Theta_0 \cdot \Theta_{сеп} + \Theta'_0 (1 - \Phi'_{сеп}) \quad (3.31)$$

$$\Theta'_{сеп} = 0,687 \cdot 0,56 + 0,3125 \cdot (1 - 0,21) = 0,632$$

14) Уточним температуру на поверхности и середине материала (3.32–3.33):

$$t_{нов}^{кон} = t_2^{кон} - \Theta'_{нов} (t_2^{кон} - t_0) \quad (3.32)$$

$$t_{нов}^{кон} = 300 - 0,524 \cdot (1300 - 20) = 628,667 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{сеп}^{кон} = t_2^{кон} - \Theta'_{сеп} (t_2^{кон} - t_0) \quad (3.33)$$

$$t_{сеп}^{кон} = 1300 - 0,632 \cdot (1300 - 20) = 491,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Полученные значения температур незначительно отличаются от принятых (не более 15...20 °С).

14) Определим время нагрева в методической зоне (3.34):

					13.04.01.2020.125.18 ПЗ	лист
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		25

$$\tau_{мет} = \frac{F_o(\delta)^2}{a} \quad (3.34)$$

$$\tau_{мет} = \frac{1,85 \cdot (0,15)^2}{1,2681 \cdot 10^{-5}} = 3282 \text{ с} \approx 54,71 \text{ мин.}$$

3. 1.4 Сварочная зона

В сварочной зоне при ускоренном нагреве температура газов остается постоянной. Так как температура поверхности металла изменяется по ходу нагрева, то коэффициент теплоотдачи излучением будет также изменяться.

Определение коэффициента теплоотдачи в сварочной зоне методической трех-зонной печи.

1) Найдем эффективную длину луча (3.13):

$$l_{эф} = 3,6 \frac{5,6 \cdot 2,35}{2 \cdot (2,35 + 5,6)} = 2,98 \text{ м}$$

2) Определим степень черноты газов по табл. ПЗ и П4, перемножив значения формул (3.11) и (3.13):

$$P_{CO_2} \cdot l_{эф} = 9,202 \cdot 2,979 = 327,42 \text{ кПа} \cdot \text{м}$$

Из полученного значения определим степень черноты $\varepsilon_{CO_2} = 0,118$.

$$P_{H_2O} \cdot l_{эф} = 17,987 \cdot 2,979 = 53,597 \text{ кПа} \cdot \text{м}$$

Из полученного значения определим степень черноты $\varepsilon_{H_2O} = 0,203$.

$\varepsilon_{CO_2}, \varepsilon_{H_2O}$ – определены при температуре уходящих газов (1350 °С).

3) Определим интегральный коэффициент излучения (3.14):

$$\varepsilon_z = 0,118 + 1,08 \cdot 0,203 = 0,337$$

4) Определим угловой коэффициент излучения кладки на металл (3.15):

$$\phi_{км} = \frac{5}{(2 \cdot 2,35 + 5,6)} = 0,485$$

5) Определим приведённый коэффициент излучения от продуктов сгорания на металл с учётом тепла, отражённого от кладки печи на металл (формула 3.16), где $\varepsilon_m = 0,85$ – коэффициент теплового излучения материала (табл. П2 [48]);

										лист
										26
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	13.04.01.2020.125.18 ПЗ					

$c_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ – коэффициент излучения абсолютно чёрного тела.

$$c_{\text{зкм}} = 5,67 \cdot 0,85 \cdot 0,337 \cdot \frac{0,485 \cdot (1 - 0,337) + 1}{0,485 \cdot (1 - 0,337)[0,85 + 0,337 \cdot (1 - 0,8)] + 0,337} =$$
$$= 3,426 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

6) Удельный тепловой поток в начале сварочной зоны (3.17):

$$T_m = 628,67 + 273 = 901,67 \text{ К}$$

$$T_z = 1300 + 273 = 1573 \text{ К}$$

$$q_l = 3,426 \cdot \left[\left(\frac{1573}{100} \right)^4 - \left(\frac{901,67}{100} \right)^4 \right] = 187122 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

7) Определим коэффициент теплоотдачи в начале сварочной зоны (3.18):

$$\alpha_{\text{нач}}^{\text{св}} = \frac{187122}{1300 - 628,67} = 278,732 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

8) Определим $t_{\text{нов}}^{\text{кон}} = 1190 \text{ }^\circ\text{C}$ – конечная температура материала в сварочной зоне.

Удельный тепловой поток в конце сварочной зоны (3.17):

$$q_l = 3,426 \cdot \left[\left(\frac{1300 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{1190 + 273}{100} \right)^4 \right] = 52803,727 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

9) Определим коэффициент теплоотдачи в конце сварочной зоны (3.20):

$$\alpha_{\text{кон}}^{\text{св}} = \frac{52803,727}{1300 - 1190} = 480,034 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

10) Определим средний коэффициент теплоотдачи по крайним значениям в начале и в конце зоны (3.35):

$$\alpha_{\text{ср}} = \frac{\alpha^{\text{нач}} - \alpha^{\text{кон}}}{\ln \left(\frac{\alpha^{\text{нач}}}{\alpha^{\text{кон}}} \right)} \quad (3.35)$$

$$\alpha_{cp} = \frac{278,732 - 480,034}{\ln\left(\frac{278,732}{480,034}\right)} = 370,309 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Выполним расчет нагрева металла в сварочной зоне.

- 1) Средняя температура газов в зоне $\bar{t}_g = 1300 \text{ }^\circ\text{C}$.
- 2) $t_{нов}$ – температура поверхности металла (628,667 $^\circ\text{C}$ – в начале, 1190 $^\circ\text{C}$ – в конце зоны).
- 3) $k_l = 1$ – для пластины.
- 4) $t_{сер}$ – температура середины металла (491,2 $^\circ\text{C}$ – в начале, 1125 $^\circ\text{C}$ – в конце зоны).
- 5) Средняя температура металла в зоне, в начале и в конце зоны (3.23–3.24):

$$\bar{t}_m^{нач} = 628,667 - \frac{2}{3}(628,667 - 491,2) = 537,022 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\bar{t}_m^{кон} = 1190 - \frac{2}{3}(1190 - 1125) = 1146,667 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\bar{t}_m = 0,5 \cdot (537,022 + 1146,667) = 841,844 \text{ }^\circ\text{C}$$

3) По этой температуре находим коэффициент теплопроводности материала (по таблице I – 51 [22]): $\lambda = 27,458 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$.

4) Определим $C_{cp} = 0,692 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$; $\rho = 7588 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Коэффициент температуропроводности по формуле (3.25):

$$a = \frac{27,458}{692 \cdot 7588} = 5,226 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$$

5) Вычислим число Био (3.26):

$$Bi = \frac{370,309}{27,458} \cdot 0,15 = 2,022$$

6) Определим температурный коэффициент на поверхности пластины в начале зоны (3.27):

$$\Theta_{нов} = \frac{1300 - 1190}{1300 - 491,2} = 0,136$$

										лист
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						28

7) По Bi и $\Theta_{нов}$ используя номограмму П1 [48], находим: $F_0 = 1,2$.

8) По Bi и F_0 используя номограмму П2 [48], находим: $\Theta_{сер} = 0,22$.

9) Используя номограммы П3 и П4 [48], определим температурный критерий :
 $\Phi'_{нов} = 0,65$; $\Phi'_{сер} = 0,4$.

10) Определим температурный коэффициент в основании пластины в начале зоны (3.28):

$$\Theta_0 = \frac{1300 - 20}{1300 - 20} = 1$$

Определим температурный коэффициент в основании пластины в конце методической зоны (3.29):

$$\Theta'_0 = \frac{1300 - 1300}{1300 - 20} = 0$$

Определим температурный коэффициент на поверхности пластины в конце зоны (3.30):

$$\Theta'_{нов} = 1 \cdot 0,136 = 0,136$$

Определим температурный коэффициент в середине пластины в конце зоны (3.31):

$$\Theta'_{сер} = 1 \cdot 0,22 = 0,22$$

11) Уточним температуру на поверхности и середине материала (3.32–3.33):

$$t_{нов}^{кон} = 1300 - 0,136 \cdot (1300 - 537,022) = 1196,232 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{сер}^{кон} = 1300 - 0,22 \cdot (1300 - 537,022) = 1132,145 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Полученные значения температур незначительно отличаются от принятых (не более 15...20 °C).

12) Определим время нагрева в сварочной зоне (3.34):

$$\tau_{св} = \frac{1,2 \cdot (0,15)^2}{5,226 \cdot 10^{-6}} = 5166 \text{ с} = 86,1 \text{ мин.}$$

									лист
									29
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	13.04.01.2020.125.18 ПЗ				

3. 1.5 Томильная зона

Температура продуктов сгорания в томильной зоне обычно выше на 30–50 °С выше конечной температуры поверхности металла.

Нагрев металла в томильной зоне.

Время нагрева металла в томильной зоне при $t_{\text{пов}} = \text{Const}$ можно рассчитать с помощью графика на рис 4.3 [48].

$\mu = 0,5$ – коэффициент, учитывающий несимметричность обогрева в сварочной зоне.

$\Delta t_{\text{нач}} = 1196,232 - 1132,145 = 64,087$ °С – перепады температур по сечению металла в начале томильной зоны.

$\Delta t_{\text{кон}} = 50$ °С – перепады температур по сечению металла в конце томильной зоны.

1) $F_0 = 0,2$ – по рисунку 4.3 [48].

2) Средняя температура металла в зоне и в конце зоны (3.23–3.24):

$$\bar{t}_m^{\text{нач}} = 1196,232 - \frac{2}{3}(1196,232 - 1132,145) = 1153,507 \text{ °С}$$

$$\bar{t}_m^{\text{кон}} = 1196,232 - \frac{2}{3}(1196,232 - 1140) = 1148,744 \text{ °С}$$

$$\bar{t}_m = 0,5 \cdot (1153,507 + 1148,744) = 1151,125 \text{ °С}$$

3) Определим $C_{sp} = 0,691 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$; $\rho = 7488 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; $\lambda = 29,3 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$.

Коэффициент температуропроводности (при $\bar{t}_m = 1151,125$ °С) (3.25):

$$a = \frac{29,3}{691 \cdot 7488} = 5,662 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$$

3) Определим время нагрева в методической зоне (3.34):

$$\tau_{\text{том}} = \frac{0,2 \cdot (0,15)^2}{5,662 \cdot 10^{-6}} = 794,67 \text{ с} \approx 13,245 \text{ мин.}$$

3. 1.6 Длина печи и напряжение пода

1) Определим длину зон печи (3.36):

$$L_i = \frac{P \cdot \tau_i}{S \cdot l \cdot \rho \cdot n}, \quad (3.36)$$

									лист
									30
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата					

13.04.01.2020.125.18 ПЗ

где P – производительность печи;

τ_i – продолжительность нагрева в зоне;

S – толщина заготовки 270 мм;

l – длина заготовки 6 м;

ρ – плотность металла при средней температуре в каждой зоне.

$$\text{Тогда } \rho_{\text{мет}} = 7776 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

$$\rho_{\text{св}} = 7587,6 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

$$\rho_{\text{том}} = 7488 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

$$\tau_{\text{мет}} = 54,7 \text{ мин.};$$

$$\tau_{\text{св}} = 86,1 \text{ мин.};$$

$$\tau_{\text{том}} = 13,2 \text{ мин.}$$

$$L_{\text{мет}} = \frac{80 \cdot 10^3 \cdot 54,7}{0,3 \cdot 5 \cdot 7776 \cdot 1 \cdot 60} = 6,3 \text{ м}$$

$$L_{\text{св}} = \frac{80 \cdot 10^3 \cdot 86,1}{0,3 \cdot 5 \cdot 7587,6 \cdot 1 \cdot 60} = 10,1 \text{ м}$$

$$L_{\text{том}} = \frac{80 \cdot 10^3 \cdot 13,2}{0,3 \cdot 5 \cdot 7488 \cdot 1 \cdot 60} = 1,6 \text{ м}$$

2) Длина активного пода методической трехзонной печи (длина, на которой происходит непосредственно нагрев металлических заготовок) рассчитывается по формуле (3.37):

$$L_a = \sum L_i \quad (3.37)$$

$$L_a = 6,3 + 10,1 + 1,6 = 17,9 \text{ м}$$

3) Длина полезного пода (длина печи, по которой перемещается металл) (3.38):

$$L_{\text{п}} = \frac{L_a}{\kappa_3}, \quad (3.38)$$

где $\kappa_3 = 0,75$ – коэффициент заполнения полезной длины.

									лист
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата					31

13.04.01.2020.125.18 ПЗ

$$L_n = \frac{17,9}{0,98} = 23,88 \text{ м}$$

4) Длина габаритного пода печи (3.39):

$$L_z = L_n + L_{np}, \quad (3.39)$$

где $L_{np} = 1,5$ м – длина неработающего участка.

$$L_z = 23,88 + 1,5 = 32,663 \text{ м}$$

5) Напряжение активного пода (3.40):

$$H_a = \frac{P}{F_a}, \quad (3.40)$$

где F_a – площадь активного пода.

Под H_a понимается удельная производительность печи, определяющая количество металла, нагреваемого на единице поверхности в единицу времени.

Площадь активного пода методической трехзонной печи рассчитаем по формуле 3.41:

$$F_a = L_a \cdot l \cdot n \quad (3.41)$$

$$F_a = 17,913 \cdot 5 \cdot 1 = 89,564 \text{ м}^2$$

$$H_a = \frac{80 \cdot 10^3}{3600 \cdot 89,564} = 0,248 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$$

3. 1.7 Тепловой баланс печи.

Тепловой баланс печи составляется для определения расхода топлива на нагрев металла и представляет собой уравнение, связывающее приход и расход тепла. В таблице 3.2 даны потери тепла через кладку печи.

Таблица 3.2 – Потери тепла через кладку печи

Определяемая величина	Расчётная формула	зоны		
		методическая	сварочная	томильная
1	2	3	4	5

Коэффициент диафрагмирования	$\Phi = \left[1 + \frac{\varphi_{км} \varepsilon_M^2 (1 - \varepsilon_2)}{\varepsilon_2 [1 + \varphi_{км} (1 - \varepsilon_M)(1 - \varepsilon_2)]} \right]^{-1}$	0,579	0,603	0,620
Температура внутренней поверхности кладки	$t_{кл} = 100 \cdot \sqrt[4]{\left(\frac{T_M}{100}\right)^4 + \Phi \left[\left(\frac{T_c}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_M}{100}\right)^4 \right]} - 273$	964	1261	1221

Продолжение таблицы 3.2

1	2	3	4	5
Площадь теплоотдающей поверхности стен в зоне	$F_{cm} = 4 \cdot L \cdot h \text{ (мет. и свар.)}, \text{ м}^2$ $F_{cm} = 2 \cdot L \cdot h \text{ (том.)}, \text{ м}^2$	28,768	94,815	3,931
Температура воздуха в цехе	$t_6, \text{ }^\circ\text{C}$ принимаем	30	30	30
Температура наружной поверхности стен	$t_c, \text{ }^\circ\text{C}$ принимаем	82	78	79
Коэффициент теплоотдачи конвекцией	$\alpha_{кон} = 9,5 + 98,15 \cdot 10^{-3} \cdot (t_c - t_6) - 4,74 \cdot 10^{-4} \cdot (t_c - t_6)^2 + 1,74 \cdot 10^{-6} \cdot (t_c - t_6)^3$	13,567	13,312	13,375
Коэффициент теплоотдачи излучением	$\alpha_{изл} = \frac{\varepsilon_{cm} \cdot c_0 \cdot \left[\left(\frac{T_c}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_6}{100}\right)^4 \right]}{t_c - t_6}$	6,908	6,777	6,809
Общий коэффициент теплоотдачи	$\alpha_{нар} = \alpha_{кон} + \alpha_{изл}, \frac{Вт}{\text{м}^2 \cdot К}$	20,475	20,089	20,186
Толщина огнеупорного слоя	$\delta_o, \text{ мм}$ по таблице 5.1. [1]	232	348	348
Толщина изоляционного слоя	$\delta_{из}, \text{ мм}$ по таблице 5.1. [1]	232	348	348
Температура соприкосновения слоёв	$t_{c1}, \text{ }^\circ\text{C}$	730	949	920
Коэффициент теплопроводности огнеупорного материала (шамот класс А)	$\lambda_1 = 0,880 + 0,00023 \cdot t, \frac{Вт}{\text{м} \cdot К}$	1,075	1,134	1,126
Коэф-т теплопроводности изоляционного материала (ша-	$\lambda_2 = 0,290 + 0,00023 \cdot t, \frac{Вт}{\text{м} \cdot К}$	0,383	0,408	0,405

мот легковесный ШЛБ – 0,9)				
Удельный тепловой поток через кладку	$q_{кл} = \frac{t_{кл} - t_в}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_{нар}}}, \frac{Вт}{м^2}$	1073,34	1018,2	978,02
Уточним температуру соприкосновения слоёв	$t_{c1} = t_{кл} - q_{кл} \frac{\delta_1}{\lambda_1}, ^\circ C$	731,9	948,9	919,1

Продолжение таблицы 3.2

1	2	3	4	5
Уточним температуру наружной поверхности кладки	$t_c = t_{кл} - q_{кл} \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right), ^\circ C$	82,4	80,7	78,5
Тепловые потери через стены зоны	$Q_{кл}^{cm} = q_{кл} \cdot F_{cm}, кВт$	30,879	96,539	3,844
Суммарные тепловые потери через стены	$Q_{\Sigma}^{cm} = \sum Q_{кли}^{cm}, кВт$	131,262		
Площадь теплоотдачи поверхности свода	$F_{св} = B \cdot L, м^2$	35,022	56,485	8,805
Температура воздуха в цехе	$t_в, ^\circ C$ принимаем	30	30	30
Температура наружной поверхности стен	$t_c, ^\circ C$ принимаем	97	119	117
Коэффициент теплоотдачи конвекцией	$\alpha_{кон} = 9,7 + 0,1 \cdot (t_c - t_в) - 4,43 \cdot 10^{-4} \cdot (t_c - t_в)^2 + 1,35 \cdot 10^{-6} \cdot (t_c - t_в)^3$	14,817	16,043	15,936
Коэффициент теплоотдачи излучением	$\alpha_{изл} = \frac{\varepsilon_{cm} \cdot c_0 \cdot \left[\left(\frac{T_c}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_в}{100} \right)^4 \right]}{t_c - t_в}$	12,223	11,839	11,847
Общий коэффициент теплоотдачи	$\alpha_{нар} = \alpha_{кон} + \alpha_{изл}, \frac{Вт}{м^2 \cdot K}$	27,041	27,882	27,783
Толщина огнеупорного слоя	$\delta_o, мм$ по таблице 5.1. [22]	300	300	300
Толщина изоляционного слоя	$\delta_{из}, мм$ по таблице 5.1. [22]	65	65	65
Температура соприкосновения слоёв	$t_{c1}, ^\circ C$	400	510	570

Коэффициент теплопроводности огнеупорного материала (шамот класс А)	$\lambda_1 = 0,880 + 0,00023 \cdot t, \frac{Вт}{м \cdot К}$	1,037	1,084	1,086
Коэф-т теплопроводности изоляционного материала (шамот легковесный ШЛБ – 0,9)	$\lambda_2 = 0,290 + 0,00023 \cdot t, \frac{Вт}{м \cdot К}$	0,347	0,362	0,369

Окончание таблицы 3.2

1	2	3	4	5
Удельный тепловой поток через кладку	$q_{кл} = \frac{t_{кл} - t_в}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_{нар}}}, \frac{Вт}{м^2}$	1817,97	2502,2 7	2439,19
Уточним т-ру соприкосновения слоёв	$t_{c1} = t_{кл} - q_{кл} \frac{\delta_1}{\lambda_1}, ^\circ C$	437,62	568,63	547,46
Уточним т-ру наруж. поверхности кладки	$t_c = t_{кл} - q_{кл} \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right), ^\circ C$	97,23	119,74	117,79
Тепловые потери через свод зоны	$Q_{кл}^{свод} = q_{кл} \cdot F_{свод}, кВт$	63,668	141,34 2	21,476
Суммарные потери через свод	$Q_{\Sigma}^{свод} = \sum Q_{кли}^{свод}, кВт$	226,486		
Суммарные потери	$Q_{кл} = Q_{\Sigma}^{см} + Q_{\Sigma}^{свод}, кВт$	357,748		

Рассмотрим потери тепла излучением через открытые окна.
Методическая зона.

а) Потери через окно загрузки:

1) Площадь окна загрузки (3.42):

$$F_{ок}^{заг} = B \cdot 2 \cdot S \quad (3.42)$$

$$F_{ок}^{заг} = 5,6 \cdot 2 \cdot 0,3 = 3,36 \text{ м}^2$$

2) Потери составят (3.43):

$$Q_{изл} = c_0 \left[\left(\frac{T_z}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_в}{100} \right)^4 \right] \Phi_1 \cdot F_{ок} \cdot \psi, \quad (3.43)$$

где $\Phi_l = 0,10$ – коэффициент диафрагмирования (по рисунку 3.7 [48]);
 $\psi = 1$ – доля времени по истечении которого окно открыто.

$$Q_{изл} = 5,67 \cdot \left[\left(\frac{1100 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{20 + 273}{100} \right)^4 \right] \cdot 0,10 \cdot 3,36 \cdot 1 = 67,562 \text{ кВт}$$

б) Потери через смотровые окна:

1) Количество смотровых окон (3.44):

$$n = \frac{L_{мет}}{2,32} \cdot 2 \quad (3.44)$$

$$n = \frac{6,3}{2,32} \cdot 2 \approx 5 \text{ шт.}$$

2) Размер окон: 464×464 мм.

3) Площадь смотровых окон (3.45):

$$F_{см} = a \cdot b \cdot n = 1,076 \text{ м}^2 \quad (3.45)$$

$$F_{см} = 0,464 \cdot 0,464 \cdot 5 = 1,076 \text{ м}^2$$

4) Определим $\Phi_l = 0,10$, $\psi = 0,15$.

Потери рассчитаем по формуле (3.43):

$$Q_{изл}^{см} = 5,67 \left[\left(\frac{1100 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{20 + 273}{100} \right)^4 \right] \cdot 0,10 \cdot 0,15 \cdot 1,076 = 3,247 \text{ кВт}$$

Сварочная зона.

а) Потери через смотровые окна:

1) Количество смотровых окон (3.44):

$$n = \frac{10,1}{2,32} \cdot 2 \approx 9 \text{ шт.}$$

2) Размер окон: 464×464 мм

3) Площадь смотровых окон (3.45):

										лист
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						36

$$F_{cm} = 0,464 \cdot 0,464 \cdot 9 = 1,938 \text{ м}^2$$

4) Определим $\Phi_l = 0,10$, $\psi = 0,3$.

Потери рассчитаем по формуле (3.43):

$$Q_{изл}^{cm} = 5,67 \left[\left(\frac{1300 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{20 + 273}{100} \right)^4 \right] \cdot 0,10 \cdot 1,938 \cdot 0,3 = 11,689 \text{ кВт}$$

Томильная зона.

а) Потери через смотровые окна:

1) Количество смотровых окон (3.44):

$$n = \frac{1,6}{1,160} \cdot 2 \approx 3 \text{ шт.}$$

2) Размер окон: $464 \times 464 \text{ мм}$.

3) Площадь смотровых окон (3.45):

$$F_{cm} = 0,464 \cdot 0,464 \cdot 3 = 0,645 \text{ м}^2$$

4) Определим $\Phi_l = 0,10$, $\psi = 0,3$.

Потери рассчитаем по формуле (3.43):

$$Q_{изл}^{cm} = 5,67 \cdot \left[\left(\frac{1230 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{20 + 273}{100} \right)^4 \right] \cdot 0,0 \cdot 0,645 \cdot 0,3 = 3,89 \text{ кВт}$$

б) Потери через окно выгрузки:

1) Площадь окна выгрузки (3.42):

$$F_{ок}^{6blz} = 5,6 \cdot 2 \cdot 0,15 = 3,36 \text{ м}^2$$

2) Определим $\Phi_l = 0,10$, $\psi = 1$.

Потери рассчитаем по формуле (3.43):

$$Q_{изл}^{6blz} = 5,67 \cdot \left[\left(\frac{1230 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{20 + 273}{100} \right)^4 \right] \cdot 0,11 \cdot 3,36 \cdot 1 = 67,562 \text{ кВт}$$

Суммарные потери тепла через открытые окна (3.46):

										лист
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	13.04.01.2020.125.18 ПЗ					37

$$Q_{изл} = \sum Q_i \quad (3.46)$$

$$Q_{изл} = 3,247 + 11,689 + 67,562 + 3,89 + 67,562 = 153,956 \text{ кВт}$$

а) Методическая зона.

Рассчитаем потери тепла с охлаждающей водой (3.47):

$$Q_{охл}^{мет} = q_{охл} \cdot F_{охл}, \quad (3.47)$$

где $q_{охл} = 140 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}$ – удельный тепловой поток через стенку охлаждаемого элемента

(по рис 5.3 [48]);

$F_{охл}$ – площадь поверхности глиссажных труб.

Рассчитаем площадь поверхности глиссажных труб (3.48):

$$F_{зл} = \pi \cdot d \cdot L_{мет} \cdot n, \quad (3.48)$$

где $L_{мет} = 6,3 \text{ м}$;

$n = 4$ – число труб;

d – диаметр труб.

$$F_{зл} = 3,14 \cdot 0,133 \cdot 6,3 \cdot 4 = 10,45 \text{ м}^3$$

$$Q_{охл}^{мет} = 140 \cdot 10,45 = 1463,32 \text{ кВт}$$

б) Сварочная зона.

Определим $q_{охл} = 165 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}$.

Площадь поверхности глиссажных труб (3.48):

$$F_{зл} = 3,14 \cdot 0,133 \cdot 10,1 \cdot 4 = 16,86 \text{ м}^2$$

Потери тепла с охлаждающей водой в сварочной зоне (3.47):

$$Q_{охл}^{св} = 165 \cdot 16,86 = 2781,59 \text{ кВт}$$

Количество сдвоенных поперечных труб (3.49):

$$n = \frac{L_{св}}{1,16} \cdot 2 \quad (3.49)$$

										лист
										38
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	13.04.01.2020.125.18 ПЗ					

$$n = \frac{10,1}{1,16} \cdot 2 = 7 \text{ шт.}$$

Площадь поверхности сдвоенных поперечных труб (3.50):

$$F_{\text{нон}} = \pi \cdot d \cdot B \cdot n \quad (3.50)$$

$$n = \frac{10,1}{1,16} \cdot 2 = 7 \text{ шт.}$$

$$Q_{\text{охл}}^{\text{сб}} = 165 \cdot 20,689 = 3413,729 \text{ кВт}$$

Полные потери с охлаждающей водой (3.46):

$$Q_{\text{охл}} = 163,32 + 2781,59 + 3413,729 = 7658,644 \text{ кВт}$$

Рассчитаем тепло затраченное на нагрев металла.

$$Q_{\text{м}} = P \cdot (C_{\text{м}}^{\text{кон}} \cdot t_{\text{м}}^{\text{кон}} - C_{\text{м}}^{\text{нач}} \cdot t_{\text{м}}^{\text{нач}}), \quad (3.51)$$

где $C_{\text{м}}^{\text{кон}}$, $C_{\text{м}}^{\text{нач}}$ – конечная и начальная теплоёмкость металла;

$$C_{\text{м}}^{\text{нач}} = 0,474 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$C_{\text{м}}^{\text{кон}} = 0,691 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

$$Q_{\text{м}} = \frac{80 \cdot 1000}{3600} \cdot (0,691 \cdot 1148,744 - 0,474 \cdot 20) = 17,429 \text{ МВт}$$

Неучтенные потери тепла (3.52):

$$Q_{\text{неуч}} = 0,1 \cdot (Q_{\text{м}} + Q_{\text{кл}} + Q_{\text{охл}} + Q_{\text{изл}}) \quad (3.52)$$

$$Q_{\text{неуч}} = 0,1 \cdot (17429 + 357,747 + 7658,644 + 153,956) = 2559,928 \text{ кВт}$$

Рассмотрим расход топлива для данной печи.

Составим уравнение теплового баланса (3.53):

$$Q_{\text{x}} + Q_{\text{фм}} + Q_{\text{фв}} + Q_{\text{экз}} = Q_{\text{м}} + Q_{\text{д}} + Q_{\text{кл}} + Q_{\text{изл}} + Q_{\text{охл}} + Q_{\text{неуч}}, \quad (3.53)$$

										лист
										39
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	13.04.01.2020.125.18 ПЗ					

где Q_x – химическое тепло топлива;

$Q_{фm}$ – физическое тепло топлива;

$Q_{фв}$ – физическое тепло воздуха;

$Q_{экз}$ – тепло экзотермической реакции окисления железа;

Q_{δ} – тепло уносимое с дымовыми газами.

Подставив значения, получим (3.54–3.55):

$$Q_p^H \cdot B_m + B_m \cdot h_m + B_m \cdot V_v \cdot h_v + 5632P \cdot a = \quad (3.54)$$

$$= Q_m + B_m \cdot V_{\delta} \cdot h_{\delta} + Q_{кл} + Q_{изл} + Q_{охл} + Q_{неуч}$$
$$B_m (Q_p^H + h_m + V_v \cdot h_v - V_{\delta} \cdot h_{\delta}) = Q_m + Q_{кл} + Q_{изл} + \quad (3.55)$$
$$+ Q_{охл} + Q_{неуч} - 5632P \cdot a$$

Выразим расход топлива (3.56)

$$B_m = \frac{Q_m + Q_{кл} + Q_{изл} + Q_{охл} + Q_{неуч} - 5632P \cdot a}{(Q_p^H + h_m + V_v \cdot h_v - V_{\delta} \cdot h_{\delta})}, \quad (3.56)$$

где $Q_p^H = 36,255 \frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$;

$V_{\delta} = 11,193$ – объём продуктов сгорания;

$V_v = 10,172$ – действительный расход воздуха;

h_v – энтальпия подогретого воздуха;

$t_d = 400$ °С;

$h_v = 210,905 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$;

h_{δ} – энтальпия уходящих газов.

Найдем энтальпию уходящих газов методической трехзонной печи по формуле (3.57):

$$h_{\delta} = \sum x_i \cdot h_i = x_{CO_2} \cdot h_{CO_2} + x_{H_2O} \cdot h_{H_2O} + x_{N_2} \cdot h_{N_2} + x_{O_2} \cdot h_{O_2} \quad (3.57)$$
$$h_{\delta} = 0,092 \cdot 501,735 + 382,640 \cdot 0,179 + 0,719 \cdot 297,808 +$$
$$+ 0,009 \cdot 319,403 = 332,029 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$$

По таблицам 1–4,1–5,1–6 [22] определяем теплоёмкости газов (3.58):

$$c'_{pm} = \sum x_i \cdot c'_i = \frac{1}{100} \cdot (x_{CO_2} \cdot c'_{CO_2} + x_{CO} \cdot c'_{CO} + x_{H_2} \cdot c'_{H_2} + x_{N_2} \cdot c'_{N_2} + x_{O_2} \cdot c'_{O_2} + x_{H_2O} \cdot c'_{H_2O} + x_{CH_4} \cdot c'_{CH_4} + x_{C_2H_6} \cdot c'_{C_2H_6}) \quad (3.58)$$

$$c'_{pm} = 0,01 \cdot (0,9136 \cdot 0,244 + 0 \cdot 1,040 + 0,0015 \cdot 14,45 + 1,034 \cdot 1,28 + 0,0095 \cdot 0,933 + 95,82 \cdot 2,448) = 2,362 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Энтальпия подогретого топлива (3.59):

$$h_m = t \cdot c_p, \quad (3.59)$$

где $t_{nm} = 100 \text{ } ^\circ\text{C}$.

$$h_m = 100 \cdot 2,362 = 236,18 \frac{\text{кДж}}{\text{М}^3}$$

$$B_m = \frac{17429 + 131,261 + 153,956 + 7658,644 + 2559,93 - 3715,4}{36255 + 236,182 + 10,17 \cdot 210,905 - 11,19 \cdot 332,029} = 0,746 \frac{\text{М}^3}{\text{с}}$$

Ниже рассмотрим приход тепла.

1) Химическое тепло топлива (3.60):

$$Q_x = Q_n^p \cdot B_m \quad (3.60)$$

$$Q_x = 36255 \cdot 0,746 = 27051,82 \text{ кВт}$$

2) Физическое тепло воздуха (3.61):

$$Q_{фв} = B_m \cdot V_v \cdot h_v \quad (3.61)$$

$$Q_{фв} = 0,695 \cdot 10,17 \cdot 463,75 = 3278,18 \text{ кВт}$$

3) Физическое тепло подогретого топлива (3.62):

$$Q_{фм} = B_m \cdot h_m \quad (3.62)$$

$$Q_{фм} = 0,746 \cdot 235,96 = 176,06 \text{ кВт}$$

										лист
										41
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	13.04.01.2020.125.18 ПЗ					

4) Тепло экзотермических реакций (3.63):

$$Q_{\text{экз}} = 5632 \cdot P \cdot a, \quad (3.63)$$

где $a = 0,015$ – угар металла.

$$Q_{\text{экз}} = \frac{5632 \cdot 80 \cdot 1000 \cdot 0,015}{3600} = 1877,3 \text{ кВт}$$

Рассмотрим формулы для вычисления тепла уносимого продуктами сгорания.

Определим тепло уносимое продуктами сгорания (3.64):

$$Q_o = B_m \cdot V_o \cdot h_o \quad (3.64)$$

$$Q_o = 0,746 \cdot 332,029 \cdot 11,193 = 2773,16 \text{ кВт}$$

Приходные и расходные статьи баланса рассмотрены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Приходные и расходные статьи баланса

Приходные данные	кВт	%	Расходные данные	кВт	%
1. Химическое тепло топлива	27051,82	88,09	1. Нагрев металла	17428,94	56,35
2. Физическое тепло воздуха	1600,67	5,21	2. Потери через кладку	357,75	1,16
3. Тепло экзотермических реакций окисления железа	1877,33	6,11	3. Тепло уходящих продуктов сгорания	2773,16	8,96
4. Физическое тепло подогретого топлива	176,06	0,57	4. Потери с охлаждающей водой	7658,64	24,76
			5. Потери излучения через окна	153,96	0,49
			6. Неучтённые потери	2559,93	8,28
ИТОГО:	30705,88	100		30932,37	100

Определим невязку теплового баланса (3.65):

$$\Delta = 100 \cdot \left(\frac{Q_n - Q_p}{Q_n} \right) \quad (3.65)$$

$$\Delta = 100 \cdot \left(\frac{30705,88 - 30932,37}{30705,88} \right) = 0,732 \%$$

Определим технологический К.П.Д (3.66):

$$\eta_{mex} = 100 \cdot \frac{Q_m}{Q_n^p \cdot B_m} \quad (3.66)$$

$$\eta_{mex} = 100 \cdot \frac{17429}{36255 \cdot 0,746} = 64,43 \%$$

Определим коэффициент использования топлива (3.67):

$$\eta_{ум.} = \frac{B_m \cdot Q_n^p + Q_{фm} + Q_{фв} - Q_d}{B_m \cdot Q_n^p} \cdot 100 \quad (3.67)$$

$$\eta_{ум.} = \frac{0,746 \cdot 36255 + 176,06 + 1600,67 - 2773,16}{0,746 \cdot 36255} \cdot 100 = 96,32 \%$$

Выполним аналогичный расчет методической трехзонной печи без работы рекуператора, тогда температура подаваемого воздуха в горелку будет равна 20 °С.

Ниже даны результаты расчета без подогрева (Таблица 3.4).

Таблица 3.4 – Приходные и расходные статьи баланса

Приходные данные	кВт	%	Расходные данные	кВт	%
1. Химическое тепло топлива	28546,95	92,5	1. Нагрев металла	17428,94	56,07
2. Физическое тепло воздуха	249,08	0,81	2. Потери через кладку	357,75	1,15
3. Тепло экзо-	1877,33	6,08	3. Тепло уходящих	2926,43	9,41

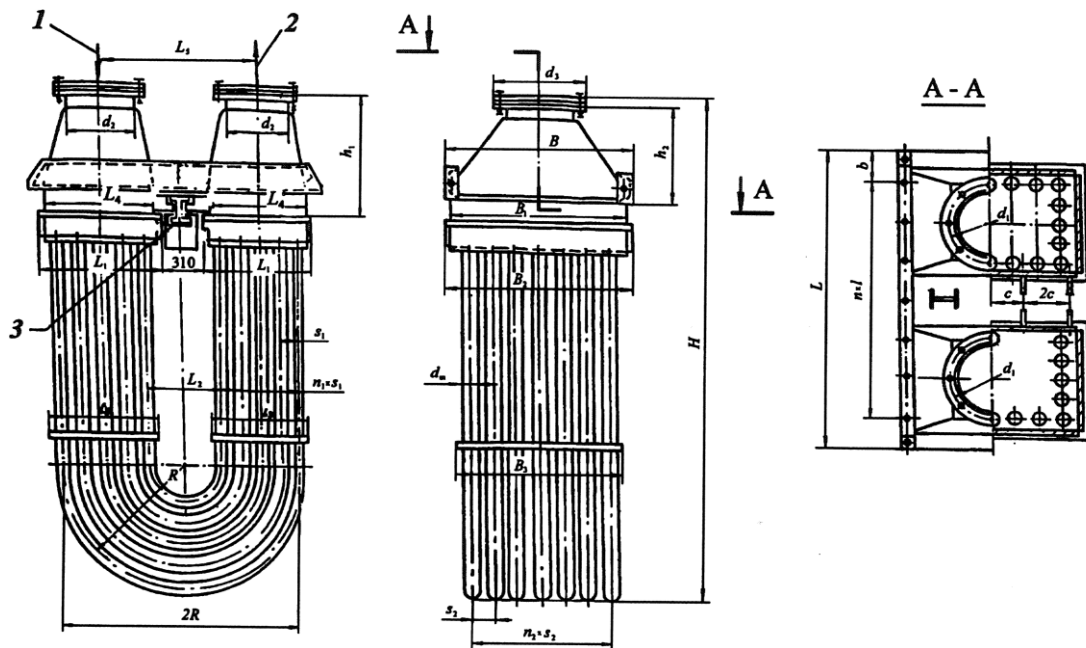


Рисунок 4.2 – Металлический петлевой рекуператор:
 1 – подвод воздуха; 2 – отвод воздуха; 3 – балка для подвески кирпича

Чтобы определить эффективность использования тепла при подогреве воздуха в рекуператоре, необходимо оценить затраты на сооружение рекуператора и срок окупаемости, что было проведено в главе «Экономика и управление».

При выборе рекуператора важно учитывать газоплотность и механическую прочность, поскольку могут возникнуть температурные напряжения, которые разрушат газоплотность конструкции, что может привести к попаданию воздуха-окислителя в дымовой тракт. Также немаловажную роль при выборе рекуператора играет тепловая производительность печи.

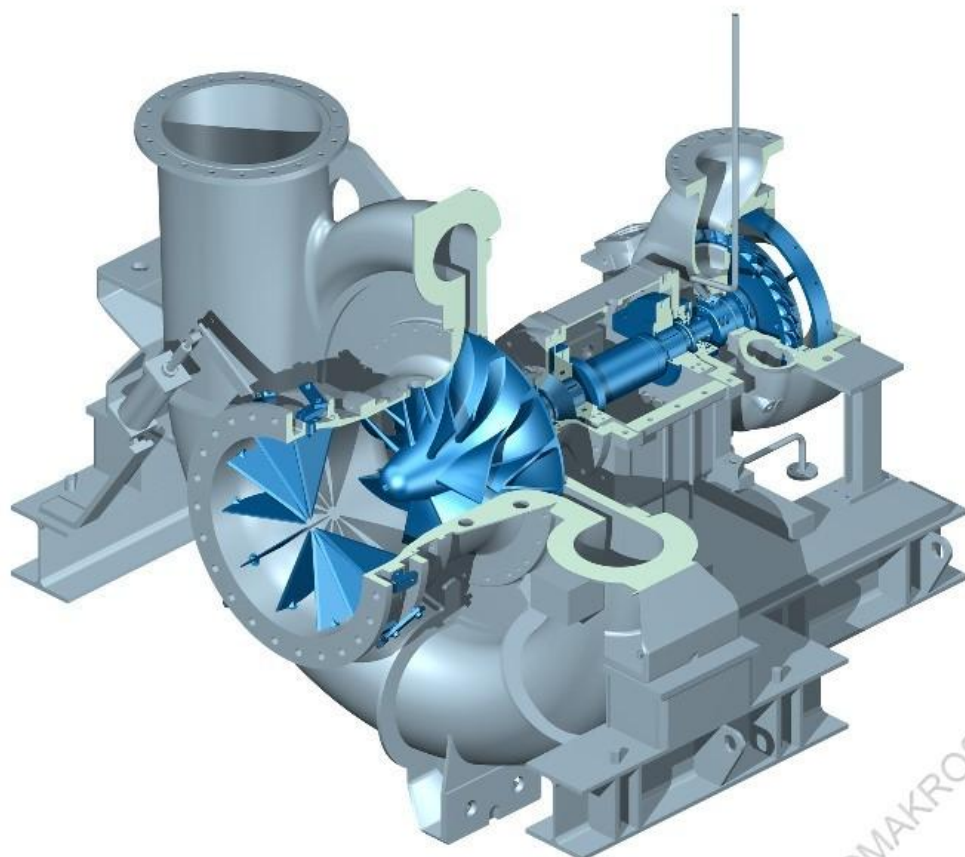
Для нагревательных печей металлургического производства нет необходимости устанавливать керамический рекуператор. Учитывая все вышесказанные преимущества металлического петлевого рекуператора, можно сделать вывод, что данный рекуператор соответствует всем требованиям, предъявляемым к теплообменным установкам [44, 49, 54].

Для более полного использования тепла отходящих газов в работе предложено разработать двухступенчатую систему утилизации. Первая ступень – рекуператор, вторая ступень – устройство, использующее тепло отходящих газов после рекуператора, но при этом вырабатывающее электроэнергию и понижающее давление природного газа высокого давления. Данное устройство называют детандер-генераторным агрегатом. Ниже рассмотрим турбодетандерные агрегаты и поршневые детандеры.

За счет движения поршня происходит расширение хладагента. Поршневой детандер сам же из себя представляет тепловую машину объёмного действия.

При снижении энтальпии хладагента происходит выработка энергии, за счет энергии сжатого газа вырабатывается механическая работа. На рисунке 4.3 изображен поршневой детандер.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата



©МАКРОСИСТЕМ LLC

Рисунок 4.4 – Турбодетандер

Рабочее вещество последовательно проходит по межлопаточным каналам направляющего аппарата. В нем увеличивается скорость потока и расширение потока. Пройдя лопатки рабочего колеса, вещество через колесо и вал передает кинетическую энергию потребителю. Пройдя через детандер, рабочее тело имеет сниженную температуру.

Условия обеспечения работы турбодетандеров без выпадения в них двуокиси углерода во время пуска аналогичны условиям в отношении влаги. Воздух из турбодетандеров должен выходить при температуре, более высокой или равной температуре насыщения парами двуокиси углерода при давлении на выходе из машины и данном количестве двуокиси углерода в воздухе.

Таким образом, в данной работе предложена установка турбодетандера, поскольку устройство агрегата позволяет эффективно использовать потенциальную энергию природного газа высокого давления.

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

13.04.01.2020.125.18 ПЗ

лист

48

4 РАСЧЕТ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПЕТЛЕВОГО РЕКУПЕРАТОРА

Целью расчета является определение площади поверхности теплообмена, числа и длины трубок в одном ходу [22, 51].

Определение коэффициента теплопередачи. Исходные данные взяты из расчета методической печи.

1) Физическое тепло воздуха (4.1):

$$Q_{фв} = B_m \cdot V_в \cdot h_в, \quad (4.1)$$

где B_m – расход топлива, м³/с;

$V_в$ – действительный расход воздуха, м³/м³;

$h_в$ – энтальпия воздуха, кДж/м³.

$$Q_{фв} = 0,746 \cdot 10,2 \cdot 210,9 = 1600,7 \text{ кВт}$$

2) С другой стороны физическое тепло воздуха определяется по формуле (4.2):

$$Q_{фв} = B_m \cdot V_д \cdot (h_1' - h_1'') \cdot \eta, \quad (4.2)$$

где $V_д$ – объем продуктов сгорания, м³/м³;

h_1' – энтальпию газов на выходе из рекуператора, кДж/м³;

h_1'' – энтальпию газов на входе в рекуператор, кДж/м³;

η – коэффициент использования топлива.

Из формулы (4.2) найдем энтальпию газов на выходе из рекуператора:

$$h_1'' = h_1' - \frac{Q_{фв}}{B_m \cdot V_д \cdot \eta} \quad (4.3)$$

$$h_1'' = 1360,6 - \frac{1600,7}{0,746 \cdot 11,2 \cdot 0,95} = 1158,9 \text{ кДж/м}^3$$

Данной энтальпии соответствует температура: $t_1'' = 600$ °С.

3) Скорость движения воздуха и дымовых газов находятся в пределах:

$$\omega_{ов} = 5 - 10 \text{ м/с}; \quad \omega_{од} = 1,5 - 5 \text{ м/с}.$$

Примем: $\omega_{ов} = 7$ м/с; $\omega_{од} = 3$ м/с.

4) Определим действительную скорость воздуха и дымовых газов в рекуператоре по формуле (4.4):

									лист
									49
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	13.04.01.2020.125.18 ПЗ				

$$\omega = \omega_{ог} \cdot \left(1 + \frac{1}{T} \cdot t\right), \quad (4.4)$$

где T – средняя температура воздуха и дымовых газов в градусах Кельвина;

t – средняя температура воздуха и дымовых газов в градусах Цельсия.

Для воздуха:

$$\omega_{г} = 7 \cdot \left(1 + \frac{1}{\left(\frac{400 + 20}{2} + 273\right)} \cdot \left(\frac{400 + 20}{2}\right)\right) = 10,04 \text{ м/с}$$

Для дымовых газов:

$$\omega_{д} = 7 \cdot \left(1 + \frac{1}{\left(\frac{778,7 + 900}{2} + 273\right)} \cdot \left(\frac{778,7 + 900}{2}\right)\right) = 5,26 \text{ м/с}$$

5) Число Рейнольдса определяется по формуле (4.5):

$$Re = \frac{\omega \cdot d_n}{\vartheta}, \quad (4.5)$$

где $d_n \times \delta = 76 \times 4,5 \text{ мм}$ – наружный диаметр и толщина трубок рекуператора;

ϑ – коэффициент динамической вязкости, принимается по средней температуре дымовых газов и воздуха.

Для воздуха число Рейнольдса:

$$Re_{г} = \frac{10,04 \cdot 0,067}{36,002 \cdot 10^{-6}} = 18690,99$$

Для дымовых газов число Рейнольдса:

$$Re_{д} = \frac{5,26 \cdot 0,076}{139,9 \cdot 10^{-6}} = 2859,491$$

6) Число Нуссельта для воздуха определяется по формуле (4.6) [22]:

$$Nu_{г} = 0,023 \cdot Re_{г}^{0,8} \cdot Pr_{г}^{0,4} \cdot \varepsilon_z, \quad (4.6)$$

где $\varepsilon_z = 1$.

Физические свойства воздуха при средней температуре 210 °С:

$$Pr_g = 0,6794;$$

$$\lambda_g = 3,99 \cdot 10^{-2}.$$

Тогда по формуле (4.6) число Нуссельта для воздуха:

$$Nu_g = 0,023 \cdot 18690,99^{0,8} \cdot 0,6794^{0,4} \cdot 1 = 51,51$$

7) Коэффициент теплоотдачи воздуха (4.7):

$$\alpha_g = \frac{Nu_g \cdot \lambda_g}{d} \quad (4.7)$$

$$\alpha_g = \frac{51,51 \cdot 3,99 \cdot 10^{-2}}{0,067} = 30,73 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

8) Число Нуссельта для дымовых газов определяется по формуле (4.8) [22]:

$$Nu_{\partial} = 0,41 \cdot Re_{\partial}^{0,6} \cdot Pr_{\partial}^{0,33} \cdot \varepsilon_z \cdot \varepsilon_s \quad (4.8)$$

где $\varepsilon_z = 1$.

Для определения ε_s воспользуемся формулой (4.9):

$$\varepsilon_s = \left(\frac{s_1}{s_2}\right)^{1/6} = \left(\frac{3 \cdot d_n}{4 \cdot d_n}\right)^{1/6} \quad (4.9)$$

$$\varepsilon_s = \left(\frac{3 \cdot 0,076}{4 \cdot 0,076}\right)^{1/6} = 0,953$$

Физические свойства дымовых газов при средней температуре 839,4 °С:
 $Pr_d = 0,596$; $\lambda_d = 9,48 \cdot 10^{-2}$.

Тогда по формуле (4.8) число Нуссельта для дымовых газов:

$$Nu_{\partial} = 0,41 \cdot 2859,49^{0,6} \cdot 0,596^{0,33} \cdot 1 \cdot 0,953 = 39,04$$

9) Коэффициент теплоотдачи для дымовых газов (4.7):

$$\alpha_{\partial z} = \frac{39,04 \cdot 9,48 \cdot 10^{-2}}{0,076} = 48,72 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

10) Линейный коэффициент теплопередачи (4.10):

										лист
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						51

$$k_l = \frac{1}{\frac{1}{d_{вн} \cdot \alpha_в} + \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln\left(\frac{d_{н}}{d_{вн}}\right) + \frac{1}{d_{н} \cdot \alpha_д}}, \quad (4.10)$$

где $\lambda = 19 \frac{Вт}{м \cdot ^\circ C}$ – коэффициент теплопроводности стали.

$$k_l = \frac{1}{\frac{1}{0,067 \cdot 30,73} + \frac{1}{2 \cdot 19} \cdot \ln\left(\frac{0,076}{0,067}\right) + \frac{1}{0,076 \cdot 48,72}} = 1,1 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ C$$

1.2 Определение среднего температурного напора

Средний температурный напор определяется по формуле (4.11):

$$\Delta t_{cp} = \Delta t_{ном} \cdot \varepsilon_{\Delta t} \quad (4.11)$$

1) Так как у нас чистый противоток, то $\Delta t_{м}$ рассчитаем по формуле (4.12):

$$\Delta t_{м} = t_1' - t_2'' \quad (4.12)$$

$$\Delta t_{м} = 778 - 20 = 758,7 \text{ } ^\circ C$$

Так как у нас чистый противоток, то $\Delta t_о$ рассчитаем по формуле (4.13):

$$\Delta t_о = t_1'' - t_2' \quad (4.13)$$

$$\Delta t_о = 900 - 400 = 500 \text{ } ^\circ C$$

Так как отношение $\frac{\Delta t_о}{\Delta t_{м}}$ меньше 1,5 и равно 0,66, то средняя температура противотока в рекуператоре определяется по формуле (4.14):

$$\Delta t_{ном} = \frac{\Delta t_о - \Delta t_{м}}{2} \quad (4.14)$$

$$\Delta t_{ном} = \frac{758,7 - 500}{2} = 629,35 \text{ } ^\circ C$$

2) Коэффициент $\varepsilon_{\Delta t}$ определяется графически в зависимости от параметров P и R (4.15 и 4.16):

$$P = \frac{t_g'' - t_g'}{t_d' - t_g'} \quad (4.15)$$

$$P = \frac{400 - 20}{900 - 20} = 0,432$$

$$R = \frac{t_d' - t_d''}{t_g'' - t_g'} \quad (4.16)$$

$$R = \frac{900 - 778,7}{400 - 20} = 0,319$$

По графику 6.1[22] коэффициент $\varepsilon_{\Delta t} = 0,99$.

Тогда средний температурный напор по формуле (4.11):

$$\Delta t_{cp} = 629,35 \cdot 0,99 = 623,06 \text{ } ^\circ\text{C}$$

1.3 Определение площади поверхности рекуператора

1) Из уравнения теплового баланса (4.17):

$$Q = k_l \cdot L \cdot \Delta t_{cp} \cdot \pi, \quad (4.17)$$

где k_l – линейный коэффициент теплопередачи, Вт/м²·°C;

L – длина трубок, м;

Δt_{cp} – Средний температурный напор, °C.

Выразим длину L (4.18):

$$L = \frac{Q}{k_l \cdot \Delta t_{cp} \cdot \pi} \quad (4.18)$$

$$L = \frac{1600,668 \cdot 10^3}{1,1 \cdot 623,06 \cdot 3,14} = 742,8 \text{ м}$$

2) Площадь поверхности теплообмена (4.19):

$$F = \pi \cdot d_n \cdot L \quad (4.19)$$

										лист
										53
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	13.04.01.2020.125.18 ПЗ					

$$F = 3,14 \cdot 0,076 \cdot 742,8 = 177,4 \text{ м}^2$$

1.4 Определения числа и длины труб в каждом ходу
Из формулы объема воздуха (4.20–4.21):

$$V_{\text{в}} = \omega_{\text{в}} \cdot f_{\text{ж.с.}} \quad (4.20)$$

$$f_{\text{ж.с.}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{в}}^2}{4} \cdot n \quad (4.21)$$

Найдем число труб (4.22):

$$n = \frac{4 \cdot V_{\text{в}}}{\omega_{\text{в}} \cdot \pi \cdot (d_{\text{в}})^2} \quad (4.22)$$

$$n = \frac{4 \cdot (10,2)}{10,04 \cdot 3,14 \cdot (0,067)^2} = 287 \text{ шт.}$$

Определим среднюю поверхность нагрева 1 трубы (4.23):

$$f_{\text{ср}} = \frac{F}{n} \quad (4.23)$$

$$f_{\text{ср}} = \frac{177,4}{287} = 0,62 \text{ м}^2$$

Средняя длина трубы определяется по формуле (4.24):

$$l_{\text{тр}} = \frac{f_{\text{ср}} \cdot 2}{\pi \cdot (d_{\text{н}} \cdot d_{\text{вн}})} \quad (4.24)$$

$$l_{\text{тр}} = \frac{0,62 \cdot 2}{\pi \cdot (0,076 \cdot 0,067)} = 2,75 \text{ м}$$

Определим число труб в ряду, расположенных перпендикулярно движению дыма (4.25):

$$z_1 = \frac{2 \cdot V_{\text{д}}}{\omega_{\text{д}} \cdot (2 \cdot d_{\text{н}} - d_{\text{н}}) \cdot l_{\text{ср}}} \quad (4.25)$$

										лист
										54
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	13.04.01.2020.125.18 ПЗ					

$$z_1 = \frac{2 \cdot (0,7 \cdot 11,2(1 + 0,1))}{5,3 \cdot (2 \cdot 0,076 - 0,076) \cdot 2,75} = 16 \text{ шт.}$$

Число труб по ходу дыма в каждой секции (4.26):

$$z_2 = \frac{n}{2 \cdot z_1} \quad (4.26)$$

$$z_2 = \frac{287}{2 \cdot 16} = 9 \text{ шт.}$$

Исходя из параметров печи, был выполнен расчет петлевого металлического рекуператора и определена площадь поверхности нагрева, количество, длины и диаметр трубок в каждом ряду, которые обеспечат качественный нагрев воздуха для горения.

					<i>13.04.01.2020.125.18 ПЗ</i>	<i>лист</i>
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		55

нии и автоматически поддерживает его на заданном уровне независимо от расхода газа потребителями; запорное устройство (задвижка 12) на выходе из основной линии. На байпасной линии имеется продувочный газопровод 5, два запорных устройства (задвижки 2), одно из которых используется для ручного регулирования давления газа в рабочей линии во время выполнения ремонтных работ на отключенной основной линии.

Предохранительно-сбросной клапан 1 (ПСК) предназначен для сброса газа через сбросную свечу в атмосферу и устанавливается на линии рабочего давления (рабочая линия). Срабатывает клапан при повышении давления газа на рабочей линии выше установленного предела [18, 45, 46].

В ГРП устанавливаются следующие контрольно-измерительные приборы: термометры для измерения температуры газа и в помещении ГРП; расходомер газа 7 (газовый счетчик, дроссельный расходомер); манометры 3 для измерения входного давления газа, давления в рабочей линии, давления на входе и выходе газового фильтра (Рисунок 5.3).

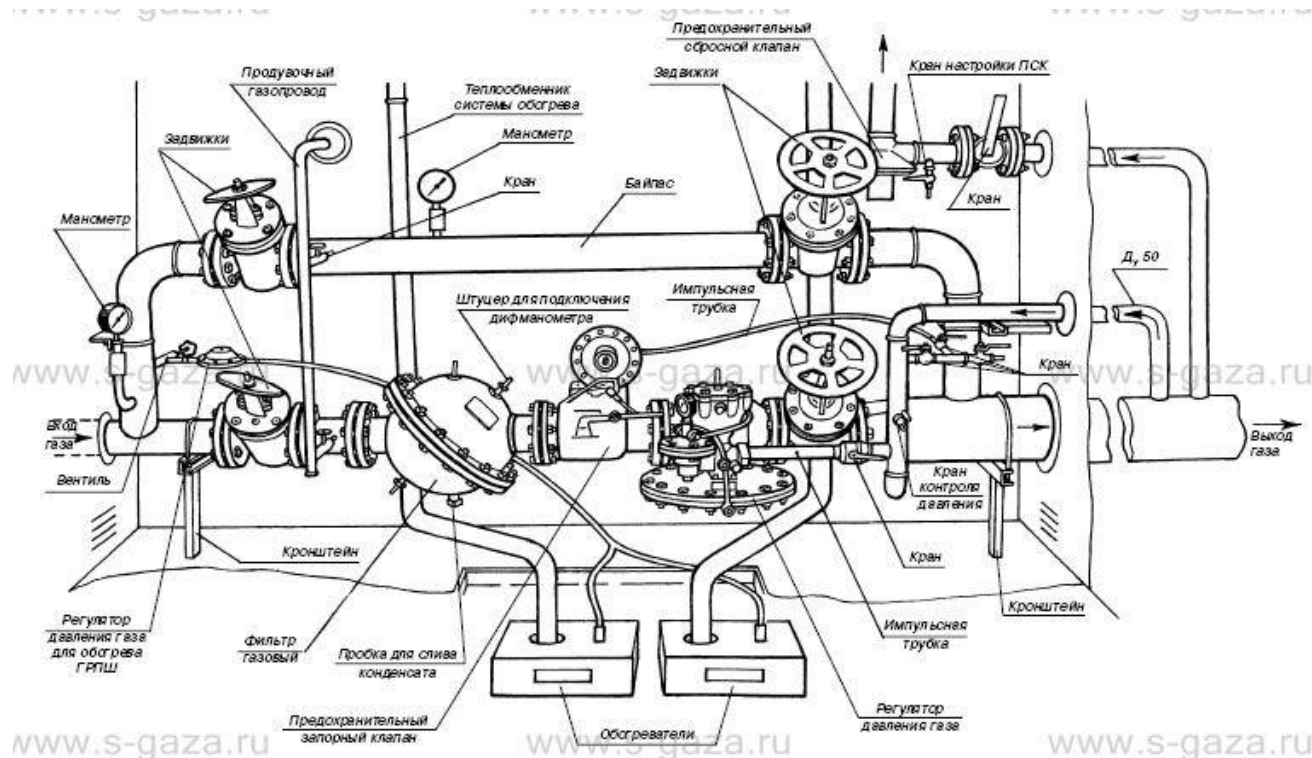


Рисунок 5.3 – Газорегуляторный пункт

Рассмотрим схемы с детандер-генераторными агрегатами (1). Такие установки располагаются параллельно работающим газораспределительным пунктами и редуцируют часть либо весь поток природного газа (Рисунок 5.4). Блок газоподготовки (2) осуществляет предварительную очистку природного газа. Возврат потока на ГРП и отключение детандера обеспечивается за счет отсекающей задвижки (3).

При необходимости происходит подогрев газа в теплообменнике (4) перед его поступлением в детандер. Для подогрева газа можно использовать недорогой теп-

вращения ротора, при высоком и среднем давлении применяют безредукторные ДГА.

Турбодетандерный агрегат первого исполнения изображен на рисунках 5.5 и 5.6. агрегат ТДР-19-6 используется в составе воздухоразделительных установок. Он рассчитан на расход воздуха до $24000 \text{ нм}^3/\text{ч}$ и работает с начальной температурой газа 117 К при низком отношении давлений $P=r_n/r_k=0,58/0,14 \text{ МПа}$ и частоте вращения вала агрегата 6900 об/мин . Изоэнтропный КПД турбодетандера лежит в диапазоне $0,80 - 0,82$.

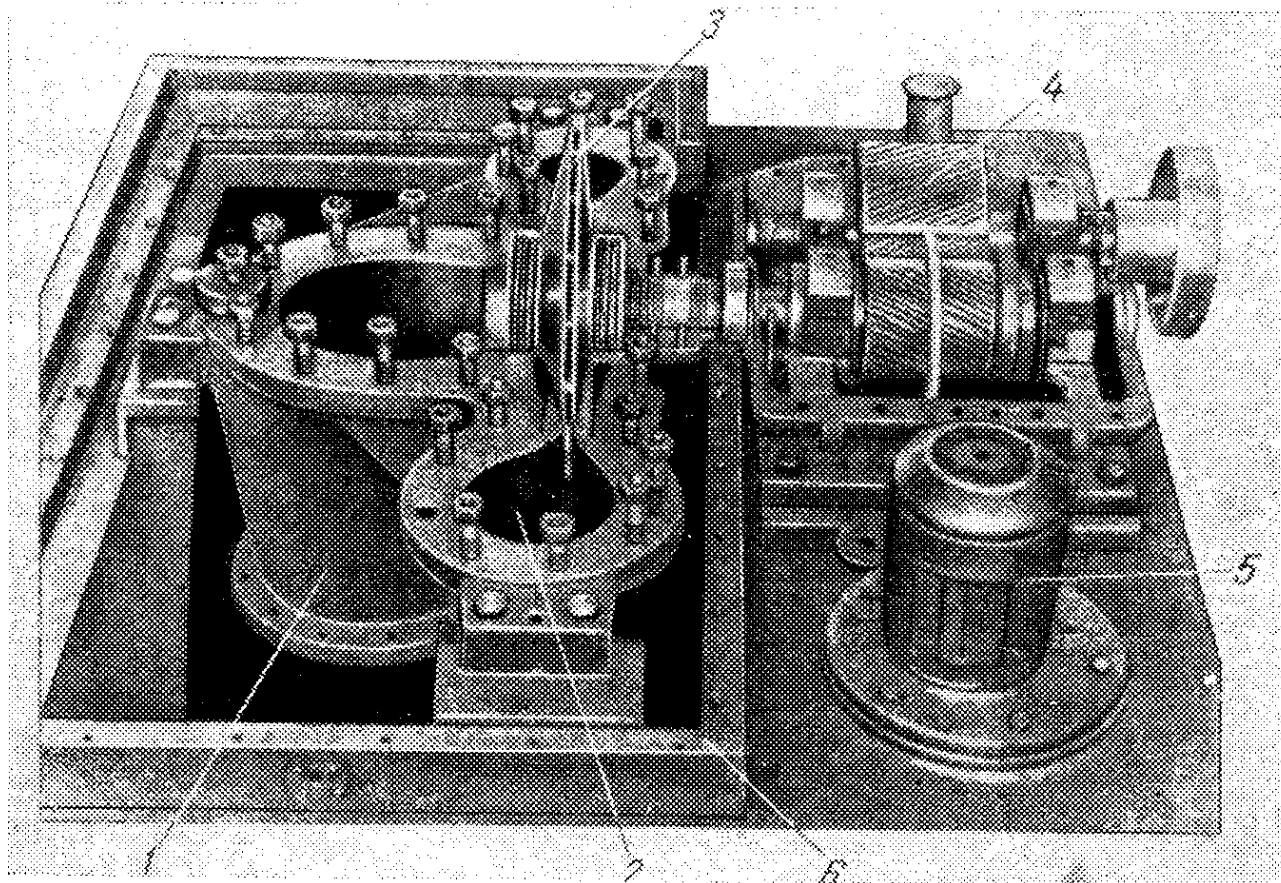


Рисунок 5.5 – Турбодетандер ТДР-19-6.

Общий вид (крышки турбодетандера и редуктора сняты):

- 1 – выходной патрубок; 2 – спиральный канал (улитка) для входа воздуха;
3 – рабочее колесо; 4 – редуктор; 5 – пусковой маслонасос; 6 – кожух

Рабочее колесо турбодетандера выполнено из алюминиевого сплава АК с цельнофрезерованными или с отдельно изготовленными лопатками (Рисунок 5.6). Рабочее колесо устанавливают с натягом на консольный вал быстроходной шестерни редуктора и разгружено от осевых усилий. Доля некомпенсированных осевых усилий воспринимается упорным подшипником редуктора. Корпус турбодетандера – литой, имеет разъем в горизонтальной плоскости. Он выполнен из латуни ЛК-80-3 и опирается на раму тремя «лапами», одна из которых имеет возможность осевого смещения по шпонке, что исключает возникновение температурных

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

13.04.01.2020.125.18 ПЗ

лист

61

деформаций корпуса. Диск и лопатки направляющего аппарата выполнены из латуни ЛЖМц-59-1-1.

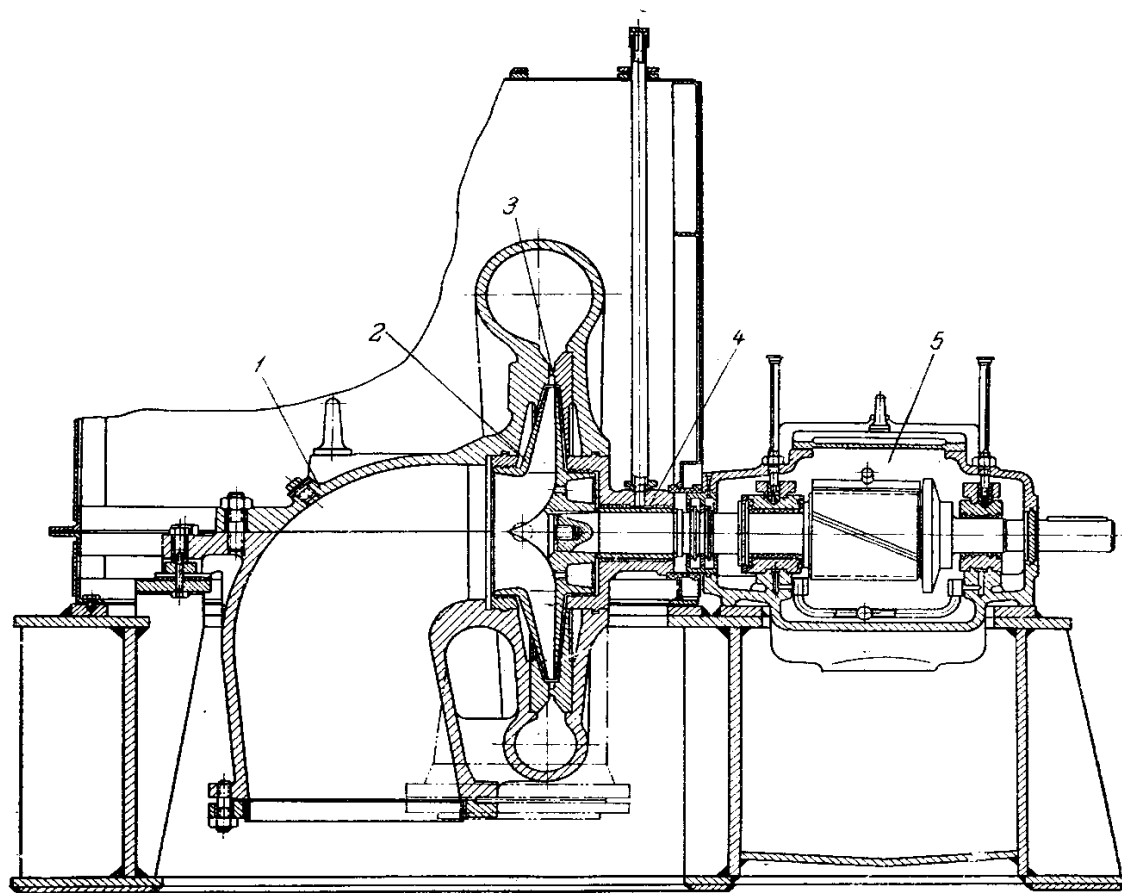


Рисунок 5.6 – Турбодетандер ТДР-19-6 (разрез) для установок БР-1, БР-1М и др.:

1 – корпус; 2 – рабочее колесо; 3 – направляющий аппарат; 4 – лабиринтное уплотнение вала; 5 – редуктор

Посредством спирального входного устройства осуществляется подвод воздуха на входе в каждый из элементов направляющего аппарата. Это необходимо для достижения идентичности вектора скорости газа (по величине и направлению).

Редуктор турбодетандера представляет собой одноступенчатую косозубую передачу с высоким классом точности нарезки зубьев. Шестеренчатый насос, который встроен в редуктор, обеспечивает принудительную циркуляцию, т.е. смазку подшипников и зацепления. На вал быстроходной шестерни насаживается шайба, которая воспринимает осевое усилие, возникающее в зацеплении. Шестеренчатый насос с индивидуальным электроприводом подает смазку при пуске и остановке агрегата. В процессе расширения сжатого природного газа получаем мощность, которая передается на вал агрегата. Преобразование энергии в электрическую осуществляется благодаря асинхронному электродвигателю-генератору.

При коротком замыкании, исчезновении напряжения в любой из фаз сети аварийно прекращается подача электроэнергии благодаря прекращению подачи воз-

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

13.04.01.2020.125.18 ПЗ

лист

62

устройство. Такое решение позволяет обеспечивать надежность газоснабжения газопотребляющего оборудования. Схемы могут включать в себя теплообменники подогрева газа, что обуславливается особенностями эксплуатации оборудования. Однако существует техническое решение, в котором отсутствует подогрев газа. Принципиальная схема установки с подогревом газа представлена на рисунке 5.9.

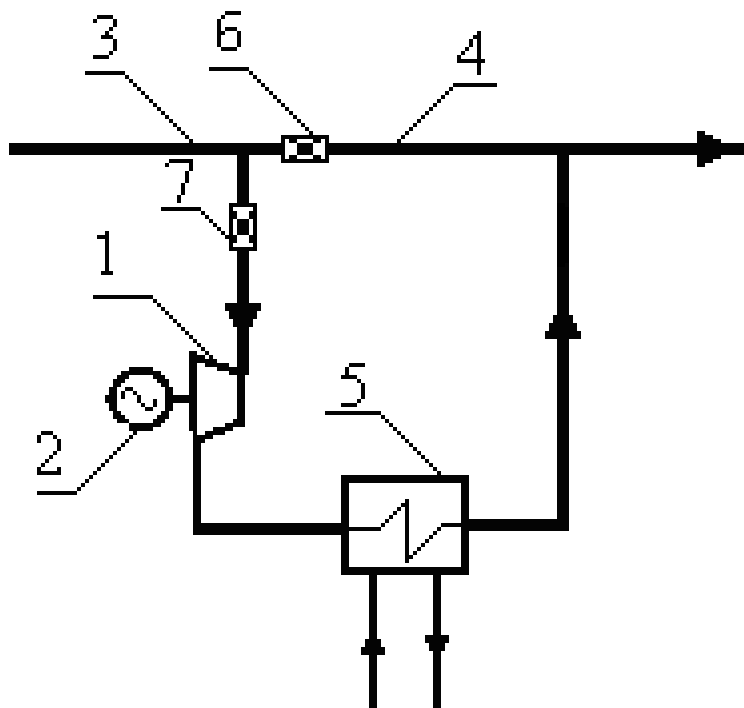


Рисунок 5.9 – Принципиальная схема детандер-генераторной установки без подогрева:

1 – детандер; 2 – генератор; 3 – газопровод высокого давления; 4 – газопровод низкого давления; 5 – теплообменный аппарат; 6 – дросселирующее устройство ГРС (ГРП); 7 – дросселирующее устройство перед ДГА

Применение дроссельного устройства в схемах детандер-генераторных установок с целью исключения значительного понижения температуры газа на выходе из ДГА неэкономично, поэтому были разработаны схемы бестопливных установок с подогревом газа перед детандером. В таких схемах перед ДГА устанавливается теплообменный аппарат, обеспечивающий подогрев транспортируемого газа. Предварительный подогрев газа осуществляется за счет низкопотенциального источника теплоты. Использование низкопотенциального тепла возможно благодаря теплонасосным установкам (ТНУ), являющимся трансформаторами теплоты [1, 2, 37, 38, 43, 62].

5.2 Расчет детандер-генераторного агрегата

На основе имеющихся данных выполнен расчет и определена мощность ДГУ-5000НД [37, 47].

Исходные данные.

										лист
										65
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	13.04.01.2020.125.18 ПЗ					

$$M_{см} = \frac{\sum V_i \cdot m_i}{100}, \quad (5.1)$$

где V_i – объемные концентрации компонентов газа;
 m_i – молярные массы компонентов газа.

$$M_{см} = 31,99 \cdot 0,000095 + 44,01 \cdot 0,00244 + 16,043 \cdot 0,96 + 30,07 \cdot 0,0197 + \\ + 44,097 \cdot 0,004 + 58,123 \cdot 0,003 + 72,15 \cdot 0,0004 + 28,01 \cdot 0,013 = 16,83 \text{ кг / кмоль}$$

Определим плотность газовой смеси по формуле (5.2):

$$\rho_{см} = \frac{M_{см}}{22,4}, \quad (5.2)$$

где 22,4 – молярный объем газовой смеси.

$$\rho_{см} = \frac{16,83}{22,4} = 0,75 \text{ кг/м}^3$$

Определим относительную плотность газа по воздуху по формуле (5.3):

$$\Delta = \frac{\rho_{см}}{\rho_{в}}, \quad (5.3)$$

где $\rho_{в}$ – плотность воздуха при стандартных условиях.

$$\Delta = \frac{0,75}{1,293} = 0,5812$$

Определим индивидуальную газовую постоянную R для газовой смеси природного газа по формуле (5.4):

$$R = \frac{R_0}{M_{см}}, \quad (5.4)$$

где $R_0 = 8,314 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К}$ – универсальная газовая постоянная.

$$R = \frac{8,314}{16,83 \cdot 10^{-3}} = 493,9 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}$$

										лист
										67
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	13.04.01.2020.125.18 ПЗ					

В таблице 5.4 даны значения мощности ДГА с расходом 10 000 м³/ч природного газа при температуре 50 °С в зависимости от давления на выходе.

Таблица 5.4 – Зависимость мощности ДГА от давления газа

Давление на выходе из ДГА, МПа	Мощность ДГА, кВт
0,03	885,8
0,1	660,6
0,2	506,1
0,3	405,9
0,4	330,1
0,6	216,1

Как известно, в результате расширения в детандере температура газа на выходе из него t_2 значительно уменьшается.

Значения ее, в зависимости от температуры газа на входе в детандер t_1 , при различных, характерных для практического применения вариантах величины расхода, показаны на рисунке 5.10.

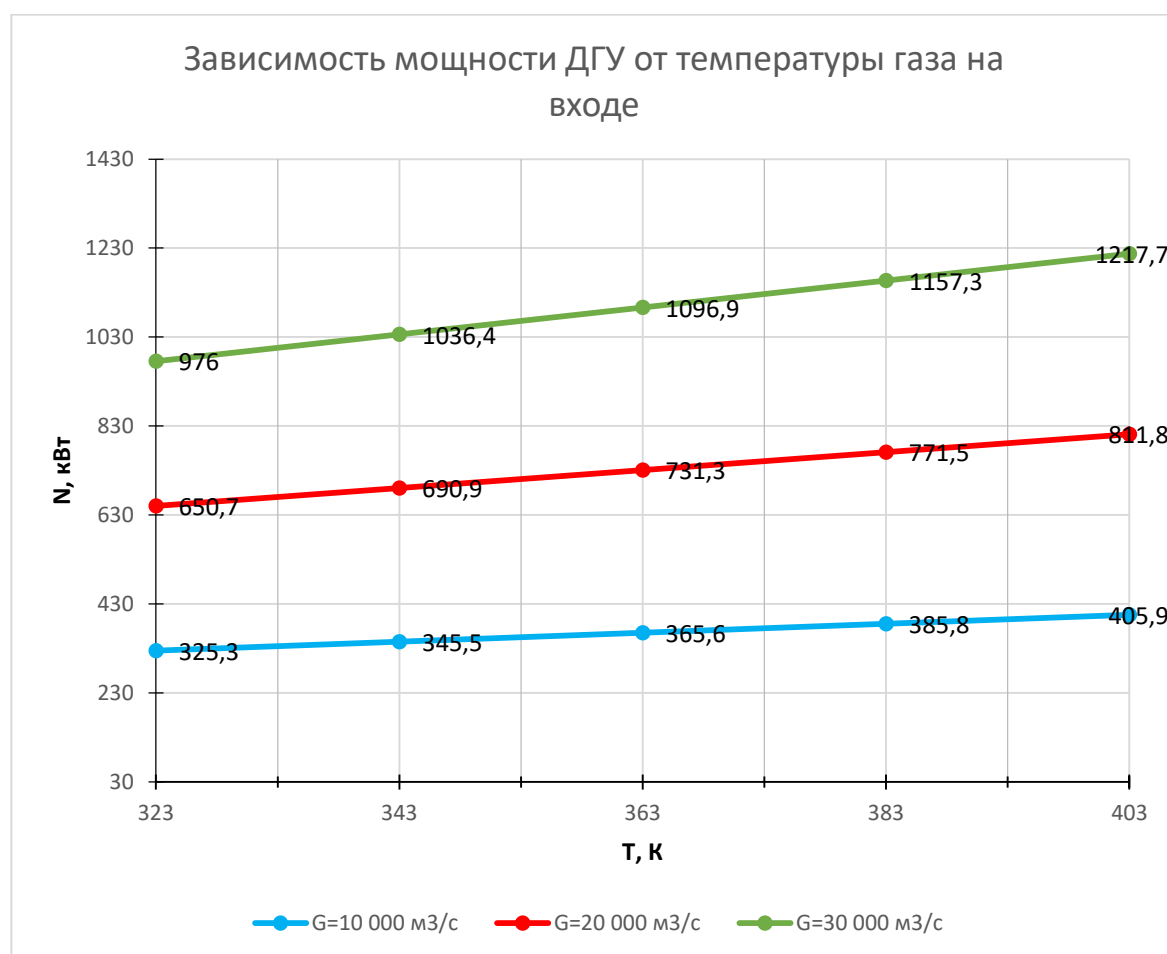


Рисунок 5.10 – Зависимость мощности ДГУ от температуры газа на входе

На рисунке 5.11 изображена зависимость мощности ДГА от давления на выходе.

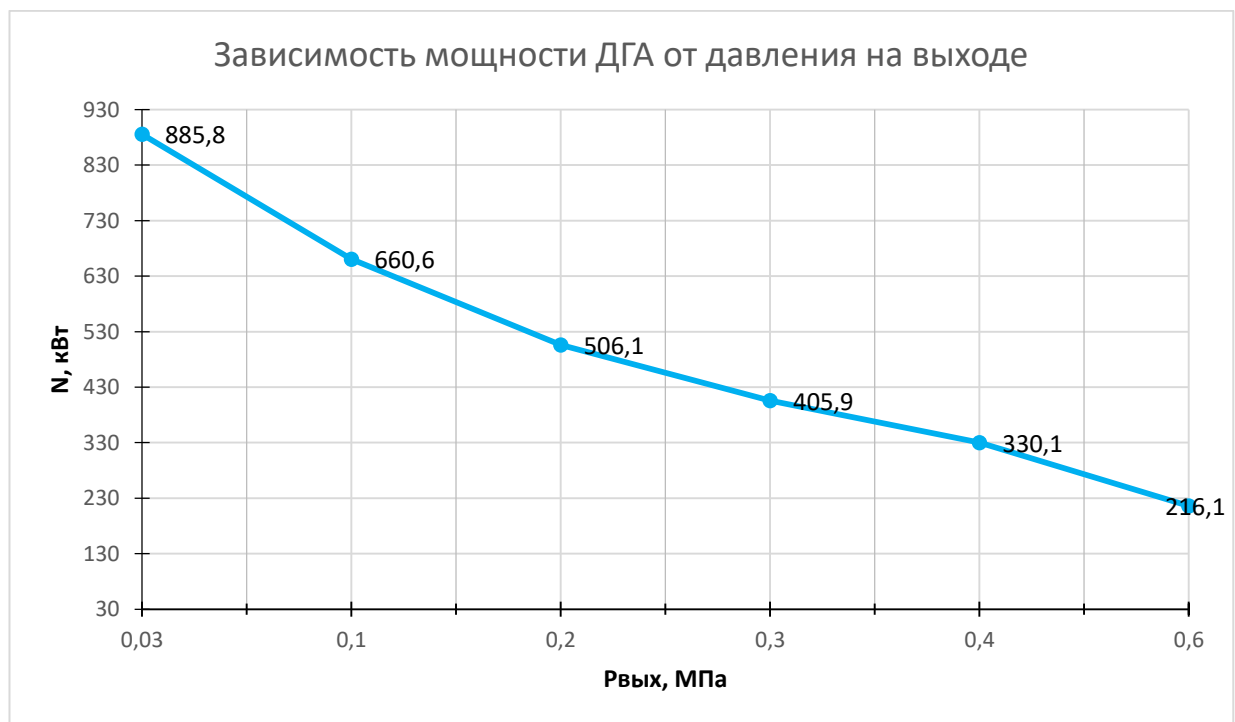


Рисунок 5.11 – Зависимость мощности ДГА от давления на выходе

Таким образом, можно сделать такие выводы исходя из расчетов детандер-генераторного агрегата с подогревом газа:

1) выработанная генератором электроэнергия может обеспечить энергией ГРП, дымосос. Также около 30 % выработанной электроэнергии пойдет на обеспечение работы самой установки;

2) используя энергию вторичных энергоресурсов можно повысить мощность детандер-генераторного агрегата за счет нагрева природного газа отходящими газами после рекуператора, а также обеспечить безопасную работу оборудования и газопроводов за счет поддержания нормальных условий благодаря подогреву газа;

3) установка детандер-генераторного агрегата в газораспределительном пункте позволит снизить давление до необходимого без использования дросселя. Преимуществом агрегата является то, что потенциальная энергия газа полезно используется и преобразуется в электрическую энергию.

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

13.04.01.2020.125.18 ПЗ

лист

70

$$V_p = \frac{(600 + 273) \cdot 760 \cdot 11,19}{(0 + 273) \cdot 755,6} = 42,52 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$$

По формуле (7.2) определим полный объем дымовых газов, выходящих из дымовой трубы:

$$V = V_p \cdot B \cdot z, \quad (7.2)$$

где z – количество печей, шт;
 $z = 3$.

$$V = 25,04 \cdot 0,746 \cdot 3 = 95,17 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Массовый расход загрязняющего вещества NO_2 можно найти по формуле (7.3):

$$M_{\text{NO}_2} = z \cdot B \cdot Q_n^p \cdot K_{\text{NO}_2} \cdot \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_\alpha, \quad (7.3)$$

где β_1 – безразмерный поправочный коэффициент, учитывающий влияние на выход окислов азота качества сжигаемого топлива;

$$\beta_1 = 0,85;$$

β_2 – коэффициент, характеризующий эффективность воздействия рециркулирующих газов в зависимости от условий подачи;

$$\beta_2 = 1;$$

K_{NO_2} – удельный выброс оксидов азота при сжигании газа, г/МДж, определяется по формуле (7.4):

$$K_{\text{NO}_2} = 0,013 \cdot \sqrt{z \cdot B \cdot Q_n^p} + 0,03 \quad (7.4)$$

$$K_{\text{NO}_2} = 0,013 \cdot \sqrt{3 \cdot 0,746 \cdot 36,3} + 0,03 = 0,1472 \frac{\text{г}}{\text{МДж}}$$

$$M_{\text{NO}_2} = 4 \cdot 0,746 \cdot 36,3 \cdot 0,147 \cdot 0,85 \cdot 1 = 10,16 \frac{\text{г}}{\text{с}}$$

Для нахождения диаметра устья дымовой трубы, зададимся оптимальной скоростью дымовых газов $\omega = 8$ м/с.

По формуле (7.5) определим примерный диаметр устья:

										лист
										75
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	13.04.01.2020.125.18 ПЗ					

$$D_{np} = \sqrt{\frac{4 \cdot V}{\pi \cdot \omega}} \quad (7.5)$$

$$D_{np} = \sqrt{\frac{4 \cdot 95,17}{3,14 \cdot 8}} = 3,89 \text{ м}$$

Округлим полученный диаметр до стандартного $D = 4$ м и пересчитаем по нему оптимальную скорость по формуле (7.6):

$$\omega_o = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D_{np}^2} \quad (7.6)$$

$$\omega_o = \frac{4 \cdot 95,17}{3,14 \cdot 4^2} = 7,58 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Для нахождения высоты дымовой трубы воспользуемся графическим методом, для которого необходимо построить график $h_3 - h_p$, в котором h_3 – заданная, а h_p – рассчитанная по формуле (7.7) высота трубы:

$$h_p = \sqrt{\frac{A \cdot F \cdot M_{NO_2} \cdot m \cdot n}{ПДК_{NO_2}} \cdot \sqrt[3]{\frac{Z}{V \cdot \Delta T}}}, \quad (7.7)$$

где ΔT – разность между температурой выбросов и температурой окружающей среды, °С;

$\Delta T = 139 - (-15,5) = 154,5$ °С;

Z – количество дымовых труб, шт;

$Z = 2$ шт;

m и n – коэффициенты, зависящие от условий выхода газовой смеси из устья источника выброса.

Причем, при $f < f_e$, коэффициент m находится по формуле (7.8):

$$m = \frac{1}{0,67 + 0,1 \cdot \sqrt{f} + 0,34 \cdot \sqrt[3]{f}}; \quad (7.8)$$

при $v_m > 2$, коэффициент $n = 1$;

при $0,5 < v_m < 2$, коэффициент n находится по формуле (7.9):

$$n = 0,532 \cdot v_m^2 - 2,13 \cdot v_m + 3,13, \quad (7.9)$$

										лист
										76
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	13.04.01.2020.125.18 ПЗ					

где f , v_m , v'_m и fe – вспомогательные параметры, для определения коэффициентов m и n .

Параметры f и v_m вычисляются по формулам (7.10) и (7.11):

$$f = \frac{1000 \cdot \omega_o^2 \cdot D}{h_3 \cdot \Delta T} \quad (7.10)$$

$$v_m = 0,65 \cdot \sqrt[3]{\frac{V \cdot \Delta T}{h_3}} \quad (7.11)$$

Параметр v'_m находят по формуле (7.12):

$$v'_m = 1,3 \cdot \frac{\omega_o \cdot D}{h_3} \quad (7.12)$$

По найденному параметру v'_m находят безразмерный параметр fe по формуле (7.13):

$$fe = 800 \cdot (v'_m)^3 \quad (7.13)$$

Для построения графика h_3-h_p был проведен расчет для нескольких заданных высот. Результаты расчетов сведены в таблицу 7.1.

Таблица 7.1 – Результаты расчетов для построения графика h_3-h_p

Параметр	Значения			
	45	50	55	60
h_3 , м	45	50	55	60
f	0,734	0,594	0,491	0,412
v_m	4,476	4,322	4,187	4,067
v'_m	0,875	0,788	0,716	0,656
fe	536	391	294	226
m	0,941	0,968	0,991	1,012
n	1	1	1	1
h_p , м	53,642	54,399	55,059	55,64

По полученным данным был построен график, представленный на рисунке 7.1.

Таким образом, по графику определена минимальная высота дымовой трубы $h_{min} = 55$ м. По принятой высоте трубы по формуле (7.14) найдем максимальное значение приземной концентрации вредного вещества:

$$C_{\max} = \frac{A \cdot F \cdot M_{NO_2} \cdot m \cdot n \cdot \eta}{h^2 \sqrt[3]{V \cdot \Delta T}}, \quad (7.14)$$

где m и n – коэффициенты, рассчитанные по формулам (7.8–7.14) для выбранной высоты трубы h (табл. 7.1).

$$C_{\max} = \frac{160 \cdot 1 \cdot 56,04 \cdot 0,99 \cdot 1 \cdot 1}{55^2 \sqrt[3]{95,17 \cdot (600 - (-15,5))}} = 0,013 \frac{\text{мг}}{\text{м}^3}$$

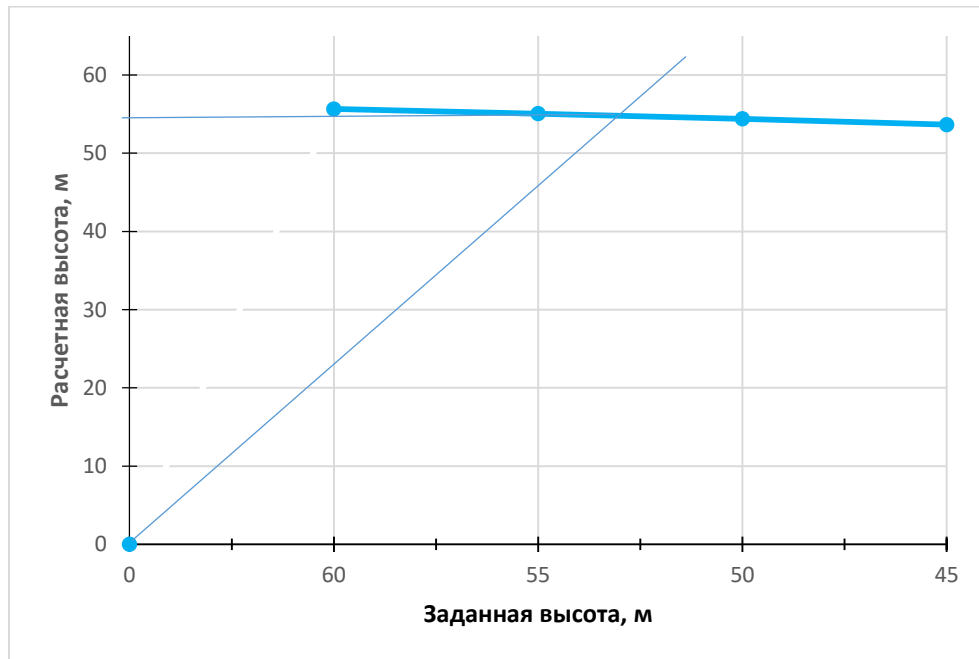


Рисунок 7.1 – График $h_z - h_p$

В результате расчетов была получена максимальная приземная концентрация вредных веществ, соответствующая условию $C_{\max} < ПДК_{NO_2}$, следовательно, полученная высота трубы удовлетворяет требованиям безопасного уровня воздействия на окружающую среду [13].

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

13.04.01.2020.125.18 ПЗ

лист

78

8 КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И АВТОМАТИКА

Управление тепловым режимом методической печи и ее теплотехнические характеристики влияют на технико-экономические параметры работы агрегата. Конструктивные и теплотехнические характеристики печи определяются при расчете, конструировании и строительстве печи, а значит, для улучшения работы методической печи необходимо совершенствовать процесс управления тепловым режимом.

Управление тепловым режимом осуществляется благодаря системам автоматизации печи. Так, при работе автоматики можно контролировать температуру рабочего пространства печи по трем зонам, расходы газа и окислителя-воздуха, давление отработанных газов в каждой зоне, а также регулировать температуру зон за счет уменьшения или увеличения расхода топлива, поддерживать заданные параметры соотношения топливо-воздух и стабилизировать давление газов.

В случае если печь имеет рекуператор, то должна применяться система автоматизации для контроля его тепловой работы, которая должна следить за измерением температуры отходящих газов на входе и выходе из теплообменника и контролировать температуру воздуха, который непосредственно подогревается в рекуператоре.

Рассмотрим функциональную схему автоматического регулирования печи. На рисунке 8.1 дана принципиальная схема контроля и регулирования автоматики трехзонной методической печи. Схема осуществляет контроль и регулирование таких параметров, как:

1. температуры газов во всех трех зонах и зоне нижнего обогрева;
2. соотношение и расход газ-воздух;
3. давления томильной зоны;
4. температура дыма до и после металлического рекуператора;
5. температуры хвостовой части печи;
6. давление газа/воздуха;
7. расход газа на весь агрегат.

С помощью платиновых термопар, которые находятся в фарфоровых чехлах, осуществляется измерение температуры каждой зоны, также применяются радиационные пирометры. Электронный потенциометр со встроенным реостатным датчиком выполняет показания и запись температур всех зон. Расход газа в газопроводе, который подводится в методическую трехзонную печь, регулируется благодаря дроссельной заслонке в этом газопроводе, управляемой электрическим исполнительным механизмом, который работает в комплекте с регулятором давления.

Рассмотрим, как проводится регулирование соотношения топливо-воздух. Схемы автоматического регулирования соотношения топливо-воздух также однотипны для всех зон. Расход газа и воздуха на каждую зону определяется с помощью измерительных диафрагм. Импульсные линии от диафрагм подсоединены ко вторичным показывающим и самопишущим приборам, а также к струйному регулятору соотношения.

										лист
										79
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	13.04.01.2020.125.18 ПЗ					

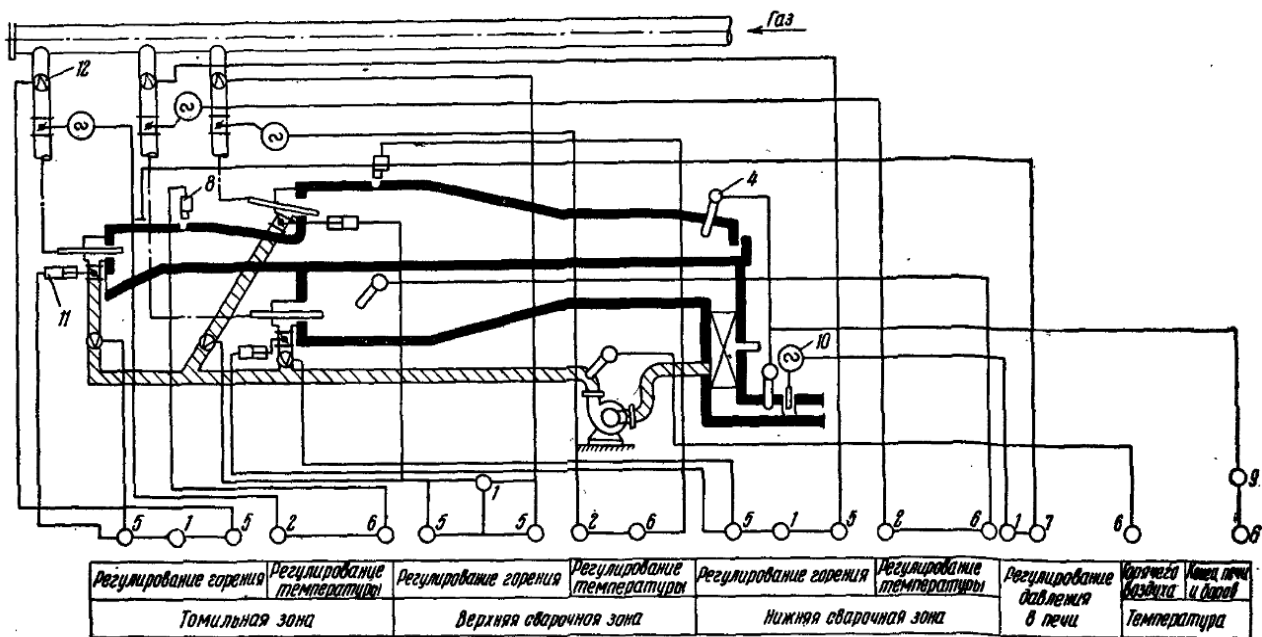


Рисунок 8.1 – принципиальная схема системы регулирования печи

При отклонении соотношения топливо воздух от заданного значения, что может иметь место при изменении расхода топлива или изменении задания, струйный регулятор воздействует на заслонку в воздухопроводе таким образом, чтобы установить заданное значение соотношения топливо воздух.

Ручное дистанционное управление заслонкой регулирования расхода воздуха осуществляется с помощью крана дистанционного управления.

Регулирование давления осуществляется по импульсу, отбираемому под сводом томильной зоны. Для регулирования давления используется электрический астатический регулятор, который воздействует на электродвигатель лебедки дымового шибер.

Схемой регулирования предусматривается возможность ручного дистанционного управления положением шибер путем кнопочного включения электродвигателя лебедки. Система регулирования давления имеет ручную установку задания регулятору.

Во избежание засосов воздуха в газопроводы и газа в воздухопроводы, при которых возможно образование взрывчатой смеси, предусматривается установка сигнализаторов падения давления газа и воздуха, воздействующих на схемы включения отсечки газа и отключения вентилятора, подающего воздух к горелкам. Кроме того, схемой автоматизации предусматривается контроль температуры в хвостовой части печи, продуктов сгорания после рекуператора, подогрева воздуха, для чего используются хромель-алюмелевые термопары, подключенные к щитовым показывающим приборам.

Указанный объем сигнализации и защиты дополнен устройствами контроля разрежения в дымоходе, элементами защиты эксгаустера от перегрева и указателем положения дымового шибер. Указанные элементы смогут обеспечить безопасную и эффективную работу агрегата.

На рисунке 8.2 представлена упрощенная функциональная схема управления тепловым режимом трехзонной нагревательной методической печи. На схеме указываются возмущающие и регулирующие воздействия, а напротив им сопоставлены управляемые параметры и регулируемые параметры. Согласно схеме, печь располагает четырьмя основными регулируемыми параметрами, характеризующими:

- а) перераспределение общей тепловой мощности между отдельными зонами печи;
- б) изменение общего расхода воздуха, поступающего к горелочным устройствам печи;
- в) перераспределение расхода воздуха между горелочными устройствами отдельных зон печи;
- г) изменение аэродинамического сопротивления дымовых трактов нагревательной печи.

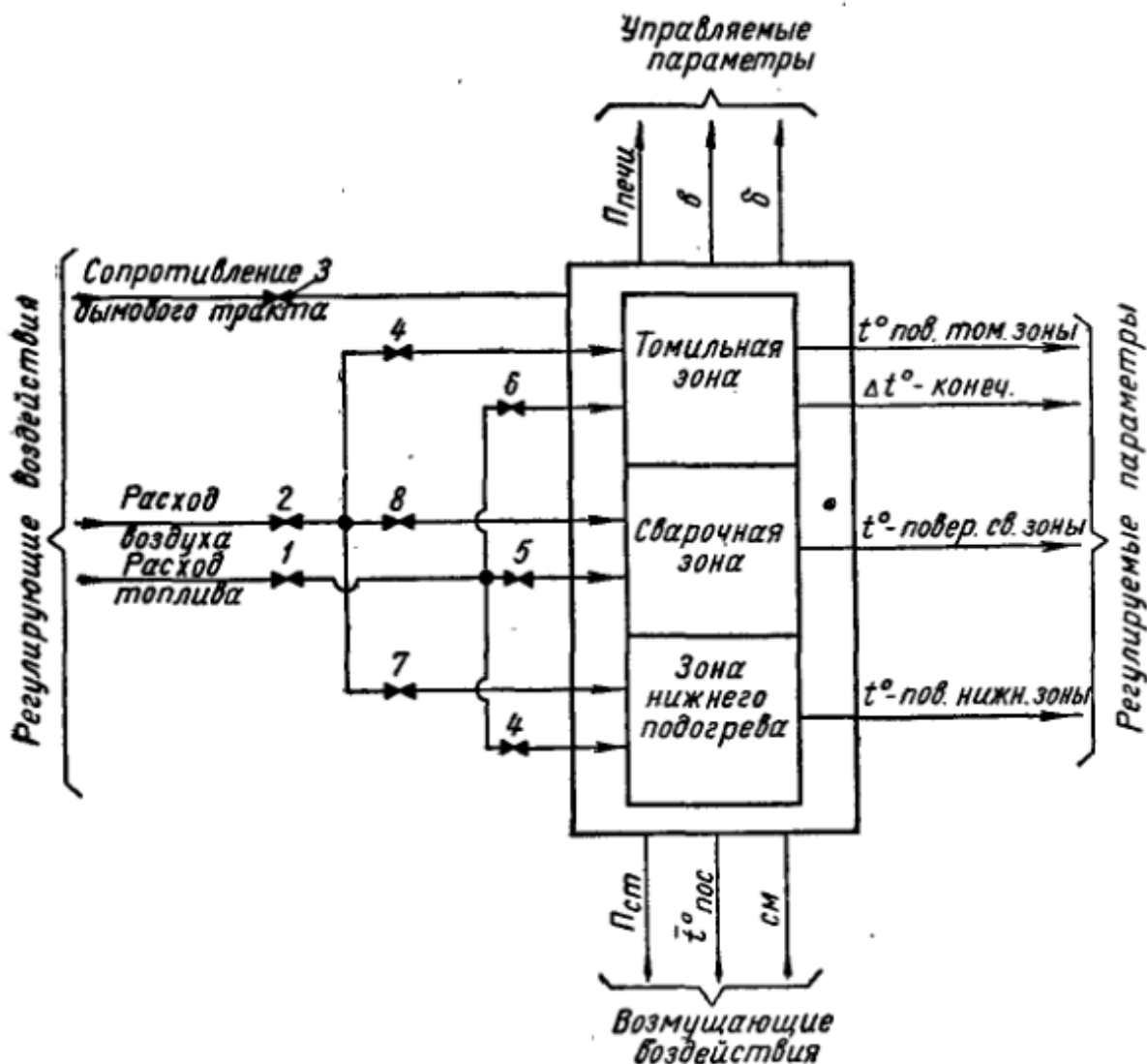


Рисунок 8.2 – Функциональная схема управления тепловым режимом трехзонной нагревательной печи

Наименование затрат	Сумма, тыс.руб
Монтажные работы [39]	3560,6
Пуско-наладочные работы [39]	408,0
Прочие затраты [39]	363,8
Итого	7911,4

10.2 Смета текущих затрат реализации проекта

В процессе организации производства проката проводится расчет текущих затрат, которые относятся к непосредственному производству, обслуживанию агрегатов, оплате труда и др. В расчете текущих затрат комбината работы печи приведены затраты на годовой расход топлива и электрической энергии, обслуживание оборудования и его текущий ремонт, заработная плата работников цеха, различные отчисления и расходы [39]. Рассмотрим два варианта текущих затрат организации работы печи: до установки и после установки рекуператора.

Текущие затраты на покупку топлива после установки рекуператора рассчитываются по формуле (10.1):

$$I_{Г} = B \cdot Ц_{Г}, \quad (10.1)$$

где B – годовой расход газа [61], млн. м³/год;

$Ц_{Г}$ – стоимость природного газа на 2020 год, руб/1000 м³;

$Ц_{Г} = 4059$ руб/ 1000 м³ [34].

$$I_{Г} = 20,6 \cdot 4059 = 83615,4 \frac{\text{тыс.руб}}{\text{год}}$$

Текущие затраты на потребляемую производственным процессом электроэнергию после установки рекуператора высчитываются по формуле (10.2):

$$I_{Э} = P_{Э} \cdot Ц_{Э}, \quad (10.2)$$

где $P_{Э}$ – потребляемая оборудованием электроэнергия [61], тыс. кВт·ч/год;

$Ц_{Э}$ – стоимость электроэнергии на 2020 год, руб./кВт·ч;

$Ц_{Э} = 2,66$ руб./ кВт·ч [50].

$$I_{Э} = 664 \cdot 2,66 = 1766,24 \frac{\text{тыс.руб}}{\text{год}}$$

									лист
									88
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	13.04.01.2020.125.18 ПЗ				

Аналогично рассчитываются текущие затраты для варианта без установки рекуператора, смета для которых приведена в таблице 10.3.

Текущие затраты на покупку топлива без установки рекуператора рассчитываются по формуле (10.5):

$$I_{\Gamma} = B \cdot C_{\Gamma}, \quad (10.5)$$

где B – годовой расход газа [61], млн. м³/год;

C_{Γ} – стоимость природного газа на 2020 год, руб/1000 м³;

$C_{\Gamma} = 4059$ руб/ 1000 м³ [34].

$$I_{\Gamma} = 25,2 \cdot 4059 = 102286,8 \frac{\text{тыс.руб}}{\text{год}}$$

Текущие затраты на потребляемую производственным процессом электроэнергию без установки рекуператора высчитываются по формуле (10.6):

$$I_{\text{Э}} = P_{\text{Э}} \cdot C_{\text{Э}}, \quad (10.6)$$

где $P_{\text{Э}}$ – потребляемая оборудованием электроэнергия [61], тыс. кВт·ч/год;

$C_{\text{Э}}$ – стоимость электроэнергии на 2020 год, руб./кВт·ч;

$C_{\text{Э}} = 2,66$ руб./ кВт·ч [50].

$$I_{\text{Э}} = 664 \cdot 2,66 = 1766,24 \frac{\text{тыс.руб}}{\text{год}}$$

Амортизационные отчисления составляют 10 % от стоимости демонтируемого рекуператора [29]:

$$A = 0,1 \cdot 69 = 6,9 \frac{\text{тыс.руб}}{\text{год}}$$

Суммарные текущие затраты, указанные в таблице 10.3, вычисляются по формуле (10.7):

									лист
									90
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	13.04.01.2020.125.18 ПЗ				

10.3 Обоснование экономической эффективности проекта

Для определения экономической эффективности проекта по установке металлического петлевого рекуператора в борове методической печи необходимо рассчитать срок окупаемости.

Срок окупаемости – это период времени, при котором затраты на разработку проекта полностью покрываются доходами объекта.

Данный результат позволит определить необходимо ли выполнять изготовление металлического петлевого рекуператора для печи и выполнять демонтаж старого рекуператора.

Срок окупаемости можно рассчитать по формуле 10.8:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K - K_{\text{лик}}}{\Delta I}, \quad (10.8)$$

где K – капитальные затраты на установку рекуператора, тыс. руб.;

ΔU – экономия текущих затрат, тыс. руб./год.

$K_{\text{лик}}$ – ликвидационная стоимость демонтируемого оборудования цеха, тыс. руб., которая рассчитывается по формуле (10.9):

$$K_{\text{лик}} = P \cdot (1 - \varepsilon), \quad (10.9)$$

где ε – коэффициент при вынужденной продаже, зависящий от сроков продажи, состояния оборудования и рыночной оценки. Данный коэффициент может быть равен 0,1-0,5 в зависимости от экспертной оценки. Ввиду отсутствия возможности оценки примем $\varepsilon = 0,5$ [62];

P – рыночная стоимость демонтируемого оборудования, тыс. руб., которая может быть определена по формуле (10.10):

$$P = M \cdot P_{\text{лом}}, \quad (10.10)$$

где M – вес демонтируемого оборудования, т. $M = 6$ т [61];

$P_{\text{лом}}$ – стоимость лома, тыс. руб./т. $P_{\text{лом}} = 11,5$ тыс. руб./т [61].

$$P = 6 \cdot 11,5 = 69 \text{ тыс. руб.}$$

$$K_{\text{лик}} = 69 \cdot (1 - 0,5) = 34,5 \text{ тыс. руб.}$$

$$T_{\text{ок}} = \frac{7911,4}{106111,73 - 88024,19} = 0,44 \text{ года} \approx 6 \text{ мес.}$$

									лист
									92
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	13.04.01.2020.125.18 ПЗ				

На основании полученного результата можно сделать вывод, что установка рекуператора экономически эффективна и целесообразна, т.к. проект окупится за короткий срок.

10.4 Качественный анализ проектных решений

Для проведения качественного анализа проектных решений необходимо провести SWOT-анализ. SWOT-анализ представляет собой метод для оценки внутренних и внешних факторов объекта, позволяющих выявить конкурентоспособность и преимущества объекта. Сначала с учетом конкретной ситуации, в которой находится объект, составляются список ее слабых и сильных сторон, а также список угроз (опасностей) и возможностей [4]. Затем устанавливается связь между ними. Для этого составляется матрица SWOT.

Данный анализ изображается в виде таблицы с 4 категориями:

1. S (Strengths) – факторы внутренней среды, являющиеся преимуществами объекта;
2. W (Weaknesses) – факторы внутренней среды, являющиеся недостатками объекта;
3. O (Opportunities) – возможности объекта, то, что может воздействовать извне;
4. T (Threats) – угрозы, внешние негативные факторы.

С помощью проведения качественного SWOT-анализа можно ответить на такие вопросы, как:

- используются ли сильные стороны как преимущества объекта;
- являются ли слабости объекта ее уязвимыми местами;
- какие благоприятные обстоятельства дают шансы на успех;
- на какие угрозы обратить внимание в первую очередь.

Рассмотрим SWOT-анализ печи без установки рекуператора в таблице 10.4.

Таблица 10.4 – SWOT-анализ работы печи без установки рекуператора

<p>S:</p> <p>1) Нет затрат на обслуживание дополнительного оборудования;</p> <p>2) Нет существенных затрат на модернизацию.</p>	<p>W:</p> <p>1) Температура отходящих газов превышает нормы;</p> <p>2) Высокий расход топлива без подогрева воздуха;</p> <p>3) Низкие температуры воздуха на горение в зимнее время;</p> <p>4) Перерасход электроэнергии.</p>
<p>O:</p> <p>1) Постоянный спрос на прокатную продукцию.</p>	<p>T:</p> <p>1) Повышение тепловой нагрузки с увеличением спроса на продукцию;</p> <p>2) Повышение цен на покупку топлива;</p> <p>3) Повышение тарифов на электроэнергию.</p>

Рассмотрим SWOT-анализ печи после установки рекуператора в таблице 10.5.

Таблица 10.5 – SWOT-анализ работы печи после установки рекуператора

<p>S:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Низкий расход топлива; 2) Эффективная работа горелочного устройства, не требующая дополнительного подогрева воздуха; 3) Наличие рекуператора обеспечивает необходимую температуру отходящих газов; 4) Минимальные потери тепла отходящих газов; 5) Наличие на комбинате квалифицированного персонала для демонтажа, монтажа и других работ, то есть, нет необходимости в подрядчиках; 6) Возможность изготовить рекуператор на комбинате. 	<p>W:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Затраты на строительство; 2) Затраты на демонтаж, монтаж и пусконаладочные работы. 3) Затраты на очистку рекуператора при его длительной эксплуатации; 4) Отсутствие на комбинате необходимых материалов для изготовления рекуператора.
<p>O:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Постоянный спрос на прокатную продукцию. 	<p>T:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Рост цен газо- или электроснабжающей организации.

На основании результатов SWOT-анализа можно сделать вывод, что модернизация методической печи, подразумевающая установку металлического рекуператора, является более эффективным и экономичным вариантом, чем вариант без установки металлического рекуператора в борове методической печи прокатного цеха №1 ПАО «ЧМК».

10.5 Оценка движущих и сдерживающих сил реализации проекта

Анализ поля сил, представленный Куртом Левиным, выявляет факторы, которые препятствуют или вызывают изменения процесса реализации проекта, то есть определяет движущие и сдерживающие силы реализации проекта. В процессе данного анализа можно определить слабые и сильные стороны реализуемого проекта.

Изменения в организации предполагают деление участвующих сил на силы продвижения и силы сопротивления изменениям. Под действием этих типов сил организация находится в состоянии равновесия.

Изменения происходят в тот момент, когда нарушается существующее равновесие организации, и продолжаются до тех пор, пока равновесие не восстановится в новой точке. В этом методе предполагается, что любая ситуация не может быть статической, а также ситуация является результатом взаимодействия двух незави-

симых и противоположных сил, которые называются движущими и сдерживающими.

На рисунке 10.1 представлено поле сил реализации мероприятий по модернизации трехзонной методической печи прокатного цеха №1 ПАО «ЧМК» с установкой металлического петлевого рекуператора, который предназначен для подогрева воздуха на горение топлива.

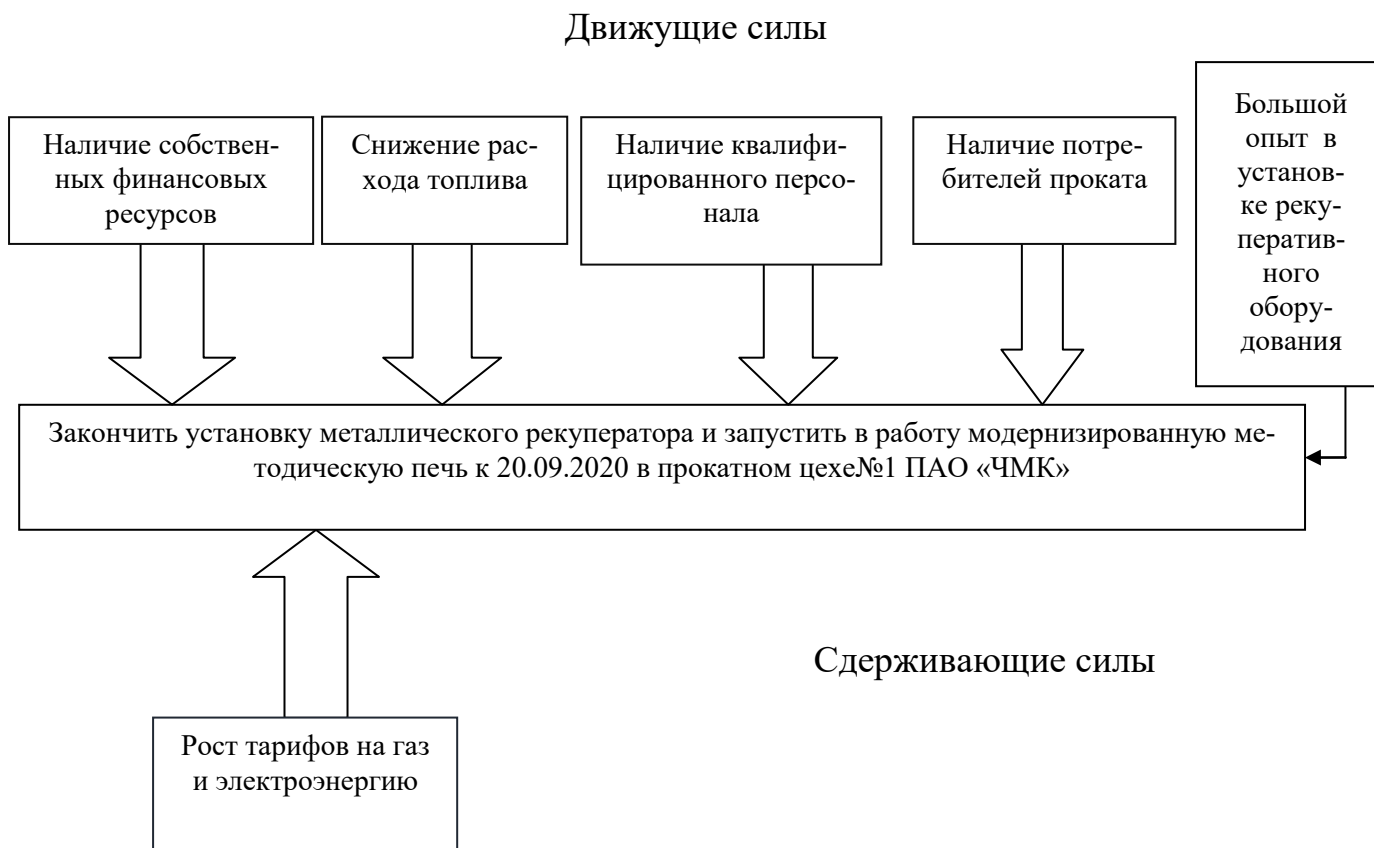


Рисунок 10.1 – Поле сил реализации проекта

На реализацию проекта модернизации методической трехзонной печи ПАО «ЧМК», расположенной в прокатном цехе металлургического комбината могут повлиять следующие движущие силы:

- наличие финансовых ресурсов у компании. Этот фактор является наиболее сильным, так как без денежных средств компания не сможет изготовить необходимое для монтажа утилизирующее металлическое оборудование и, следовательно, реализовать проект по модернизации трехзонной методической печи прокатного цеха №1 металлургического комбината;
- наличие квалифицированных специалистов. Также является сильным фактором, так как без квалифицированного персонала невозможна реализация проекта;
- снижение текущих затрат. Данный фактор также является достаточно сильным, так как при отсутствии снижения текущих затрат проект просто не имеет смысла;

- наличие платежеспособных потребителей выпускаемого проката. Этот фактор является менее сильным по влиянию, так как оплата потребителей существенно не повлияет на модернизацию печи.

К сдерживающим силам данного проекта относятся:

- рост цен на газ и электроэнергию. Данный фактор является важным, так как стоимость топлива и электроэнергии входит в текущие затраты, но средним по силе, поскольку перерасходы финансовых средств от повышения цен на топливо и энергию не смогут превысить количество сэкономленных средств.

Потенциалом изменений является: положительный и большой опыт разработки и установки данного оборудования [39].

На основании приведенного анализа поля сил можно сделать вывод о том, что реализация проекта модернизации методической печи прокатного цеха ПАО «ЧМК» возможна, так как движущих сил больше, чем сдерживающих, и они имеют больший удельный вес.

10.6 Модель пирамиды целеполагания ПАО «ЧМК»

Пирамида целеполагания предназначена для наглядного, последовательного и долгосрочного повышения энергетической эффективности по уровням управления предприятием.

На рисунке 10.2 представлена модель пирамиды целеполагания ПАО «ЧМК».



Рисунок 10.2 – Модель пирамиды целеполагания ПАО «ЧМК»

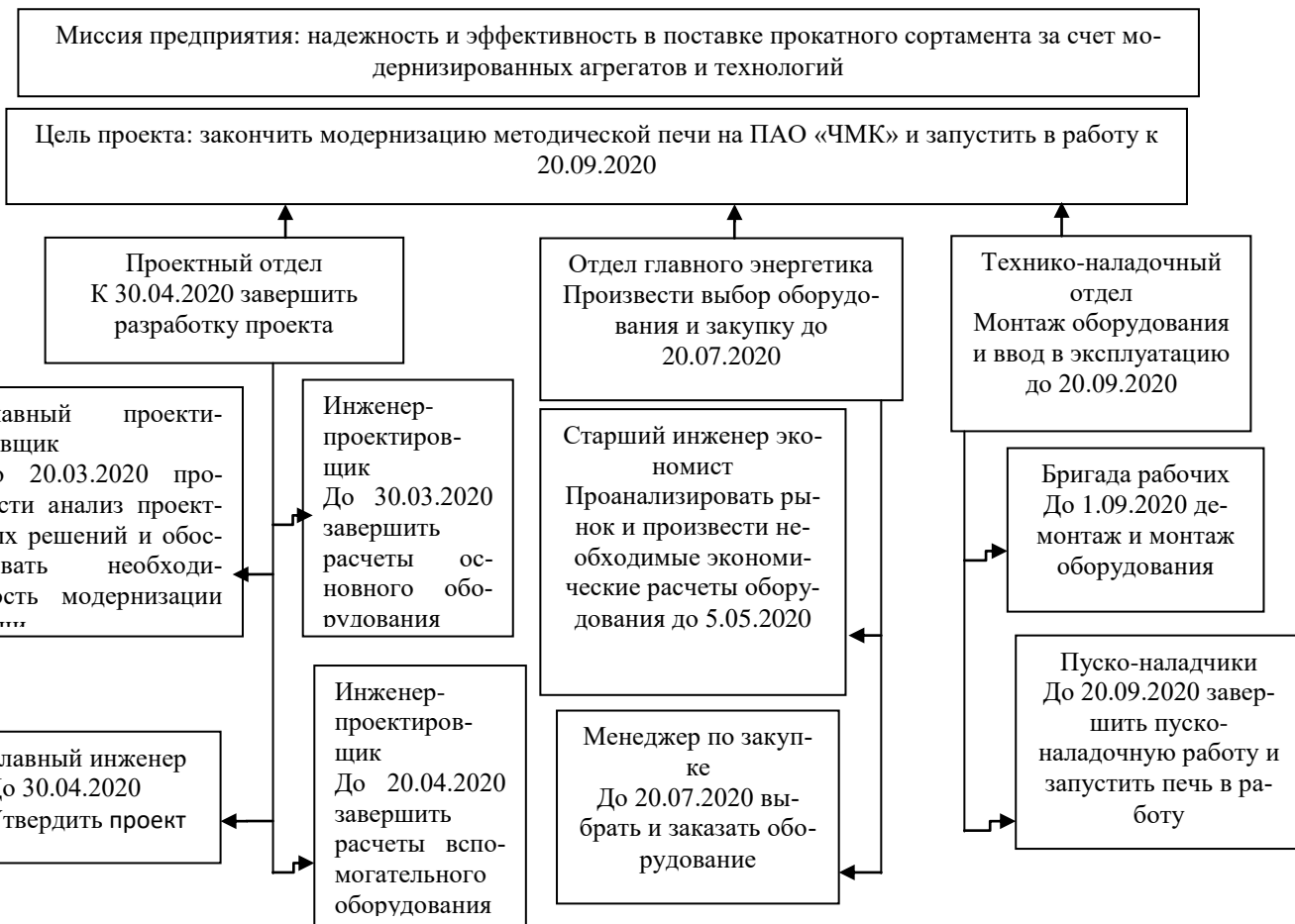


Рисунок 10.3 – Дерево целей проекта

10.8 Планирование мероприятий по реализации проекта

График Ганта является графическим представлением выполнения задач для реализации проекта. График состоит из временной шкалы и шкалы задач. Данный способ позволяет выполнить проект в установленные сроки и по определенной последовательности.

График Ганта используется для планирования и контроля выполнения проекта. На графике отображаются задачи и стадии проекта с учетом их протяженности во времени. Задачи на графике могут быть зависимыми друг от друга (например, одна задача может начинаться только после завершения другой). Задавая планируемую длительность каждой задачи и зависимости между задачами - можно легко получить теоретический срок проекта.

В таблице 10.6 приведен график Ганта по реализации мероприятий модернизации методической трехзонной печи прокатного цеха №1 на металлургическом комбинате.

По графику можно увидеть, что срок выполнения поставленных задач составит 9 месяцев, при этом каждый этап имеет свой срок и время выполнения их может пересекаться. Таким образом, модернизация методической нагревательной печи прокатного цеха №1 металлургического комбината ПАО «ЧМК» будет выполнена в период с января до сентября 2020 года.

Таблица 10.6 – График Ганта

Этапы работы	2020								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Разработка проекта модернизации печи	■	■	■						
Провести анализ проектных решений и обосновать необходимость модернизации печи		■	■						
Провести расчет основного и вспомогательного оборудования			■	■	■				
Проанализировать рынок и произвести необходимые экономические расчеты оборудования					■	■			
Подготовка и утверждение сметного расчета проекта						■	■		
Выбрать и закупить оборудование							■	■	■
Демонтаж и монтаж оборудования								■	■
Завершить пуско-наладочную работу и запустить методическую печь в работу									■

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Утилизация теплоты отходящих газов является обязательной составляющей повышения эффективности использования топлива в методических трехзонных печах. Значимость и возможности утилизации теплоты с точки зрения экономии топлива возрастают по мере роста технологических температур в агрегате и снижения разности между теоретической температурой горения рассматриваемой топливо-окислительной смеси. Эффективность использования топлива в печах достигается путем утилизации теплоты в рекуператорах. За счет теплоты дымовых газов происходит нагрев воздуха, который поступает на горение топлива.

Так, в выпускной квалификационной работе был выполнен расчет трехзонной методической печи прокатного цеха №1 ПАО «ЧМК» с подогревом воздуха до 400 °С за счет использования теплоты отходящих газов в борове печи и подогревом до 20 °С. В результате расчета был сделан вывод, что с увеличением энтальпии воздуха, т.е. температуры, увеличивается коэффициент использования топлива, следовательно, при установке металлического петлевого рекуператора происходит экономия топливных ресурсов.

Исходя из параметров печи, был выполнен расчет петлевого металлического рекуператора и определена площадь поверхности нагрева – 177,4 м², количество, длины и диаметр трубок в каждом ряду, которые обеспечат качественный нагрев воздуха для горения.

Помимо использования металлического рекуператора в борове печи в научной части выпускной квалификационной работы предлагается использовать детандер-генераторный агрегат для утилизации тепла после рекуператора. Подогревая газ перед ДГА, мы утилизируем тепло и обеспечиваем нормальный режим работы агрегата и газопроводов. Также агрегат вырабатывает электричество, которое затрачивается на обслуживание самой установки, ГРП и дымососа.

С точки зрения энергосбережения вышеупомянутые мероприятия считаются актуальными, поскольку направлены на снижение себестоимости продукции, снижение энергетических затрат, т.е. повышение эффективности работы методической трехзонной печи для нагрева заготовок.

Использовать утилизирующие устройства для работы печи недостаточно, ведь для достижения экологических требований, которые предполагают определенную температуру и концентрацию загрязняющих веществ на выходе из дымовой трубы, необходимо достичь нужных ее параметров. Так, была рассчитана дымовая труба высотой 55 м, обеспечивающая такой отвод уходящих газов, который не нарушит экологическую обстановку территории.

Для более эффективной, безопасной работы методической печи необходимо управлять ее тепловым режимом. Управление тепловым режимом осуществляется благодаря системам автоматизации печи. Так, при работе автоматики можно контролировать температуру рабочего пространства печи по трем зонам, расходы газа и окислителя-воздуха, давление отработанных газов в каждой зоне, а также регулировать температуру зон за счет уменьшения или увеличения расхода топлива,

										лист
										100
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	13.04.01.2020.125.18 ПЗ					

поддерживать заданные параметры соотношения топливо-воздух и стабилизировать давление газов.

Немаловажным мероприятием на производстве является обеспечение безопасности. При работе с методическими нагревательными печами, необходимо следовать требованиям техники безопасности при эксплуатации, которые предусматривают как виды вредных факторов, которые могут возникнуть на производстве, так и особенности данного промышленного хозяйства, а именно: вредные газы, влияющие на организм человека, которые также могут быть причиной взрывов, пожаров и т.д., соединяясь с окислителем.

Таким образом, модернизация оборудования позволяет повысить надежность и работоспособность агрегатов металлургического производства, также сэкономить топливные ресурсы. Модернизация подразумевает такие мероприятия, которые будут осуществлять поставленные задачи предприятием. Для решения поставленных задач предприятие будет использовать такие факторы производства, как трудовые ресурсы, технику, технологии, природные ресурсы, капитал и т.д.

Модернизация трехзонной методической печи с целью ресурсосбережения на ПАО «ЧМК» предусматривает установку металлического петлевого рекуператора для подогрева воздуха отходящими газами, поступающего в горелку. Для достижения необходимого результата были проведены экономико-управленческие мероприятия: рассчитан экономический эффект и экономическая эффективность от внедрения мероприятий, планирование, организация мероприятий и др. В результате расчета, имея текущие и капитальные затраты на установку рекуператора, был получен срок окупаемости, который составил 6 месяцев.

										лист
										101
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	13.04.01.2020.125.18 ПЗ					

64 Gil, S. Wisniewsk pressurized recuperator for heat recovery in industrial high temperature processes / S. Gil, J. Goral, P. Hornak, J. T. Ochman. – Archives of metallurgy and materials, 2015. – Vol 60. – Issue 3. – P. 1847–1852.

65 Mouhamadou, A. D. Billets heat treatment using flue gas for energy efficiency and batching cycle time reduction / A. D. Mouhamadou, X. Chen, I.H. Mohamed. – Energy Procedia, 2017. - 105. – P. 3377 –3383.

					<i>13.04.01.2020.125.18 ПЗ</i>	<i>лист</i>
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		<i>106</i>