

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
ГЛАВА 1 ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ, НАПРАВЛЕННЫХ НА ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ В ОТОПИТЕЛЬНЫХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ КОТЕЛЬНЫХ	11
1.1 Характеристика выбрасываемых котельными в атмосферу продуктов сгорания.....	11
1.2 Источники и механизм образования оксидов азота при сжигании органических топлив.....	13
1.3 Классификация основных типов газогорелочных устройств.....	15
1.4 Основные методы снижения содержания оксидов азота в продуктах сгорания.....	19
1.4.1 Сжигание топлива с низким коэффициентом избытка воздуха.....	20
1.4.2 Двухступенчатое сжигание топлива	23
1.4.3 Рециркуляция продуктов сгорания	26
1.4.4 Усовершенствование горелочных устройств.....	27
1.5 Методы, направленные на повышение тепловой эффективности работы котельной	30
1.5.1 Основные методы интенсификации.....	30
1.5.2 Примеры интенсификации в теплообменниках.....	32
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1	35
ГЛАВА 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА ВИТОМАХ 200-2,6 МВт, РАБОТАЮЩЕГО НА ПРИРОДНОМ ГАЗЕ.....	36
2.1 Исходные данные для теплового расчёта котлоагрегата.....	36

Взамен инв. №	
Подпись и дата	
Инв. № подл.	

						МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ			
Изм.	Кол. уч.	Лист	№Докум	Подпись	Дата	«Снижение загрязнения воздушной среды при эксплуатации котельных городского хозяйства при сжигании природного газа»	Стадия	Лист	Листов
Зав. каф.		Пухал В.А.					МД	5	89
Нормоконтр		Яковлев В.А.					ФГБОУ ВО СПбГАСУ		
Проверил		Яковлев В.А.							
Разработал		Целикова Д.С.							

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность избранной темы. В настоящее время всё чаще как в нашей стране, так и за рубежом ставится вопрос по сокращению выбросов вредных веществ в атмосферу при сжигании органического топлива на объектах промышленного и жилищно-коммунального сектора.

Актуальность проблемы загрязнения воздушного бассейна определяется количеством находящихся в эксплуатации теплоэнергетических объектов и качеством их работы. Предприятия жилищно-коммунального сектора, к которым относятся отопительные, отопительно-производственные котельные, размещающиеся на территории города, являются объектами, вносящими серьёзный вклад в загрязнение воздушного бассейна.

Технологии производства тепловой энергии на городских энергетических объектах с применением органического топлива связаны, как правило, с растратой большей части топливно-энергетических ресурсов в энергетические отходы, сбрасываемые в большинстве случаев в окружающую среду. Актуальность поиска решения проблем снижения экологической нагрузки объектов энергетики в связи с ежегодно увеличивающейся степенью загрязнения окружающей среды приобретает острый характер.

В большинстве регионов Российской Федерации в настоящее время вследствие высокой степени их централизованной газификации большинство энергетических объектов использует в качестве топлива природный газ. Природный газ является органическим углеводородным топливом, правильная организация сжигания которого даёт минимальный выброс вредных веществ с продуктами сгорания. При правильной организации сжигания в продуктах сгорания отсутствуют твёрдые частицы и оксид углерода, в большинстве случаев минимален выход вредных и канцерогенных веществ. Вследствие предельно малых концентраций сероводорода, содержащегося в составе природного газа большинства месторождений нашей страны, и высокой степени очистки от него при подготовке топлива к транспортировке на

Изм. № подл.	Подпись и дата	Взамен инв. №
--------------	----------------	---------------

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата

МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ

Лист

7

газоподготовительных станциях, расположенных у мест добычи немногочисленных сероводородсодержащих месторождений газа, может наблюдаться предельно малая концентрация выбросов оксидов серы, что в большинстве случаев сильного влияния на окружающую среду не оказывает.

Основными вредными выбросами при сжигании газообразного топлива, содержание которых в продуктах сгорания может иметь сравнительно высокое значение, являются оксиды азота NO_x . Следовательно, снижение концентрации данного компонента при эксплуатации котельных, работающих на природном газе, является актуальным вопросом.

Степень разработанности темы исследования. Теоретической и практической базой работы стали исследования отечественных и зарубежных ученых, которые посвящены проблемам экологии и защиты атмосферного воздуха при сжигании органических видов топлива: И.Я. Сигала, А.К. Внукова, С.В. Белова, А.С. Носкова, М.А. Савинкиной, Л.Я. Анищенко, Л.И. Пугача, О.А. Федяевой, П.А. Щинникова, Г.П. Беспмятнова, К.К. Богушевской, А.В. Беспмятовой, Ю.А. Израэля и ряда других.

Цель выпускной квалификационной работы заключается в исследовании режимов работы котельной на природном газе, в исследовании рассеивания вредных выбросов, а также в исследовании теплообмена в трубке газохода с установленным в нём интенсификатором.

Задачи исследования:

- проанализировать существующие методы по снижению вредных выбросов при сжигании природного газа и повышению энергоэкологической эффективности котельной;
- выполнить тепловой расчёт котлоагрегата;
- проанализировать изменения значений ряда параметров при изменении тепловой мощности котла;
- смоделировать трубу газохода с интенсификатором разного шага закрутки, исследовать изменение распределения температуры на стенке

Изм. № подл.	Подпись и дата	Взамен инв. №
--------------	----------------	---------------

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата

турбулизатора и скорости на выходной границе в зависимости от мощности котельного агрегата;

- рассчитать вредные выбросы от котельной общей мощностью 15,8 МВт и исследовать их распределение с использованием программного комплекса УПРЗА «Эко центр» с учётом розы ветров;

Объект исследования – автоматизированная отопительная газовая котельная, предназначенная для теплоснабжения промплощадки КС-1 Шекснинского ЛПУ МГ.

Предмет исследования – трубка с винтовым интенсификатором; исследование вредных выбросов при сжигании природного газа.

Научная новизна исследования:

- исследованы режимы работы котла марки «Vitomax 200» фирмы Viessmann, работающего на природном газе;
- составлена программа теплового расчёта котла марки «Vitomax 200» в MS Excel;
- смоделирована геометрия трубки газохода с установленным в ней интенсификатором с разным шагом закрутки в ПК ANSYS;
- исследована тепловая эффективность котла «Vitomax 200» мощностью 2,6 МВт;
- исследовано рассеивание вредных выбросов с учётом розы ветров при разных нагрузках котлоагрегатов;
- построены изолинии концентраций выбрасываемых веществ на прилегающей к источнику выброса территории, закрытой расчётной площадкой.
- получены различные графики зависимостей

Практической значимостью работы является возможность использования исследований при проектировании и наладке котельных и установленных в них оборудования.

Изм. № подл.	Подпись и дата	Взамен инв. №
--------------	----------------	---------------

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата
------	----------	------	---------	---------	------

МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ

Лист

9

Методология и методы исследования базируются на основных положениях по снижению вредных выбросов при сжигании природного газа, системного анализа и теории моделирования систем, аналитическом обобщении известных научных и практических результатов.

Структура и объём работы

Диссертационная работа состоит из введения, 3 глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объём диссертационной работы составляет 86 страниц, включая 24 рисунка, 20 таблиц, 35 формул, списка литературы из 60 наименований работ отечественных и зарубежных авторов и 7 приложений.

Инв. № подл.						<i>МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ</i>	Лист
							10
Взамен инв. №							
Подпись и дата							
Изм.	Кол. уч.	Лист	№Докум	Подпись	Дата		

ГЛАВА 1 ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ, НАПРАВЛЕННЫХ НА ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ В ОТОПИТЕЛЬНЫХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ КОТЕЛЬНЫХ

1.1 Характеристика выбрасываемых котельными в атмосферу продуктов сгорания

При сжигании органических топлив в топках котлов образуются различные продукты сгорания, такие как оксиды углерода CO_x , водяные пары H_2O , оксиды серы SO_x , оксиды азота NO_x , полициклические ароматические углеводороды, фтористые соединения, соединения ванадия V_2O_5 , твёрдые частицы и др. (табл. 1.1). При неполном сгорании топлива уходящие газы могут также содержать углеводороды метана CH_4 , этана C_2H_4 и др. Все образующиеся при неполном сгорании продукты являются вредными, тем не менее, благодаря современной технике сжигания топлива их можно свести к минимуму.

Таблица 1.1 – Удельные выбросы при факельном сжигании органических топлив в котлах

Выбросы	Природный газ, г/(м ³ пр. газа)	Мазут, кг/(т мазута)	Уголь, кг/(т угля)
Оксиды серы SO_x (в пересчёте на SO_2)	0,006 ÷ 0,01	~21S ^{P*}	(17 ÷ 19)S ^P
Оксиды азота NO_x (в пересчёте на NO_2)	5 ÷ 11	5 ÷ 14	4 ÷ 14
Монооксид углерода CO	0,002 ÷ 0,005	0,005 ÷ 0,05	0,1 ÷ 0,45
Углеводороды	0,016	0,1	0,45 ÷ 1,0
Водяные пары H_2O	1000	700	230 ÷ 360
Диоксид углерода CO_2	2000	~3000	2200 ÷ 3000
Летучая зола и шлак	-	10A ^{P*}	10A ^P

*S^P, A^P – содержание серы и золы соответственно на рабочую массу топлива, %

Изм. № подл.	Подпись и дата	Взамен инв. №
--------------	----------------	---------------

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата	МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ	Лист 11
------	----------	------	---------	---------	------	------------------------------	-------------------

Критерием санитарной оценки среды является предельно допустимая концентрация (ПДК) вредного вещества в атмосферном воздухе на уровне земли. Под ПДК понимают такую концентрацию различных химических соединений и веществ, которая при ежедневном воздействии на организм человека в течение длительного времени не вызывает каких-либо патологических изменений или болезней.

Ниже, в табл. 2.2, приведены предельно допустимые концентрации вредных веществ в атмосферном воздухе населённых мест. Максимально-разовая концентрация вредных веществ определяется по пробам, которые были отобраны в течение 20 мин, среднесуточная — за сутки.

Таблица 1.2 – Предельно допустимые концентрации некоторых вредных веществ в атмосферном воздухе

Загрязняющее вещество	Предельно допустимая концентрация, мг/м ³	
	Максимально-разовая	Среднесуточная
Диоксид серы	0,5	0,05
Оксид углерода	3,0	1,0
Монооксид углерода	3,0	1,0
Диоксид азота	0,085	0,04
Оксид азота	0,6	0,06
Сажа (копоть)	0,15	0,05
Сероводород	0,008	0,008
Бенз(а)пирен	-	0,1 мкг/100 м ³

Природный газ – это важный источник энергии, способный существенно сократить объём выбросов и поддерживать нормальное состояние окружающей среды. Кроме того, что он встречается в избытке в разных местах, он также является весьма безопасным источником энергии, а использование природного газа даёт и много других преимуществ, и особенно при сравнении ископаемых видов топлива.

В магистерской диссертации рассматриваются оксиды азота, являющиеся основными вредными выбросами при сжигании природного газа.

Изм. № подл.	Подпись и дата	Взамен инв. №
--------------	----------------	---------------

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата	МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ	Лист
							12

1.2 Источники и механизм образования оксидов азота при сжигании органических топлив

Максимальную зону загрязнения атмосферного воздуха от выбросов тепловой электростанции составляют оксиды азота, которые по механизму образования делятся на топливные, быстрые и термические (рис. 1).

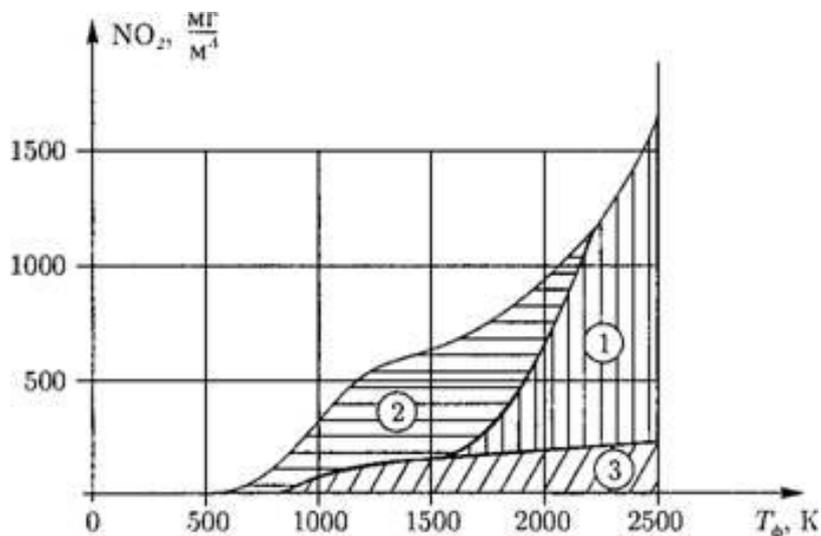


Рисунок 1.1 – Зоны образования оксидов азота при сжигании топлив

1 – термические оксиды; 2 – топливные оксиды;

3 – быстрые оксиды

В случае образования термических и быстрых оксидов азота источником азота является воздух, при образовании топливных оксидов азота – азотсодержащие составляющие топлива.

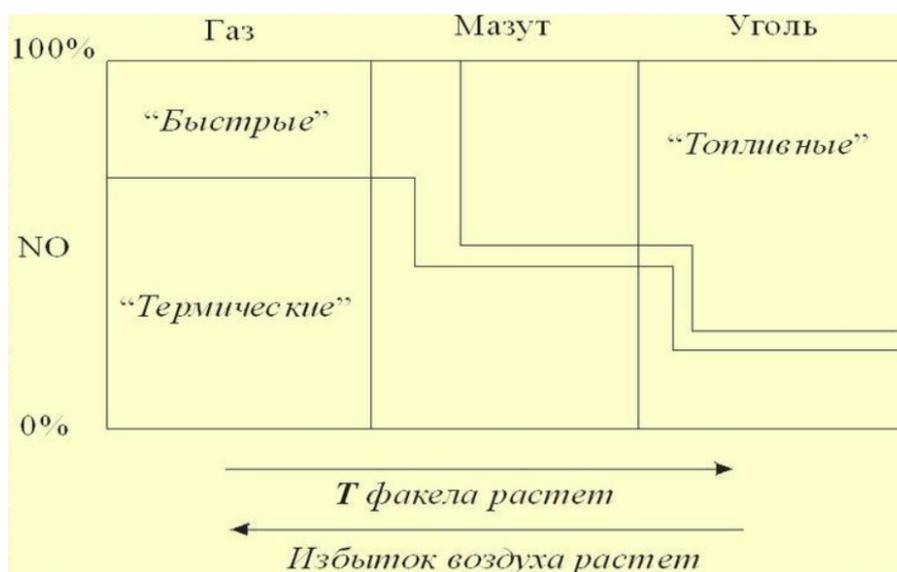


Рисунок 1.2 – Образование оксидов азота при сжигании различных топлив

Инд. № подл.	Взамен инд. №
Подпись и дата	

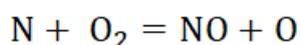
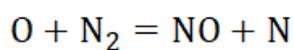
Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата
------	----------	------	---------	---------	------

МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ

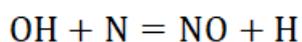
Лист

13

Термические оксиды азота образуются в результате реакции окисления атмосферного азота свободным кислородом в процессе горения. Основное количество термических оксидов азота образуется в узком диапазоне температур, близком к максимальной температуре в зоне активного горения. Механизм образования термических оксидов азота был предложен Я.Б. Зельдовичем и включает следующие реакции [20]:



Позднее он был дополнен реакцией атомарного азота с гидроксилом и получил название расширенного механизма Я.Б. Зельдовича:



Основными факторами, влияющими на выход термических оксидов азота, являются: температура в зоне генерации NO_x , концентрация атомарного кислорода и время пребывания продуктов сгорания в этой зоне. При этом концентрация оксидов азота линейно увеличивается с увеличением концентрации атомарного кислорода и экспоненциально с увеличением температуры.

Быстрые оксиды азота образуются при сравнительно низких температурах в результате реакций углеводородных радикалов с азотом воздуха и последующего взаимодействия азотсодержащих и кислородсодержащих радикалов. Данный метод образования оксидов протекает с очень высокой скоростью, поэтому они и получили название быстрые. Образование быстрых оксидов, прежде всего, зависит от концентрации радикалов в корневой части факела. При окислительном пламени (горение происходит с избытком кислорода) их вклад весьма мал, но при сжигании обогащённых смесей и при низкотемпературном горении их доля может достигать 25 % от общего содержания оксидов азота [21].

Инд. № подл.	Подпись и дата	Взамен инд. №
--------------	----------------	---------------

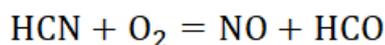
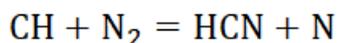
Изм.	Кол. уч.	Лист	№Докум	Подпись	Дата
------	----------	------	--------	---------	------

МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ

Лист

14

Механизм образования быстрых NO_x описан С. Фенимором:



Топливные оксиды азота образуются из азотосодержащих соединений топлива при окислении кислородом уже при температуре 900-1000 К.

Топливные оксиды азота не образуются при сжигании природного газа (так как он, за редким исключением, не содержит связанного азота), но зато при сжигании мазута и особенно всех видов твёрдого топлива (торфа, сланцев, бурых и каменных углей) доля топливных NO_x весьма значительна, а в некоторых случаях составляет 100 % общего выброса NO_x .

Наибольший вклад в содержание оксидов азота в уходящих газах вносит механизм протекания химических реакций между кислородом и молекулярным азотом, входящих в состав воздуха, вследствие которого образуются «термические» NO_x [21].

Меньший вклад в суммарное содержание оксидов азота в составе топлива вносит механизм преобразования молекулярного азота во фронте пламени в присутствии промежуточных углеводородсодержащих соединений, вследствие которого образуются «быстрые» NO_x . Технология очистки продуктов сгорания от содержания NO_x довольно сложна, и, как правило, экономически невыгодна. Вследствие этого обычно отдаются предпочтение технологическим методам, которые позволяют снизить их образование в процессе сжигания топлива.

1.3 Классификация основных типов газогорелочных устройств

Сжигания газообразного топлива осуществляются с помощью устройств, которые называются горелками. Они предназначены для ввода газа и окислителя (обычно им является воздух) в топку или печь, смешивания потока до начала горения или в самом процессе горения и для стабилизации факела.

Под стабилизацией понимают создание условий, обеспечивающих надёжное горение факела без затуханий, пульсаций или отрыва от горелки.

Изм. № подл.	Подпись и дата	Взамен инв. №
--------------	----------------	---------------

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата

МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ

Лист

15

Главным назначением горелок является организация процесса горения топлива так, чтобы обеспечить заданный экономически целесообразный режим работы печи. Для достижения этой цели горелка должна обеспечить [14]:

- 1) подвод и смешивание между собой необходимых количеств топлива и воздуха;
- 2) полноту сжигания топлива в пределах рабочего пространства печи;
- 3) сжигание топлива с образованием такого пламени, которое может обеспечить необходимый по технологическим условиям уровень теплопередачи в рабочем пространстве печи.

Основным классификационным признаком горелок является способ смешения газа с воздухом. По данному признаку горелки делятся на три большие группы:

- 1) с полным предварительным смешиванием газа и воздуха (беспламенной или инжекционные горелки);
- 2) с частичным предварительным смешиванием газа и воздуха (горелки с улучшенным смешиванием);
- 3) горелки без предварительного смешения или с внешним смешиванием (пламенные горелки).

Инв. № подл.							Подпись и дата	Взамен инв. №
Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата	<i>МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ</i>		Лист
								16

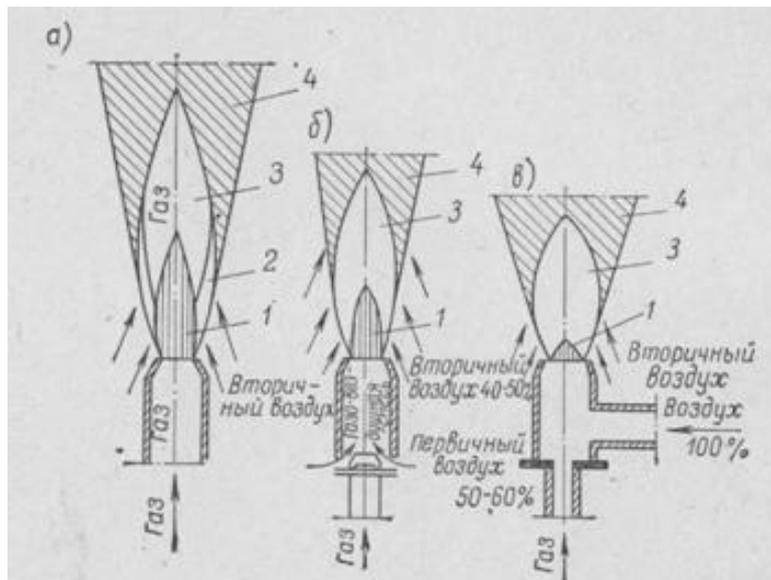


Рисунок 1.3 – Пламя газа

а) без предварительного смешения газа с воздухом; б) с частичным предварительным смешением газа с воздухом; в) с предварительным полным смешением газа с воздухом; 1 – внутренняя тёмная зона; 2 – коптящий светящийся конус; 3 – горящий слой; 4 – продукты сгорания

К первой группе относятся такие горелки, которые обеспечивают полное смешивание топлива и воздуха ещё до входа в печь. В зону горения печи подают заранее подготовленную горючую смесь, процесс горения имеет кинетический характер. Такие горелки часто называют беспламенными, потому что заранее подготовленная топливовоздушная смесь при сгорании почти не даёт видимого пламени. Пламенные горелки дают факел с малой излучательной способностью, радиация такого факела быстро падает по мере удаления от горелки [17].

В горелках с частичным предварительным смешиванием к топливу предварительно (до входа в печь) подмешивается только часть воздуха, необходимого для горения.

В горелках с внешним смешением образование смеси происходит в одном объёме с горением, которое носит диффузный характер. В результате при сжигании топлива, которое содержит углеводороды, образуется хорошо видимое пламя. Поэтому такие горелки часто называют пламенными.

Изм. № подл.	Подпись и дата	Взамен инв. №

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата

МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ

Лист

17

По способу подачи воздуха горелки делятся на инжекционные и с принудительной подачей воздуха. В соответствии с этим различают горелки низкого давления газа (до 5 кПа), среднего (5 кПа – 0,3 МПа) и высокого (более 0,3 МПа). Инжекционные горелки бывают только низкого и среднего давления.

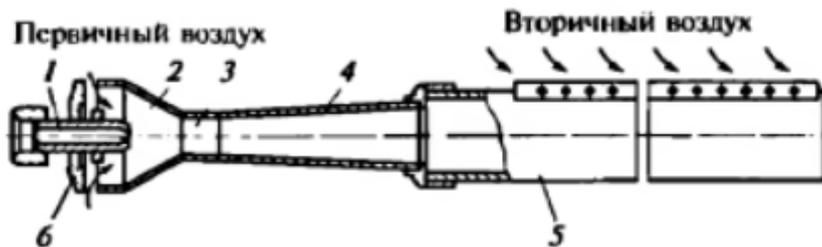


Рисунок 1.4 – Инжекционная горелка низкого давления

1 – сопло; 2 – конфузор; 3 – горловина; 4 – диффузор; 5 – огневой насадок; 6 – регулятор первичного воздуха

В инжекционных горелках, дающих хорошее предварительное смешивание топлива с воздухом, нужная полнота сгорания достигается при малейшем коэффициенте избытка воздуха по сравнению с горелками других типов. Снижение коэффициента избытка воздуха способствует повышению температуры горения. Поэтому горелки с предварительным смешиванием для аналогичного топлива обеспечивают самую высокую температуру горения.

Предварительное смешение газа и воздуха требует специальных устройств-смесителей, которые могут быть выполнены либо вместе с горелкой, либо отдельно от него. Наибольшее распространение получили смесители инжекционного типа.

Объём топочной камеры, которая приспособлена к беспламенному сжиганию газа, может быть заметно уменьшен, и при выборе габаритов камеры исходят не из необходимости обеспечить завершение в ней процесса горения, а из условия получения наибольшей площади поверхности нагрева.

Расход газа через горелку в зависимости от её конструкции может меняться в широких пределах от 0,5 до 1000 кубических метров в час и выше. Длина насадки доходит до 1 м. Эти горелки применяют обычно на больших нагревательных печах. Печи с такими горелками и керамическими

Изм. № подл.	Подпись и дата	Взамен инв. №

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата

МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ

Лист

18

рекуператорами с шамотных блоков, могут работать без принудительной подачи воздуха.

Значительную роль в работе инжекционных горелок играет тоннель. В процессе горения газа стенки тоннеля накаляются, что обеспечивает поджиг новых порций газозвушной смеси и тем самым способствует устойчивому горению.

При всех отмеченных преимуществах инжекционным горелкам присущи следующие дефекты: недостаточные пределы регулирования, невозможность изменять теплоты сгорания топлива при данном диаметре сопла, большие размеры горелок большой производительности.

Беспламенные горелки не следует применять в том случае, когда по условиям работы печи необходимы хорошо светящийся и достаточно длинный факел.

1.4 Основные методы снижения содержания оксидов азота в продуктах сгорания

Очистка продуктов сгорания от оксидов азота технически сложна и в большинстве случаев экономически нерентабельна. Наиболее разумным является внедрение технологий подавления оксидов азота на стадии сжигания топлива, которые предусматривают организацию топочного процесса при возможно более низкой температуре в зоне горения и малом избытке воздуха.

Основными режимно-технологическими методами снижения эмиссии оксидов азота являются:

1. Сжигание топлива с низким коэффициентом избытка воздуха.
2. Двухступенчатое сжигание топлива.
3. Рециркуляция части дымовых газов в зону горения.
4. Снижение температуры подогрева воздуха.
5. Усовершенствование горелочных устройств.

Инд. № подл.	Взамен инд. №
Изд.	Подпись и дата

Изд.	Кол. уч.	Лист	№Докум	Подпись	Дата

МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ

1.4.1 Сжигание топлива с низким коэффициентом избытка воздуха

Сжигание топлив с малыми избытками воздуха является одним из самых распространённых способов снижения выбросов окислов азота. Наибольшая эффективность достигается при сжигании с избытками воздуха $\alpha = 1,03 \div 1,05$. Зависимость концентрации NO_x от коэффициента избытка воздуха имеет вид экстремальной кривой с максимумом в интервале $\alpha = 1,1 \div 1,3$. Причём максимум NO_x соответствует, как правило, такому значению коэффициента избытка воздуха, при котором в данных условиях достигается наиболее полное сгорание топлива. В диапазоне $\alpha = 1,1 \div 1,3$ обеспечивается достаточное количество свободного кислорода и достаточно высокий температурный уровень. Различие в местоположении и уровне максимумов концентраций NO_x определяется различиями в конструкциях горелочных устройств, топочных камер и др. Однако низкие уровни избытка воздуха приводят к увеличению выбросов канцерогенных веществ, твёрдых частиц и окиси углерода, что противоречит требованиям защиты окружающей среды, а также в ряде случаев могут интенсифицировать высокотемпературную сульфидную коррозию экранов в топочной камере. Усовершенствованием горелочных устройств, обеспечивающих надежное регулирование расходов топлива и воздуха по горелкам и хорошее смешение топливовоздушной смеси, можно интенсифицировать процесс горения топлива и добиться значительного уменьшения БП (рис. 1.5): при этом максимальные значения концентрации NO_x остаются без изменения, но вся кривая зависимости NO_x (α) сдвигается в область меньших избытков воздуха. Таким образом, сжигание топлив с малыми избытками воздуха без значительных выбросов продуктов неполного сгорания возможно только при усовершенствовании горелочных устройств, позволяющих интенсифицировать процесс горения. Кроме того, большое значение при этом имеет устранение неорганизованных присосов в топку, так как подсосанный воздух участвует в дожигании факела с образованием дополнительного количества NO_x [6].

Изм. № подл.	Взамен инв. №
Изм. № подл.	Подпись и дата

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата

МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ

Лист

20

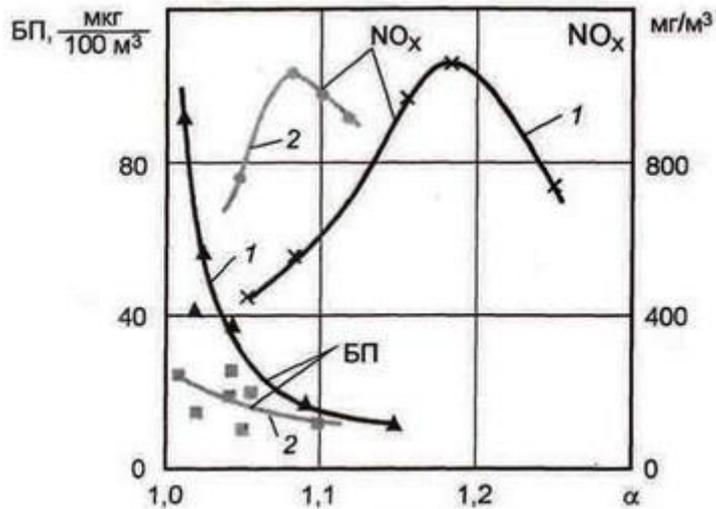


Рисунок 1.5 – Зависимость концентрации БП и NO_x от избытка воздуха
 1 – обычная горелка; 2 – усовершенствованная горелка

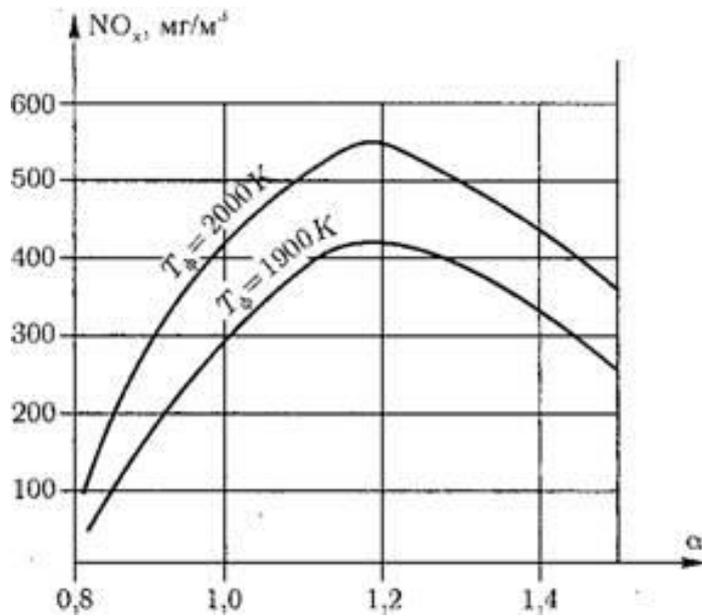


Рисунок 1.6 – Зависимость образования оксидов азота от избытка воздуха в зоне горения при сжигании природного газа

Избыток воздуха в топке, при котором будут наблюдаться максимальные концентрации оксидов азота в уходящих газах, зависит от максимальной действительной температуры, развивающейся при горении топлива, которая в свою очередь пропорциональна его теплоте сгорания. Подогрев воздуха, подаваемого на горение, повышает выход оксидов азота вследствие увеличения действительной температуры в ядре пламени.

Изм. № подл.	Подпись и дата	Взамен инв. №

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата

В качестве примера на рисунке 1.7 приведён график зависимости основных признаков эффективности и экологичности процесса сжигания топлива от коэффициента избытка воздуха α [7].

Самым эффективным и экономичным методом по сохранению топлива и одновременным сокращением образования вредных веществ в топке является применение систем непрерывного автоматического контроля и регулирования соотношения «топливо-воздух». Но подача воздуха должна поддерживаться таким образом, чтобы значение коэффициента избытка воздуха находилось в достаточно небольшой области (зона А). Верхняя граница данной зоны определяется увеличением потерь теплоты с уходящими газами и ростом интенсивности образования оксидов азота, а нижняя – появлением следов оксида углерода.

Поддержание оптимального соотношения «топливо-воздух» на границе возникновения химического недожога является трудным процессом, который ограничивает сжигание топлива с низким α . Лишь на основе микропроцессорных систем регулирования это возможно осуществить, но для данных систем необходима оперативная информация о составе уходящих газов.

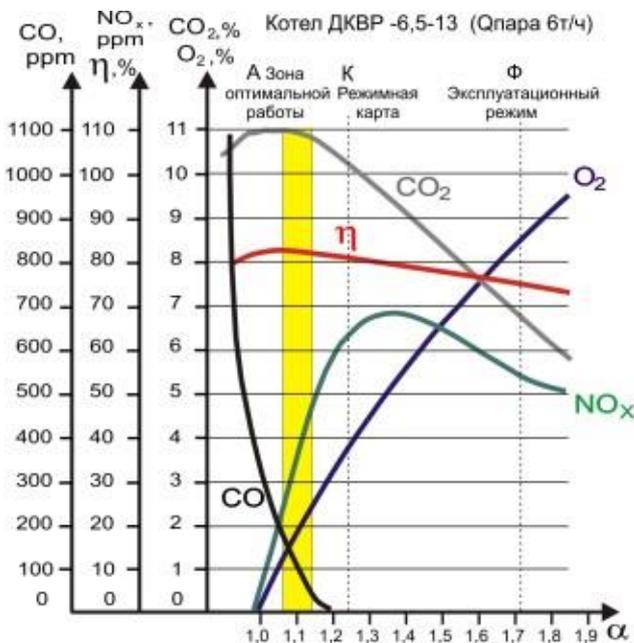


Рисунок 1.7 – Типичная зависимость показателей качества сжигания топлива от коэффициента избытка воздуха

Изм. № подл.	Подпись и дата	Взамен инв. №

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата

МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ

1.4.2 Двухступенчатое сжигание топлива

Под двухступенчатым сжиганием имеется в виду такая организация процесса горения, когда через горелки с топливом подается воздух в количестве, меньшем стехиометрического (обычно $\alpha = 0,8 \div 0,95$), а остальное необходимое по балансу количество воздуха вводится в топочную камеру далее по длине факела. Таким образом, на первом этапе горения осуществляется сжигание топлива при недостатке окислителя, а на втором – дожигание продуктов газификации при пониженных температурах (рис. 1.8). Благодаря этому в начале факела из-за пониженной концентрации кислорода уменьшается образование топливных окислов азота, а снижение температурного уровня на второй стадии уменьшает образование термических NO_x [6].

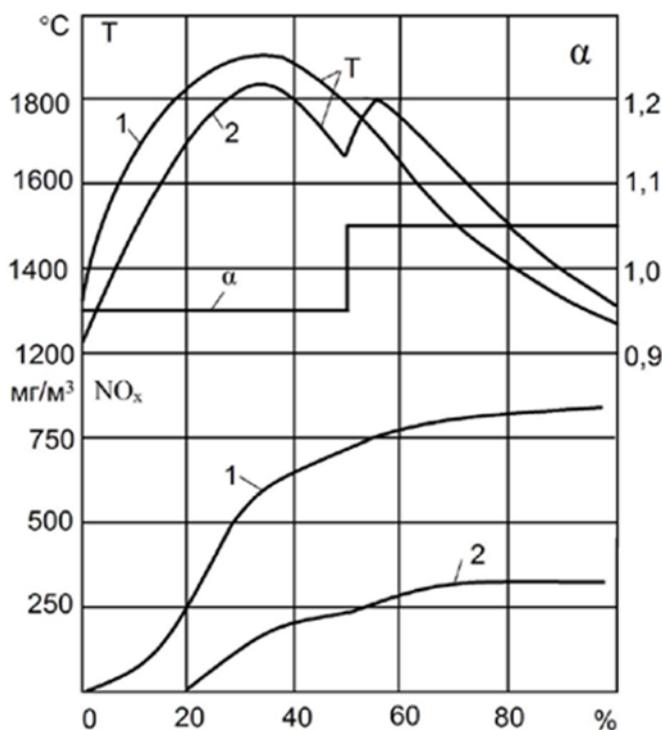


Рисунок 1.8 – Характеристики двухступенчатого сжигания

1 – одноступенчатое сжигание; 2 – двухступенчатое сжигание

Основной трудностью реализации двухступенчатого сжигания является правильное определение места подвода воздуха второй ступени и его количества, которые для разных конструкций котельных агрегатов не тождественны. Воздух должен быть введён таким образом, чтобы обеспечить

Изм. № подл.	Подпись и дата	Взамен инв. №

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата

МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ

Лист

23

полное смешение с продуктами реакции первой ступени для завершения догорания. В то же время эта зона должна быть достаточно удалена от устья горелки с тем, чтобы начальное выгорание у первой ступени достигло достаточной полноты. Недостаточно интенсивное смешение во второй ступени может привести к значительному увеличению выбросов продуктов неполного сгорания [6].

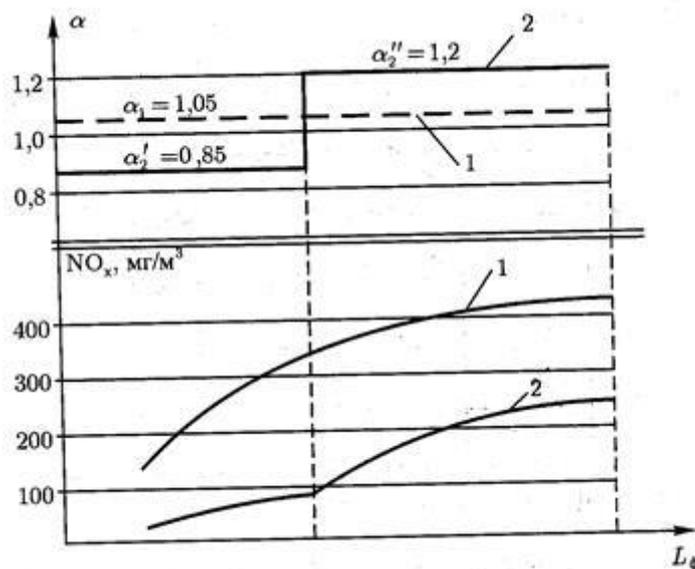


Рисунок 1.9 – Изменение концентрации оксидов азота на выходе из зоны активного горения

1 – одноступенчатое сжигание при $\alpha = 1,05$; 2 – двухступенчатое сжигание с разным избытком воздуха в подзонах горения

При правильной организации двухступенчатое сжигание позволяет на 40-50 % снизить выбросы NO_x и на 10-15 % уменьшить образование БП. Наибольшая эффективность данного способа подавления образования окислов азота достигается при совместном использовании режима с малыми избытками воздуха или режима с рециркуляцией топочных газов (рис. 1.10) [6].

Изм. № подл.	Подпись и дата	Взамен инв. №

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата

МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ

Лист

24

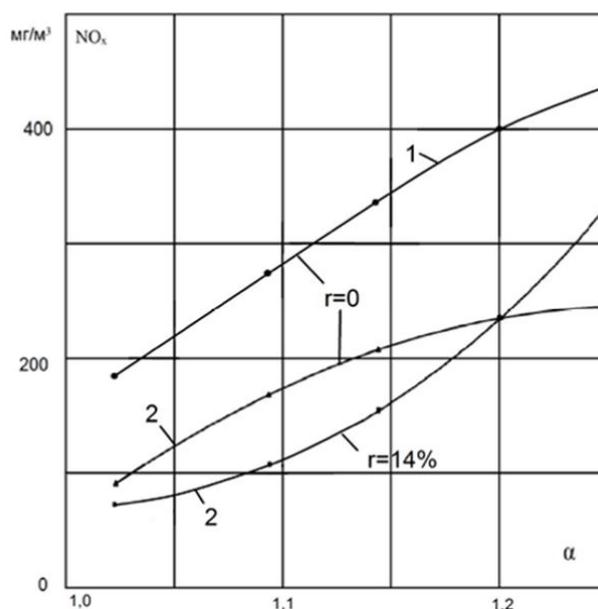


Рисунок 1.10 – Влияние избытка воздуха и рециркуляции на образование NO_x

1 – одноступенчатое сжигание; 2 – двухступенчатое сжигание

Таблица 1.3 – Снижение выхода NO_x при двухстадийном горении при сжигании природного газа

Мощность котла, МВт	C_{NO_x} , г/м ³		$(C_{\text{NO}_x \text{ двухст}}/C_{\text{NO}_x}) \cdot 100, \%$
	Нормальный режим	Двухстадийное горение	
78	0,28	0,14	50
160	0,55	0,23	42
230	0,40	0,18	45
250	0,64	0,17	27
418	0,49	0,28	57

В целом данный способ перспективен, относительно недорог и может быть реализован на большинстве существующих котлов как за счёт разбаланса соотношения «топливо-воздух» по ярусам горелок, так и за счёт подачи недостающего воздуха через шлицы или погашенные горелки в верхней части топки. Возможна также организация встречного дутья вторичного воздуха.

Изм. № подл.	Подпись и дата	Взамен инв. №
--------------	----------------	---------------

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата
------	----------	------	---------	---------	------

МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ

Лист

25

1.4.3 Рециркуляция продуктов сгорания

Метод рециркуляции продуктов сгорания заключается в отборе части дымовых газов (5...30 %) из газохода при температуре 300...400 °С и подаче этих газов в зону активного горения (предпочтительно через горелочные устройства, с использованием отдельных сопел или в смеси с воздухом, поступающим для горения). Рециркуляция продуктов сгорания является эффективным средством снижения выброса NO_x [6].

Уменьшение концентрации NO_x объясняется не столько низкой температурой рециркулирующих газов, сколько снижением температуры горения из-за уменьшения скоростей цепных реакций вследствие присутствия инертных газов и снижения концентраций реагирующих веществ. Большое количество современных котлов оборудовано различными схемами рециркуляции продуктов сгорания в зону горения. Исследования этих схем с точками отбора дымовых газов на рециркуляцию в диапазоне от 150 до 600 °С и ввод их в различные зоны показали, что наибольший эффект снижения образования окислов азота достигается при попадании всего количества рециркулирующих газов в зону активного горения в случае полного их предварительного перемешивания с дутьевым воздухом (рис. 1.11). В этом смысле наибольшей эффективностью обладает ввод продуктов сгорания в воздухопроводы перед горелками или подача их в топку через отдельные каналы горелок (кривая 1, рис. 1.11). Ввод рециркулирующих газов через щлицы, расположенные под горелками (кривая 2, рис. 1.11), менее эффективен, а при вводе дымовых газов через щлицы в поде топки (кривая 3, рис. 1.11) концентрация NO_x практически не меняется. В этих случаях основное сгорание топлива происходит прежде, чем рециркулирующие газы смешиваются с топливозвоздушной смесью. Организация рециркуляции продуктов сгорания в зону горения довольно дорогостоящее мероприятие, поскольку требует дополнительных капитальных затрат на установку дутьевого оборудования и газоотходов рециркуляции. Если не учитывать затрат на рециркуляцию

Изм. № подл.	Подпись и дата	Взамен инв. №
--------------	----------------	---------------

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата

МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ

Лист

26

дымовых газов, то на КПД котла этот метод практически не оказывает влияния [6].

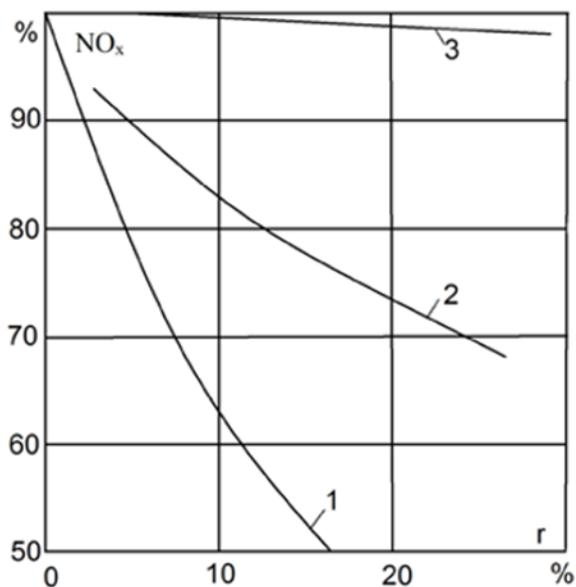


Рисунок 1.11 – Снижение образования NO_x в зависимости от рециркуляции топочных газов

1.4.4 Усовершенствование горелочных устройств

Усовершенствование горелочных устройств является одним из наиболее экономичных способов предотвращения выбросов не только окислов азота, но и сажи и канцерогенных веществ. По условиям образования NO_x приходится ограничивать размеры горелок, обеспечивать умеренные теплонапряжения, затяжку горения, равномерные поля температур.

Горелочные устройства с пониженным выходом NO_x обладают:

- 1) улучшенной равномерностью подготовки газозоудушной смеси;
- 2) рециркуляцией продуктов сгорания к корню факела;
- 3) организацией технологии ступенчатого сжигания;
- 4) организацией технологии многофакельного сжигания.

При использовании ГГУ с улучшенной равномерностью подготовки газозоудушной смеси получается короткое пламя, что является следствием ускорения химических реакций. В результате чего снижается содержание NO_x в продуктах сгорания и обеспечивается полное сгорание топлива при

Инв. № подл.	Взамен инв. №
Инв. № подл.	Подпись и дата

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата

МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ

Лист

27

минимальных коэффициентах избытка воздуха. Размеры и длина пламени определяется типоразмером ГГУ и сравнительно слабо изменяются от коэффициента избытка воздуха и тепловой нагрузки.

Снижение образования оксидов азота при использовании многофакельных горелок происходит за счёт увеличения скорости сгорания топлива и уменьшения удельного заполнения объёма топки.

Установка горелочных устройств специальных конструкций позволяет снизить содержание NO_x на 30 – 50 % и более, улучшить процессы выгорания топлива, повысить КПД и надёжность работы котлоагрегатов [6].

В таблице 1.4 представлены данные о снижении выбросов NO_x в зависимости от способа организации процесса горения.

Таблица 1.4 – Снижение выбросов оксидов азота в зависимости от способа организации процесса горения

Тип горелки по механизму организации горения	Снижение выделения NO_x по сравнению с обычной горелкой без предварительного смешения, %
Ступенчатая подача воздуха	25-35
Ступенчатая подача топлива	40-50
Горелки с низким избытком воздуха	20-25
Горелки с внутренней рециркуляцией продуктов сгорания	40-50
Горелки с внешней рециркуляцией продуктов сгорания	50-60
Ступенчатая подача воздуха или топливного газа с внутренней рециркуляцией продуктов сгорания	55-75
Ступенчатая подача воздуха или топливного газа с внешней рециркуляцией продуктов сгорания	60-80

Изм. № подл.	Подпись и дата	Взамен инв. №
--------------	----------------	---------------

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата
------	----------	------	---------	---------	------

МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ

Лист

28

Инжекционные горелки отличаются повышенным образованием оксидов азота по сравнению с диффузионными горелками такой же тепловой мощности. Благодаря предварительному смешению топлива с воздухом в камеру сгорания инжекционных горелок поступает хорошо подготовленная горючая смесь. Процесс горения происходит более интенсивно, в результате чего формируется более короткий факел с зонами повышенных температур по сравнению с диффузионными горелками, что способствует повышенному образованию NO_x .

Горелки на самотяге имеют более длинный факел и низкие выбросы NO_x по сравнению с дутьевыми горелками такой же тепловой мощности.

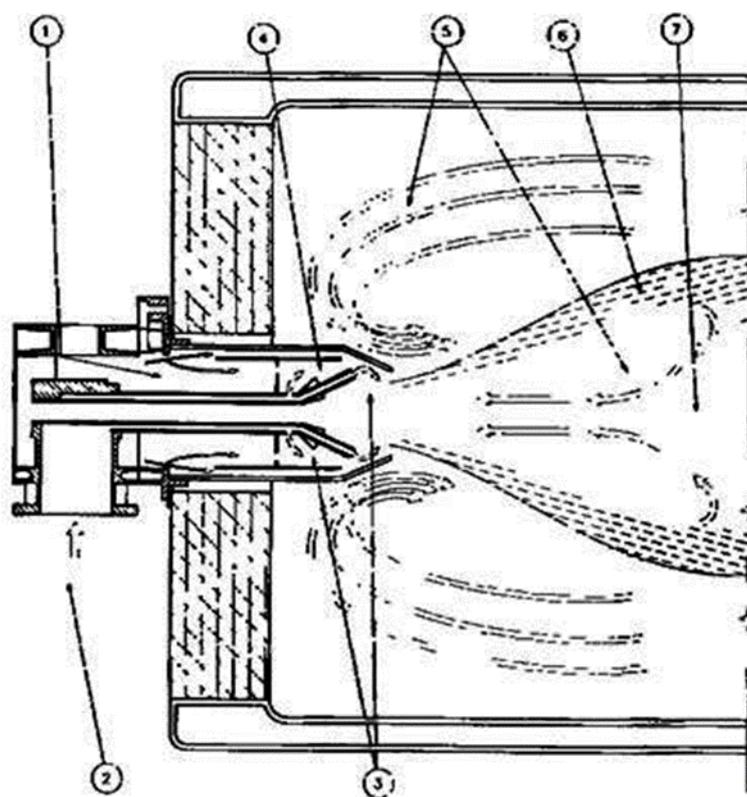


Рисунок 1.12 – Функциональная схема процесса горения в газовой горелке

1 – воздух для горения; 2 – подача газообразного топлива; 3 – струя газообразного топлива; 4 – зона стабилизации пламени (горение при стехиометрических условиях); 5 – рециркуляция продуктов горения; 6 – горение вне стехиометрических условий – смесь воздуха для горения; 7 – «холодная» зона пламени

В теплогенераторах большой мощности из-за большого сопротивления, возникающего на головке горелки, сложно организовать подмес продуктов

Изм. № подл.	Подпись и дата	Взамен инв. №

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата

МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ

Лист

29

горения внутри камеры сгорания. Поэтому продукты горения подмешиваются в камеру сгорания извне.

С помощью дополнительного вентилятора или с помощью вентилятора самой горелки часть продуктов горения забирается на выходе из теплогенератора и подаётся обратно в головку горелки для того, чтобы смешать с воздухом для горения.

Даже если при некоторых обстоятельствах рециркуляция газов внутри камеры сгорания может оказаться недостаточной для достижения очень низкого содержания NO_x (данный случай относится к горелкам большой мощности), этот метод можно применять в сочетании со ступенчатым сжиганием.

1.5 Методы, направленные на повышение тепловой эффективности работы котельной

1.5.1 Основные методы интенсификации

Задачи интенсификации теплообмена сводятся к уменьшению габаритов и массы теплообменных устройств или к снижению температурного напора по сравнению с их величиной, которая достигается в данных условиях обычными путями. Если увеличение скорости потока в пределах, допустимых на практике, не обеспечивает получения необходимых габаритов теплообменного устройства, то необходима интенсификация теплообмена методами, которые обеспечат уменьшение габаритов при умеренном увеличении суммарных потерь мощности на прокачку теплоносителей через теплообменные аппараты [51].

Выделяются два направления интенсификации. Одно из них связано с увеличением теплового потока без учёта дополнительных потерь энергии.

Второе направление связано с увеличением теплового потока при заданной величине энергии, затрачиваемой на перекачку теплоносителя, т. е. с увеличением эффективности теплоотдачи. Оно становится особенно важным для стационарно работающих теплообменных аппаратов большой мощности.

Инд. № подл.	Подпись и дата	Взамен инд. №
--------------	----------------	---------------

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата
------	----------	------	---------	---------	------

МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ

Лист

30

На сегодняшний день существует множество методов интенсификации теплообмена, которые отличаются степенью интенсификации и увеличением гидравлического сопротивления в устройстве.

Можно выделить две основные группы методов интенсификации теплообмена [51]:

- пассивные, не требующие подвода дополнительной энергии (применение оребренных и других развитых поверхностей теплообмена на стороне теплоносителя с низким коэффициентом теплоотдачи, использование разных турбулизирующих планок, завихрителей или шероховатых поверхностей теплообмена, уменьшающих толщину пограничного слоя или разрушающих его);
- активные, требующие применения дополнительной энергии.

Таблица 1.5 – Методы интенсификации теплообмена в трубах

Метод интенсификации	$Nu_{инт}/Nu_0$	$\zeta_{инт}/\zeta_0$
	$Re \cdot 10^3 \div 2 \cdot 10^4$	
Винтовая ленточная вставка	1,8 ÷ 2,7	4 ÷ 4,5
Кольцевые диафрагмы	2,0 ÷ 2,4	3,5 ÷ 4
Шнековая вставка	1,0 ÷ 1,7	2,5 ÷ 5,2
Сферические выступы и выемки на стенках канала	1,2 ÷ 1,3	1,3 ÷ 1,7
Каналы с пружинными вставками	1,7 ÷ 2	3 ÷ 7
Конфузор-диффузор	1,5	1,5
Витые трубы	1,2 ÷ 1,4	1,3 ÷ 1,7
Акустическое поле	1,5 ÷ 2	-
Электромагнитное поле	2 ÷ 2,5	-

Если говорить об интенсификации в каналах теплообменных аппаратов, то под этим подразумевается интенсификация конвективного теплообмена, основными способами которого являются [54]:

Изм. № подл.	Подпись и дата	Взамен инв. №
--------------	----------------	---------------

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата	<i>МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ</i>	Лист
							31

1. Изменение термического сопротивления.
2. Изменение скорости потока.
3. Использование развитых поверхностей теплообмена путём оребрения.

Оребрение поверхности применяется со стороны теплоносителя, обладающего меньшим коэффициентом теплоотдачи. Оребрение поверхности теплообмена целесообразно не только по высоким значениям коэффициента теплопередачи, но и по весовым показателям, так как поверхность оребрения, в 5-10 раз превосходящая несущую поверхность трубок, не подвержена давлению, а поэтому оребрение изготавливается из более тонкого материала, чем трубки, тем самым обеспечивается значительный весовой эффект.

4. Воздействием на поток с целью его искусственной турбулизации. При значениях критерия Рейнольдса, соответствующих ламинарному и переходному режимам за счёт искусственной турбулизации достигаются значения коэффициента теплоотдачи, характерные для развитого турбулентного потока.

Однако эффективность искусственной турбулизации потока с увеличением значения критерия Рейнольдса снижается, при этом темп роста сопротивления превалирует над темпом роста теплоотдачи.

1.5.2 Примеры интенсификации в теплообменниках

Для интенсификации теплообменных процессов в компактных аппаратах с продольно-обтекаемыми пучками труб предложено использовать трубы с поперечными кольцевыми канавками, изготовленными накаткой (рис. 1.13).

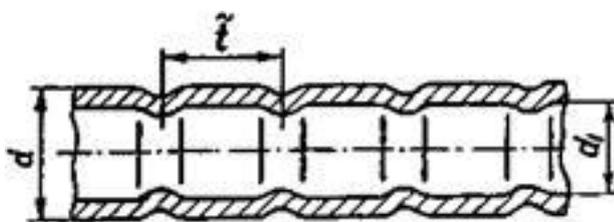


Рисунок 1.13 – Продольный разрез трубы с канавками

Преимущества этого способа интенсификации теплообмена по сравнению с другими способами следующие:

Изм. № подл.	Подпись и дата	Взамен инв. №
--------------	----------------	---------------

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата
------	----------	------	---------	---------	------

а) образующиеся внутри трубы диафрагмы после накатки снаружи кольцевых канавок существенно интенсифицируют теплообмен в трубе;

б) технологически способ осуществляется несложно, к тому же не надо менять существующую технологию сборки трубчатых теплообменников;

в) он применим при больших удельных тепловых потоках и в тесных пучках труб, поскольку не увеличивает наружного диаметра труб. Применение данного способа интенсификации теплообмена наиболее целесообразно в диапазоне относительных шагов труб $s/d = 1,1 \div 1,3$. В пучках с $s/d > 1,3$ оптимальная интенсификация в межтрубном пространстве обеспечивается при высотах кольцевых диафрагм внутри трубы выше оптимальных и, следовательно, при значительных потерях давления внутри трубы. Оптимальная же интенсификация теплообмена внутри трубы даёт незначительную его интенсификацию снаружи труб.

Интенсификация трубного пространства кожухотрубных аппаратов выполняется либо в виде металлических вставок, либо в виде изменения стенки трубы с гладкой на профилированную путём её деформации.

Такие меры интенсификации приводят к созданию псевдотурбулизации потока, изменению его тангенсальной скорости, созданию различных вихрей.

Интенсификация межтрубного пространства осуществляется посредством установки различных перегородок, которые создают перпендикулярное направление при обтекании пучка труб потоком (рис.1.14).

Изм. № подл.	Подпись и дата	Взамен инв. №							Лист
			<i>МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ</i>						
Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата				

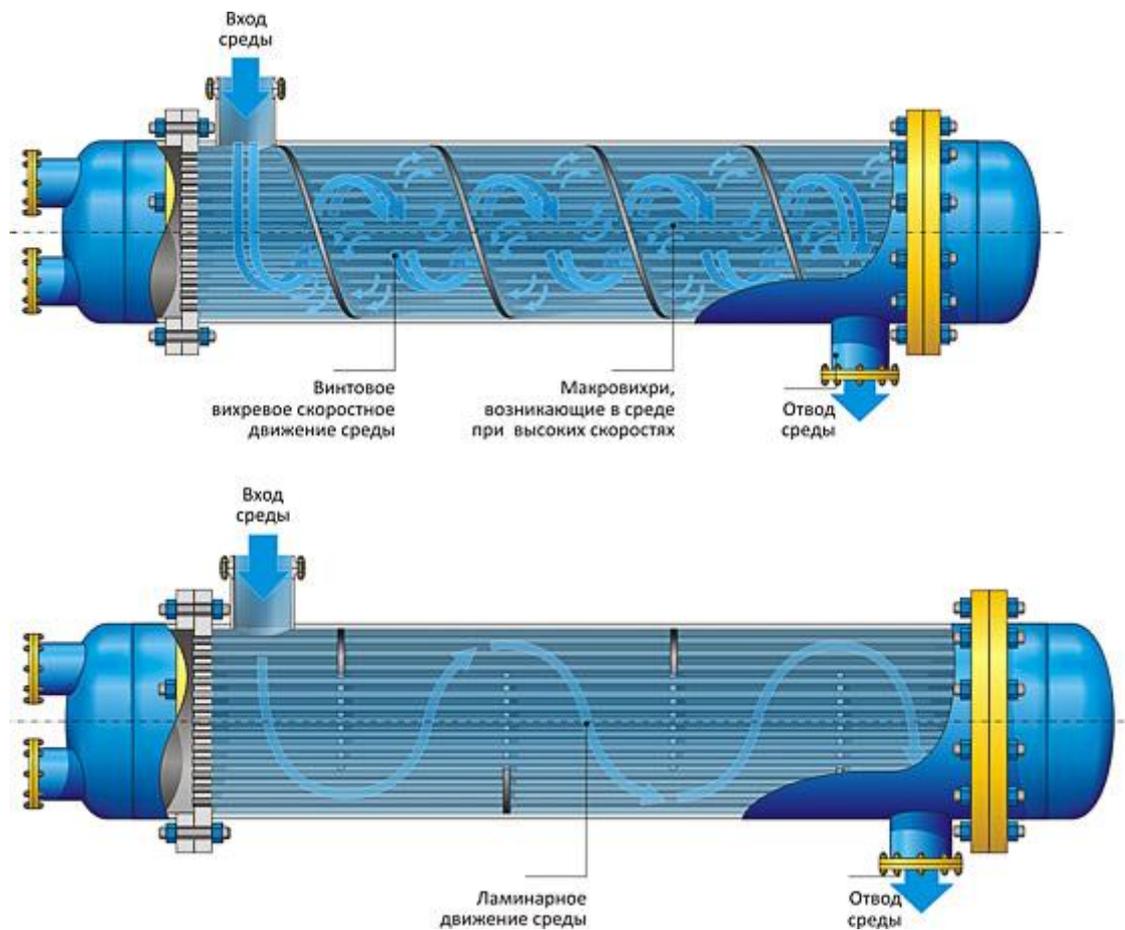


Рисунок 1.14 – Движение среды в межтрубном пространстве

Инд. № подл.	Подпись и дата	Взамен инд. №

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата

МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ

Лист

34

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1

На основании изученных методов снижения вредных выбросов и методов, направленных на повышение тепловой эффективности работы котельной, сделаны следующие выводы:

1. Обзор удельных выбросов при сжигании органических видов топлива показал, что при сжигании природного газа основным вредным веществом являются оксиды азота.

2. Основными методами, направленными на сокращение эмиссии оксидов азота, являются: сжигание топлива с низким коэффициентом избытка воздуха, двухстадийное сжигание, рециркуляция продуктов сгорания, усовершенствование ГГУ. Однако наиболее эффективным будет использование методов комплексно.

3. Одним из распространённых методов по повышению тепловой эффективности работы котельной является интенсификация теплообмена. Интенсификация межтрубного пространства осуществляется за счёт установления внутри трубы различных перегородок.

4. Наиболее распространён винтовой турбулизатор.

5. В следующей главе магистерской диссертации будут рассмотрены режимы работы котла, а также эффективность винтового турбулизатора.

Инд. № подл.	Подпись и дата	Взамен инд. №							Лист
Изм.	Кол. уч.	Лист	№Докум	Подпись	Дата	МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ			

Таблица 2.2 – Режимы работы котельной

Наименование вида потребителя тепла	Тепловая нагрузка, МВт				Кол. работающих котлов
	отопление	вентиляция	ГВС	Всего	
Максимально-зимний режим (-31)	7,13	5,61	2,62	15,36	3
Переходный период (+10)	1,16	0,91	2,62	4,69	1
Летний режим	-	-	2,096	2,096	1

Согласно данным о тепловых нагрузках в котельной устанавливаются два водогрейных котла марки «Vitomax-200» тепловой мощностью 6600 кВт фирмы «Viessmann» (Германия) с газовой горелкой G70/2-A фирмы «Weishaupt» (Германия) и один котёл «Vitomax-200» тепловой мощностью 2600 кВт фирмы «Viessmann» (Германия) с газовой горелкой G10/1-D фирмы «Weishaupt» (Германия).

Суммарная установленная мощность котельной 15,8 МВт.

Топливо – природный газ, теплотворная способность которого 33250 кДж/м³ (8000 ккал/м³) при стандартных условиях – температура 293 К (20 °С) и давлении 101,3 кПа. Давление газа на вводе в котельную – 5 кг/см².

В магистерской работе произведён тепловой расчёт котлоагрегата Vitomax 200 тепловой мощностью 2600 МВт.

Техническое задание на проектирование:

1. Номинальная тепловая мощность котлоагрегата Vitomax 200: $Q_k = 2,6$ МВт
2. Температура питательной воды: $t_{п.в.}' = 70$ °С;
3. Температура нагретого теплоносителя воды: $t_{н.т.}' = 105$ °С;
4. Рабочее давление теплоносителя в котле: $P_{н.т.} = 0,6$ (6,0) Мпа (кгс/см²);
5. Величина номинального разряжения в топке котла: $\Delta p_{разр} = 20 \div 40$ (2 ÷ 4) (Па (мм. вод. ст.);

Изм. № подл.	Подпись и дата	Взамен инв. №
--------------	----------------	---------------

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата	МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ	Лист
							37

6. Топливо: природный газ с теплотворной способностью 33250 кДж/м³ (8000 ккал/м³)

Для расчёта использован природный газ следующего состава:

CH₄ – 98,9 %;

C₂H₆ – 0,3 %;

C₃H₈ – 0,1 %;

C₄H₁₀ – 0,01 %;

N₂ – 0,6 %;

CO₂ – 0,1 %.

7. Тип котлоагрегата: Жаротрубный;

8. Температура газового топлива перед горелкой: $t_r' = 5$ °С;

9. Организация подачи первичного воздуха: из помещения котельной;

10. Температура воздуха в котельной: $t_b = 25$ °С.

2.2 Материальный баланс горения

2.2.1 Расчёт материального баланса горения природного газа

1) Низшая теплота сгорания сложной газовой смеси:

$$Q_H^p = \sum_{i=1}^n Q_{ин}^0 \cdot r_i, (2.1)$$

где $Q_{ин}^0$ – низшая теплота сгорания входящих в состав газовой смеси i -ых компонентов, находящихся при н.ф.у., кДж/нм_Г³. Определяется по справочной литературе;

r_i – объёмная доля i -го компонента входящего в состав сложной многокомпонентной газовой смеси, нм_Г³/нм_Г³.

2) Теоретический расход воздуха, нм_В³/нм_Г³, необходимый для полного сгорания газовой смеси:

$$V_T^c = 4,76 \cdot \sum_{i=1}^n (V_i^{O_2} \cdot r_i - O_2^T), (2.2)$$

Изм. № подл.	Подпись и дата	Взамен инв. №
--------------	----------------	---------------

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата
------	----------	------	---------	---------	------

МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ

Лист

38

где N_2^B – объём азота, входящего в состав подаваемого на горение воздуха, $\text{нм}_{\text{N}_2}^3/\text{нм}_{\text{Г}}^3$;

N_2^T – объём азота, входящего в состав газового топлива (топливного азота), $\text{нм}_{\text{N}_2}^3/\text{нм}_{\text{Г}}^3$.

4) Теоретический объём кислорода, находящегося в продуктах сгорания образовавшихся в результате полного сгорания 1 нм^3 газовой смеси, $\text{нм}_{\text{O}_2}^3/\text{нм}_{\text{Г}}^3$:

$$V_{\text{O}_2} = 0,21 \cdot (\alpha - 1) \cdot V_{\text{T}}^c + V_{\text{O}_2}^T, (2.8)$$

5) Теоретический объём влажных продуктов сгорания, образовавшихся в результате полного сгорания 1 нм^3 газовой смеси, $\text{нм}_{\text{п.с.}}^3/\text{нм}_{\text{Г}}^3$:

$$V_{\text{п.с.}}^{\text{вл}} = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2}, (2.9)$$

6) Объёмная доля диоксида углерода, содержащегося в продуктах сгорания, $\text{нм}_{\text{CO}_2}^3/\text{нм}_{\text{п.с.}}^3$:

$$r_{\text{CO}_2} = \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_{\text{п.с.}}^{\text{вл}}}, (2.10)$$

7) Объёмная доля водяных паров, содержащихся в продуктах сгорания, $\text{нм}_{\text{H}_2\text{O}}^3/\text{нм}_{\text{п.с.}}^3$:

$$r_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{V_{\text{H}_2\text{O}}}{V_{\text{п.с.}}^{\text{вл}}}, (2.11)$$

8) Общая объёмная доля трёхатомных газов, содержащихся в продуктах сгорания, $\text{нм}_{\text{CO}_2+\text{H}_2\text{O}}^3/\text{нм}_{\text{п.с.}}^3$:

$$r_{\text{п}} = r_{\text{CO}_2} + r_{\text{H}_2\text{O}}, (2.12)$$

9) Значения парциальных давлений и водяных паров, МПа:

$$P_{\text{RO}_2} = \frac{V_{\text{RO}_2}}{V_{\text{п.с.}}^{\text{вл}}} \cdot P_{\text{T}}, (2.13)$$

$$P_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{V_{\text{H}_2\text{O}}}{V_{\text{п.с.}}^{\text{вл}}} \cdot P_{\text{T}}, (2.14)$$

где P_{T} – абсолютное давление в топке, МПа

Инд. № подл.	Взамен инд. №
Изд. № подл.	Подпись и дата

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата

МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ

Лист

40

10) Значение средней удельной теплоёмкости газовой смеси сложного состава, кДж/нм³·град, определяется по закону аддитивности произведения удельных объёмов компонентов на значение величины удельной объёмной теплоёмкости при постоянном давлении:

$$c'_{p\Gamma} = \sum_{i=1}^n V_i \cdot c'_{pi}, \quad (2.15)$$

где $c'_{p\Gamma}$ – объёмная теплоёмкость при постоянном давлении i -го компонента, входящего в состав сложной газовой смеси, находящейся при температуре t'_{Γ} , кДж/нм³·град.

11) Физическая теплота, подаваемая с газовым топливом, кДж/нм³, и воздухом, кДж/нм³, в горелочное устройство, кДж/нм³:

$$Q_{\text{физ}} = Q_{\text{физ}}^{\text{в}} + Q_{\text{физ}}^{\text{г}} = V_{\text{д}}^{\text{вл}} \cdot c'_{p\text{в}} \cdot t'_{\text{в}} + c'_{p\Gamma} \cdot t'_{\Gamma}, \quad (2.16)$$

где $c'_{p\text{в}}$ – удельная теплоёмкость подаваемого на организацию горения влажного воздуха при постоянном давлении, кДж/нм³·град;

$c'_{p\Gamma}$ – удельная теплоёмкость подаваемой на горение газовой смеси при постоянном давлении, кДж/нм³·град;

$t'_{\text{в}}$ – температура подаваемого в газогорелочное устройство первичного воздуха, °С.

12) Калориметрическая температура горения газовых смесей сложного состава, °С:

$$t_{\text{к}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{п}} + Q_{\text{физ}}}{V_{\text{CO}_2} \cdot c_{p\text{CO}_2}^{\text{к}} + V_{\text{H}_2\text{O}} \cdot c_{p\text{H}_2\text{O}}^{\text{к}} + V_{\text{N}_2} \cdot c_{p\text{N}_2}^{\text{к}} + V_{\text{O}_2} \cdot c_{p\text{O}_2}^{\text{к}}}, \quad (2.17)$$

где $Q_{\text{физ}}$ – теплосодержание (физическая теплота) подаваемого газа и воздуха, кДж/нм³;

V_{CO_2} , $V_{\text{H}_2\text{O}}$, V_{N_2} – объёмы компонентов CO_2 , H_2O , N_2 , содержащихся в продуктах сгорания газа при действительном значении коэффициента избытка воздуха α_{Γ} и температуры $t_{\text{к}}$, нм³/нм³;

Изм. № подл.	Подпись и дата	Взамен инв. №
--------------	----------------	---------------

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата
------	----------	------	---------	---------	------

$c''_{iп.с}$ – теплоёмкость i -го компонента продуктов сгорания, находящегося при температуре $t''_{у.г.}$, кДж/м³·град;

$V_{п.с}''$ – полный объём продуктов сгорания, нм_{пс}³/нм_г³;

$t''_{у.г.}$ – температура уходящих газов, °С.

4) Потери теплоты с уходящими газами, %:

$$q_2 = \frac{(I''_{у.г.} - \alpha_{у.г.} \cdot I'_в) \cdot (100 - q_4)}{Q_p^p}, \quad (2.21)$$

где $I''_{у.г.}$ – энтальпия уходящих газов за котлом, кДж/м³;

$I'_в$ – энтальпия холодного воздуха, подаваемого в воздухоподогреватель входящий в котловой контур, работающий на теплоте отходящих газов котла, кДж/м³;

$\alpha_{у.г.}$ – коэффициент избытка воздуха в уходящих газах;

q_4 – потеря от механической неполноты сгорания, %. Для котлов, работающих на природном газе, величина $q_4 = 0$ %.

Потери теплоты с химической неполнотой сгорания топлива q_3 обусловлены наличием в уходящих газах продуктов незавершённого горения (СО, Н₂, СН₄ и др.). Для котлов с отлаженными и правильно эксплуатирующими горелками, сжигающими природный газ, процент потерь теплоты с химической неполнотой сгорания $q_3 = 0$ %.

Величина потерь теплоты через наружные теплограждения котла q_5 зависят от площади наружной поверхности котлоагрегата $F_{н.п.}$, величины термического сопротивления теплоотдачи $R_{н.}$, разности температур на наружной поверхности обмуровки котла $t_{н.п}$ и внутреннего воздуха в помещении котельной $t_в.$

Согласно нормативным данным для обеспечения техники безопасности при эксплуатации котельного оборудования и снижения величины q_5 значение температуры на поверхности котлов $t_{н.п}$ не должна превышать 45 ÷ 50 °С.

Для отопительных котлов малой мощности значение q_5 обычно принимают в пределах 1,5 ÷ 2 %.

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взамен изн. №
--------------	----------------	---------------

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата
------	----------	------	---------	---------	------

5) КПД (брутто) котлоагрегата, %:

$$\eta_{к.а}^{бр} = 100 - q_2 - q_5, (2.22)$$

где q_2 – потери теплоты с уходящими газами, %;

q_5 – потери теплоты через наружные ограждения котлоагрегата, %.

6) Расчётный часовой расход природного газа V_r , $нм^3/ч$:

$$V_r = \frac{Q_1}{Q_p^p \cdot \eta} \cdot 100 (2.23)$$

7) Массовый часовой расход нагреваемого теплоносителя (воды) при параметрах теплоносителя $105 \div 70$, $кг/ч$:

$$G_{н.т} = \frac{3,6 \cdot 10^6 \cdot Q_1}{c_{н.т}^{cp} \cdot (t''_{н.т} - t'_{н.т})} (2.24)$$

8) Часовой расход нагреваемого теплоносителя (воды) для водогрейных котлов, $кг/ч$:

$$G_{н.т} = \frac{3,6 \cdot Q_1}{(I''_{н.т} - I'_{н.т})} = \frac{3,6 \cdot Q_1}{c_{н.т}^{cp} \cdot (t''_{н.т} - t'_{н.т})}, (2.25)$$

где $I''_{н.т}$ – энтальпия нагреваемого теплоносителя на выходе их экранных поверхностей котла, $кДж/кг$;

$I'_{н.т}$ – энтальпия нагреваемого теплоносителя на входе в экранные поверхности нагрева котла, $кДж/кг$;

$c_{н.т}^{cp}$ – средняя удельная теплоёмкость нагреваемого теплоносителя (воды) в пределах температур $t''_{н.т} \div t'_{н.т}$, $кДж/кг \cdot град$;

$t''_{н.т}$ – температура нагреваемого теплоносителя на входе в экранные поверхности нагрева котла, $^{\circ}C$;

$t'_{н.т}$ – температура нагреваемого теплоносителя на выходе из экранных поверхностей нагрева котла, $^{\circ}C$.

9) Коэффициент сохранения теплоты ϕ зависит от величины потерь теплоты через наружные ограждения котельной установки:

$$\phi = 1 - \frac{q_5}{\eta + q_5} (2.26)$$

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взамен инв. №
--------------	----------------	---------------

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата
------	----------	------	---------	---------	------

МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ

Лист

44

Расчёт теплового баланса горения был произведён в программном комплексе Microsoft Excel. Результаты сведены в таблицу, которая представлена в Приложении Б.

2.4 Тепловой расчёт топки и жаротрубных конвективных поверхностей нагрева

Целью теплового расчёта топки является определение температуры уходящих газов на выходе из топки, а также величины приращения температуры нагреваемого теплоносителя (воды).

Таблица 2.3 – Конструктивные характеристики топки

№ п/п	Наименование величины	Обозначение	Расчётная формула или способ определения	Размерность	Расчётное значение
1	2	3	4	5	6
1	Площадь экранированных участков	$F_{ст}^{экр}$	По эскизам котлоагрегата	m^2	14,32
2	Площадь неэкранированных участков	$F_{ст}^{неэкр}$	По эскизам котлоагрегата	m^2	0,05
3	Общая площадь лучевоспринимающих поверхностей топки	$F_{л}$	$F_{л} = F_{ст}^{экр}$	m^2	14,32
4	Общая площадь стен топки	$F_{ст}$	$F_{ст} = F_{ст}^{экр} + F_{ст}^{неэкр}$	m^2	14,37
5	Высота топки	H_T	По эскизам котлоагрегата	m	0,97
6	Высота установки горелки	h_r	По эскизам котлоагрегата	m	0,408
7	Объём топочной камеры	V_T	По эскизам котлоагрегата	m^3	4,42
8	Степень экранирования топки	ψ	$\psi = F_{л}/F_{ст}$		0,997
9	Эффективная толщина излучающего слоя	S	$S = 3,6 \cdot (V_T/F_{ст})$	m	1,107
10	Коэффициент загрязнения экранов	ξ	По номограмме		0,65
11	Абсолютное давление в топке	p	По заданию	MPa	0,1
12	Степень заполнения топочного пространства светящимися компонентами факела	m	По номограмме		1

Изм. № подл.	Подпись и дата	Взамен инв. №
--------------	----------------	---------------

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата
------	----------	------	---------	---------	------

МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ

Лист

45

Поверочный тепловой расчёт топочного устройства котлоагрегата был произведён в программном комплексе Microsoft Excel. Результаты сведены в таблицу, которая представлена в Приложении В.

Таблица 2.4 – Основные конструктивные параметры второго газохода

Наименование величин	Обозначения	Размерность	Примечание (расчётные формулы)	Значения
Внутренний диаметр трубки	$d_{вн}$	м	По эскизам котлоагрегата	0,05
Площадь живого сечения одной конвективной трубки	$f_{тр}$	м ²	$f_{тр} = 0,785 \cdot d_{вн}^2$	0,00196
Количество труб	n	шт	По эскизам котлоагрегата	34
Сечение для прохода газов	$f_{кп}^I$	м ²	$f_{кп}^I = f_{тр} \cdot n$	0,067
Длина труб	$l_{тр}$	м	По эскизам котлоагрегата	2,588
Площадь поверхности нагрева одной трубы	$F_{тр}$	м ²	$F_{тр} = \pi \cdot d_{вн} \cdot l_{тр}$	0,407
Площадь поверхности нагрева конвективного пакета	$F_{кп}^I$	м ²	$F_{кп}^I = F_{тр} \cdot n$	13,822
Эквивалентный диаметр живого сечения труб для прохода продуктов сгорания	$d_{экр}$	м	$d_{экр} = (4 \cdot f_{кп}^I) / (\pi \cdot d_{вн} \cdot n)$	0,050
Свободный объём конвективных поверхностей нагрева	$V_{кп}$	м ³	$V_{кп} = f_{тр} \cdot n \cdot l_{тр}$	0,173
Эффективная толщина излучающего слоя	S	м	$S = 3,6 \cdot (V_{кп} / F_{кп}^I)$	0,045

Инд. № подл.	Взамен инд. №
Подпись и дата	

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата
------	----------	------	---------	---------	------

МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ

Лист

46

Таблица 2.5 – Основные конструктивные параметры третьего газохода

Наименование величин	Обозначения	Размерность	Примечание (расчётные формулы)	Значения
Внутренний диаметр трубки	$d_{вн}$	м	По эскизам котлоагрегата	0,047
Площадь живого сечения одной конвективной трубки	$f_{тр}$	м ²	$f_{тр} = 0,785 \cdot d_{вн}^2$	0,00173
Количество труб	n	шт	По эскизам котлоагрегата	52
Сечение для прохода газов	$f_{кп}^I$	м ²	$f_{кп}^I = f_{тр} \cdot n$	0,090
Длина труб	$l_{тр}$	м	По эскизам котлоагрегата	3,145
Площадь поверхности нагрева одной трубы	$F_{тр}$	м ²	$F_{тр} = \pi \cdot d_{вн} \cdot l_{тр}$	0,464
Площадь поверхности нагрева конвективного пакета	$F_{кп}^I$	м ²	$F_{кп}^I = F_{тр} \cdot n$	24,147
Эквивалентный диаметр живого сечения труб для прохода продуктов сгорания	$d_{экр}$	м	$d_{экр} = (4 \cdot f_{кп}^I) / (\pi \cdot d_{вн} \cdot n)$	0,047
Свободный объём конвективных поверхностей нагрева	$V_{кп}$	м ³	$V_{кп} = f_{тр} \cdot n \cdot l_{тр}$	0,284
Эффективная толщина излучающего слоя	S	м	$S = 3,6 \cdot (V_{кп} / F_{кп}^I)$	0,042

Поверочные тепловые расчёты конвективных поверхностей котлоагрегата были произведены в программном комплексе Microsoft Excel. Результаты сведены в таблицы, которые представлены в Приложении Г.

В результате теплового расчёта котлоагрегата построены следующие графики зависимостей:

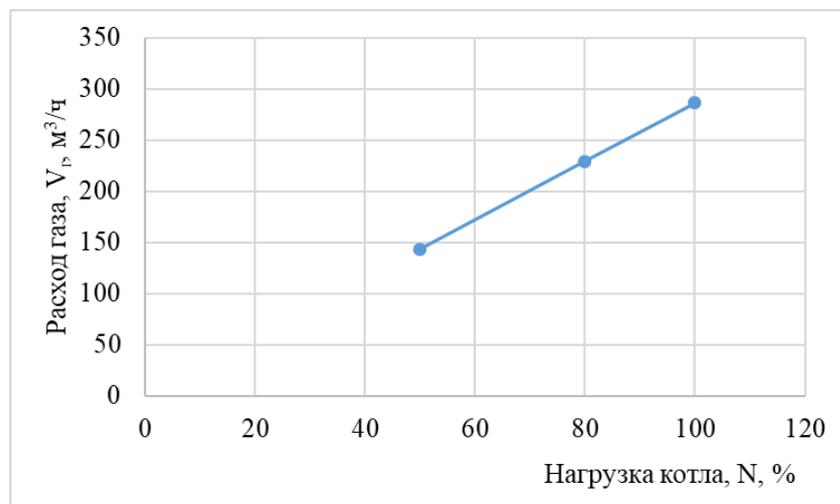


Рисунок 2.1 График зависимости расхода топлива от нагрузки котла

Изм. № подл.	Подпись и дата	Взамен инв. №
--------------	----------------	---------------

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата
------	----------	------	---------	---------	------

МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ

Лист

47

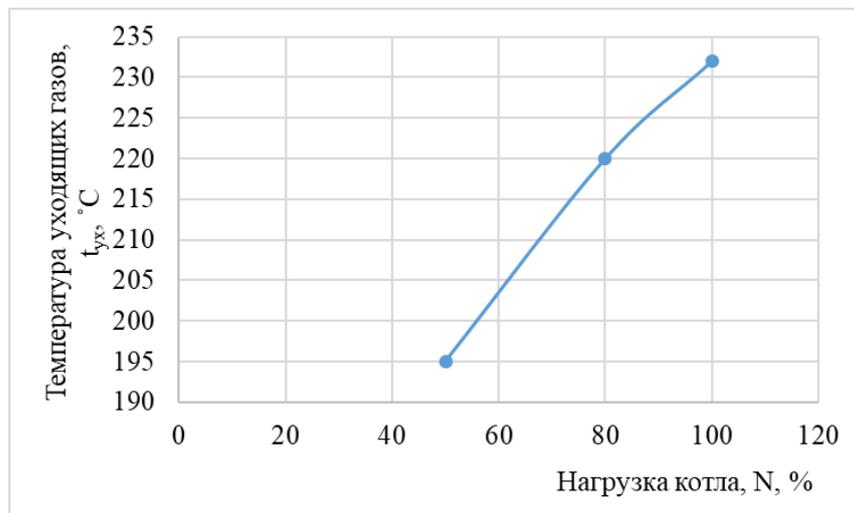


Рисунок 2.2 – График зависимости температуры уходящих газов от нагрузки котла

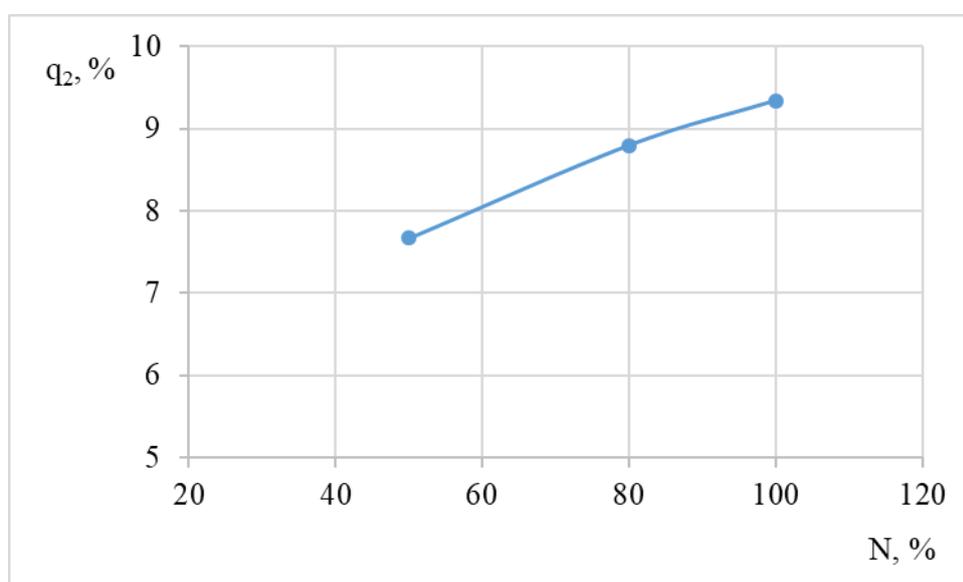


Рисунок 2.3 – Изменение потерь уходящих газов при разной нагрузке котла

2.5 Моделирование трубки газохода с интенсификатором в программном комплексе ANSYS

Рассмотрение аэродинамики трубки газохода с интенсификатором проводился по результатам расчёта конвективных поверхностей третьего газохода. Для моделирования трубки использовался программный комплекс ANSYS, который является одним из лучших и наиболее эффективных ПК в области множества инженерных расчётов, в том числе и теплообмена.

В модуле ANSYS Design Modeler – универсальном редакторе с большим количеством инструментов для создания геометрии – была построена

Изм. № подл.	Подпись и дата	Взамен инв. №

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата

пространственная геометрическая модель трубки газохода (рис. 2.4) с интенсификатором (рис. 2.5).

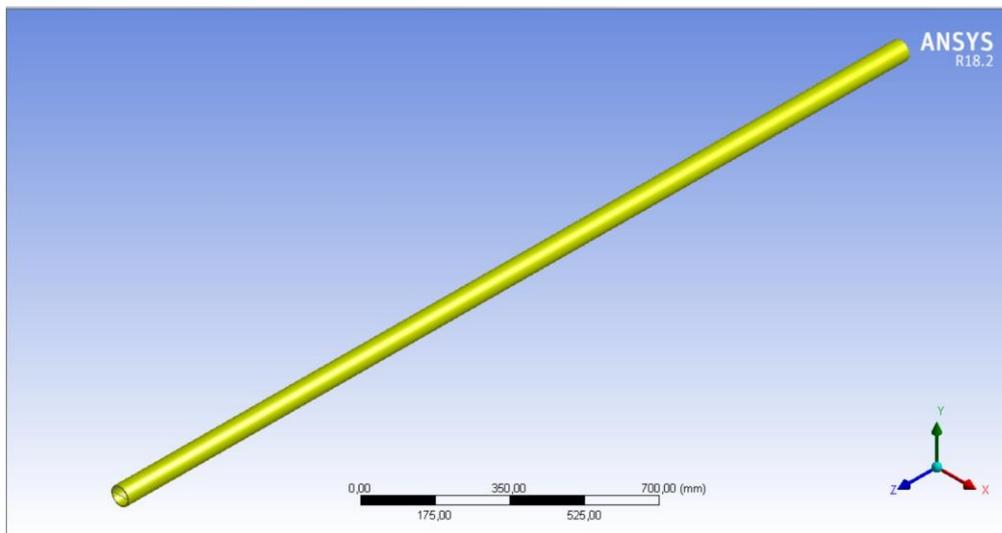


Рисунок 2.4 – Геометрическая модель трубки газохода

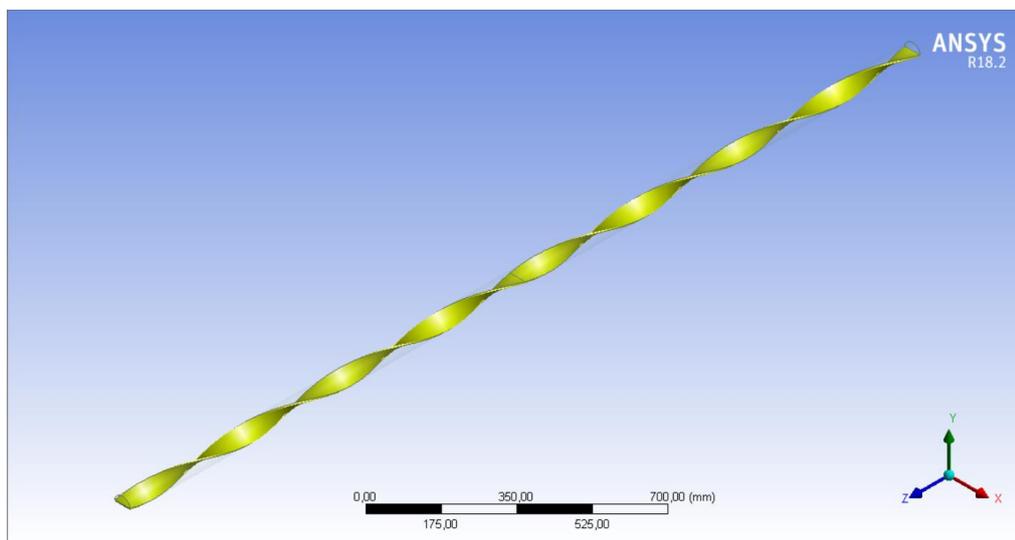


Рисунок 2.5 – Интенсификатор, установленный в трубке газохода, с шагом $n = 100$ мм

Далее, геометрия была передана в модуль ANSYS Meshing, который служит для создания сеточных моделей для различного рода анализа. В модуле Mesh была сгенерирована оптимальная сетка конечных объёмов (рис. 2.6), качество которой наиболее удовлетворяет характеристикам подвергаемой анализу геометрии. Для создания сетки был выбран тетраэдрический метод на основе поверхностной сетки (patch conforming).

Инв. № подл.	Взамен инв. №
	Подпись и дата

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата

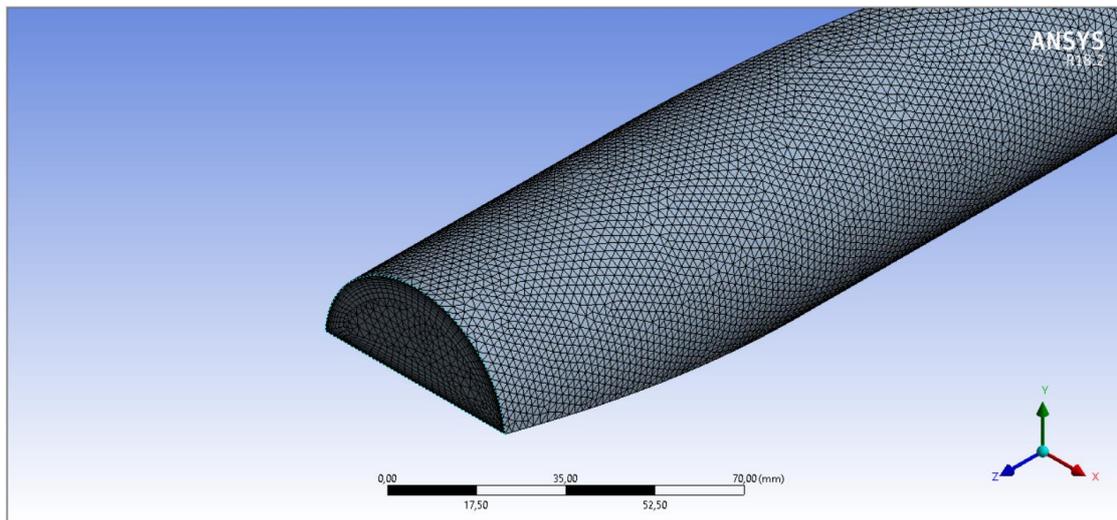


Рисунок 2.6 – Фрагмент сетки

На следующей стадии сгенерированная расчётная сетка была передана в модуль Fluent для внесения граничных условий, выбора параметров моделирования и получения решения поставленной задачи. Для моделирования была выбрана k-ε realizable модель турбулентности. Для решения 000 уравнений использовался метод Coupled.

В ходе исследования были рассмотрены два интенсификатора винтового вида с разным шагом закрутки (100 и 50 мм) при трёх нагрузках котла – 100 %, 80 % и 50 %.

2.6 Результаты моделирования трубки газохода с интенсификатором

В результате решения задачи в ПК ANSYS были получены контуры температуры на поверхности турбулизатора (рис. 2.7), а также контур скорости на выходной границе (рис 2.8).

Инв. № подл.	Взамен инв. №
Подпись и дата	

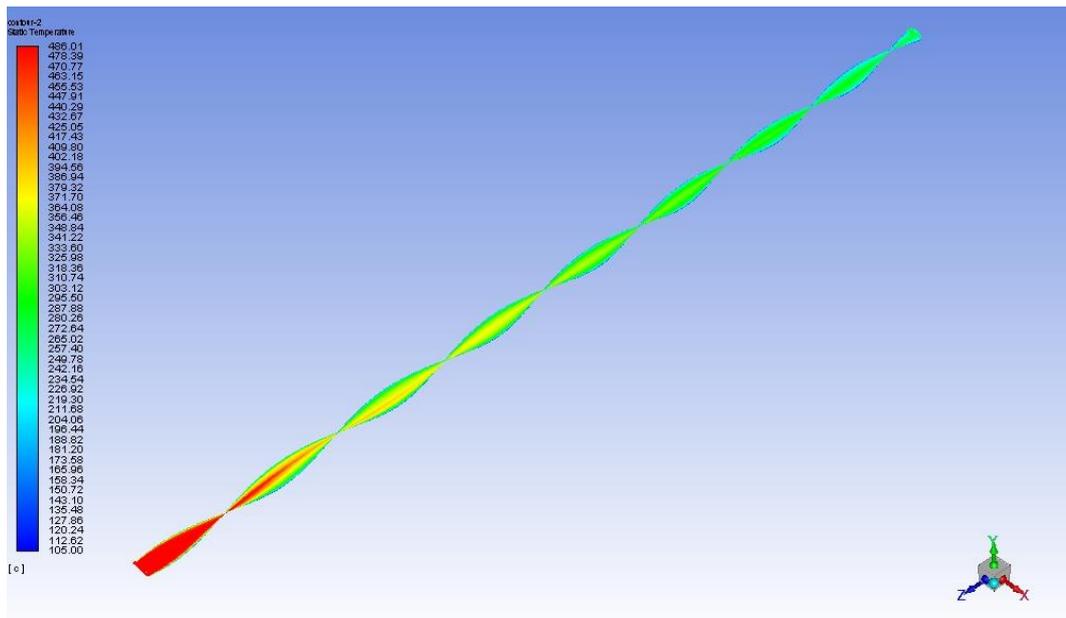
Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата

МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ

Лист

50

а)



б)

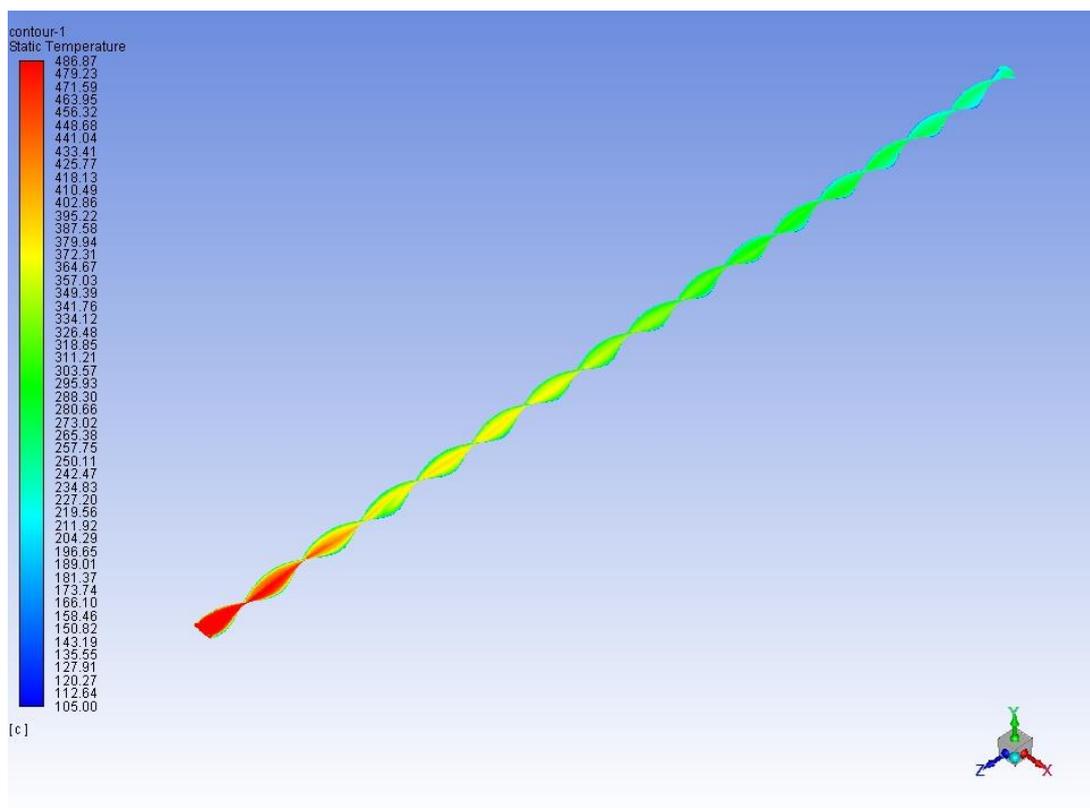


Рисунок 2.7 – Распределение температуры на стенке интенсификатора при 100%-ной нагрузке котла

а – интенсификатор с шагом 100 мм; б – интенсификатор с шагом 50 мм

Изм. № подл.	Подпись и дата	Взамен инв. №
--------------	----------------	---------------

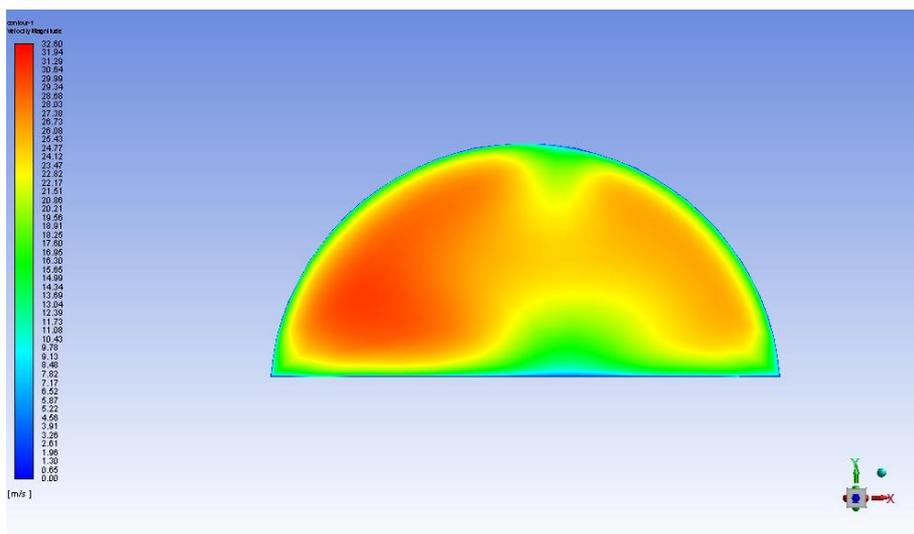
Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата
------	----------	------	---------	---------	------

МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ

Лист

51

а)



б)

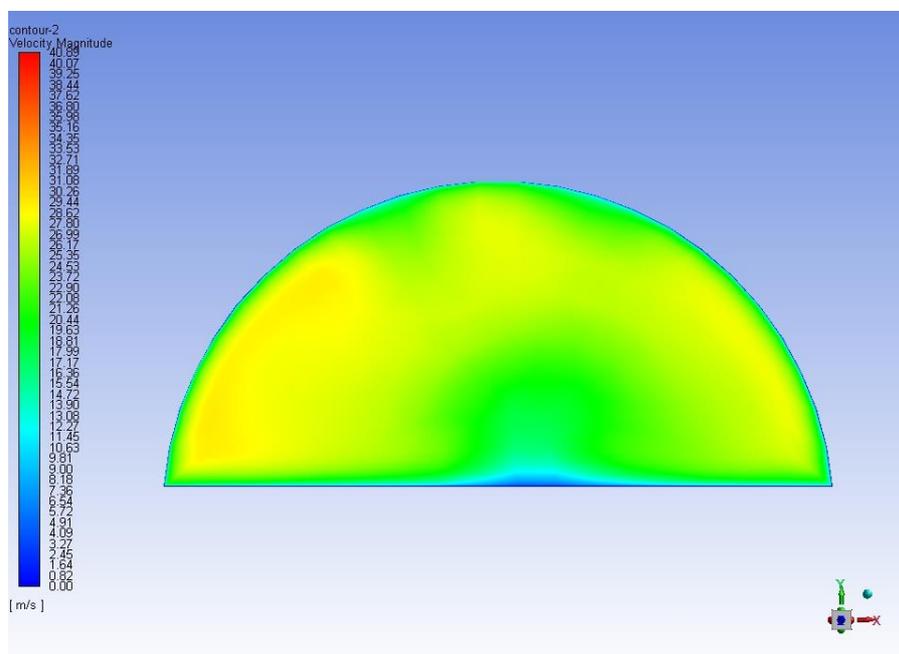


Рисунок 2.8 – Распределение скоростей при 100%-ной нагрузке

а – распределение скорости на выходной границе (интенсификатор с шагом 100 мм);

б – распределение скорости на выходной границе (интенсификатор с шагом 50 мм)

В приложении Д представлены контуры распределений температуры и скорости при нагрузках котла 80 % и 50 %.

В модуле Results с помощью калькулятора функций были получены средние температуры на входной и выходной границах (табл.2.6).

Изм. № подл.	Подпись и дата	Взамен инв. №
--------------	----------------	---------------

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата
------	----------	------	---------	---------	------

МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ

Лист

52

Таблица 2.6 – Средняя температура на выходной границе в зависимости от шага турбулизатора и нагрузки котла по результатам моделирования

Шаг интенсификатора	Нагрузка котла, %		
	100	80	50
	$t_{\text{вых}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{вых}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{вых}}, ^\circ\text{C}$
100 мм	245,077	225,4	188,049
50 мм	233,153	208,428	172,884

Сравним полученные значения температуры по итогу моделирования со значениями по результатам расчёта (табл. 2.7).

Таблица 2.6 – Средняя температура на выходной границе в зависимости от нагрузки котла по результатам расчёта

Нагрузка котла, %		
100	80	50
$t_{\text{вых}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{вых}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{вых}}, ^\circ\text{C}$
232	220	195

По результатам моделирования был построен график изменения температуры на выходе из третьего газохода в зависимости от шага закрутки интенсификатора (рис. 2.9).

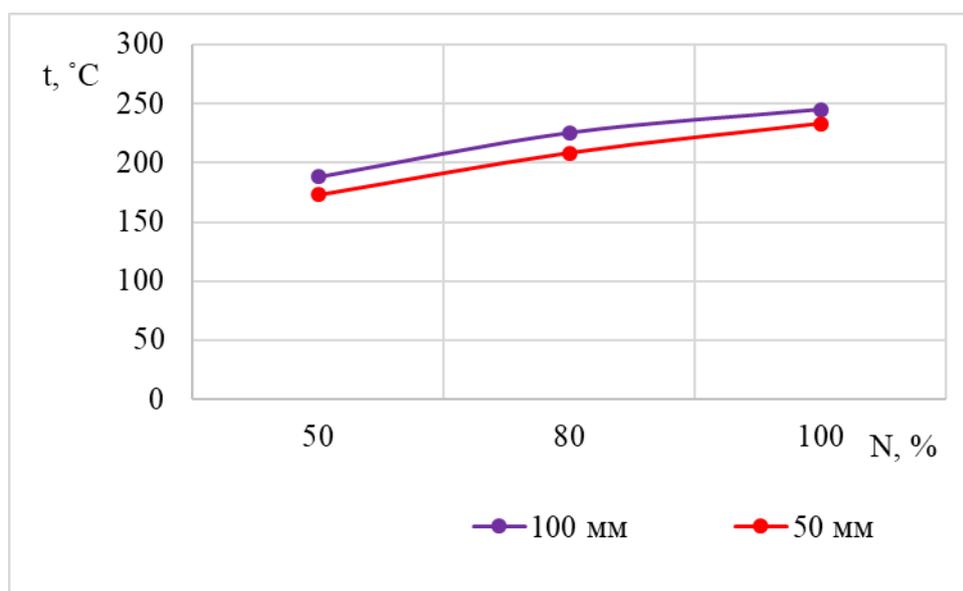


Рисунок 2.9 – Зависимость температуры уходящих газов от нагрузки котла

Изм. № подл.	Взамен инв. №
Изм. № подл.	Подпись и дата

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата
------	----------	------	---------	---------	------

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

1. Разработана программа теплового расчёта котлоагрегата.
2. Представлены основные формулы для материального и теплового баланса.
3. Определены необходимые для дальнейших исследований параметры.
4. Выявлены зависимости температуры уходящих газов от тепловой мощности котла, расхода топлива от тепловой мощности котла и КПД от нагрузки котла.
5. Смоделирована трубка газохода с интенсификатором разных шагов.
6. Исследован теплообмен в межтрубном пространстве газохода в программном комплексе ANSYS Fluent при разной нагрузке.
7. Получены контуры распределений температуры по стенке турбулизатора и скоростей на границах.
8. Построены графики изменения температуры уходящих газов в зависимости от нагрузки котла по результатам моделирования.
9. В следующей главе магистерской диссертации будет исследоваться рассеивание оксидов азота на местность с учётом розы ветров.

Инд. № подл.	Подпись и дата	Взамен инд. №						Лист
						<i>МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ</i>	54	
<i>Изм.</i>	<i>Кол. уч.</i>	<i>Лист</i>	<i>№Докум</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>			

ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ РАССЕЙВАНИЯ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ НА МЕСТНОСТИ С УЧЁТОМ РОЗЫ ВЕТРОВ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ УПРЗА «ЭКО ЦЕНТР»

3.1 Расчёт выделений оксидов азота в воздушную среду от работы котельной при разной нагрузке котлоагрегатов в программном комплексе «Котельная ЭКО центр»

Расчёт вредных выбросов осуществляется в соответствии с «Методикой определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании топлива в котлах производительностью менее 30 тонн пара в час или менее 20 ГКалл в час.

Общее количество оксидов азота NO_x в пересчёте на NO_2 (в г/с, т/год), выбрасываемых в атмосферу с дымовыми газами, рассчитывается по формуле:

$$M_{NO_x} = V_p \cdot Q_i^r \cdot K_{NO_2}^r \cdot \beta_k \cdot \beta_t \cdot \beta_\alpha \cdot (1 - \beta_r) \cdot (1 - \beta_\delta) \cdot k_{\Pi} \quad (3.1)$$

где V_p – расчётный расход топлива, л/с (тыс. nm^3 /год);

Q_i^r – низшая теплота сгорания топлива, МДж/ nm^3 ;

$K_{NO_2}^r$ – удельный выброс оксидов азота при сжигании газа, г/МДж;

β_k – коэффициент, который учитывает принципиальную конструкцию ГГУ;

β_t – коэффициент, учитывающий температуру подаваемого для горения воздуха;

β_α – коэффициент, который учитывает влияние избытка воздуха на образование NO_x ;

β_r – коэффициент, учитывающий влияние рециркуляции дымовых газов через горелки на образование оксидов азота;

β_δ – коэффициент, учитывающий ступенчатый ввод воздуха в топочную камеру;

k_{Π} – коэффициент пересчёта, $k_{\Pi} = 10^{-3}$.

Для водогрейных котлов $K_{NO_2}^r$ находится по формуле:

$$K_{NO_2}^r = 0,0113 \cdot \sqrt{Q_T} + 0,03 \quad (3.2)$$

Изм. № подл.	Подпись и дата	Взамен инв. №
--------------	----------------	---------------

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата	МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ	Лист 55
------	----------	------	---------	---------	------	------------------------------	-------------------

где Q_T – фактическая тепловая мощность котлоагрегата по введённому в топку теплу, МВт, которая определяется по формуле:

$$Q_T = V_p' \cdot Q_i^r \cdot k_{\Pi} \quad (3.3)$$

Коэффициент β_t находится по формуле:

$$\beta_t = 1 + 0,002 \cdot (t_{гв} - 30) \quad (3.4)$$

где $t_{гв}$ – температура горячего воздуха, °С.

Рециркуляция в смеси с воздухом β_r при подаче газов находится по формуле:

$$\beta_r = 0,16 \cdot \sqrt{r} \quad (3.5)$$

где r – степень рециркуляции дымовых газов, %.

Коэффициент β_{δ} определяется формулой:

$$\beta_{\delta} = 0,022 \cdot \delta \quad (3.6)$$

где δ – доля воздуха, который подаётся в промежуточную зону факела (в процентах от общего количества организованного воздуха).

Так как для оксида и диоксида азота установлены отдельные предельно-допустимые концентрации и, учитывая изменения оксида азота в воздушной среде, суммарные выбросы оксидов азота делятся на составляющие по формулам:

$$M_{NO_2} = 0,8 \cdot M_{NO_x} \quad (3.7)$$

$$M_{NO} = 0,13 \cdot M_{NO_x} \quad (3.8)$$

Расчётный расход топлива V_p , тыс. нм³/ч или тыс. нм³/год, определяется по формуле:

$$V_p = (1 - q_4 / 100) \cdot V \quad (3.9)$$

где V – полный расход топлива на котёл тыс. нм³/ч или тыс. нм³/год;

q_4 – потери тепла от механической неполноты сгорания топлива, %.

Изм. № подл.	Подпись и дата	Взамен инв. №
--------------	----------------	---------------

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата
------	----------	------	---------	---------	------

1. Расчёт вредных выбросов при 100%-ной нагрузке котлоагрегата Vitomax 200-2,6

В таблице 3.1 приведена характеристика загрязняющих веществ, выделяющихся в атмосферу от котлоагрегата.

Таблица 3.1 – Характеристика выделений NO_x в атмосферу

Загрязняющее вещество		Максимально разовый выброс, г/с	Годовой выброс, т/год
код	наименование		
301	Азота диоксид	0,1367829	4,745144
304	Азота оксид	0,0222272	0,771086

Исходные данные для расчёта:

Котёл – водогрейный;

Топливо – природный газ;

Газопровод – Нижний Новгород-Иваново-Череповец;

Горелка дутьевая напорного типа: $\beta_k = 1$;

Температура воздуха для дутья: $t_{гв} = 30$ °С;

Объём сухих дымовых газов рассчитывается по составу топлива;

Расход: $V' = 79,58$ л/с, $V = 2510$ тыс. нм³/год.

Коэффициенты:

$Q_r = 35,75$ МДж/нм³;

$\rho = 0,725$ кг/нм³;

$Q_n = 2,6$ МВт;

$\beta_a = 1,225$; $\beta_r = 0$; $\beta_\delta = 0$;

$V_t = 4,42$ м³;

$\tau = 5544$ ч.;

$S_r' = 0$ %; $S_r = 0$ %;

$q_3 = 0,2$ %; $q_4 = 0$ %;

$\alpha''_T = 1,1$.

Инд. № подл.	
Подпись и дата	
Взамен инд. №	

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата

МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ

Лист

57

Расчёт:

$$V_p' = (1-0/100) \cdot 79,58 = 79,58 \text{ л/с};$$

$$V_p = (1-0/100) \cdot 2510 = 2510 \text{ тыс. м}^3/\text{год};$$

$$Q_T' = 79,58 \cdot 35,75 \cdot 10^{-3} = 2,844985 \text{ МВт};$$

$$Q_T = (2510/5544/3600 \cdot 10^6) \cdot 10^{-3} \cdot 35,75 = 4,49598 \text{ МВт};$$

$$K_{NO_x}^r = 0,0113 \cdot \sqrt{2,844985} + 0,03 = 0,0490598 \text{ г/МДж};$$

$$K_{NO_x}^r = 0,0113 \cdot \sqrt{4,49598} + 0,03 = 0,0539602 \text{ г/МДж};$$

$$\beta_t = 1 + 0,002 \cdot (30-30) = 1;$$

$$\beta_r = 0;$$

$$\beta_\delta = 0,022 \cdot 0 = 0;$$

$$\sum (m+n/4) \cdot C_m H_n = (1+4/4) \cdot 98,99 + (2+6/4) \cdot 0,25 + (3+8/4) \cdot 0,04 + (4+10/4) \cdot 0,02 + (5+12/4) \cdot 0 = 199,05;$$

$$V^0 = 0,0476 \cdot [0,5 \cdot 0 + 0,5 \cdot 0 + 1,5 \cdot 0 + 199,05 \cdot 0] = 9,47478 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$\sum n \cdot C_m H_n = 4 \cdot 98,99 + 6 \cdot 0,25 + 8 \cdot 0,04 + 10 \cdot 0,02 + 12 \cdot 0 = 397,98;$$

$$V_{H_2O}^0 = 0,01 \cdot [0 + 0 + 0,5 \cdot 397,98 + 0,124 \cdot 1] + 0,0161 \cdot 9,47478 = 2,143684 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$\sum m \cdot C_m H_n = 1 \cdot 98,99 + 2 \cdot 0,25 + 3 \cdot 0,04 + 4 \cdot 0,02 + 5 \cdot 0 = 99,69;$$

$$V_r^0 = 0,01 \cdot [0,1 + 0 + 0 + 99,69] + 0,79 \cdot 9,47478 + 0,6/100 + 2,143684 = 10,63266 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$V_{CT} = 10,63266 + (1,4-1) \cdot 9,47478 - 2,143684 = 12,27889 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$M_{301}^{NO_x} = 79,58 \cdot 35,75 \cdot 0,0490598 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,225 \cdot (1-0) \cdot (1-0) \cdot 0,001 \cdot 0,8 = 0,1367829 \text{ г/с};$$

$$M_{301}^{NO_x} = 2510 \cdot 35,75 \cdot 0,0539602 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,225 \cdot (1-0) \cdot (1-0) \cdot 0,001 \cdot 0,8 = 4,745144 \text{ т/год};$$

$$M_{304}^{NO_x} = 79,58 \cdot 35,75 \cdot 0,0490598 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,225 \cdot (1-0) \cdot (1-0) \cdot 0,001 \cdot 0,13 = 0,0222272 \text{ г/с};$$

$$M_{304}^{NO_x} = 2510 \cdot 35,75 \cdot 0,0539602 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,225 \cdot (1-0) \cdot (1-0) \cdot 0,001 \cdot 0,13 = 0,771086 \text{ т/год}.$$

Инв. № подл.	Взамен инв. №					
	Подпись и дата					
Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата	Лист
						58

2. Расчёт вредных выбросов при 100%-ной нагрузке котлоагрегата Vitomax 200-6,6

В таблице 3.2 приведена характеристика загрязняющих веществ, выделяющихся в атмосферу от котлоагрегата.

Таблица 3.2 – Характеристика выделений NO_x в атмосферу

Загрязняющее вещество		Максимально разовый выброс, г/с	Годовой выброс, т/год
код	наименование		
301	Азота диоксид	0,4272167	15,21678
304	Азота оксид	0,0694227	2,472727

Исходные данные для расчёта:

Котёл – водогрейный;

Топливо – природный газ;

Газопровод – Нижний Новгород-Иваново-Череповец;

Горелка дутьевая напорного типа: $\beta_k = 1$;

Температура воздуха для дутья: $t_{гв} = 30$ °С;

Объём сухих дымовых газов рассчитывается по составу топлива;

Расход: $V' = 79,58$ л/с, $V = 2510$ тыс. нм³/год.

Коэффициенты:

$Q_r = 35,75$ МДж/нм³;

$\rho = 0,725$ кг/нм³;

$Q_n = 6,6$ МВт;

$\beta_a = 1,225$; $\beta_r = 0$; $\beta_\delta = 0$;

$V_t = 10,38$ м³;

$\tau = 5544$ ч.;

$S_r' = 0$ %; $S_r = 0$ %;

$q_3 = 0,2$ %; $q_4 = 0$ %;

$\alpha''_T = 1,1$.

Инд. № подл.	Подпись и дата	Взамен инд. №

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата

МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ

Лист

59

Расчёт:

$$V_p' = (1 - 0/100) \cdot 202 = 202 \text{ л/с};$$

$$V_p = (1 - 0/100) \cdot 6371 = 6371 \text{ тыс. нм}^3/\text{год};$$

$$Q_T' = 202 \cdot 35,75 \cdot 10^{-3} = 7,2215 \text{ МВт};$$

$$Q_T = (6371/5544/3600 \cdot 10^6) \cdot 10^{-3} \cdot 35,75 = 11,4119 \text{ МВт};$$

$$K_{NO_x}^r = 0,0113 \cdot \sqrt{7,2215} + 0,03 = 0,0603663 \text{ г/МДж};$$

$$K_{NO_x}^r = 0,0113 \cdot \sqrt{11,4119} + 0,03 = 0,0681731 \text{ г/МДж};$$

$$M_{301}^{NO_x} = 202 \cdot 35,75 \cdot 0,0603663 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,225 \cdot (1-0) \cdot (1-0) \cdot 0,001 \cdot 0,8 = 0,4272167 \text{ г/с};$$

$$M_{301}^{NO_x} = 6371 \cdot 35,75 \cdot 0,0681731 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,225 \cdot (1-0) \cdot (1-0) \cdot 0,001 \cdot 0,8 = 15,21678 \text{ т/год};$$

$$M_{304}^{NO_x} = 202 \cdot 35,75 \cdot 0,0603663 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,225 \cdot (1-0) \cdot (1-0) \cdot 0,001 \cdot 0,13 = 0,0694227 \text{ г/с};$$

$$M_{304}^{NO_x} = 6371 \cdot 35,75 \cdot 0,0681731 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,225 \cdot (1-0) \cdot (1-0) \cdot 0,001 \cdot 0,13 = 2,472727 \text{ т/год}.$$

3. Расчёт вредных выбросов при 80%-ной нагрузке котлоагрегата Vitomax 200-2,6

Расчёт выполнялся аналогично пункту 1. Результаты представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Характеристика выбросов NO_x в атмосферу

Загрязняющее вещество		Максимально разовый выброс, г/с	Годовой выброс, т/год
код	наименование		
301	Азота диоксид	0,1049304	3,618161
304	Азота оксид	0,0170512	0,587951

4. Расчёт вредных выбросов при 80%-ной нагрузке котлоагрегата Vitomax 200-6,6

Расчёт выполнялся аналогично пункту 2. Результаты представлены в таблице 3.4.

Изм. № подл.	Подпись и дата	Взамен инв. №
--------------	----------------	---------------

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата
------	----------	------	---------	---------	------

МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ

Лист

60

3.2 Проведение исследований по расчёту рассеивания вредных веществ в атмосфере с помощью расчётного программного комплекса УПРЗА «ЭКО центр»

Расчёт загрязнения атмосферного воздуха осуществляется в соответствии с ОНД-86 «Методика расчёта концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий», с использованием единой программы расчёта загрязнения атмосферы УПРЗА «ЭКО центр». Применение программы УПРЗА «ЭКО центр» упрощает и ускоряет процедуру расчётов, получить наглядную картину рассеивания вредных выбросов вредных веществ на прилегающей территории в привязке к действительному масштабу местности.

На рис. 3.1 приведена карта-схема района размещения предприятия.

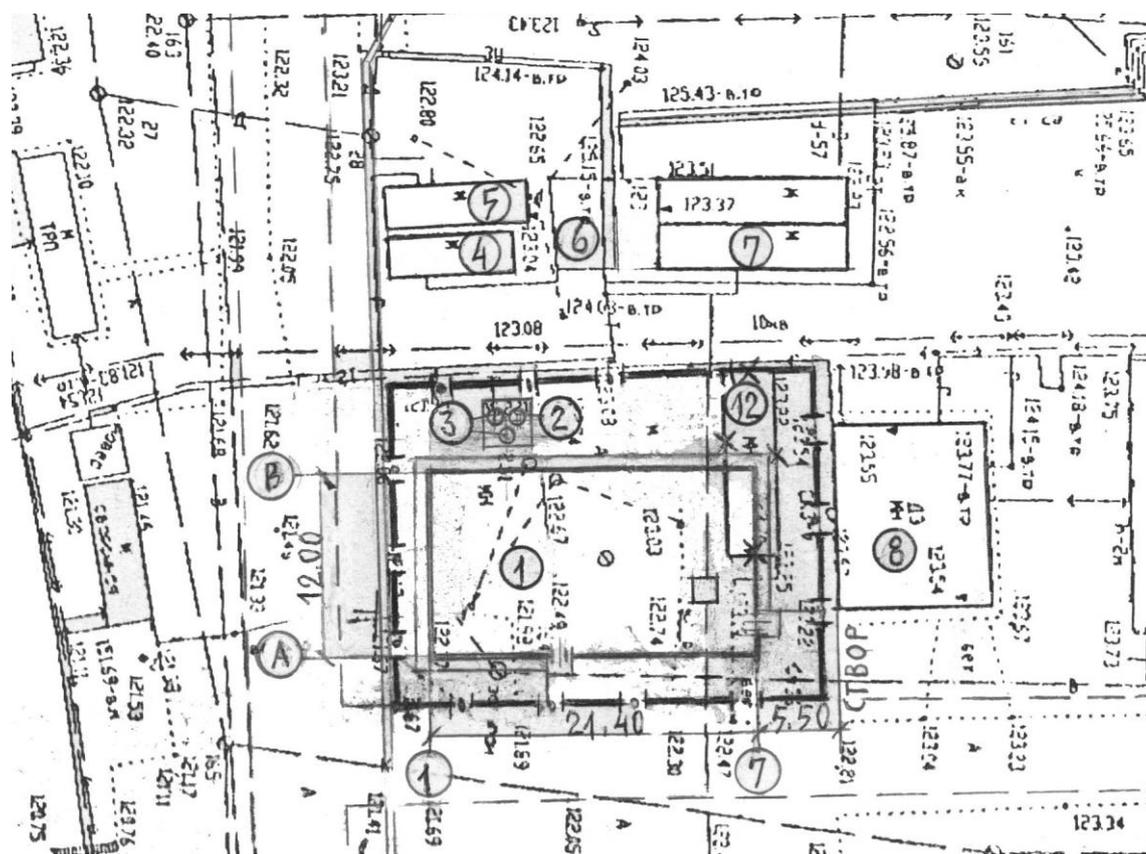


Рисунок 3.1 – Карта-схема расположения предприятия

В таблице 3,7 приведены перечень и коды веществ и групп суммации, участвующих в расчёте загрязнения окружающей среды, с указанием класса опасности и предельно-допустимой концентрации (ПДК).

Инд. № подл.	Подпись и дата	Взамен инд. №

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата

МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ

Таблица 3.7 – Перечень загрязняющих веществ и групп суммации

Загрязняющее вещество		Класс опасности	Предельно-допустимая концентрация, мг/м ³		
код	наименование		максимально-разовая	средне-суточная	используется в расчёте
1	2	3	4	5	6
301	Азота диоксид	3	0,2	0,04	0,2
304	Азота оксид	3	0,4	0,06	0,4

Для каждого источника определены опасная скорость ветра, максимальная концентрация выброса в долях ПДК и расстояние, на котором достигается максимальная концентрация.

1. Рассеивание вредных выбросов при 100%-ной нагрузке

Параметры источников загрязнения окружающей среды, учитываемых в данном варианте расчёта, приведены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Параметры источников загрязнения атмосферы

Высота, м	Диаметр, м	Параметры ГВС			Опас. скор. ветра, м/с	Загрязняющее вещество			Макс. концентрация, д.ПДК	Расст. до максимума, м
		скорость, м/с	объем, м ³ /с	темп., °С		код	масса выброса, г/с	К ос.		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
21	0,82	3,2	1,69	208,8	1,603	301	0,1367829	1	0,046	188,48
						304	0,0222272	1	0,004	188,48
21	1,02	5,8	4,74	263,2	2,63	301	0,4272167	1	0,077	274,99
						304	0,0694227	1	0,006	274,99
21	1,02	5,8	4,74	263,2	2,63	301	0,4272167	1	0,077	274,99
						304	0,0694227	1	0,006	274,99

Суммарный выброс диоксида азота от учтённых в расчёте источников составляет 0,991 грамм в секунду и 35,179 тонн в год.

Количество источников загрязнения атмосферы, учтённых в расчёте, составляет – 3.

Суммарный выброс оксида азота от учтённых в расчёте источников составляет 0,161 грамм в секунду и 5,717 тонн в год.

Количество источников загрязнения атмосферы, учтённых в расчёте составляет – 3.

Изм. № подл.	Подпись и дата	Взамен инв. №
--------------	----------------	---------------

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата	МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ	Лист
							63

Расчёт загрязнения для мажоранты проводится по всем источникам загрязнения атмосферы и по всем веществам. Результат расчёта для каждой точки представляет собой наибольшее значение из максимальных расчётных концентраций, полученных для данной точки отдельно по каждому из веществ.

Ситуационная карта-схема района расположения котельной с нанесёнными изолиниями расчётных концентраций, выраженных в долях ПДК, приведена в масштабе 1:8000 в Приложении Ж.

2. Рассеивание вредных выбросов при 80%-ной нагрузке

Параметры источников загрязнения атмосферного воздуха, учитываемых в данном варианте расчёта, приведены в таблице 3.9

Таблица 3.9 – Параметры источников загрязнения атмосферы

Высота, м	Диаметр, м	Параметры ГВС			Опас. скор. ветра, м/с	Загрязняющее вещество			Макс. концентрация, д.ПДК	Расст. до максимума, м
		скорость, м/с	объем, м³/с	темп., °С		код	масса выброса, г/с	К ос.		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
21	0,82	2,49	1,31	196,8	1,442	301	0,1049304	1	0,043	166,91
						304	0,0170512	1	0,004	166,91
21	1,02	4,51	3,68	250,2	2,344	301	0,3236229	1	0,068	255,43
						304	0,0525887	1	0,006	255,43
21	1,02	4,51	3,68	250,2	2,344	301	0,3236229	1	0,068	255,43
						304	0,0525887	1	0,006	255,43

Суммарный выброс диоксида азота от учтённых в расчёте источников составляет 0,752 грамм в секунду и 26,527 тонн в год.

Суммарный выброс оксида азота от учтённых в расчёте источников составляет 0,1222 грамм в секунду и 4,311 тонн в год.

Ситуационная карта-схема района расположения котельной с нанесёнными изолиниями расчётных концентраций, выраженных в долях ПДК, приведена в масштабе 1:10000 в Приложении З.

Изм. № подл.	Подпись и дата	Взамен инв. №
--------------	----------------	---------------

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата	МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ	Лист
							64

3. Рассеивание вредных выбросов при 50%-ной нагрузке

Параметры источников загрязнения воздушной среды, учитываемых в данном варианте расчёта, приведены в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Параметры источников загрязнения атмосферы

Высота, м	Диаметр, м	Параметры ГВС			Опас. скор. ветра, м/с	Загрязняющее вещество			Макс. концентрация, д.ПДК	Расст. до максимума, м
		скорость, м/с	объем, м³/с	темп., °С		код	масса выброса, г/с	К ос.		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
21	0,82	1,48	0,78	171,8	1,152	301	0,0606092	1	0,039	129,82
						304	0,009849	1	0,003	129,82
21	1,02	2,68	2,19	223,2	1,792	301	0,1821363	1	0,052	208,99
						304	0,0295971	1	0,004	208,99
21	1,02	2,68	2,19	223,2	1,792	301	0,4272167	1	0,123	208,99
						304	0,0694227	1	0,01	208,99

Суммарный выброс диоксида азота от учтённых в расчёте источников составляет 0,67 грамм в секунду и 23,64 тонн в год.

Суммарный выброс оксида азота от учтённых в расчёте источников составляет 0,1089 грамм в секунду и 3,842 тонн в год.

Ситуационная карта-схема района расположения котельной с нанесёнными изолиниями расчётных концентраций, выраженных в долях ПДК, приведена в масштабе 1:10000 в Приложении И.

Изм. № подл.	Подпись и дата	Взамен инв. №

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата

МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ

Лист

65

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

1. В третьей главе работы были рассчитаны вредные выбросы от котельной при разных нагрузках установленных в ней котлов. На основе полученных данных построены графики зависимостей, по которым можно сделать вывод, что чем меньше нагрузка котла, тем меньше выбрасывается оксидов азота в воздушную среду.
2. В программе УПРЗА «ЭКО центр» были посчитаны суммарные выбросы диоксида и оксида азота, а также построены изолинии концентраций на площадке предприятия.

Изм. № подл.	Подпись и дата	Взамен инв. №					Лист
Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата		

МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнен обзор и анализ существующих методов, направленных на повышение энергоэкологической эффективности в котельных.
2. Произведён тепловой расчёт котлоагрегата Vitomax 200 с тепловой мощностью 2,6 МВт в составленном программном комплексе MS Excel. Благодаря выполнению расчёта в ПК удалось построить графические зависимости изменения ряда параметров (температуры уходящих газов, расхода топлива, КПД) от тепловой мощности котла.
3. В программном комплексе ANSYS смоделирована трубка газохода с установленным в ней винтовым интенсификатором для повышения эффективности. Были произведены исследования двух интенсификаторов разных шагов закрутки (100 мм и 50 мм) при трёх режимах работы котла – при 100%, 80% и 50%-ной нагрузке. На основе полученных данных были выявлены контуры распределения температуры по стенке турбулизатора и скорости на выходной границе трубки. В CFD-post были получены средние значения температур на границах трубки газохода.
4. В ПК УПРЗА «ЭКО центр» и «Котельная» рассчитаны вредные выбросы от трёх дымовых труб котельной, построены распределения концентраций на расчётной площадке.

Инд. № подл.	Подпись и дата	Взамен инд. №						Лист
						МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ	67	
Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата			

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 89.13330.2012 «Котельные установки»
2. СНиП 2.04.05–91* «Отопление вентиляция и кондиционирование»
3. СП 62.13330.2011* «Газораспределительные системы»
4. СП–41–104–2000 «Проектирование автономных источников теплоснабжения»
5. ГОСТ 17.2.3.02-78. Охрана природы. Атмосфера. Правила установления допустимых выбросов вредных веществ промышленных предприятий. – М.: Государственный комитет по стандартам. 1987. -13 с.
6. Жуйков А.В., Матюшенко, А.И. Снижение оксидов азота в процессе сжигания канско-ачинских углей [Электронный ресурс] / А.В. Жуйков, А.И. Матюшенко / Сибирский федеральный университет. 2014. – URL: <http://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/13335> (08.12.2017)
7. Новиков О.Н. Автоматическое управление качеством сжигания топлива – ключ к энергосбережению и энергоэкологической безопасности предприятия / О.Н. Новиков, А.Н. Окатьев, А.Л. Шкаровский // Автоматизация без границ. – 2010. – с. 20-26
8. Тепловой расчет котлов (нормативный метод). 3–е изд., перераб. и доп. – СПб.: НПО ЦКТИ, 1998 г. – 256 с.: ил.
9. Аэродинамический расчет котельных установок (нормативный метод). 3–е изд. Под ред. С.И. Мочана. – Л.: Энергия, 1977 г. – 255 с.
10. Лумми А.П., Мунц В.А. Расчёт водогрейного котла. Учебное издание. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2009 г. – 40 с.
11. Гусев Ю.Л. Основы проектирования котельных установок. Учебное пособие. 2–е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1973 г. – 248 с.
12. Комина Г.П., Яковлев В.А. Энергосбережение и экономия энергоресурсов в системах ТГС. Пособие по выполнению курсовой работы. – СПб.: СПбГАСУ, 2009 г. – 133 с.

Изм. № подл.	Подпись и дата	Взамен инв. №						Лист
							МД 25.04.16.270–ТМ ПЗ	68
Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата			

13. Ионин А.А. Газоснабжение. Учебник для ВУЗов. 4–е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1989 г. – 439 с.: ил.

14. Стаскевич Н.Л., Северинец Г.Н., Вигдорчик Д.Я. Справочник по газоснабжению и использованию газа. – Л.: Недра, 1990 г. – 762 с.: ил.

15. Пугач Л.И. Энергетика и экология: Учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 504 с.

16. Толстова Ю.И. Охрана воздушного бассейна: Учебное пособие / Ю.И. Толстова, Р.Н. Шумилов, Л.Г. Пастухова. [Науч. ред. А.С. Носков]. М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017. – 118 с.

17. Новиков Ю.В. Экология, окружающая среда и человек: Учебное пособие для вузов, средних школ и колледжей. – 3-е изд., испр. и доп. / Ю.В. Новиков. –М: ФАИР-ПРЕСС, 2005. – 736 с.

18. Комарова Л.Ф., Кормина Л.А. Инженерные методы защиты окружающей среды. Техника защиты атмосферы и гидросферы от промышленных загрязнений: Учебное пособие. – Барнаул, 2000. – 395 с.

19. Стерман Л.С. и др. Тепловые и атомные электростанции: Учебник для вузов / Л.С. Стерман, С.А. Тевлин, А.Т. Шарков; Под ред. Л.С. Стермана. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Энергоиздат, 1982. – 456 с.: ил.

20. Сигал И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Недра, 1988. – 312 с.: ил.

21. Внуков А.К. Защита атмосферы от выбросов энергообъектов: Справ. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 176 с.: ил.

22. Белов С.В. Охрана окружающей среды: Учеб. для техн. спец. вузов / С.В. Белов, Ф.А. Барбинов, А.Ф. Козьяков и др. Под ред. С.В. Белова. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Высш. шк., 1991. – 319 с.: ил.

23. Носков А.С., Савинкина М.А., Анищенко Л.Я. Воздействие ТЭС на окружающую среду и способы снижения наносимого ущерба / Ин-т катализа СО АН СССР, Ин-т химии твёрдого тела и переработки минерального сырья

Изм. № подл.	Подпись и дата	Взамен инв. №
--------------	----------------	---------------

Изм.	Кол. уч.	Лист	№Докум	Подпись	Дата
------	----------	------	--------	---------	------

МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ

Лист

69

СО АН СССР, ГПНТБ СО АН СССР – Новосибирск. Изд. ГПНТБ СО АН СССР, 1990. – 177 с.

24. Щинников П.А. Некоторые экологические проблемы от действия ТЭС и возможные пути их решения: Учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – 41 с.

25. Ветошкин А.Г. Процессы инженерной защиты окружающей среды (теоретические основы): Учебное пособие. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2004. – 325 с.: ил.

26. Фёдорова Н.Н., Вальгер С.А., Данилов М.Н., Захарова Ю.В. Основы работы в ANSYS 17. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 210 с.: ил.

27. Ахмедов Р. Б. Технология сжигания горючих газов и жидких топлив / Р. Б. Ахмедов, Л. М. Цирюльников. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Недра, 1984. – 238 с.

28. Бадагуев Б. Т. Безопасная эксплуатация паровых и водогрейных котлов / Б. Т. Бадагуев. – М.: Альфа-Пресс, 2012. – 296 с.

29. Бадагуев Б. Т. Газовое хозяйство. Безопасность при эксплуатации. Приказы, инструкции, журналы, положения, графики, протоколы, паспорта / Б. Т. Бадагуев. – 2-е изд., перераб и доп. – М.: Альфа-Пресс, 2013. – 232 с.

30. Бадагуев Б. Т. Работы с повышенной опасностью. Эксплуатация и ремонт тепловых энергоустановок / Б. Т. Бадагуев. – М.: Альфа-Пресс, 2012. – 224 с.

31. Беликов С. Е. Малые котлы и защита атмосферы. Снижение вредных выбросов при эксплуатации промышленных и отопительных котельных / С. Е. Беликов, В. П. Котлер. – М.: Энергоатомиздат, 1996. – 125 с.

32. Види, Ю. В. Инженерные методы расчета задач теплообмена: монография / Ю. В. Видин, В. В. Иванов, Р. В. Казаков. – Красноярск: СФУ, 2014. – 167 с.

Изм. № подл.	Подпись и дата	Взамен инв. №
--------------	----------------	---------------

Изм.	Кол. уч.	Лист	№Докум	Подпись	Дата
------	----------	------	--------	---------	------

МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ

Лист

70

54. Лаптев А.Г. Методы интенсификации и моделирования тепломассообменных процессов. Учебно-справочное пособие / А.Г. Лаптев, Н.А. Николаев, М.М. Башаров. – М: «Теплотехник», 2011. – 335 с.

55. Кузма-Китча Ю. А. Методы интенсификации теплообмена. М.: Изд-во МЭИ, 2001, 112 с.

56. Павлов Д. А., Семикова Е. Н. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КОТЕЛЬНОЙ С ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИМ ОБОРУДОВАНИЕМ // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 5-1. – С. 179-181;

57. Котлер В.Р., Гольдберг А.С. Проблема выбросов закиси азота при сжигании органического топлива. — Энергохозяйство за рубежом, 1990, № 6. С. 1-5.

58. Котлер В.Р. Оксиды азота в дымовых газах котлов. М.: Энергоатомиздат, 1987. - 144 с.: ил. - (Бтка теплоэнергетики)

59. Басов К.А. ANSYS: справочник пользователя / Под общ. ред. Д. Г. Красковского. — М: КомпьютерПресс, 2002. —224 с: ил.

60. Ветошкин А.Г. Инженерная защита атмосферы от вредных выбросов

Инв. № подл.						<i>МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ</i>	Лист
							73
Взамен инв. №							
Подпись и дата							
Изм.	Кол. уч.	Лист	№Докум	Подпись	Дата		

ПРИЛОЖЕНИЯ

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взамен инв. №					Лист
			МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ				
Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата		

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Таблица Б.1 – Результаты расчёта теплового баланса горения

№ п/п	Наименование величины	Обозначение	Размерность	Расчётное значение
1	2	3	4	5
1	Располагаемая теплота, вносимая в топку	Q_{pP}	кДж/м ³	35791,142
2	Температура уходящих газов	$t_{п.с}''$	°С	232
3	Энтальпия уходящих газов	$I_{у.г.}''$	кДж/м ³	3680,936
4	Потери теплоты с уходящими газами	q_2	%	9,341
5	Потери теплоты с химическим недожогом	q_3	%	0
6	Потери теплоты с механическим недожогом топлива	q_4	%	0
7	Потери теплоты через наружные ограждения котлоагрегата	q_5	%	1,5
8	Потери теплоты с физической теплотой шлака	q_6	%	0
9	КПД (брутто) котлоагрегата	$\eta_{к.а}^{бр}$	%	89,159
10	Расчётный часовой расход природного газа	$V_{г}$	м ³ /ч	293,317
11	Часовой расход нагреваемого теплоносителя параметрах теплоносителя (105 ÷ 70)	$G_{н.т.}$	т/ч	63,871
12	Коэффициент сохранения теплоты	φ		0,983

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взамен инв. №						Лист
						МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ	76	
Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата			

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Таблица В.1 – Результаты поверочного теплового расчёта топочного устройства котлоагрегата

№ п/п	Наименование величины	Обозначение	Размерность	Расчётное значение
1	2	3	4	5
1	Энтальпия подаваемого в топку воздуха	$I'_в$	кДж/м ³	306,834
2	Приход теплоты с подаваемым в топку воздухом	$Q'_в$	кДж/м ³	337,517
3	Полезное тепловыделение в топке	$Q_т$	кДж/м ³	35591,793
4	Температура калориметрическая	t_k	°С	1910
5	Средняя суммарная теплоёмкость продуктов сгорания в топке	$(V \cdot c_{cp})$	кДж/м ³ ·°С	19,697
6	Среднее значение коэффициента тепловой эффективности экранов	Ψ_{cp}		0,648
7	Критерий Больцмана	Bo		0,280
8	Относительное положение максимальной температуры пламени по высоте топки	$X_т$		0,421
9	Расчётный параметр	M		0,456
10	Суммарная объёмная доля трёхатомных газов	$r_{п}$	м ³ /кг	0,261
11	Парциальное давление трёхатомных газов	$P_{п}$	МПа	0,026
12	Коэффициент ослабления лучей топочной средой содержащей несветящиеся компоненты	$k_r \cdot r_{п}$	(м · ат.) ⁻¹	0,2203
13	Эффективная степень черноты факела	$a_{ф}$		0,217
14	Эффективная степень черноты топки	$a_т$		0,299
15	Температура продуктов сгорания на выходе из топки (расчётная)	$t''_{п.с}$	°С	1217,533
16	Количество теплоты, воспринятое лучевоспринимающими экранами	$q_{л}^т$	кДж/м ³	13825,785
17	Средняя тепловая нагрузка лучевоспринимающих поверхностей нагрева	$q_{л}$	МДж/м ² ·ч	283,194
18	Удельное тепловое напряжение топочного объёма	q_v	МДж/м ³ ·ч	2361,9
19	Приращение температуры нагреваемого теплоносителя	$\Delta t_{н.т.}^т$	°С	15,164

Инв. № подл.	Взамен инв. №
Изм.	Подпись и дата

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата				

МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ

Лист

77

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Таблица Г.1 – Результаты поверочного теплового расчёта конвективных поверхностей нагрева второго газохода

№ п/п	Наименование величины	Обозначение	Размерность	Расчётное значение при температуре $t''_{пс}$
				485 °С
1	2	3	4	5
1	Энтальпия продуктов сгорания на выходе из газохода	$I''_{пс}$	кДж/м ³	7937,023
2	Тепловосприятие газохода (по уравнению теплового баланса)	$Q_б$	МДж/ч	3832,256
3	Приращение температуры теплоносителя в конвективных поверхностях нагрева котла	$\Delta t_{пт}^к$	°С	14,33
4	Температура нагреваемого теплоносителя (воды) на выходе из конвективных поверхностей нагрева	$(t_{пт}^{пкп})''$	°С	90,18
5	Среднелогарифмический температурный напор на концах теплообменника	$\Delta t_{ср}$	°С	705,838
6	Средняя температура продуктов сгорания на выходе из конвективных поверхностей нагрева	$t_{пс}^{ср}$	°С	847,928
7	Средняя скорость продуктов сгорания в конвективных поверхностях нагрева	$w_{ср}^{пс}$	м/с	56,046
8	Критерий Re продуктов сгорания	$Re_{пс}$	–	20637,49
9	Критерий Pr продуктов сгорания	$Pr_{пс}$	–	0,60712
10	Поправочный коэффициент, зависящий от температуры потока и температуры стенки теплообменной поверхности	C_t	–	1
11	Поправочный коэффициент, учитывающий геометрию проходного сечения жаровых труб	C_d	–	1
12	Поправочный коэффициент, учитывающий относительную длину труб	C_l	–	1

Инд. № подл.	
Подпись и дата	
Взамен инд. №	

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата

МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ

Лист

78

№ п/п	Наименование величины	Обозначение	Размерность	Расчётное значение при температуре $t''_{пс}$
13	Коэффициент конвективной теплоотдачи продуктов сгорания	α_k	кДж/м ² ·ч·°С	367,4696
14	Коэффициент загрязнения	ε	м ² ·ч·°С/кДж	0,00119
15	Средняя температура нагреваемого теплоносителя	$t_{нт}^{cp}$	°С	87,5
16	Абсолютная температура наружной поверхности стенок теплообменных поверхностей	T_3	К	691,5997
17	Суммарное парциальное давление трёхатомных газов	$P_{п}$	МПа	0,026
18	Оптическая толщина излучающего слоя	$k_{г} \cdot r_{п}$	(м · ат.) ⁻¹	1,4777
19	Эффективная степень черноты несветящихся компонентов излучающего газа	$a_{н,св}$	—	0,064
20	Коэффициент теплоотдачи излучением не запылённого потока продуктов сгорания	$\alpha_{л}$	кДж/м ² ·ч·°С	36,0199
21	Коэффициент омывания конвективных теплообменных поверхностей дымовыми газами	ω	—	1
22	Коэффициент теплоотдачи в конвективном газоходе	k	кДж/м ² ·ч·°С	395,4197
23	Часовой расход теплоты, воспринимаемый теплопередающими конвективными поверхностями	$Q_{г}$	МДж/ч	3857,677
24	Удельное количество теплоты, передаваемое теплопередающими конвективными поверхностями при сжигании 1 кг топлива	$Q^1_{кп}$	кДж/м ³	13465,31
25	Значение невязки теплового баланса	δ	%	0,66

Взамен инв. №

Подпись и дата

Инв. № подл.

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата

МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ

Лист

79

Таблица Г.2 – Результаты поверочного теплового расчёта конвективных поверхностей нагрева третьего газохода

№ п/п	Наименование величины	Обозначение	Размерность	Расчётное значение при температуре $t''_{пс}$
				232 °С
1	2	3	4	5
1	Энтальпия продуктов сгорания на выходе из газохода	$I''_{пс}$	кДж/м ³	3680,936
2	Тепловосприятие газохода (по уравнению теплового баланса)	$Q_б$	МДж/ч	1199,614
3	Приращение температуры теплоносителя в конвективных поверхностях нагрева котла	$\Delta t_{нт}^к$	°С	4,49
4	Температура нагреваемого теплоносителя (воды) на выходе из конвективных поверхностей нагрева	$(t_{нт}^{пкп})''$	°С	74,49
5	Среднелогарифмический температурный напор на концах теплообменника	$\Delta t_{ср}$	°С	265,79
6	Средняя температура продуктов сгорания на выходе из конвективных поверхностей нагрева	$t_{пс}^{ср}$	°С	358,5
7	Средняя скорость продуктов сгорания в конвективных поверхностях нагрева	$w_{ср}^{пс}$	м/с	23,365
8	Критерий Re продуктов сгорания	$Re_{пс}$	–	21270,712
9	Критерий Pr продуктов сгорания	$Pr_{пс}$	–	0,15311
10	Поправочный коэффициент, зависящий от температуры потока и температуры стенки теплообменной поверхности	C_t	–	1
11	Поправочный коэффициент, учитывающий геометрию проходного сечения жаровых труб	C_d	–	1
12	Поправочный коэффициент, учитывающий относительную длину труб	C_l	–	1

Изм. № подл.	Подпись и дата	Взамен инв. №

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата

МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ

Лист

80

№ п/п	Наименование величины	Обозначение	Размерность	Расчётное значение при температуре $t''_{пс}$
13	Коэффициент конвективной теплоотдачи продуктов сгорания	α_k	кДж/м ² ·ч·°С	183,793
14	Коэффициент загрязнения	ε	м ² ·ч·°С/кДж	0,00119
15	Средняя температура нагреваемого теплоносителя	$t_{нт}^{cp}$	°С	72,24
16	Абсолютная температура наружной поверхности стенок теплообменных поверхностей	T_3	К	404,568
17	Суммарное парциальное давление трёхатомных газов	$P_{п}$	МПа	0,026
18	Оптическая толщина излучающего слоя	$k_{г} \cdot r_{п}$	(м · ат.) ⁻¹	1,996
19	Эффективная степень черноты несветящихся компонентов излучающего газа	$a_{н,св}$	—	0,0809
20	Коэффициент теплоотдачи излучением не запылённого потока продуктов сгорания	$\alpha_{л}$	кДж/м ² ·ч·°С	8,375
21	Коэффициент омывания конвективных теплообменных поверхностей дымовыми газами	ω	—	1
22	Коэффициент теплоотдачи в конвективном газоходе	k	кДж/м ² ·ч·°С	188,325
23	Часовой расход теплоты, воспринимаемый теплопередающими конвективными поверхностями	$Q_{г}$	МДж/ч	1208,6911
24	Удельное количество теплоты, передаваемое теплопередающими конвективными поверхностями при сжигании 1 кг топлива	$Q^1_{кп}$	кДж/м ³	4218,9624
25	Значение невязки теплового баланса	δ	%	0,76

Изм. № подл.	Подпись и дата	Взамен инв. №

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата

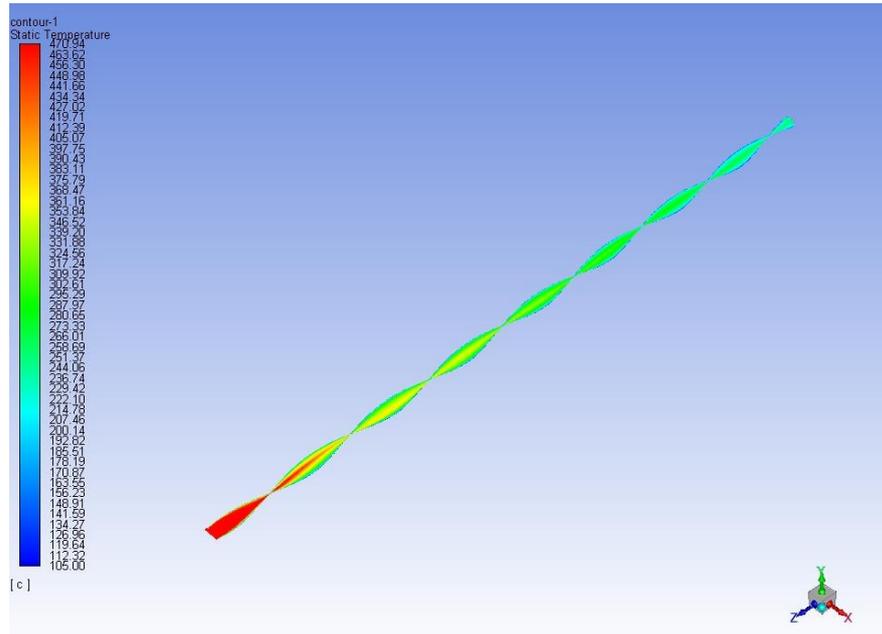
МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ

Лист

81

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

а)



б)

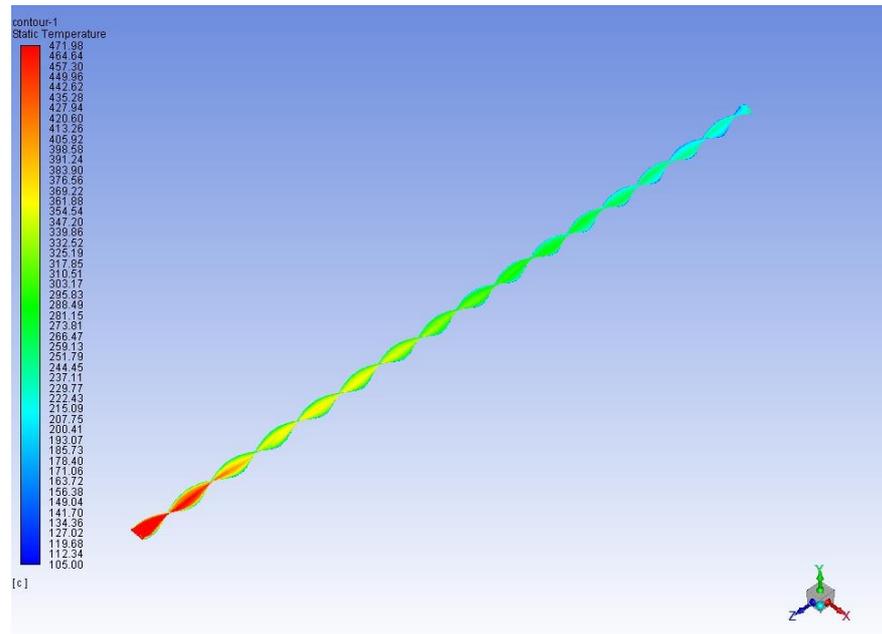


Рисунок Д.1 – Распределение температуры на стенке интенсификатора при 80%-ной нагрузке котла

а – интенсификатор с шагом 100 мм; б – интенсификатор с шагом 50 мм

Изн. № подл.	Взамен изн. №
Изн. № подл.	Взамен изн. №
Изн. № подл.	Взамен изн. №

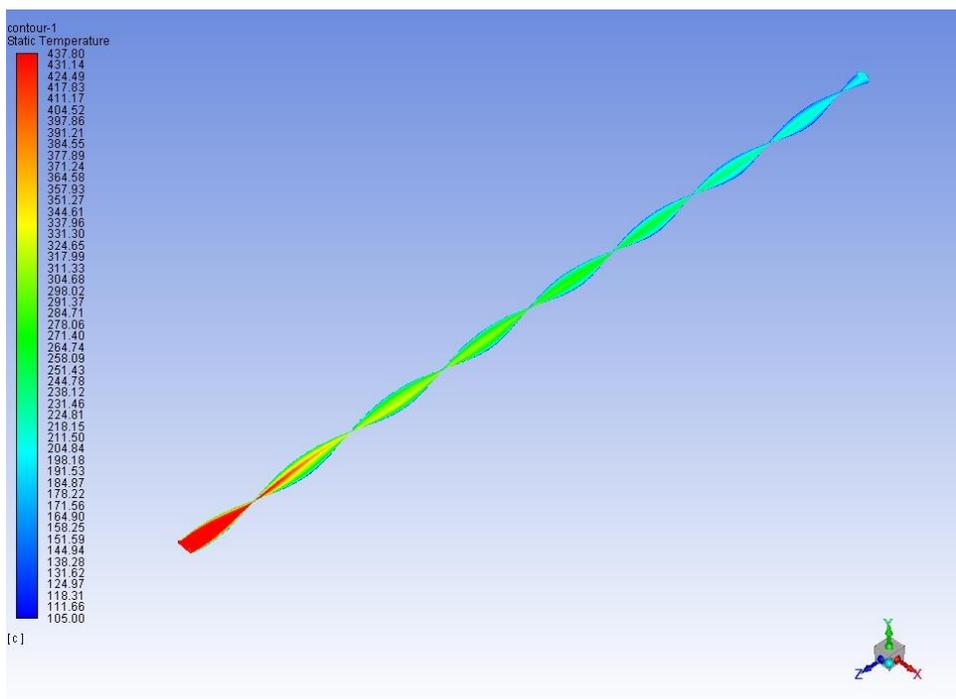
Изн.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата

МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ

Лист

82

a)



б)

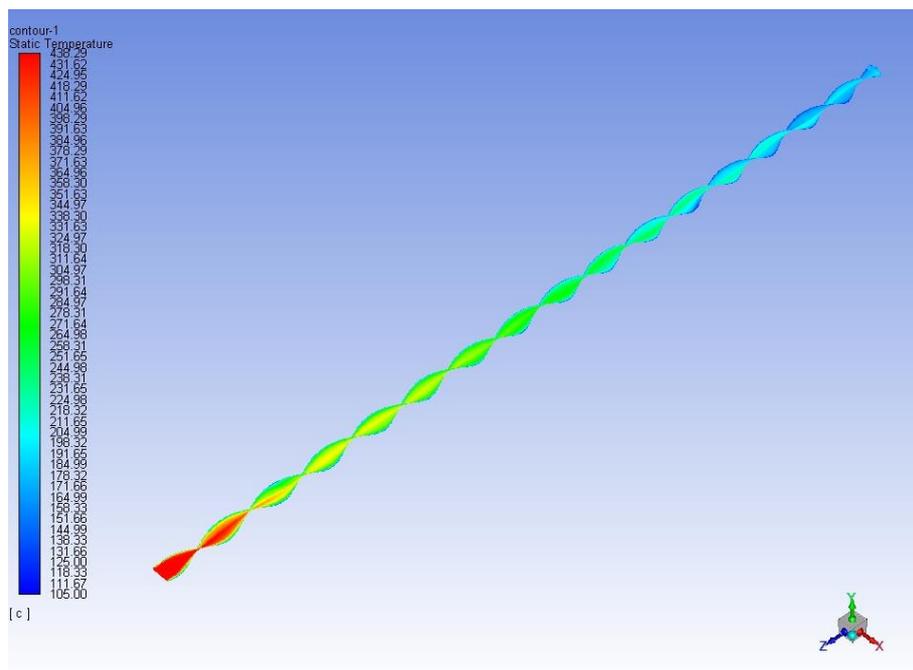


Рисунок Д.2 – Распределение температуры на стенке интенсификатора при 50%-ной нагрузке котла

а – интенсификатор с шагом 100 мм; б – интенсификатор с шагом 50 мм

Инд. № подл.	Взамен инд. №
	Подпись и дата

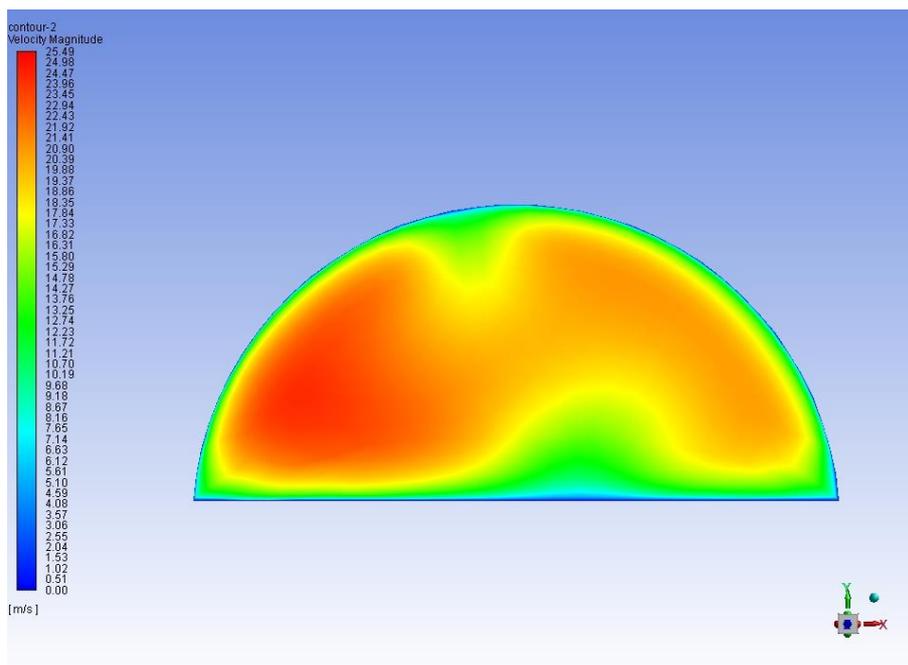
Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата

МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ

Лист

83

a)



б)

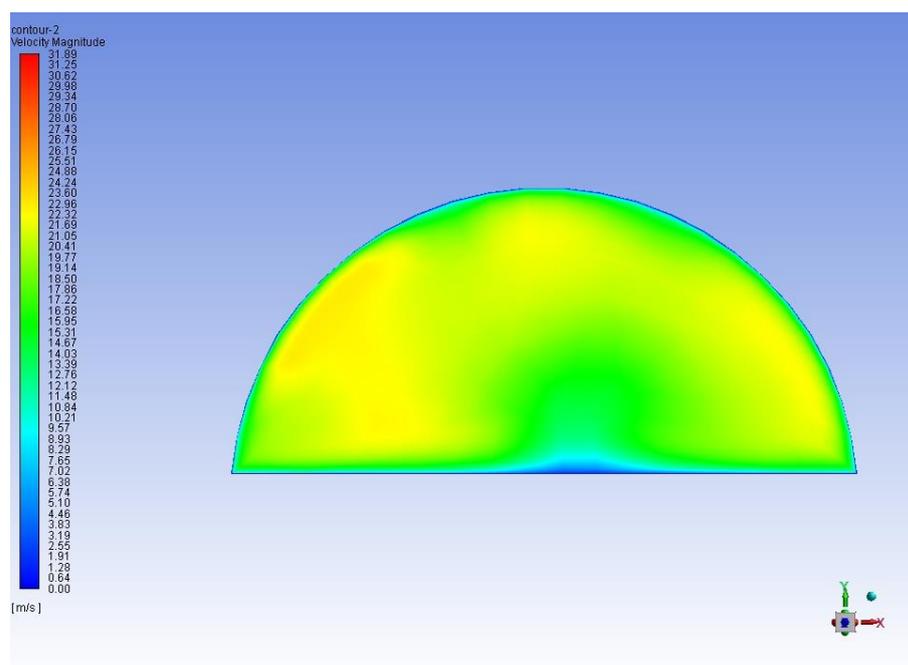


Рисунок Д.3 – Распределение скоростей при 80%-ной нагрузке

а – распределение скорости на выходной границе (интенсификатор с шагом 100 мм);

б – распределение скорости на выходной границе (интенсификатор с шагом 50 мм)

Изм. № подл.	Взамен инв. №
	Подпись и дата

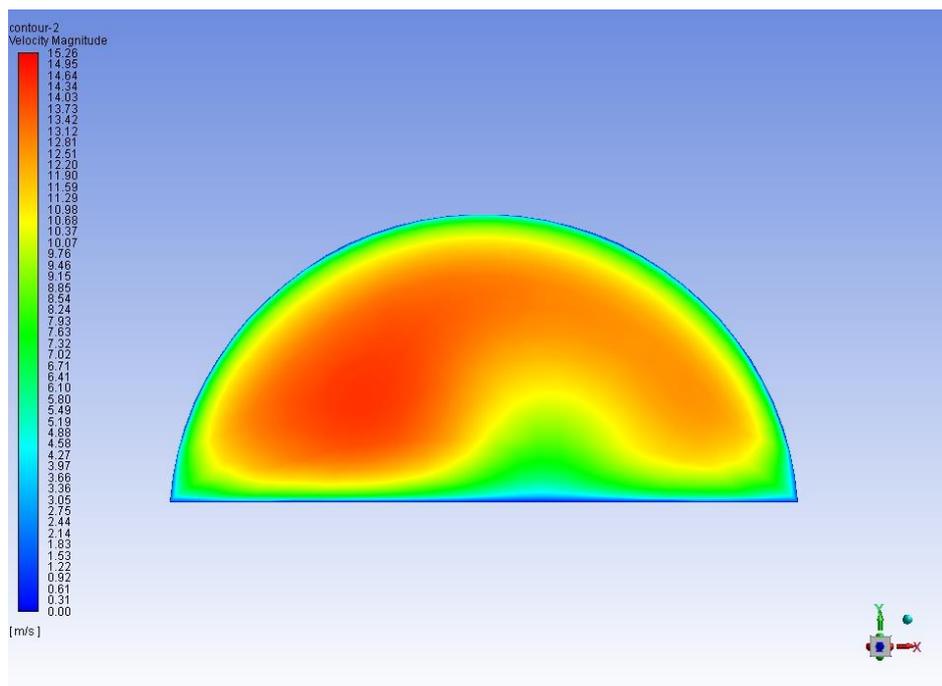
Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата

МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ

Лист

84

a)



б)

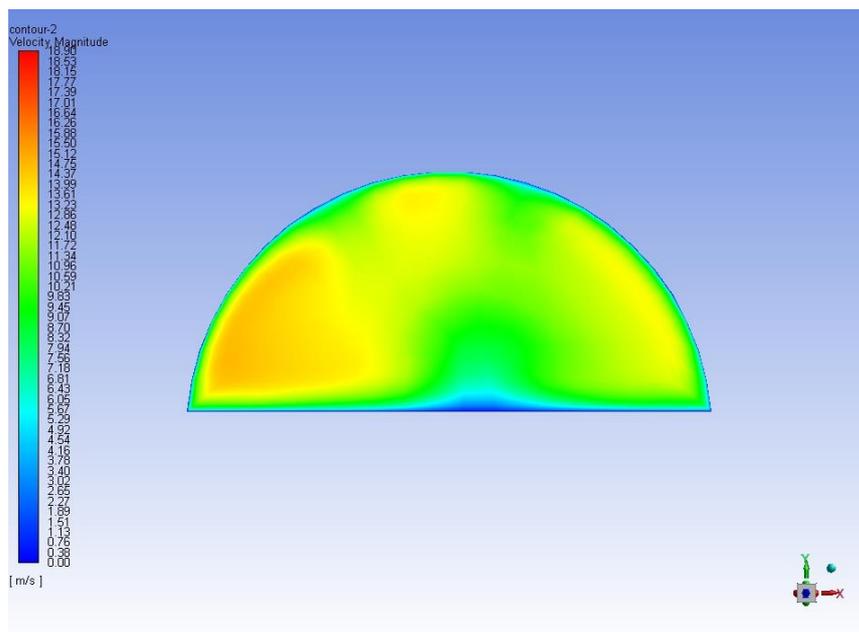


Рисунок Д.4 – Распределение скоростей при 50%-ной нагрузке

а – распределение скорости на выходной границе (интенсификатор с шагом 100 мм);

б – распределение скорости на выходной границе (интенсификатор с шагом 50 мм)

Инд. № подл.	Взамен инд. №
Подпись и дата	

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата

МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ

Лист

85

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

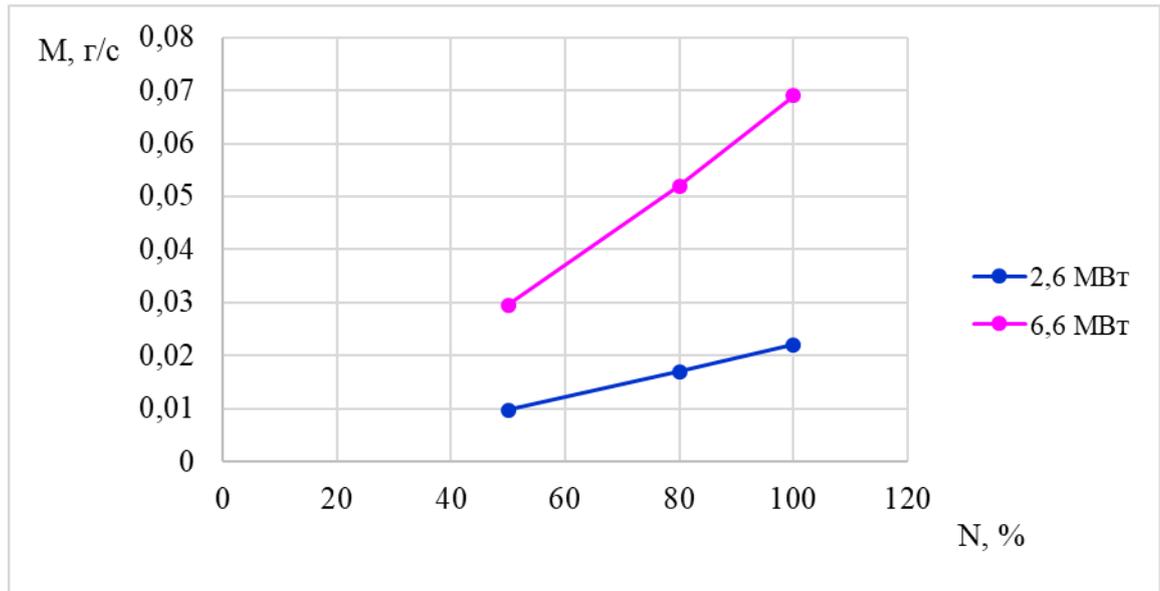


Рисунок Д.1 – Зависимость массы выброса NO от нагрузки котлов

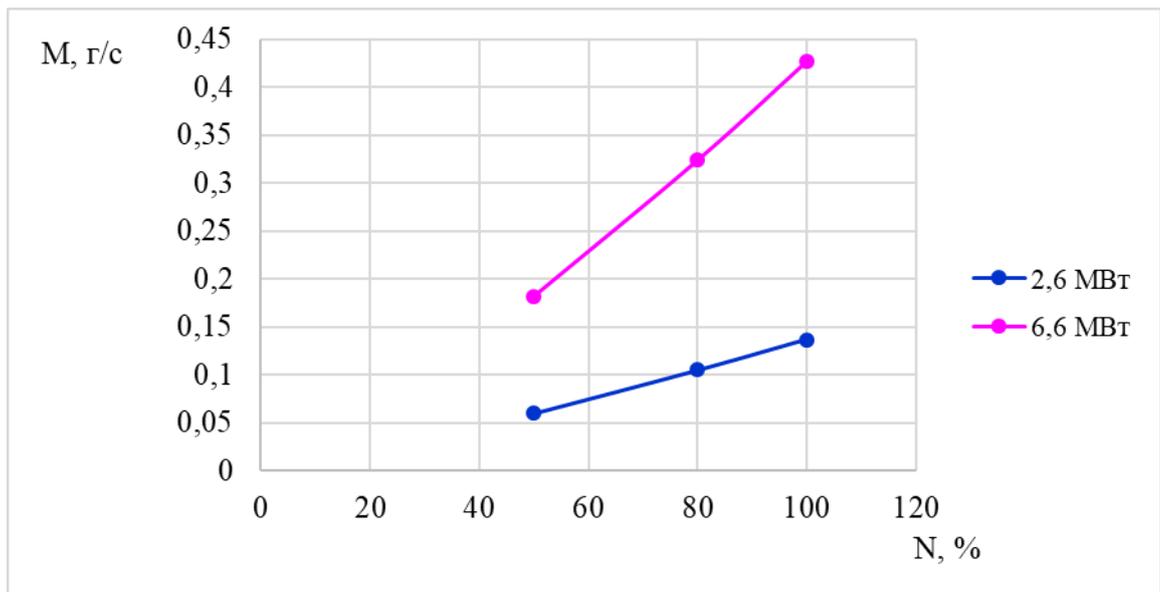


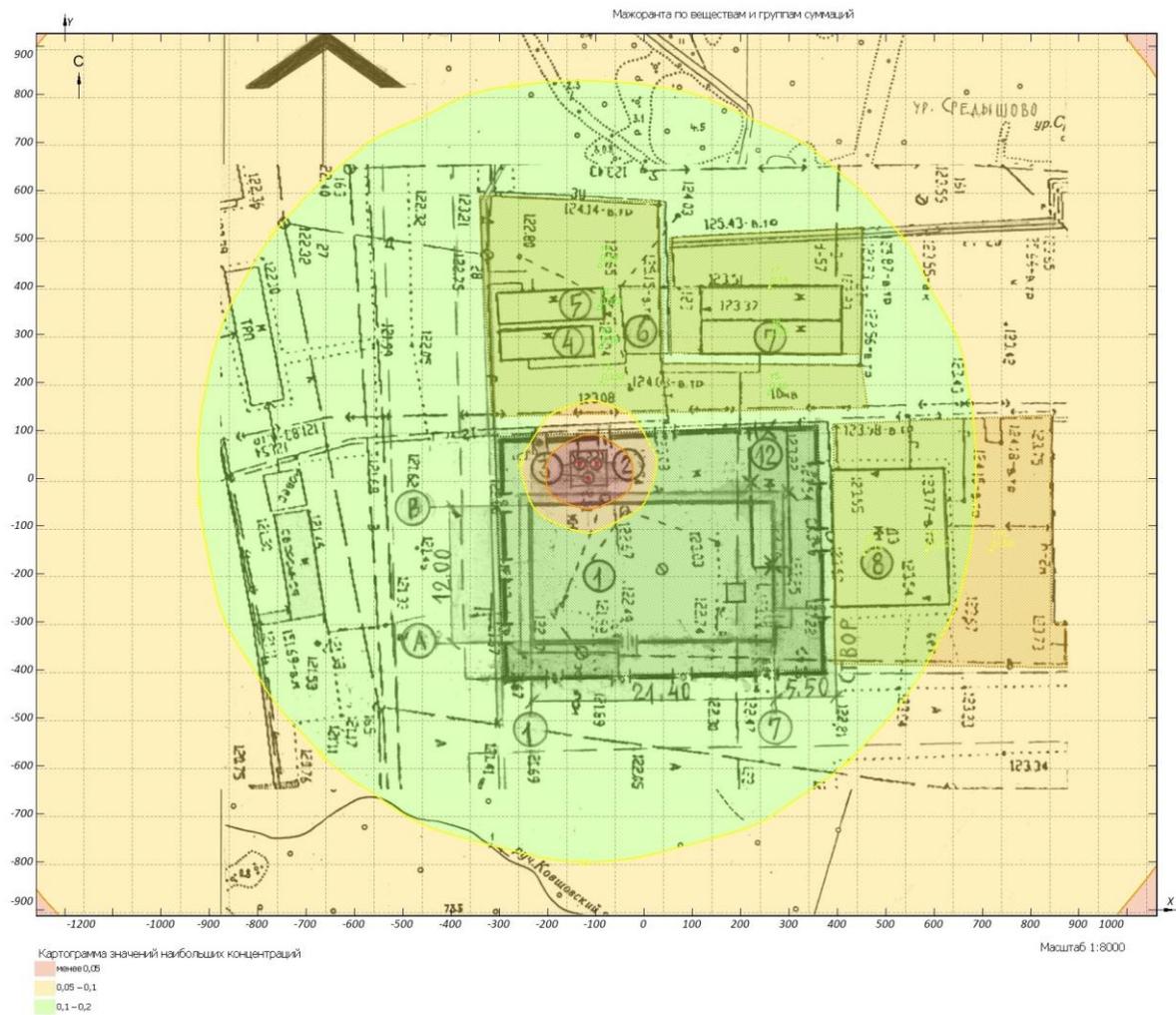
Рисунок Д.2 – Зависимость массы выброса NO₂ от нагрузки котлов

Инд. № подл.	Взамен инд. №	
Подпись и дата		

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата		

МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж



Инд. № подл.	Подпись и дата	Взамен инд. №

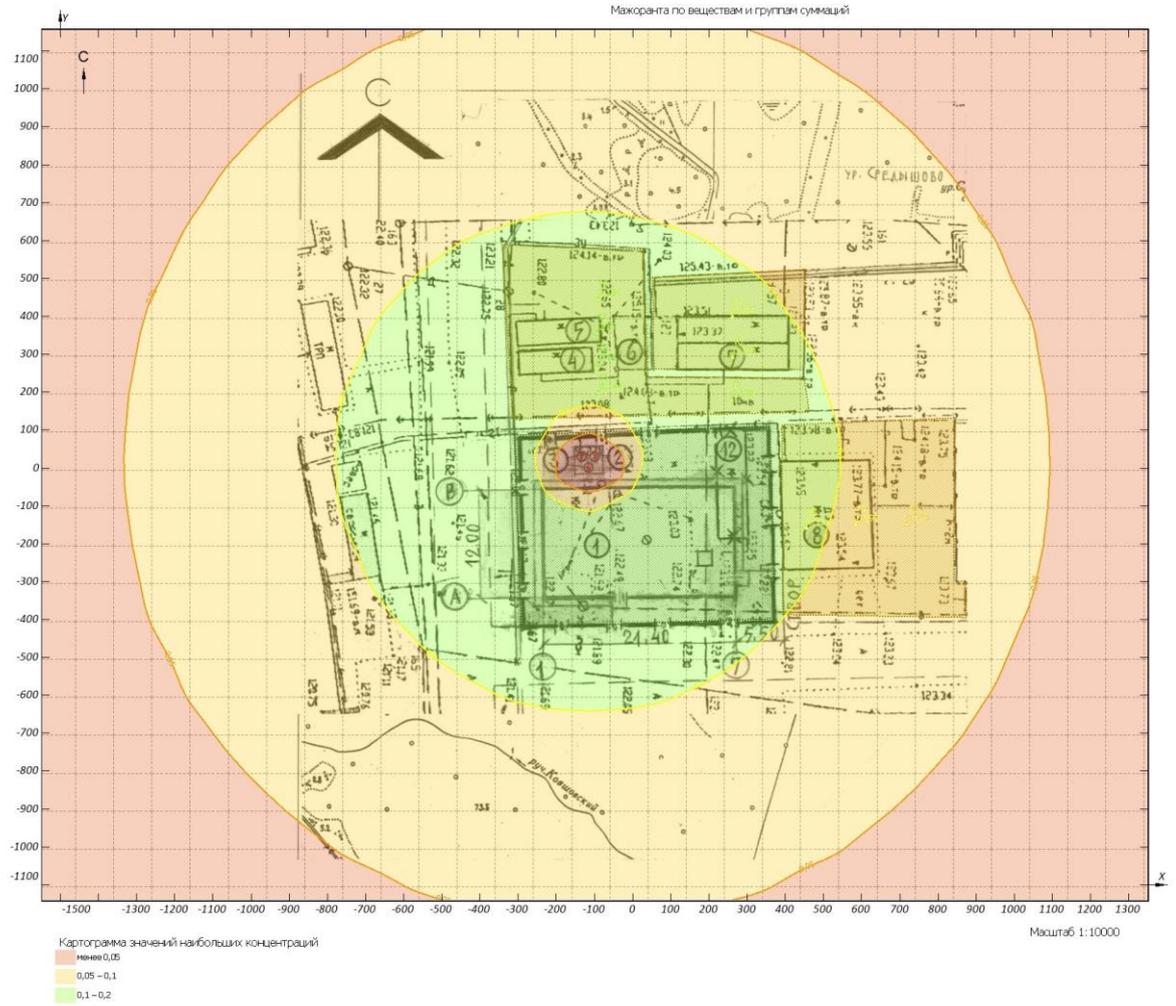
Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата

МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ

Лист

87

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

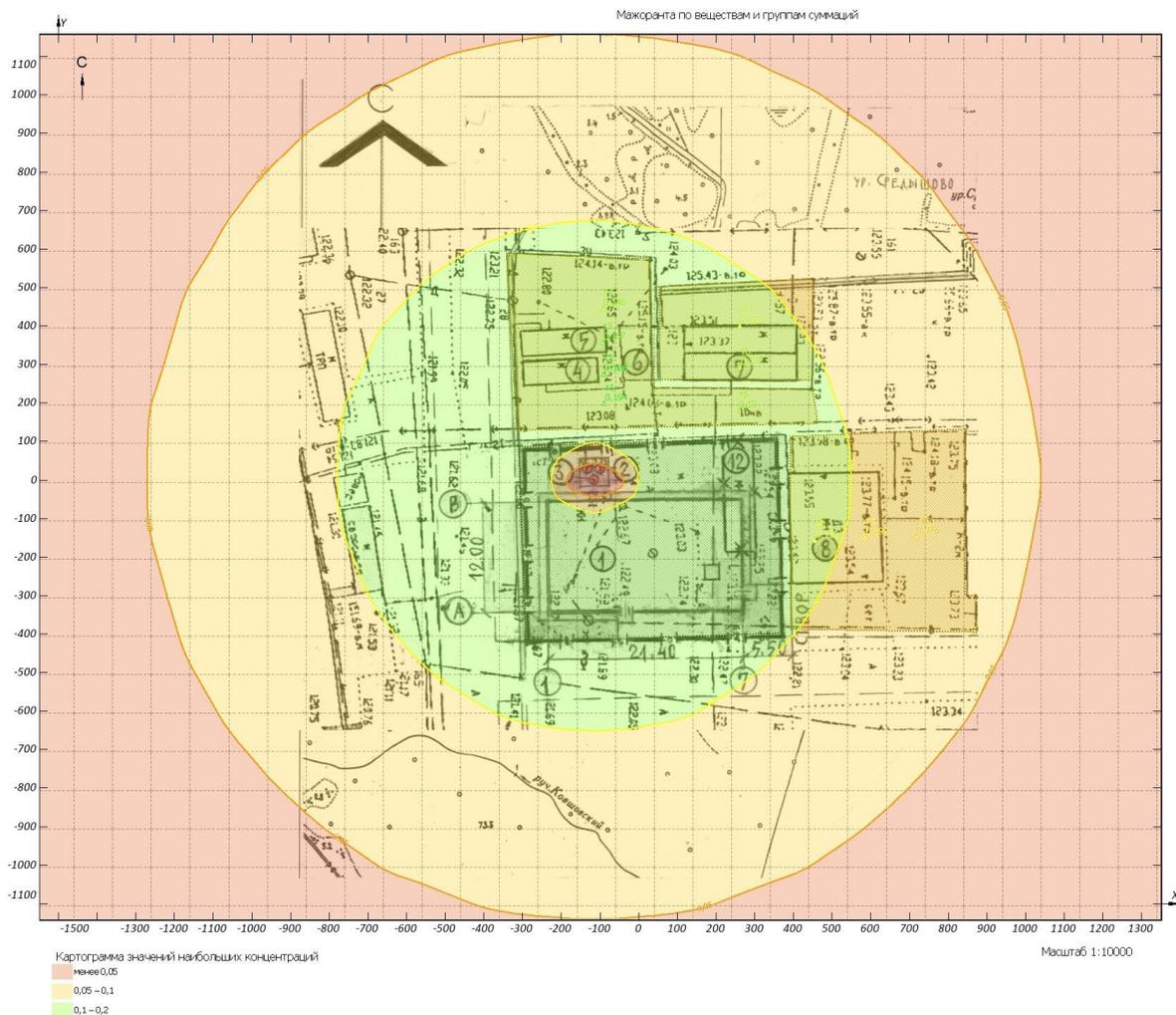


Инд. № подл.	Подпись и дата	Взамен инд. №	

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата

МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ

ПРИЛОЖЕНИЕ И



Инв. № подл.	
Подпись и дата	
Взамен инв. №	

Изм.	Кол. уч.	Лист	№ Докум	Подпись	Дата

МД 25.04.16.270-ТМ ПЗ