

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Казанский государственный энергетический университет»

На правах рукописи



Ахметова Римма Валентиновна

**МОДЕРНИЗАЦИЯ СХЕМ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВ
В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОТЛАХ ТЭС**

05.14.14 – Тепловые электрические станции, их энергетические системы и
агрегаты

Диссертация на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Научный руководитель-
доктор технических наук,
профессор Таймаров М.А.

Казань – 2019 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	10
1.1. Расчетное определение параметров структуры факела в топке котла..	10
1.2. Горение малых и больших капель мазута	20
1.3. Взаимосвязь параметров, влияющих на эффективность сжигания топлива	27
1.4. Постановка задач исследования	31
2. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ	32
2.1. Разработка стенда для тарировки форсунок	32
2.2. Разработка конструкции термозонда с двумя термопарами	39
2.3. Разработка конструкции отсосного пирометра	43
2.4. Разработка оборудования для измерения интенсивности излучения факела	47
2.6. Определение КПД котла	52
2.7. Анализ погрешностей экспериментов	54
2.8. Позонный тепловой расчет топочной камеры	55
3. ИЗЛУЧЕНИЕ ФАКЕЛА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КОНСТРУКЦИИ МАЗУТНЫХ ФОРСУНОК.....	59
3.1. Конструкция мазутных форсунок	59
3.2. Исследование температуры и интенсивности излучения в топке котла ТГМ-84Б при сжигании газа и мазута с использованием различных форсунок	66
4. ВЛИЯНИЕ СХЕМЫ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА НА ТЕМПЕРАТУРУ ФАКЕЛА И КПД КОТЛА	75
4.1. Исследование схем сжигания газа и мазута с использованием механических форсунок на котле ТГМ-84Б.....	75

4.2. Исследование схем сжигания газа и мазута с использованием паромеханических форсунок на котле ТГМ-84Б.....	83
4.3 Исследование схем сжигания топлива на котлах ТГМ-84А	89
4.4. Сжигание топлива в котлах ТГМ-84Б при различных крутках воздуха.....	98
4.5.Теплоэнергетические характеристики факела при сжигании мазута.	102
4.6. Распределение температуры по высоте, ширине и глубине топки при сжигании газа и мазута при различных нагрузках	105
4.7. Исследование КПД котла при сжигании газа и мазута.....	112
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	119
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	121
Приложение 1	133
Приложение 2	138
Приложение 3	139
Приложение 4	140
Приложение 5	141
Приложение 6	142
Приложение 7	147
Приложение 8	148
Приложение 9	158
Приложение 10	164
Приложение 11	169

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы диссертации. Одной из приоритетных задач, выделенной в «Основных положениях технической политики в электроэнергетике России на период до 2030 г.», является минимизация расходов на производство электроэнергии и тепла. Для повышения КПД котла и, следовательно, для снижения удельных затрат энергоресурсов на производство тепловой энергии, необходима оптимизация процессов сжигания топлива в топках энергетических котлов. Выбор рациональных режимов сжигания газа и мазута в энергетических котлах связан с необходимостью учета большого количества одновременно протекающих взаимосвязанных процессов радиационного теплообмена и исследования влияния многочисленных режимных и конструктивных факторов на радиационный теплообмен и излучение факела в топках энергетических котлов. В этой связи, исследование взаимодействия факелов и распределение температур по топочному объему при совместном сжигании газа и мазута и их влияния на радиационный теплообмен в топках котлов является актуальным для повышения экономичности и надежности паровых котлов.

Степень разработанности темы исследования. Проблема поддержания высокого КПД при сжигании топлива в энергетических котлах ТЭС при всех нагрузках изучалась как российскими, так зарубежными учеными, такими как Блинов Е.А., Блох А.Г., Адамов В.А., Митор В.В., Ахмедов Р.Б., Кормилицын В.И., Зройчиков Н.А. и др. Но тем не менее, следует отметить о значительном недостатке экспериментального материала по характеру температурных полей факела в топках котлов в зависимости от их конструктивного исполнения, паропроизводительности, вида сжигаемого топлива и типа используемых горелочных устройств. Данные различных авторов по распределению значений тепловых потоков от факела в топочном объеме не согласуются между собой из-за различных подходов к проведению экспериментов. Экспериментов по оценке влияния распределения интенсивности излучения факела по топочному

объему, конструктивных параметров форсунок и режимных условий работы котлов на эффективность совместного сжигания газа и мазута не проводилось.

Объект исследования: схемы сжигания газа и мазута в энергетических котлах ТЭС марки ТГМ-84А и ТГМ-84Б.

Цель работы: повышение эффективности совместного сжигания газа и мазута в зависимости от режимных параметров и конструктивных особенностей паровых котлов ТГМ-84А и ТГМ-84Б.

Задачи исследования:

1. Разработка экспериментального оборудования и методики исследования.
2. Разработка модернизированного варианта форсунки и исследование влияния применяемого типа форсунок на повышение эффективности сжигания мазута.
3. Исследование влияния схем сжигания газа, мазута и совместного сжигания газа и мазута на температуру факела в зависимости от типа форсунок и марок котлов для повышения энергетической эффективности котлов.
4. Исследование влияния схем сжигания газа, мазута и совместного сжигания газа и мазута на КПД котлов.

Соответствие диссертации паспорту специальности 05.14.14 - «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты» по формуле специальности:

- проблемы совершенствования действующих и обоснования новых технологий производства электрической энергии и тепла, систем подготовки и сжигания топлива;

по областям исследований:

п.1. разработка научных основ методов расчета, выбора и оптимизации параметров, показателей качества и режимов работы агрегатов, систем и тепловых электростанций в целом;

п.3. разработка, исследование, совершенствование действующих и освоение новых технологий производства электрической энергии и тепла,

использования топлива, водных и химических режимов, способов снижения влияния работы тепловых электростанций на окружающую среду;

п. 6 разработка вопросов эксплуатации систем и оборудования тепловых электростанций.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Для котлов ТГМ-84Б и ТГМ-84А при сжигании схем сжигания газа, мазута и совместного сжигания газа и мазута экспериментально получены зависимости температуры факела и интенсивности излучения факела по высоте, ширине и глубине топочных объемов при различных паровых нагрузках.

2. Получены экспериментальные данные о влиянии применяемого типа форсунок на эффективность сжигания мазута при различных нагрузках.

3. Получены зависимости о влиянии круток воздуха и конструктивных особенностей горелок на эффективность сжигания топлива.

Теоретическая и практическая значимость полученных результатов.

1. Полученные закономерности изменения интенсивности излучения факела в топках котлов ТГМ-84Б и ТГМ-84А в зависимости от особенностей горелочных устройств, схем сжигания газа и мазута могут быть использованы в технических мероприятиях по модернизации энергетических котлов на ТЭС.

2. Разработан и запатентован стенд для тарировки мазутных форсунок.

3. Разработана и запатентована форсунка с соударением струй, применение которой повышает энергетическую эффективность котла на 0,54 %.

4. Результаты работы могут использоваться проектными организациями и котлостроительными заводами при разработке новых конструкций топок энергетических котлов, а также при проведении пусконаладочных и режимно-наладочных работ на котлах, находящихся в эксплуатации.

Достоверность и обоснованность результатов обусловлена применением современных методов экспериментальных исследований, сопоставимостью полученных данных с результатами других авторов, практической проверкой предложенных решений на действующих энергетических котлах.

Методология и методы исследования. В работе использованы методы экспериментальной физики, аэродинамики, теории горения, теории лучистого теплообмена, спектроскопии и инфракрасной техники. Для расчетов и построения графических зависимостей использовались пакеты прикладных программ Microsoft Excel, MathCad Professional, AutoCAD 2015.

Реализация результатов работы. Научно-технические решения по повышению эффективности совместного сжигания газа и мазута в паровых котлах ТГМ-84Б внедрены в филиале ОАО «ТГК-16» Нижнекамской ТЭЦ-1.

Личный вклад автора состоит в получении экспериментальных зависимостей, обобщении результатов, написании и опубликовании статей и тезисов, патентов, формулировке основных выводов диссертационной работы и выборе способов достижения цели работы.

Все результаты диссертационной работы получены лично автором под научным руководством профессора, доктора технических наук М.А. Таймарова.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Полученные экспериментальные данные по распределению температур по высоте, ширине и глубине топочных объемов паровых котлов при различных паровых нагрузках.
2. Запатентованная конструкция форсунки для сжигания мазута.
3. Полученные данные по влиянию конструктивных параметров форсунок, схемы их расположения в топке на распределение интенсивности излучения факела по топочным объемам при совместном сжигании газа и мазута, что обеспечивает повышение энергетической эффективности котлов.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы доложены и обсуждены на следующих конференциях: международной научно-технической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы» (г. Казань, 2015-2016), XX аспирантско - магистерском научном семинаре, посвященному Дню энергетика (г. Казань, 2016), Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские

чтения» (г. Казань, 2017-2018), II Международной научно–технической конференции «Энергетические системы» (г. Белгород, 2017).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 20 работ, из них 10 статей в журналах из перечня ВАК, 2 статьи в журналах, включенных в базу SCOPUS, 3 патента, 5 материалов докладов на различных конференциях и семинарах.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 122 наименований. Общий объем диссертации - 169 страниц, 62 рисунков, 13 таблиц.

Во введении раскрывается актуальность темы диссертации, формулируются цели и задачи исследования, описываются научная новизна и практическая ценность работы, обосновывается достоверность результатов, кратко излагается содержание работы по главам.

В первой главе выполнен анализ литературы по исследованиям сжигания газа и мазута. Рассмотрены методы определения параметров структуры факела в топке котла при сжигании мазута. Представлена взаимосвязь параметров, влияющих на эффективность сжигания топлива.

Во второй главе приведены описание методики и используемого экспериментального оборудования для определения оптимальных расходных и регулировочных характеристик форсунок и определения интенсивности излучения факела на действующих котлах ТЭС. Дается расчет погрешностей экспериментов.

В третьей главе приведены результаты экспериментов по исследованию температуры и теплового излучения в топке котла ТГМ-84Б при сжигании топлива с использованием различных форсунок.

Четвертая глава содержит экспериментальные данные о влиянии схем сжигания газа, мазута и совместного сжигания газа и мазута на температуру факела. Эксперименты проводились с использованием механических и паромеханических форсунок. Рассмотрено влияние схем сжигания газа и

мазута на КПД котла, представлены экспериментальные значения по КПД котла и проведено сравнение с расчетными данными.

В заключении в обобщенной форме приведены достигнутые в диссертационной работе научные результаты и оценена практическая значимость полученных результатов.

В приложениях приведены протоколы первичных экспериментальных данных, режимные карты конкретных котлов, программы для обработки и описания полученных результатов, а также акт внедрения.

1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Расчетное определение параметров структуры факела в топке котла

Мазут играет важную роль в топливно-энергетическом балансе нашей страны. Использование мазута в виде резервного топлива является традиционным решением. Вопросам сжигания мазута посвящены ряд публикаций [1-11,31], однако изучение вопроса повышения эффективности совместного сжигания газа и мазута в части экономичности и надежности работы энергетических котлов не менее актуально.

Сжигание органического топлива представляет собой взаимосвязанный комплекс химических и физических процессов, при котором химическая энергия топлива превращается в тепловую энергию продуктов сгорания. Основное влияние на горение топлива оказывают процессы теплообмена, испарения, термического разложения, смешения, воспламенения и химического соединения компонентов топлива с окислителем.

При совместном сжигании природного газа и мазута в топке котла основные сложности связаны со смесеобразованием мазутовоздушной смеси [12]. Для качественной организации сжигания мазута необходимо обеспечить получение достаточно однородной смеси капель топлива и окислителя. Роль окислителя выполняет кислород воздуха, поступающего в горелки подогретым. Подготовка топливовоздушной смеси к сжиганию выполняется горелочными устройствами. Топливоздушная смесь поступает в топку из горелки в виде закрученных струй. Для воспламенения распыленного жидкого топлива необходимо испарить некоторую его часть и подогреть смесь паров топлива с окислителем до температуры кипения. В начальный период при розжиге горелки теплота подводится от специального газового запальника.

Запальник отключается после достижения стабильного процесса горения. В дальнейшем воспламенение вновь поступающих порций топлива и

устойчивое их горение происходит за счет двух источников теплоты: теплового излучения из ядра факела и от стен топочной камеры и за счет конвективного нагрева при перемешивании свежей топливовоздушной смеси с горячими топочными газами.

На оси абсцисс рисунок 1.1 откладывается расстояние от среза форсунки x_0 , на этой же оси может быть показано время движения смеси (для x_0 время $\tau_0 = 0$). Тогда x_ϕ – расстояние от среза форсунки, на котором находился фронт пламени, а $\tau_{\text{инд}}$ – время подготовки топливовоздушной смеси до ее устойчивого горения, т.е. время индукции, U_Π – скорость нормального распространения пламени, м/с; W_x – скорости смеси мазута с воздухом, м/с. По расчетам $\tau_{\text{инд}} = 0,05$ сек (см. приложение 2).

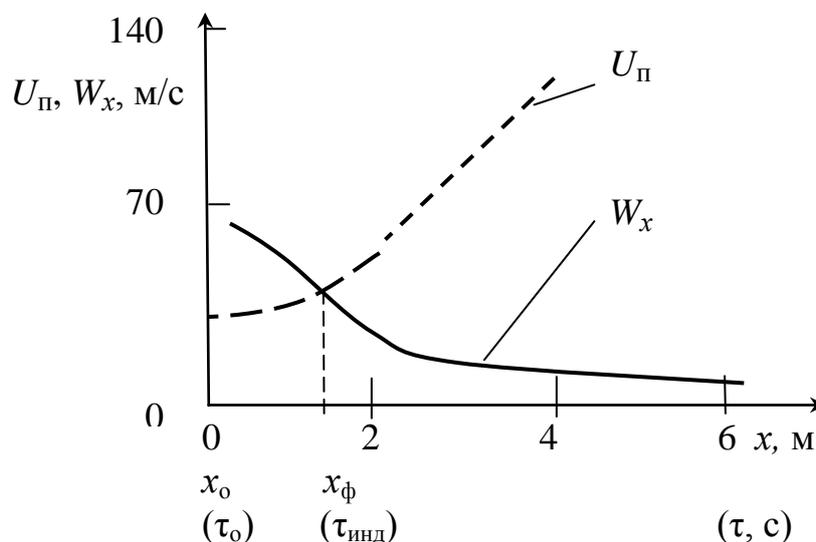


Рисунок 1.1. Схема стабильного положения фронта воспламенения при сжигании мазута в топке котла ТГМ-84Б при использовании форсунки ФУЗ-5000.

Факел в топке имеет три области: негорящая часть, фронт, горящая и догорающая часть факела. Скорость смеси W_x при x_0 взята по результатам расчетов (см. приложение 1) равной скорости распылителя – пара 150 м/с (с учетом потерь на расширение) в выходном сечении форсунки. Скорость смеси W_x при x_ϕ взята по результатам расчетов (приложение 1).

Для большинства топочных устройств время пребывания капель топлива в топочном объеме значительно больше времени, необходимого для испарения основной массы топлива. Такое соотношение времени испарения и пребывания объясняется необходимостью за время пребывания не только превратить топливо в парообразное состояние, но и перемешать пары топлива окислителем. Процессы испарения и перемешивания паров осуществляются параллельно. Перемешивание паров может происходить по мере их образования.

По данным [12], на рисунке 1.2 показана структура нормального развития диффузионного мазутного факела. Условно факел можно разбить на зоны. В зоне I осуществляется подвод турбулизированного потока воздуха к распыленному потоку мазута. В зоне II происходит активное перемешивание капель мазута с воздухом, подогрев основной массы капель топлива до температуры испарения, а также частичное испарение наиболее мелких капель. Однако основным процессом в этой зоне является распределение топлива по сечению факела. В соответствии с этим границей зоны II является момент, когда прекращается действие первичных инерционных сил, определяемых массой и начальной скоростью движения капель жидкого топлива. Дальнейшее движение капель происходит вследствие воздействия на них движущегося потока смеси газов и воздуха.

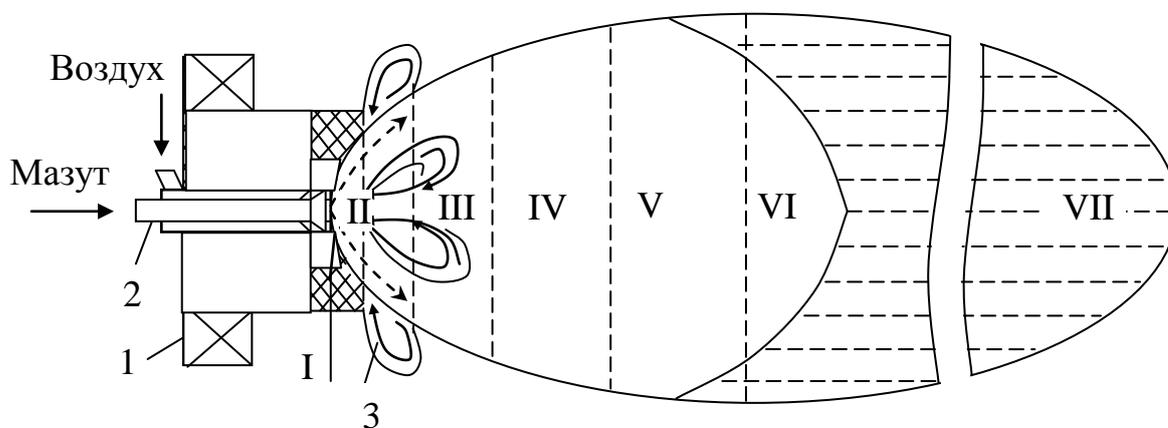


Рисунок 1.2. Схема диффузионного факела: 1 – периферийный регистр (завихритель воздуха); 2 – форсунка; 3- обратные вихревые потоки;

В кинетической зоне III полностью испаряются мелкие капли мазута, частично испаряются более крупные. Смесь паров мазута и окислителя воспламеняется и сгорает в кинетической области. При этом практически мгновенно выделяется до 50...70 % тепловой энергии мазута. Протяженность области кинетического горения зоны III определяется тонкостью распыливания и равномерностью распределения капель по сечению факела. Количество выделяющейся теплоты и развивающаяся при этом температура определяют скорость испарения и временем подогрева мазутовоздушной смеси до воспламенения в зонах II, III и последующих зонах.

В зоне IV полностью заканчивается испарение жидкого топлива, и весь процесс горения переходит в диффузионную область. Характерной особенностью процесса перемешивания в этой зоне является сохранение достаточно высокой интенсивности и больших масштабов турбулентности в зависимости от их первоначального уровня на выходе из воздухонаправляющего устройства. Поток в этой зоне в зависимости от масштабов турбулентности фактически расчленяется на отдельные объемы с различными концентрациями топлива и воздуха. В некоторых объемах может наблюдаться сильно обогащенная топливно-воздушная смесь, в других объемах концентрация топлива может быть равна нулю. Взаимодействия между этими вихревыми образованиями, которые определяются турбулентной структурой потока, оказывают основное влияние на выравнивание соотношения топливо – воздух по сечению факела. Чем больше отличаются концентрации топлива в различных объемах – очагах горения, тем больше роль крупномасштабных пульсаций в достижении среднего соотношения мазут – воздух, достаточного для полного сгорания топлива.

В зоне V продолжается взаимодействие вихревых образований и выгорания мазута. Горят пары мазута, не сгоревшие в предыдущей зоне, а также тяжелых углеводородов, сажа и коксовые частицы, образовавшиеся в зонах III и IV в результате перегрева капель при испарении. При диффузионном горении существенную роль играет как крупномасштабная, так и

мелкомасштабная турбулентность потока. Крупномасштабная турбулентность осуществляет перемешивание крупных объемов и массообмен в наиболее отдаленных точках сечения, а мелкомасштабная обеспечивает перемешивание в отдельных небольших объемах, в которых имеется недостаток или избыток окислителя. На процесс смесей образования в пятой зоне, так же как и в предыдущих продолжает оказывать значительное влияние равномерность распределения топлива в потоке окислителя, достигнутая в зоне II. Протяженность зоны V (в конце ее выгорает 98...99% мазута) зависит также от структуры турбулентности в этой зоне и от коэффициента избытка воздуха в зоне I.

Если в зоне II была получена большая неравномерность распределения (например, одной стороны факела наблюдается большой избыток, с другой – недостаток окислителя), то без крупномасштабного перемешивания получить достаточно высокое выгорание мазута будет практически невозможно. В связи с этим вопросу распределения топлива и воздуха в начальном сечении факела при оптимизации процесса горения уделяется очень большое внимание.

В зоне VI происходит диффузионное дожигание твердой фазы. В этой зоне осуществляется дожигание различных очаговых остатков. Гетерогенное дожигание этих остатков протекает наиболее успешно при наличии мелкомасштабной турбулентности, которая при большой протяженности факелов практически вырождается уже до IV– V зоны. Это обстоятельство накладывает определенные трудности на организацию полного дожигания топлива. Эти трудности растут также в связи с тем, что температура факела в VI зоне уменьшается до 1000-1200°C вследствие теплового излучения и конвективного теплообмена факела с граничными объемами и поверхностями. Все это приводит к тому, что абсолютно полного сгорания мазута при факельном сжигании практически никогда не достигают.

Зона VII - это зона движения продуктов сгорания по тракту котла. Протяженность зон I...VI по оси факела в долях диаметра устья горелочного

устройства $D_{гy}$ для закрученной струи мазутовоздушной смеси приведена в таблице 1.1.

Таблица 1.1. Протяженность зон факела при сжигании мазута

Номер зоны	Процесс, происходящий в зоне	Протяженность зоны в относительных единицах от $D_{гy}^*$	Протяженность зоны в м
I	Турбулизация и подача воздуха	-	
II	Распределение капель мазута в воздухе, его подогрев и частичное испарение	$0,5 D_{гy}$	0,43
III	Испарение	$(0,75... 1,0) D_{гy}$	0,645...0,86
IV	Испарение и начало диффузионного Горения	$1,5 D_{гy}$	1,29
V	Диффузионное горение	$(2...3) D_{гy}$	1,72... 2,58
VI	Диффузионное дожигание	$(3...7) D_{гy}$	2,58... 5,88

$D_{гy}^*$ - диаметра устья горелочного устройства

На основе вышеизложенного можно представить физическую схему процесса выгорания газообразного и распыленного жидкого топлива в факеле. При этом необходимо учитывать, что капли топлива, введенные в начальное сечение факела посредством форсунки распределяются в начальном сечении неравномерно.

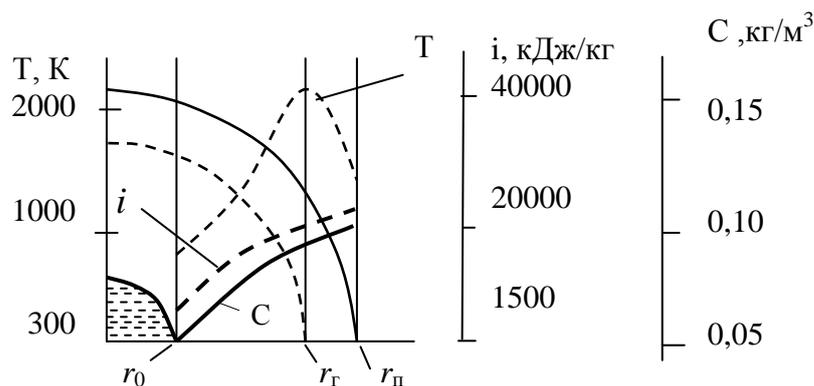


Рисунок 1.3. Распределение параметров горения капли мазута по схеме приведенной пограничной пленки:

C, i, T - распределение концентраций кислорода, энтальпий и температур в пограничном слое; r_0 – начальный радиус капли ($r_0=12,7$ мкм - для форсунки типа ФУЗ); $r_Г, r_П$ - радиусы зоны горения и пограничного слоя

На рисунке 1.3 отмечен радиус капли $r_0=12,7$ мкм (расчет приведен в приложении 1), радиус пограничного слоя $r_{п}$, где происходит изменение концентрации паров топлива и кислорода C , а также радиус зоны горения паров $r_{г}$. Изменение концентрации кислорода C (в кг/м³) отнесено к 1 м³ паров мазута в пограничном слое.

При попадании мелких капель мазута в топочную камеру происходит их испарение [14, 20- 24]. На испарение капли влияют различные факторы: свойства топлива, температура газа, окружающего каплю, диаметр капли. Вокруг капель образуется парогазовая смесь, которая воспламеняется, обеспечивая дальнейший прогрев, испарение и горение паров жидкого топлива.

Полный расчет горения капли мазута сложен и описывается системой уравнений энергии и массообмена для паров топлива и кислорода. Уравнение энергии может быть упрощено введением понятия для капли мазута о полной энтальпии парогазовой смеси:

$$i = cT + C\chi Q/\rho \quad (1.1)$$

где c – теплоемкость смеси, кДж/(кг К); ρ – плотность смеси, кг/м³; C – концентрация кислорода, кг/м³; χ – стехиометрический коэффициент; Q – теплота сгорания топлива, кДж/кг.

Большое значение в развитии исследований горения капли жидкого топлива имеет работа Г.А. Варшавского по диффузной теории горения [14,25]. В ней принята схема приведенной пленки. Под приведенной пленкой понимается такая концентрическая шаровая пленка вокруг горящей капли, через которую посредством теплопроводности проходит столько же теплоты, сколько к ней поступает за счет конвекции. Предполагается, что время выгорания капли определяется диффузионным переносом паров топлива и кислорода к месту горения, а также подачей тепла на испарение топлива и нагрев пара. Собственно кинетическое сопротивление горению ничтожно по сравнению с диффузионным и им можно пренебречь [32].

На рисунке 1.4 представлена схема, соответствующая диффузионному горению капли. Теплота сгорания выделяется на поверхности горения с

диаметром d_r . Часть его идет к поверхности капли и расходуется на испарение и нагрев пара до температуры в зоне горения T_r . Пары мазута с поверхности капли переносятся к зоне горения. К поверхности горения переносится с внешней поверхности приведенной пленки кислород. В зоне горения концентрации паров топлива и кислорода равны нулю. Соотношение же между поступающим к поверхности горения кислородом и парами топлива соответствует стехиометрии. Во внутренней части приведенной пленки между поверхностями горения и капли находятся лишь продукты реакции и пары топлива, а с наружной стороны – только окислитель и продукты горения.

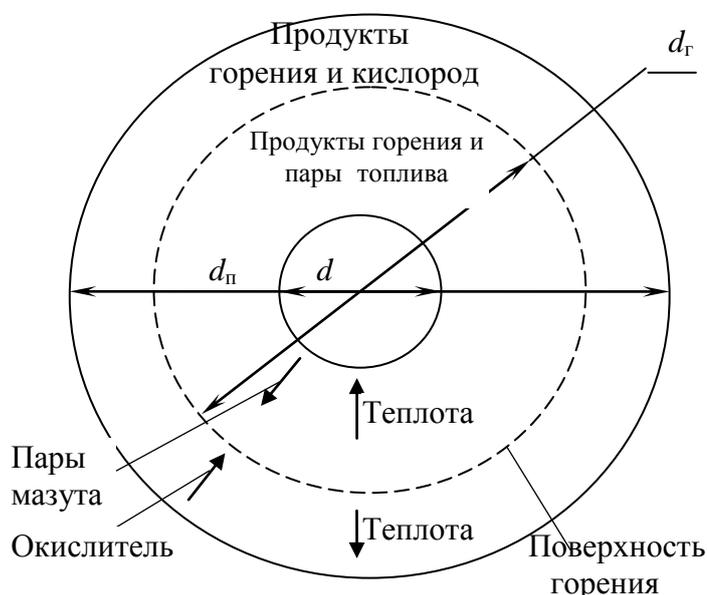


Рисунок 1.4. Поток теплоты и паров мазута и кислорода для диффузионного горения капли мазута по схеме приведенной пленки:

d_r - диаметр зоны поверхности горения; T_r - температура в зоне горения;
 $d_{\text{п}}$ - диаметр зоны поверхности продуктов горения (пограничного слоя);
 d - диаметр капли мазута.

Размер капли и толщина приведенной пленки, расположение зоны горения изменяются по мере выгорания капли. Поэтому следует учесть нестационарность процесса в пограничном слое. Однако в большинстве расчетов принимается во внимание, что плотность горячего газа в приведенной пленке в несколько тысяч раз меньше плотности жидкости в капле. Поэтому

считается, что в каждый данный момент времени процесс в пограничном слое происходит квазистационарно.

Дальность полета отдельной капли зависит от начального диаметра и скорости ее [27-29]. Если учесть, что диаметр горячей капли уменьшается в полете, то очевидно, что в этом случае уменьшается и дальность ее полета.

Наиболее важной характеристикой факельного сжигания топлива является длина факела. Длина факела в значительной степени определяет конструкцию топки, компоновку горелок, характер теплообмена и другие характеристики топочной камеры и топочного процесса. Под длиной факела подразумевается длина пути выгорания по оси факела, на которой сгорает основная масса поданного топлива [19,34]. Следует отметить, что эта фактическая длина обычно бывает существенно больше видимой длины факела.

При отсутствии рециркуляции газов в топку длина мазутного факела l_{ϕ} по аэродинамической оси при заданной полноте выгорания $\beta=0,97\dots 0,995$ [30, с.37] рассчитывается по формуле:

$$l_{\phi} = A\beta^3(\alpha_r - 1)^{-0,48} B_m^n \quad (1.2)$$

где A – коэффициент, учитывающий расположение горелок в топке. При одностороннем расположении горелок $A=1,1$; β – коэффициент полноты выгорания мазута; α_r – коэффициент избытка воздуха в горелке; B_m – расход мазута на форсунку, т/ч; n – показатель удлинения факела при увеличении расхода мазута.

Аэродинамическая ось факела проходит по геометрической оси горелки и по пересекающей ее вертикали, являющейся осью вертикального участка факела. Расчет длины факела для котла ТГМ-84Б при сжигании мазута приведен в приложении 1. Результаты расчета длины факела l_{ϕ} в зависимости от расхода мазута на форсунку приведены на рисунке 1.5.

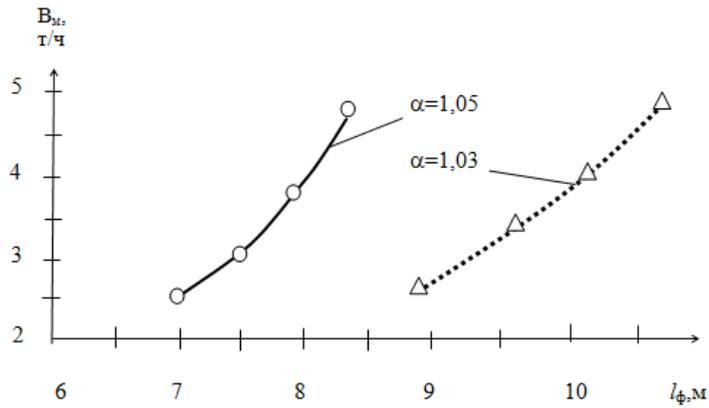


Рисунок 1.5. Длина факела l_ϕ в зависимости от расхода мазута на форсунку и коэффициента избытка воздуха α

Относительное выгорание мазута по длине факела l_ϕ рассчитывается по формуле [30]:

$$B_{MX}/B_M = 1 - 0,03(x/l_\phi)^{0,8}, \quad (1.3)$$

где B_{MX}/B_M – отношение количества топлива, выгоревшего в факеле до сечения x , к количеству топлива, поступившего в горелку.

На рисунке 1.6 приведены расчетные данные (приложение 1) по относительному выгоранию мазута B_{MX}/B_M по длине факела в зависимости от зависимости от начальной скорости v (м/с) капель.

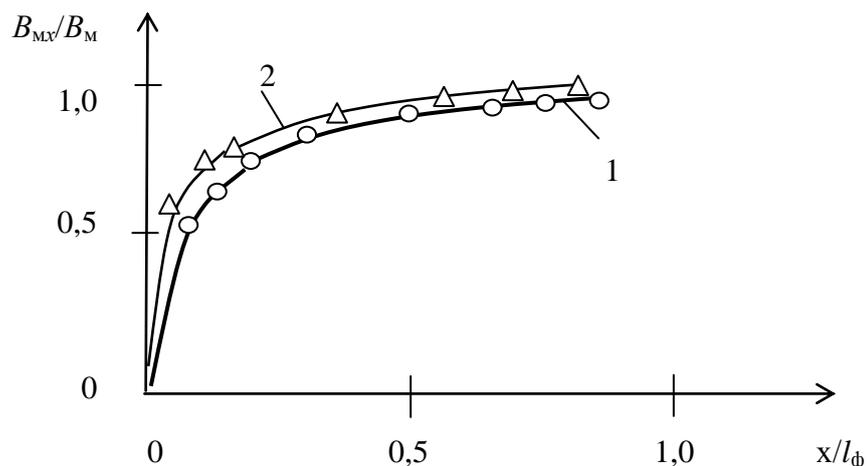


Рисунок 1.6. Относительное выгорание мазута B_{MX}/B_M по относительной длине факела l_ϕ в топке котла ТГМ-84Б при $\alpha=1,05$ в зависимости от начальной скорости v (м/с): 1 - $v = 38,46$; 2 - $v = 23,4$;

Изменение требований к полноте сгорания в конце факела соответствует удлинению факела на 20 %, а абсолютно полному сгоранию теоретически соответствует $l_{\phi} = \infty$. На практике за длину факела l_{ϕ} принимают расстояние от устья горелки до того места факела, где недожог составляет 1%.

В вертикальных топках вследствие действия подъемных сил общая длина факела l_{ϕ} складывается из горизонтальной и вертикальной составляющих. Полученные расчетные данные (см. приложение 1) по длинам горизонтального и вертикального участков факела для котла ТГМ-84Б для расхода мазута 5 т/ч и 2,5 т/ч при $\alpha=1,05$ приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2. Длины горизонтального b_{ϕ} и вертикального h_{ϕ} участков факела для котла ТГМ-84Б для $\alpha=1,05$

Расход мазута, т/ч	Осевая скорость воздуха в сечении амбразуры с $D_{\text{п}}=0,84$ м	Длины участков факела, м	
		горизонтального b_{ϕ}	вертикального h_{ϕ}
5	53,05	5,04	3,27
2,5	36,29	4,2	2,8

Длина факела зависит от многих взаимосвязанных величин. Ею можно управлять изменением дисперсности распыливания, удельным расходом распылителя, давлением, круткой воздуха. Организация оптимального сжигания мазута, в том числе и длина факела l_{ϕ} , определяется конструктивными и технологическими характеристиками топки.

1.2. Горение малых и больших капель мазута

Некоторые авторы [39-40] рассматривают горящий факел как сплошное физическое тело, характеристики которого непрерывно изменяются во времени в результате происходящих в нем процессов выделения тепла и взаимодействия молекул. Такая постановка задачи позволяет все процессы горения жидкого топлива отождествить с процессами горения газового топлива. Другие авторы Д.Б. Сполдинг, В.В. Померанцев [21,41-42] переносят

закономерности горения одиночной капли на горение всего факела, принимая некоторый средний размер капель за определяющий [29].

В предыдущем разделе показано, что испарение горячей капли происходит за счет молекулярного переноса тепла через пограничную застойную пленку у поверхности капли. По мере выгорания капли из-за уменьшения поверхности общее испарение уменьшается, зона горения суживается и исчезает при полном выгорании капли. Так протекает процесс горения капли полностью испаряющихся жидких топлив, находящейся в покое в окружающей среде или движущейся вместе с ней с одинаковой скоростью.

Количество кислорода, диффундирующее к шаровой поверхности при прочих равных условиях, пропорционально квадрату ее диаметра, поэтому установление зоны горения на некотором удалении от капли мазута обуславливает большую скорость ее горения по сравнению с такой же частицей твердого топлива, при горении которой химическая реакция практически протекает на самой поверхности. Так как скорость горения капли мазута определяется скоростью испарения, то время ее выгорания можно рассчитать на основе уравнения теплового баланса ее испарения за счет тепла, получаемого из зоны горения [17, 35]

$$qFdt = -\rho[c_{cp}(t_k - t_0) + \lambda_{п}] dV \quad (1.4)$$

где q – количество тепла, получаемое из зоны горения единицей поверхности капли в единицу времени, кВт/м²; F – поверхность капли в текущий момент времени, м²; τ – время полного выгорания капли, с; ρ – плотность мазута, кг/м³; c_{cp} – средняя теплоемкость мазута, кДж/(кг·К); t_k и t_0 – температура кипения и начальная температура мазута, °С; $\lambda_{п}$ – теплота испарения, кДж/кг; $dV = Fdr$ – уменьшение объема капли за промежуток времени $d\tau$, r и r_0 – текущий и начальный радиус капли, м.

Время полного выгорания капли мазута определяется по уравнению (1.5):

$$\tau = -\int_{r_0}^0 \frac{\rho[(t_k - t_0)c_{cp} + \lambda_{п}]}{q} \cdot dr \quad (1.5)$$

Использование формулы (1.5) для расчета времени выгорания капли мазута связано с трудностями определения теплового потока q , поступающего из зоны горения к поверхности капли.

В диффузионной теории горения капли мазута применительно к горению в неподвижной среде или в потоке при нулевой относительной скорости капли используется представление о приведенной пограничной сферической $d_{\text{п}}$ пленке у поверхности капли на рисунке 1.4, в пределах которой происходит только молекулярный перенос при резком изменении температуры и концентрации реагирующих веществ. Вне этой условной пограничной пленки благодаря интенсивному молярному переносу поток однороден по температурным и концентрационным условиям. Вокруг капли устанавливается зона горения в виде сферической поверхности. Часть тепла, выделяющегося в зоне горения, поступает к поверхности капли и расходуется на испарение и нагрев пара мазута до температуры в зоне горения $T_{\text{г}}$. В процессе горения это тепло возвращается.

В зону горения с внутренней стороны от поверхности капли молекулярной диффузией переносятся пары мазута, а с наружной стороны – кислород с внешней поверхности приведенной пленки. Принимается, что горение протекает в диффузионной области, т.е. что химическое реагирование в зоне горения совершается настолько быстро, что временем его протекания можно пренебречь по сравнению со временем диффузии.

Это позволяет считать, что зона горения является поверхностью, на которой концентраций паров мазута и кислорода равны нулю вследствие практически мгновенного реагирования диффузионных потоков этих компонентов горючей смеси, поступающих в зону горения со стехиометрическим количественным соотношением между ними. Образующиеся в зоне горения продукты сгорания диффундируют во внешнюю среду и в пространстве между зоной горения и каплей, а выделяющееся тепло отводится молекулярной теплопроводностью во внешнюю среду. Во внутренней части приведенной пленки, между

поверхностями горения и капли, находятся продукты горения и пары мазута, а с наружной стороны – окислитель и продукты горения.

Для расчета процесса выгорания для каждой из этих двух частей приведенной пленки составляется по два уравнения: теплового и материального балансов.

Для упрощения задачи считается [22], что температура поверхности жидкой капли равняется температуре кипения и в основу расчета берется уравнение теплового баланса испарения капли в процессе горения:

$$q = -g[\lambda_{\text{п}} + c_{\text{п}}(T - T_{\text{к}})] = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (1.6)$$

где q – удельный тепловой поток к поверхности; g – удельный поток паров с поверхности жидкости в единицу времени; $\lambda_{\text{п}}$ – теплота испарения мазута; $c_{\text{п}}$ – теплоемкость паров мазута; $T_{\text{к}}, T$ – температура поверхности мазута, принимаемая равной температуре кипения, и температура паров мазута; λ – коэффициент теплопроводности тазовой среды.

Интегрирование уравнения (1.6) дает:

$$g = \frac{1}{\Delta} \int_{T_{\text{к}}}^{T_{\text{г}}} \frac{\lambda dT}{\lambda_{\text{п}} + c_{\text{п}}(T - T_{\text{к}})} \quad (1.7)$$

где Δ – толщина приведенной пленки; $T_{\text{г}}$ – температура в зоне горения.

Необходимая для расчетов по формуле (1.7) температура в зоне горения определяется из соотношения между потоками тепла из зоны горения в окружающую среду и кислорода из окружающей среды в зону горения через приведенную пленку. Предполагая, что в условиях топки котла тепловые потери от излучения в окружающую среду относительно малы, коэффициенты диффузии и температуропроводности равны между собой, и что можно пренебречь стефановским потоком ввиду его малости, показывается, что температура на поверхности горения равна теоретической температуре горения в среде одинакового состава и с одинаковой начальной температурой с окружающей средой при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$.

Для демонстрации определяющей роли испарения в протекании процесса горения капли и зависимость испарения от тепловых условий рассматривается предельный случай [36], когда горение паров не лимитирует процесс, а тепловые условия задаются независимо от процесса горения паров горючего вблизи от поверхности капли.

Для малых капель метод определения количества тепла, получаемого движущейся каплей базируется на предположении, что теплообмен каплей с окружающей средой совершается только конвекцией [37]. В этом случае тепловой поток, воспринимаемый каплей, равен:

$$q = \alpha_c (T - T_k) \quad (1.8)$$

где α_c – коэффициент конвективного теплообмена; T_c - температура окружающей среды.

Величина коэффициента теплоотдачи α_c зависит от состояния движения среды рассчитывается по зависимости критерия Nu от числа Re, определяемой экспериментально. Для мелких капель, движущихся в потоке с очень малой относительной скоростью ($Re < 100$), критерий $Nu = \frac{\alpha_c d}{\lambda} = 2$, откуда:

$$\alpha_c = \frac{2\lambda}{d} = \frac{\lambda}{r} \quad (1.9)$$

$$\tau = \int_0^{r_0} \frac{\rho[(t_k - t_0)c_{cp} + \lambda_{II}]}{\lambda(T_c - T_k)} \cdot r dr = \frac{\rho[(t_k - t_0)c_{cp} + \lambda_{II}]}{2\lambda(T_c - T_k)} \quad (1.10)$$

Согласно формуле (1.10) продолжительность выгорания малой капли, испаряющейся в процессе конвективного нагрева в несущем газовом потоке, пропорциональна квадрату ее начального радиуса.

По закону о линейной зависимости квадрата диаметра испаряющейся или горящей в диффузионном режиме малой капли от времени, то как характерную величину для горения капли принимают коэффициент горения

$$k = \frac{d_0^2 - d^2}{\tau} \quad (1.11)$$

где d_0, d - соответственно начальный и текущий диаметры капли, м.

При горении в воздухе с температурой 800–900°C и скоростях обтекания каплей до 1 м/с для бензина $k = 1,3 \div 1,5$; для керосина $k = 1-1,3$ мм²/с, для мазута и солярового масла значение k приблизительно такое же. Коэффициент k возрастает с повышением температуры среды и концентрации кислорода, которые приводят к повышению температуры в зоне горения, а также с ростом скорости обтекания капли, приводящим к увеличению величины критерия Nu.

Вместе с тем опытные данные показывают, что горение каплей не всегда диффузионно. Характеристикой отклонения от диффузионного горения является критерий Семенова

$$Se = \frac{\sqrt{KD}}{\alpha_d} \quad (1.12)$$

где K , D , α_d - соответственно константа скорости реакции, коэффициент молекулярной диффузии и коэффициент диффузионного обмена.

С улучшением условий диффузии при уменьшении размера каплей и увеличении скорости их обтекания потоком, т. е. при переходе к режимам, характеризующимся меньшими значениями критерия Семенова, роль горения паров в пределах пограничной пленки уменьшается и увеличивается количество паров, выносимых в окружающую среду. При $Se \rightarrow 0,4$ горением паров в пределах пограничной пленки очень мелких каплей можно пренебречь. Выносимые в газовый объем пары жидкого топлива сгорают по законам горения газовых смесей.

Большие значения критерия $Se \rightarrow \infty$ соответствуют диффузионному горению паров в пределах пограничной пленки.

При крупных каплях увеличивается расстояние от поверхности капли до зоны горения, вследствие чего роль конвективного теплообмена с каплей уменьшается и начинает превалировать передача тепла излучением $q_{\text{л}}$ из зоны горения. В этом случае тепловой поток q , воспринимаемый каплей [37] принимается равным

$$q = q_{\text{л}} \quad (1.13)$$

где $q_{\text{л}}$ - интенсивность излучения диффузионного пламени, воспринимаемая каплей на поверхности.

При горении со свободной поверхности интенсивность излучения диффузионного пламени не зависит от величины и формы зеркала испарения. Поэтому значения $q_{\text{л}}$, полученные для горения со свободной поверхности, могут быть использованы для расчета выгорания капли жидкого топлива.

Из выражения (1.12), получается формула для расчета времени выгорания капли:

$$\tau = \frac{\rho[(t_{\text{к}} - t_0)c_{\text{ср}} + \lambda_{\text{п}}]}{q_{\text{л}}} r_0 \quad (1.14)$$

где τ – время полного выгорания капли, с; ρ – плотность мазута, кг/м³; $c_{\text{ср}}$ – средняя теплоемкость мазута, кДж/(кг·К); $t_{\text{к}}$ и t_0 – температура кипения и начальная температура мазута, °С; $\lambda_{\text{п}}$ – теплота испарения мазута, кДж/кг; r_0 – начальный радиус капли, м; $q_{\text{л}}$ – интенсивность излучения пламени, воспринимаемая каплей мазута на поверхности, кВт/м².

Результаты расчета времени τ (сек) выгорания капли мазута с начальным радиусом 12,7 мкм в зависимости от $q_{\text{л}}$ приведены в таблица 1.3. В настоящей работе составлена программа в Mathcad по определению времени выгорания капли мазута в зависимости от тепловых потоков от факела (приложение 2).

Таблица 1.3. Время τ (сек) выгорания капли мазута с начальным радиусом 12,7 мкм в зависимости от $q_{\text{л}}$

интенсивность излучения пламени $q_{\text{л}}$, кВт/м ²	Время выгорания капли мазута τ ,сек
100	0,047
150	0,031
200	0,023
250	0,019

Как видно из таблицы 1.3, с ростом интенсивности излучения пламени время выгорания капли мазута τ сильно уменьшается, однако по кинетической теории время выгорания капли мазута составляет 0,05 секунд.

1.3. Взаимосвязь параметров, влияющих на эффективность сжигания топлива

Взаимосвязь параметров, влияющих на эффективность сжигания мазута в топках котлов показана на рисунке 1.7.

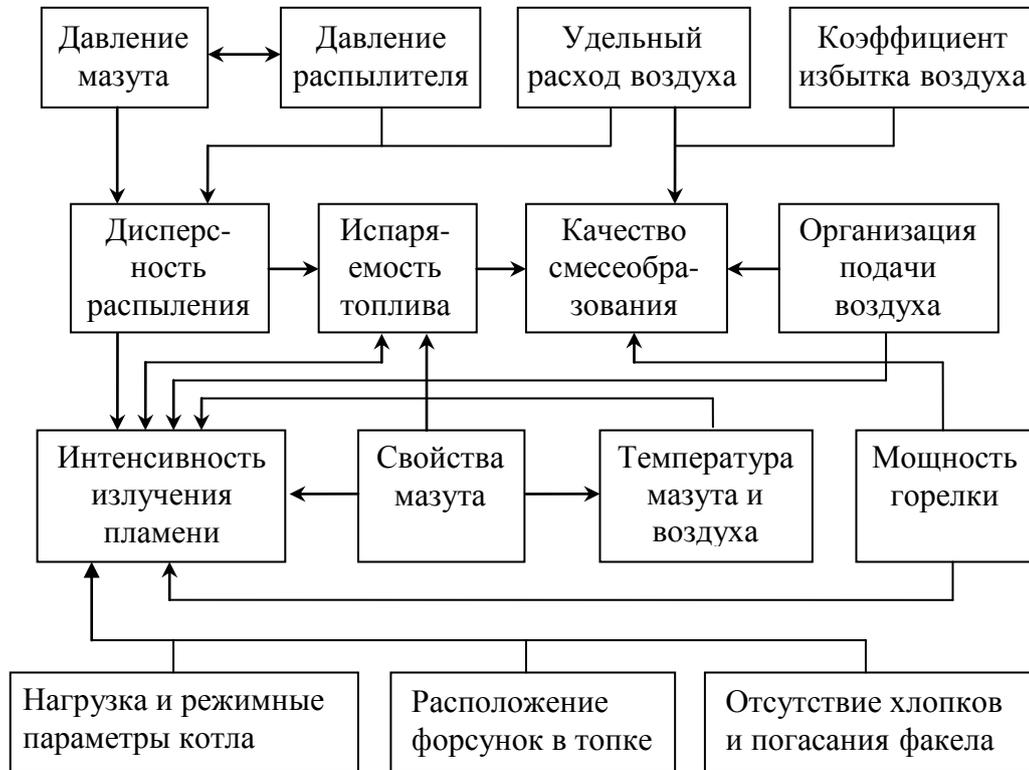


Рисунок 1.7. Взаимосвязь параметров, влияющих на эффективность сжигания мазута в топках паровых котлов

Короткий факел свидетельствует об интенсивном и экономичном горении в ограниченном объеме топочной камеры. С другой стороны излишнее укорочение факела $l_{\text{ф}}$ приведет к росту тепловых потоков на уровне горелок и к значительному падению температуры в остальном топочном пространстве, что отрицательно скажется на экономичности и надежности котла.

В этом случае для лучшего заполнения камеры сгорания факелом и выравнивания температур следует удлинить факел, например, укрупнив распыл.

По Адамову В.А. [2] горение мазута сопровождается протеканием сложнейших физических и химических процессов. Разделить процессы по времени протекания реакций и по их последовательности практически невозможно: поэтому их рассматривают обобщенно.

В диффузионной теории горения вводится квазистационарное представление о процессе: без учета изменения температур и концентраций отдельных компонентов газовой среды с уменьшением диаметра горячей капли. Допускается симметричность полей температур и концентраций. Предполагается отсутствие влияния кинетической фазы и отсутствие пиролиза при нагреве топлива и его паров.

Предполагается, что непосредственно с каплей соприкасаются пары топлива с диффузией к ним кислорода, и горение происходит на некотором расстоянии от капли при $\alpha = 1$. Это подтверждается оптическими измерениями температур и тепловых потоков от факела. Избыточный воздух разбавляет продукты горения, участвуя в массообмене в последующих стадиях горения.

При горении капли мазута в ходе прогрева идет выкипание легких фракций, вязкость оставшихся фракций возрастает, под действием образующихся внутри капли паров происходит взрыв и распад капли. Коксовая частица, образованная в результате пиролиза, горит по законам твердого тела. Прогрев капли идет за счет тепловых потоков от продуктов сгорания. Роль лучистого теплообмена при прогреве значительна.

Для эффективного и качественного сжигания топлива в котлах должно быть точно сбалансировано соотношение «топливо - воздух». Недостаток воздуха при горении вызывает неполное сгорание и, как следствие, перерасход топлива [44-50]. Избыток воздуха также приводит к перерасходу топлива на нагрев лишнего воздуха в составе отходящих газов. В обоих случаях сжигание топлива сопровождается повышенным выбросом в атмосферу высокотоксичных газов.

Для оптимизации процесса горения мазута наиболее эффективным является применение крутки воздуха в горелках, ступенчатый подвод потоков

воздуха, что способствует лучшему заполнению топочного объема факелом и выравнивания температур по топке, удлинение факела, некоторое укрупнение распыла. Это конструктивно решается применением паромеханических форсунок (рисунок 1.8).

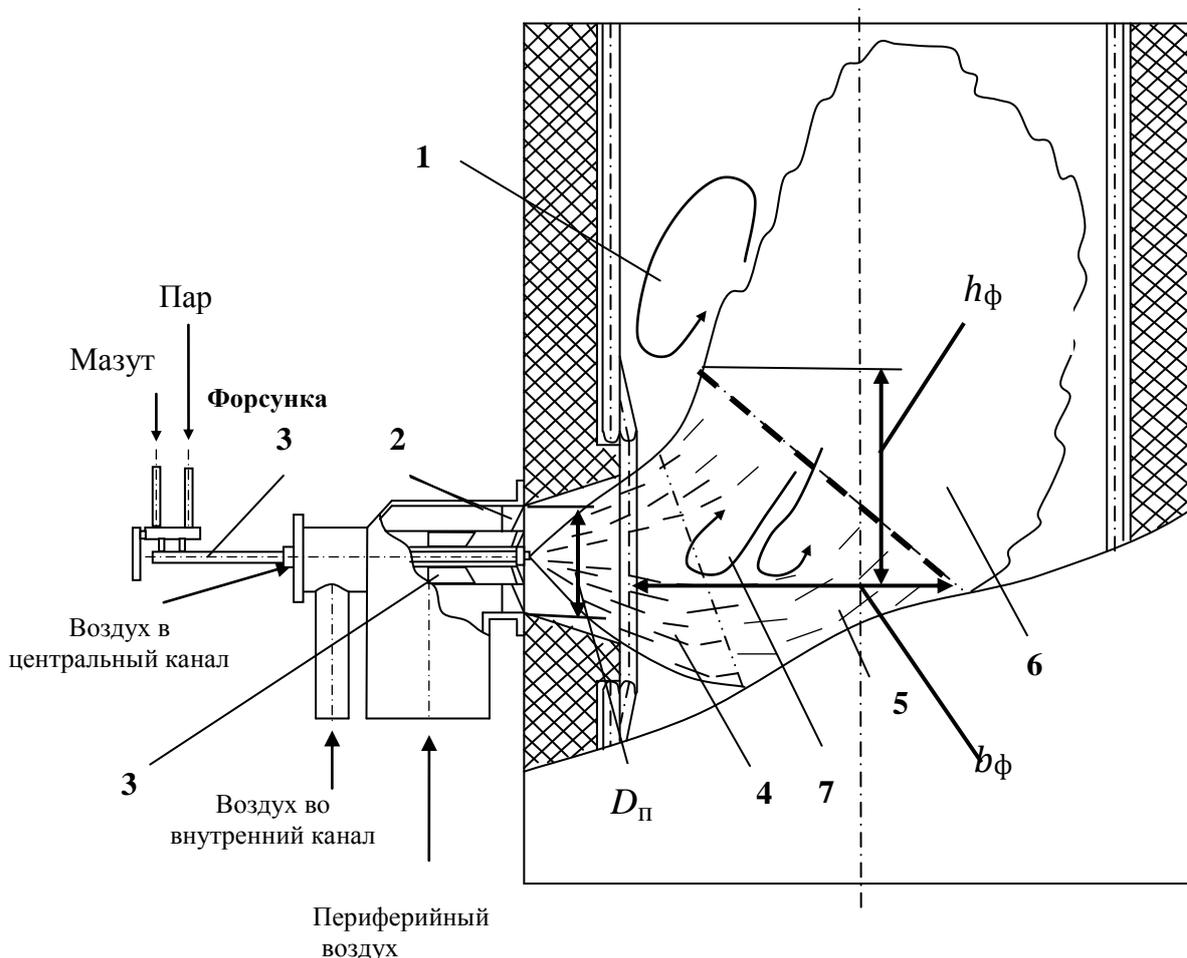
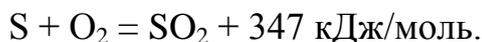
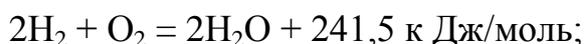
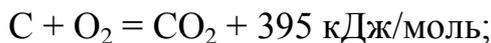


Рисунок 1.8. Схема организации экономичного процесса сжигания мазута в топке котла при помощи паромеханических форсунок:

- 1 – топочный объем; 2 -периферийный завихритель; 3 – внутренний завихритель; 4 – зона подогрева топлива; 5 – зона горения; 6 – зона дожигания; 7 –зона обратных потоков в факеле, эжектируемых из топочного объема.

Многообразный состав паров топлива, неоднородность концентраций окислителя в факеле, а также наличие температурных полей в топке с разным уровнем и высокая энергия активации конечных продуктов сгорания обуславливают сложность протекания процессов химической реакции горения

топлива. В конечном итоге в молекулярном виде реакции можно представить так:



При полном сгорании топлива в состав продуктов сгорания входят CO_2 , H_2O , SO_2 , N_2 и свободный кислород O_2 при избыточном количестве воздуха. При неполном сгорании, кроме вышеперечисленных компонентов, в дымовых газах наблюдаются CO и H_2 с возможным отсутствием свободного O_2 при сжигании с коэффициентом избытка воздуха $\alpha < 1$.

При высоких температурах и наличии свободного кислорода имеет место образование некоторого количества сернистого ангидрида ($2SO_2 + O_2 = 2SO_3 + Q$) и оксидов азота NO_x [2].

Многочисленные опыты показывают, что при сжигании тяжелых жидких топлив в пламени образуется значительно больше сажи, чем при сжигании легких топлив. Концентрации сажи в мазутном пламени при прочих равных условиях всегда выше, чем в чисто газовом пламени.

Наибольшая неравномерность распределения концентрации сажи по поперечному сечению топки наблюдается на начальном участке факела. В этой зоне для регистровых горелочных устройств с завихрителями распределение концентрации сажи по поперечному сечению топки аналогично по своему характеру распределению массы капель распыленного жидкого топлива.

По мере увеличения α неравномерность распределения концентрации сажи по поперечному сечению топки уменьшается. При совместном сжигании мазута и природного газа концентрация сажи в пламени зависит при прочих равных условиях от относительной доли в тепловыделении каждого из топлив. Увеличение доли природного газа, интенсифицируя выгорание мазута, значительно снижает концентрацию сажи в пламени.

По мере удаления от горелки концентрация сажи в пламени существенно уменьшается, а ее распределение по поперечному сечению топки становится

более равномерным [13]. Для мазутов марок М-40 и М-100 равномерные распределения концентрации сажи по поперечному сечению топки достигаются уже на расстоянии двух метров от горелки.

1.4. Постановка задач исследования

Проведенный выше анализ литературы показал, что горение мазута сопровождается протеканием сложнейших физических и химических процессов. Разделить процессы по времени протекания реакций и по их последовательности практически невозможно: поэтому их рассматривают обобщенно. На практике основная роль при определении оптимальных режимов сжигания топлива принадлежит экспериментальному изучению теплового излучения факела.

Рост тепловых потоков до предельных значений, воспринимаемых экранами, на уровне горелок приводит к падению температуры в горизонтальном газоходе, которое отрицательно сказывается на экономичности и надежности эксплуатации котла. Прогрев капель мазута преимущественно идет за счет падающих от продуктов сгорания лучистых потоков. В этой связи, экспериментальное изучение условий оптимального распределения тепловых потоков является актуальным для повышения эффективности совместного сжигания газа и мазута.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1. Разработка экспериментального оборудования и методики исследования.
2. Разработка модернизированного варианта форсунки и исследование влияния применяемого типа форсунок на повышение эффективности сжигания мазута.
3. Исследование влияния схем совместного сжигания газа и мазута на температуру факела в зависимости от типа форсунок и марок котлов для повышения энергетической эффективности котлов.
4. Исследование влияния схем сжигания газа, мазута и совместного сжигания: газ, мазут на КПД котлов.

2. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

2.1. Разработка стенда для тарировки форсунок

На данном этапе работы производился выбор методики для проведения экспериментов и подбор форсунок на водяном стенде.

Экономичность и надежность котла в значительной степени зависят от качества работы мазутных форсунок [51-53]. Равномерное распределение топлива между всеми работающими горелками - неременное условие для обеспечения его полного выгорания.

По ОСТ 108.836.03 – 80 разброс пропускной способности форсунок, устанавливаемых на котле, допускается 1,5 % от среднего значения. Даже при их изготовлении в заводских условиях этот разброс значителен; еще большая разница пропускной способности наблюдается у форсунок, изготавливаемых в местных условиях. Для определения пропускной способности, угла раскрытия факела, качества распыливания и качества сборки форсунки испытываются на водяном стенде [2].

Простейший стенд для испытания механических форсунок показан на рисунке 2.1. Ствол форсунки 2 поддерживается стойкой, опирающейся на пол котельной. Вода поступает через запорный 8 и регулирующий (игольчатый) 7 вентили от насосов (чаще всего питательных через охладитель) на измерительный участок 6 с расходомерной шайбой 5 и вторичным прибором 3. На расходомерном участке (с условным диаметром не менее D_y 50 по правилам расчета расходомерных шайб) устанавливается манометр 4. Вода из форсунки поступает в собирательную емкость 1, а из нее сливается в канализацию.

При тарировке паровых форсунок стенд несколько сложнее: требуется еще участок с подводом распыливающего агента (пар заменяют сжатым воздухом) также с измерительным участком для определения количества распыливающего агента. Стенды для регулируемых центробежных форсунок еще более сложны.

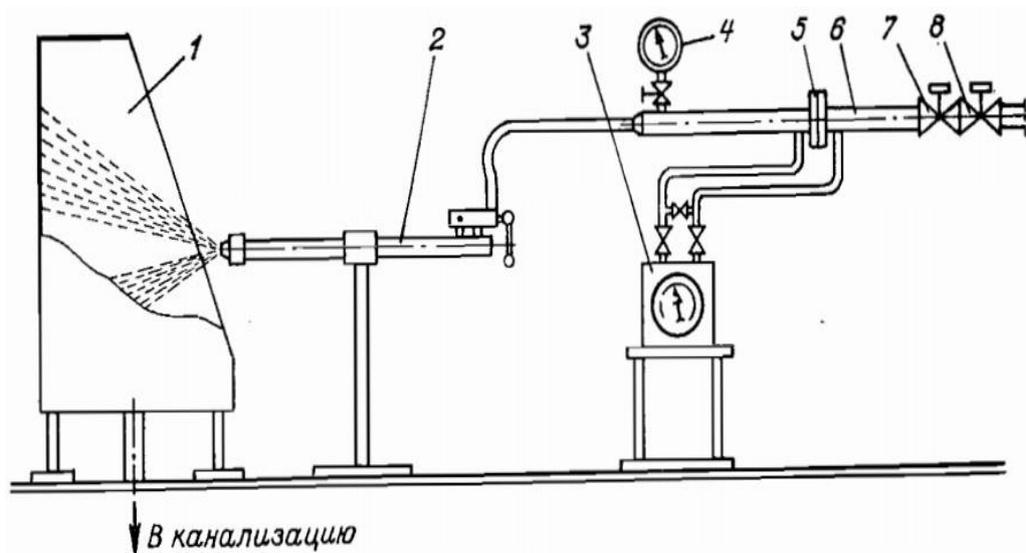


Рисунок 2.1. Стенд для тарировки форсунок:

1 – щиток; 2 – форсунка; 3 – вторичный прибор; 4 – манометр; 5 – расходомерная шайба; 6 – расходомерный участок; 7 – регулирующий вентиль; 8 – запорный вентиль.

В настоящей работе разработан стенд [54], позволяющий тарировать механические и паромеханические форсунки. В механических форсунках распыл мазута происходит за счет давления и отверстий в распыливающей головке, в паромеханических – дополнительно за счет энергии водяного пара под давлением.

Паромеханическая форсунка 1 (рисунок 2.2.) представляет собой стволовую трубчатую часть, на одном конце которой установлена на резьбе распыливающая головка, а на другом конце имеются штуцера для подвода мазута и распыливающего агента – пара. На рисунке 2.2. штуцера условно не обозначены. На стенде мазут заменен водой, а распыливающий агент – сжатым воздухом, реальный факел в топке – заменен модельным факелом на стенде.

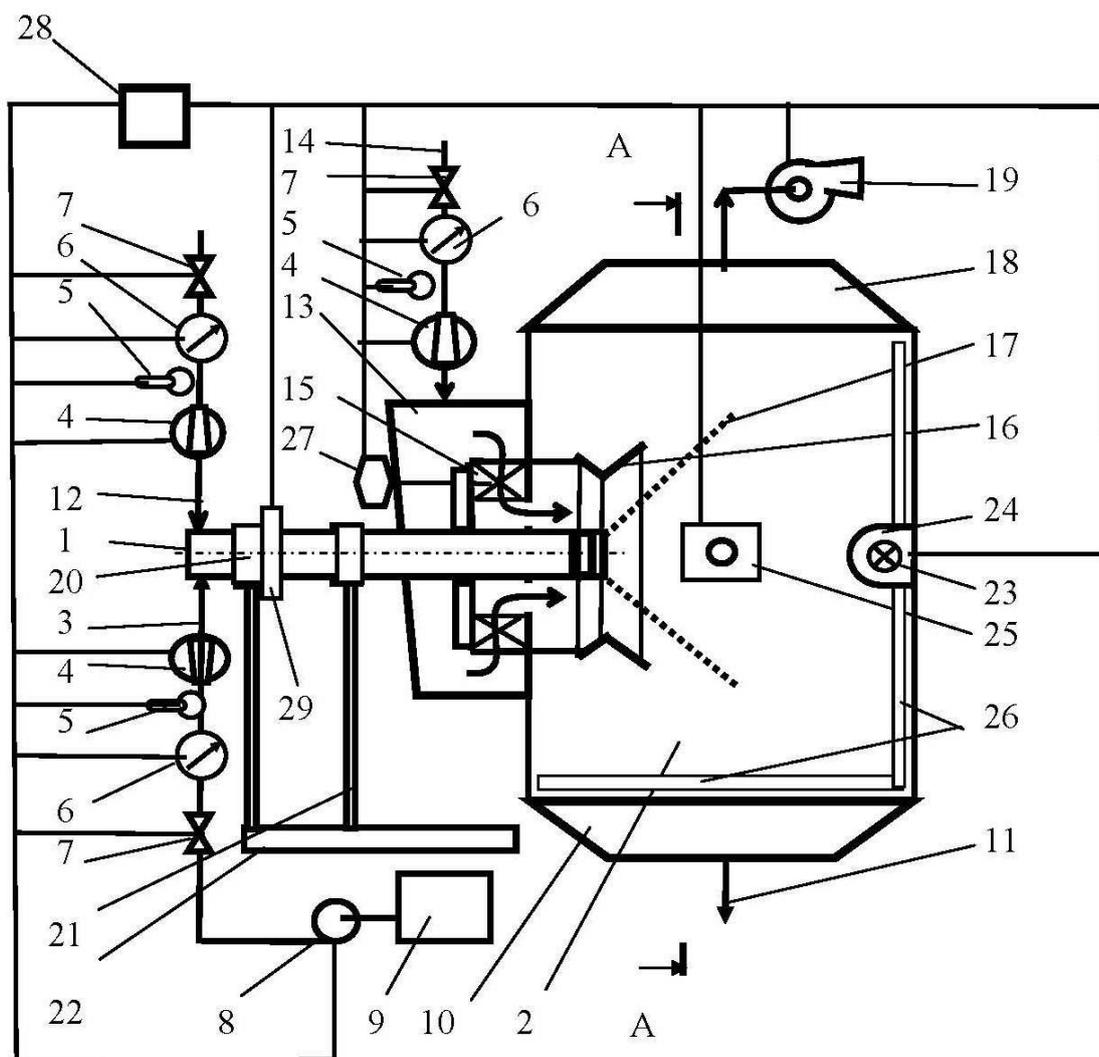


Рисунок 2.2. Стенд для тарировки мазутных форсунок:

1 – форсунка, 2 – камера впрыска, 3 – труба для подачи воды, 4 – расходомер, 5 – термометр, 6 – манометр, 7 – запорно-регулирующий вентиль, 8 – электрический насос, 9 – расходный бак для воды, 10 – поддон, 11 – слив воды, 12 – трубопровод для подачи распыливающего воздуха, 13 – подача воздуха в завихритель, 14 – приемный воздушный короб, 15 – лопатки завихрителя, 16 – диффузор, 17 – диспергированная и закрученная воздушно-водяная смесь, 18 – вытяжной короб, 19 – вентилятор выброса воздуха в атмосферу, 20 – кронштейн, 21 – стойка, 22 – основание, 23 – осветительная лампа, 24 – защитный колпак, 25 – видеокамера, 26 – координатные линейки, 27 – узел поворота лопаток завихрителя, 28 – электронный блок сбора сигналов и управления стендом обработки сигналов и управления, 29 – узел автоматизированного осевого перемещения форсунки

Камера впрыска 2 предназначена для удерживания распыленной диспергированной и закрученной воздушно-водяной смеси 17 во взвешенном состоянии, имитирующей факел в топке котла.

Труба 3 для подачи воды с расходомером 4, термометром 5, манометром 6 и запорно-регулирующим вентилем 7, соединенные электрическими связями с электронным блоком сбора сигналов и управления стендом, служат для измерения и регулирования параметров модельной среды – воды на форсунку 1.

Электрический насос 8 подает воду из расходного бака 9 по компьютерной программе электронный блока 28. После прохождения через форсунку 1 и пребывания в виде мелко раздробленных частиц во взвешенном состоянии в камере 2 в виде «холодного тумана» вода конденсируется и стекает в поддон 10, откуда стекает через трубу слива 11 в отстойник для последующего использования.

С помощью трубопровода 12 для подачи распыливающего воздуха производится дробление капель воды потоком воздуха непосредственно в форсунке 1. Размещенные на трубопроводе 12: расходомер 4, термометр 5, манометр 6 и запорно-регулирующий вентиль 7 служат для измерения температуры и давления и регулирования расхода воздуха, подаваемого из ресивера и нагнетаемого компрессором при различных давлениях.

Приемный воздушный короб 13 (выполнен идентичным коробу горелок на котле) служит для равномерного подвода по окружности воздуха, подаваемого через трубопровод 14 на лопатки завихрителя 15, который создает закрученные струи воздуха для дальнейшего перемешивания частиц жидкости с воздухом. В окончательном виде образуется диспергированная и закрученная воздушно-водяная смесь 17, моделирующая аэродинамику струи факела в топке котла. Параметры этой взвеси: диаметр, длина, конфигурация факела и размер микрочастиц в этой факельной струе, регистрируются видеокамерой 25 с помощью оптических датчиков координатных линеек 26.

Поворот лопаток завихрителя 15 производится узлом 27 по команде компьютерной программы с электронного блока 28 сбора сигналов и управления стендом. Воздух в трубопровод 14 подается от ресивера компрессора (на рисунках 2.2 и 2.3 ресивер и компрессор не показаны).

Диффузор 16 служит для первоначального развертывания под определенным углом выхода диспергированной и закрученной воздушно-водяной смеси 17 от торца форсунки 1 (на рисунке 2.2 торец показан утолщенной линией).

Вытяжной короб 18 и электровентилятор 19 служат для выброса избыточных воздушно-капельных взвесей в атмосферу и моделируют разрежение в топке котла.

Стойки 21 и основание 22 служат для поддержания веса форсунки 1 при ее размещении на стенде. Кронштейны 20 служат для направления корпуса форсунки 1 при ее продольном движении при помощи узла 29 автоматизированного осевого перемещения форсунки, управляемого по команде компьютерной программы электронного блока 28 сбора сигналов и управления стендом.

Защитный колпак 24 предохраняет лампу 23 от попадания на нее капель воды. Кординатные линейки 26 имеют оптические датчики фиксирования в плоскостном и объемном изображении границ взвеси -диспергированной и закрученной воздушно-водяной смеси 17, представляющей собой конфигурации модельного факела.

Компьютеризированный электронный блок 28 сбора сигналов и управления стендом имеет монитор с дублированием записи на бумажном носителе всех параметров диспергированной и закрученной воздушно-водяной смеси 17, давлений воды и воздуха и датчиков сигнала с координатных линеек 26 и сигнала с видеокамеры 25. С блока 28 производится управление и регистрация продольных осевых перемещений форсунки 1 относительно диффузора 16, осуществляемых узлом 29.

От линейного расстояния по оси торца форсунки 1 относительно пережима диффузора 17 (на рисунке 2.2 пережим – наименьший диаметр диффузора позицией не обозначен) зависит угол раскрытия факела - диспергированной и закрученной воздушно–водяной смеси 17 и длина факела, которая необходима для полного выгорания мазута в реальных условиях.

На рисунке 2.2 тонкими линиями показаны электрические связи между первичными датчиками с электронным блоком сбора сигналов и управления. Толстыми линиями показаны основные узлы стенда.

На рисунке 2.3 в поперечном сечении камеры впрыска электрические связи условно не показаны.

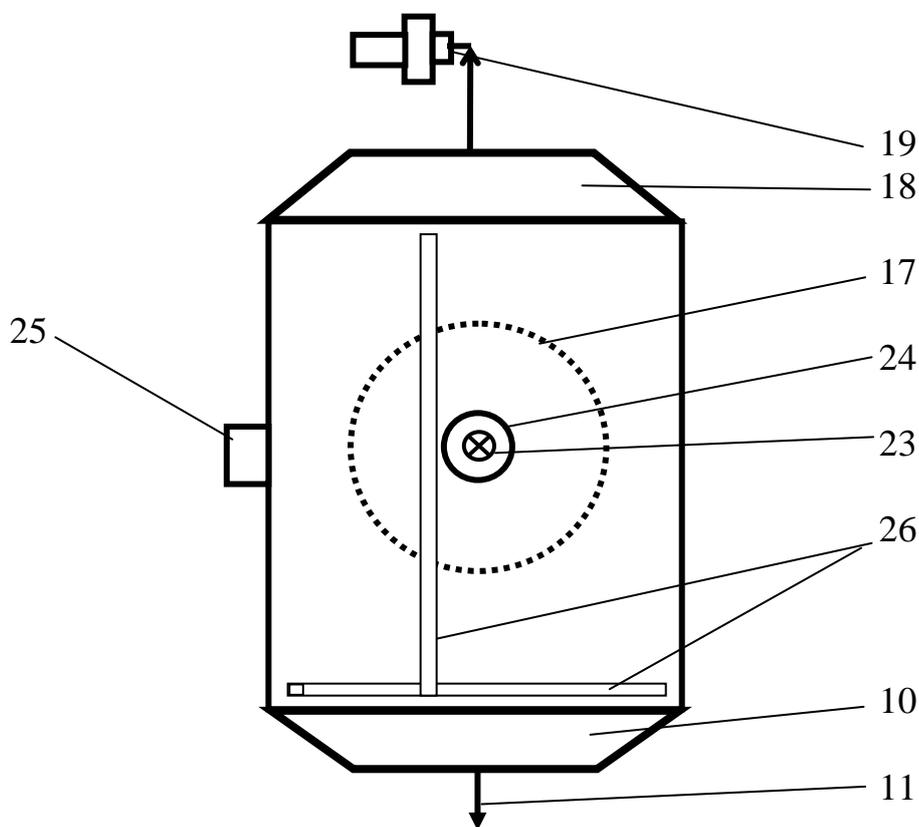


Рисунок 2.3. Стенд для тарировки мазутных форсунок (вид А – А)

Порядок проведения тарировки мазутных форсунок следующий. Тарируемая форсунка 1 устанавливается в направляющих кронштейнах 20 и крепится в узле 29 автоматизированного осевого перемещения форсунки. Уплотняется место прохода форсунки 1 через приемный воздушный короб 13.

К форсункам 1 подсоединяются трубы подачи воды 3, трубопроводы для подачи распыливающего воздуха 12.

С блока 28 включаются последовательно вентилятор 19 выброса влажного воздуха, лампа 23, видеокамера 25, датчики координатных линеек 26, подача воздуха 14 в приемный воздушный короб 13 и на лопатки 15 завихрителя, подача воздуха 12 в форсунку 1, подача воды по трубе 3 в форсунку 1.

В форсунке 1 происходит дробление воды на капли с помощью распыливающего воздуха и давления воды и последующая закрутка смеси потоком воздуха, выходящим после лопаток завихрителя 15.

С помощью видеокамеры 25 и датчиков на координатных линейках 26 регистрируются длина, диаметр и границы конфигурация модельного факела, которые получаются в результате дробления капель воды в форсунке при заданном положении относительно диффузора 16 среза форсунки 1, отмечаемого с помощью узла 29 автоматизированного осевого перемещения форсунки 1 на мониторе электронного блока 28.

Регистрация линейного расстояния автоматически перемещаемого торца форсунки 1 относительно пережима (наименьшего диаметра) диффузора 16, при котором получаются оптимальные параметры модельного факела.

Сигналы с видеокамеры 25 и датчиков на координатных линейках 26 передаются с помощью электрической связи на электронный блок 28, на который также подаются давление, температура и расход распыливающего воздуха, воды и значения углов расположения лопаток 15 крутки воздуха.

На основании этих сигналов в табличной и графической форме по компьютерной программе строятся зависимости расхода от давления воды и воздуха, диаметра капель от давления воды и воздуха, длины и диаметра модельного факела от давления воды и воздуха, в зависимости от направления крутки воздуха на лопатках 15 и положения торца форсунки 1 относительно диффузора 16. Выбирается оптимальное положение торца форсунки 1 относительно диффузора 16, при котором получается необходимая длина и диаметр факела и мелкодисперсность дробления жидкости. Затем производится

перерасчет расходных и регулировочных характеристик форсунки с модельной среды – воды на мазут.

При тарировке форсунок необходимо симметрично от центра котла ставить форсунки с разностью производительностей не более 1,5 %. Устанавливать форсунки с разницей в производительности более 2,5% запрещается.

Особенность данного стенда заключается в применении узла автоматизированного осевого перемещения форсунки относительно диффузора, позволяющего воздействовать на аэродинамику смесеобразования путем изменения точек контакта струй закрученных потоков воздуха с распыливаемой аэродисперсной жидкой средой и автоматизированным определением оптимального положения форсунки в топке относительно диффузора по компьютерной программе. Технический результат - улучшение распыливания и выбора оптимального положения форсунки относительно диффузора в топке и, как следствие, устранение недогорания мазута в топке [54].

Стенд позволяет определить диаметр и длину факела в зависимости от производительности форсунки, степени дробления капель, влияния взаимодействия круток воздуха и мазута на длину и диаметр факела.

2.2. Разработка конструкции термозонда с двумя термопарами

Основной целью экспериментов по определению оптимального положения факела в топке является выявление режимных условий, при которых обеспечивается работа топки с минимальными потерями теплоты, отсутствием шлакования радиационных поверхностей нагрева, обеспечением надежной циркуляции в котле и расчетной температуры перегрева пара [55-58].

О положении факела в топке судят по распределению температуры в характерных сечениях топочной камеры по ее высоте. Для этого на высоте

топки необходимо иметь равномерно расположенные лючки, через которые производится измерение температуры [59].

В практике измерений температуры на энергетических установках среди контактных методов наибольшее применение нашли термопары. Принцип действия термопар основан на свойстве металлов, сплавов и некоторых неметаллических материалов создавать термо-э.д.с. при нагревании места соединения двух разнородных проводников.

В работе для измерения температуры продуктов сгорания в топке разработан пирометрический термозонд, который позволяет измерять температуру газового потока при помощи двоярных неэкранированных термопар без отсоса газа с термоэлектродами различных диаметров (рисунок 2.4.), выполненных из одинаковых материалов [68]. В термопаре ХА положительным электродом является проволока из никелевого сплава хромель НХ 9,5, отрицательным – проволока из никелевого сплава алюмель НМЦАК 2-2-1 [69]. Холодный спай термопары имел температуру окружающего воздуха, что учитывалось при обработке результатов экспериментов согласно рекомендациям [58,70].

Измерение температуры факеле выполнялись в следующем порядке: термозонд устанавливался перед лючком на специальном приспособлении для крепления и перемещения. Включалась охлаждающая вода, ее подача контролировалась наличием сплошной ровной струи воды в сливной линии. Зонд вводился в топку в первую точку измерения (на расстоянии 100 - 150 мм от экранных труб). Измерялась температура (термоЭДС) и показания каждой термопары записывались отдельно в протоколе экспериментальных данных. Затем термозонд передвигался зонд на очередную отметку.

Открытые рабочие концы этих термопар помещены в общий кожух с водяным охлаждением и выдвигаются при измерении на 100 мм в одну и ту же точку потока. В настоящей работе одна из термопар имеет диаметр термоэлектродов d_1 , равный 0,5 мм, диаметр другой d_2 1,2 мм. В промежутках

между очередными измерениями обе термопары для защиты их рабочих концов вдвигаются посредством подвижной трубки внутрь кожуха.

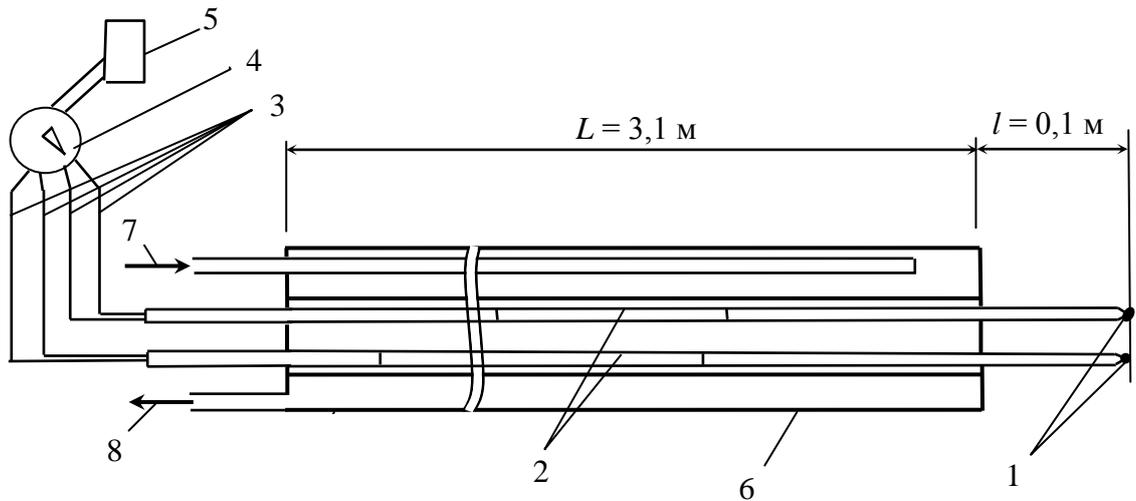


Рисунок 2.4. Схема устройства экспериментального термозонда с двумя термопарами, применяемого для измерения температуры факела:

1 – рабочие концы термопар; 2 – фарфоровая изоляция;
 3 – термоэлектроды; 4 – переключатель термопар; 5 – вторичный измерительный прибор (электронный цифровой вольтметр); 6 – кожух; 7 – вход воды; 8 – выход воды.

Поскольку поверхность рабочих концов термопар, участвующих в лучистом и конвективном теплообмене, различна ($d_1 \neq d_2$), то, естественно, для них будут различны конвективная теплоотдача от газовой среды к рабочему концу (спаю), излучение газовой среды, поглощенное рабочим концом, эффективное излучение стенок, прошедшее через поглощающий газ и поглощенное рабочим концом, а также собственное излучение рабочего конца [71-72].

На рисунке 2.5 представлена рабочая сторона термозонда с двумя термопарами.

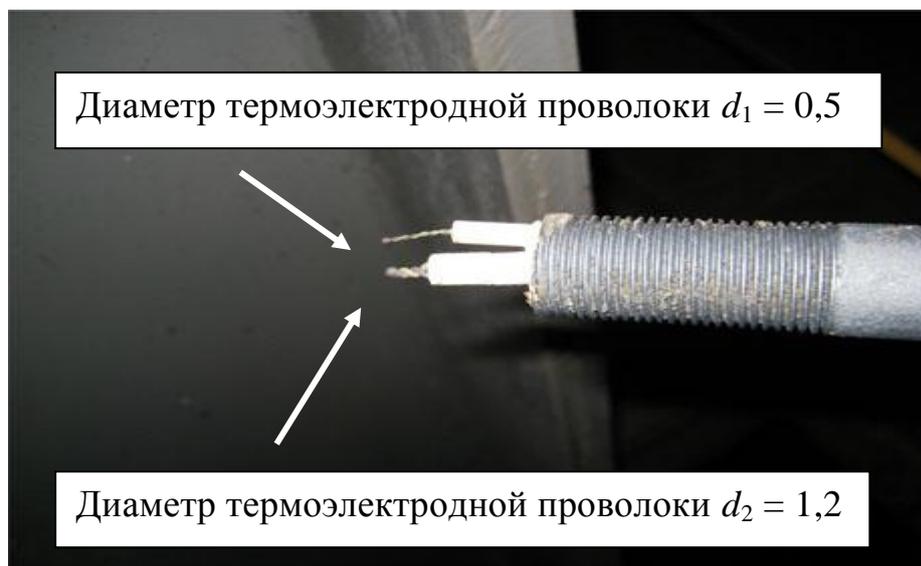


Рисунок 2.5. Измерительная сторона термозонда с двумя термопарами, применяемого для измерения температуры факела

Действительная температура газового потока для используемого метода без учета поправок на температуру свободных концов термопары, градуировку шкалы вторичного прибора и без учета коэффициента C кривизны характеристики термопары, °С [60-67]:

$$t = t_1 + A_o(t_2 - t_1) \quad (2.1)$$

где t_1 и t_2 – температуры, соответствующие показаниям термопар с диаметрами термоэлектродов d_1 и d_2 , °С; A_o – коэффициент, учитывающий влияние на показания термопар потери тепла лучеиспусканием.

Значения A_o находились по формуле (2.2.):

$$A_o = 1 / (1 - (d_2 / d_1)^{1-m}) \quad (2.2)$$

где m – коэффициент, зависящий от числа Рейнольдса:

$$R_e = w l / \nu \quad (2.3)$$

где w – скорость газов в топке котла, м/с; l – характерный линейный размер, м; ν – кинематический коэффициент вязкости газа, м²/с.

Исходя из этого, получается, что для турбулентного режима $m = 0,5$. Таким образом, из формулы (2.2.) получается $A_o = 1,56$. При $t_1 = 1177$ °С и $t_2 = 1155$ °С действительная температура газового потока для используемого метода без учета поправок на температуру свободных концов термопары будет $t = 1130$ °С.

Погрешность в определении температуры газового потока по показаниям двух неэкранированных термопар составляет, °С [62, 66, 67]:

$$\Delta t_2 = (2 A_o + 1) + (t_2 - t_1) \Delta A_o \quad (2.4.)$$

где ΔA_o – погрешность в определении коэффициента A_o , равная $\pm 0,25...0,32$.

При $t_1 = 1177$ °С и $t_2 = 1155$ °С, $\Delta t_2 = 22$ °С, что составляет чуть больше 1 % от измеренной температуры.

Значения Δt_2 может быть принято в зависимости от температуры газов в потоке и компоновки газоходов в пределах 3–25°. Наибольшими преимуществами преобразователей термических (термопар) являются их малые размеры и связанная с этим незначительная тепловая инерция, а так же они позволяют измерять температуру в пределах от – 200 до 2500 °С, при этом они дают возможность определить точечное значение температуры в месте установки термочувствительного элемента (рабочего конца ПТ).

При экспериментах в послойных измерениях температуры факела рабочий спай вместе с кожухом вдвигался через лючок в топку котла через каждые 0,5 м и производился отсчет показаний. Максимально допустимая температура работы пирометрического термозонда, достигнутая с термопарой типа хромель-алюмель ХА до 1200 °С. Каолиновая нить при этой температуре, с углублением кожуха термозонда на всю длину до 2000 мм вглубь топки термически не разрушалась, а лишь происходило локальное потемнение нити в местах контакта с ее внутренней поверхностью защитного трубчатого экрана.

2.3. Разработка конструкции отсосного пирометра

Для бесконтактного измерения температуры продуктов сгорания в топке разработан пирометр с отсосом топочных газов, конструкция которого и принцип действия предназначены для устранения погрешности, связанной с влиянием конвективного теплообмена между горячим спаем термопары и движущимися со скоростью около 5 м/сек дымовыми газами.

Пирометр способен производить забор топочных газов до 2 м в глубину топочного объема котла. Для получения данных по температуре от милливольт использовалась градуировочная формула (приложение 3):

$$t = 24,44U + 20 \quad (2.5.)$$

где t – искомая температура; U – показания милливольт.

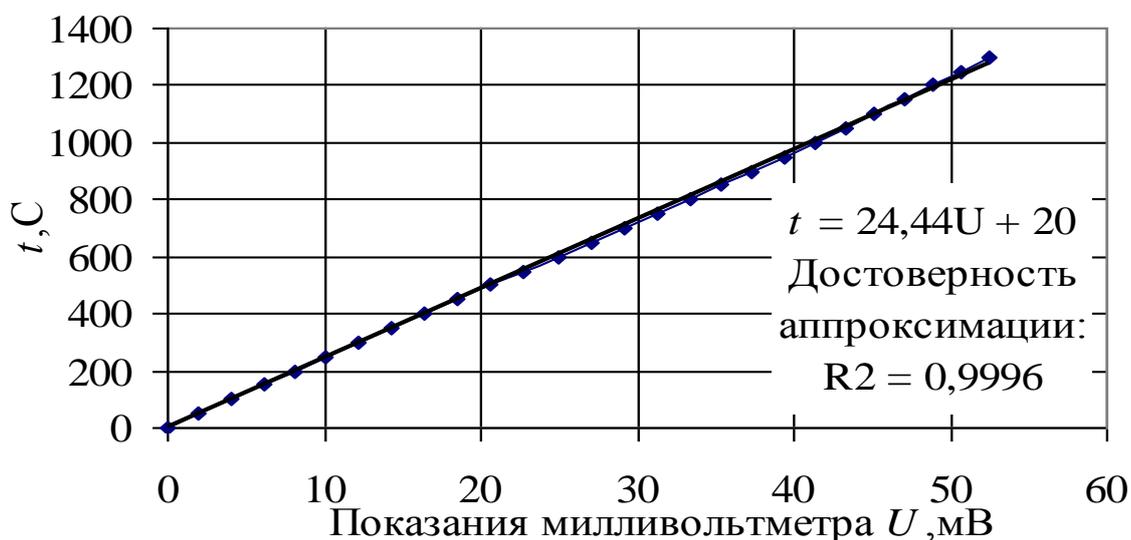


Рисунок 2.6. График градуировки термопары хромель-алюмелевой ХА

Электронный цифровой вольтметр позволял считывать показания в виде мВ. График на рисунке 2.6 позволяет переводить милливольты в °C.

Данный пирометр (рисунок 2.7) состоит из хромель-алюмелевой термопары с термоэлектродом в 1,2 мм, фарфоровой изоляции от конца спая до вторичного измерительного прибора (электронный цифровой вольтметр) и трех трубок. Первая труба для отсоса продуктов сгорания с диаметром 15 мм; вторая с диаметром 51 мм для охлаждения водой первую трубку; и третья для выхода воды с диаметром 25 мм.

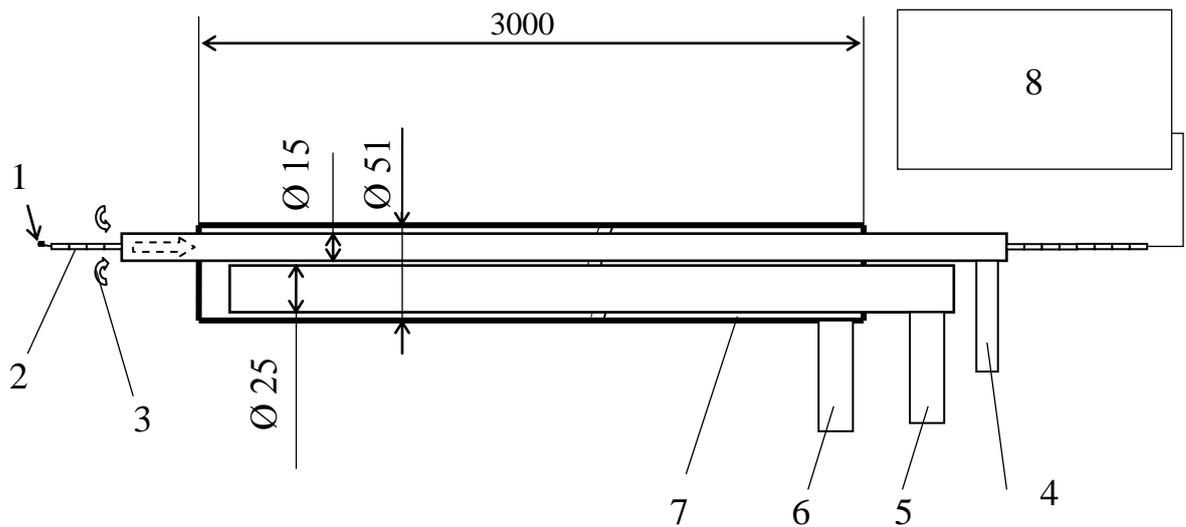


Рисунок 2.7. Пирометр с отсосом топочных газов: 1 –ХА термопара с диаметром термоэлектрода 1,2 мм; 2 – фарфоровая изоляция; 3 – забор продуктов сгорания; 4 – патрубок отсоса продуктов сгорания для замера температуры; 5 – трубка для ввода воды; 6 – трубка для выхода воды; 7 – трубка для циркуляции воды; 8 – вторичный измерительный прибор.

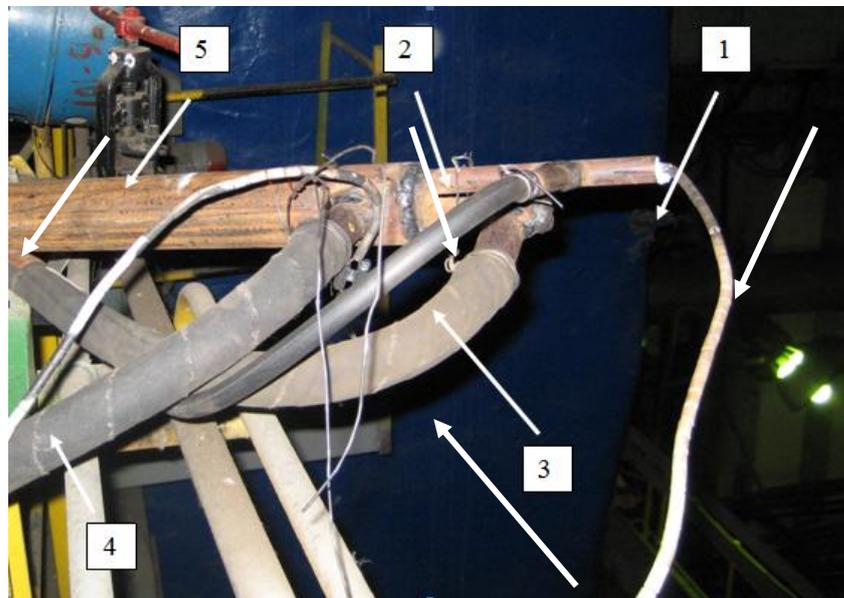


Рисунок 2.8. Рабочий пирометр с отсосом топочных газов:

1 – фарфоровая изоляция; 2 – отсос продуктов сгорания для замера температуры; 3 – трубка для ввода воды; 4 – трубка для выхода воды; 5 – трубка для циркуляции воды.

Погрешность определения температуры контактным способом с помощью термопары рассчитывается на основе средних приведенных значений частных погрешностей в виде, %:

$$\sigma_T = 1,1(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2 + \sigma_5^2 + \sigma_6^2)^{0,5}, \quad (2.6)$$

где σ_1 - погрешность, вызванная неоднородностью термоэлектродных материалов, $\pm (0,15 - 0,2) \%$; σ_2 - погрешность градуировки термопары, $\pm (0,2 - 0,3) \%$; σ_3 - погрешность вторичного прибора [$\pm 0,15 \%$]; σ_4 - погрешность определения сопротивления термоэлектрической цепи термопары при измерении милливольтметром, $\pm (0,5) \%$; σ_5 - погрешность определения температуры свободных концов (холодных спаев), $\pm (0,2 - 0,3) \%$; σ_6 - погрешность установки термопар $\pm (0,2 - 0,3) \%$.

Подставляя численные значения частных погрешностей в формулу (2.6), получаем значение средней квадратичной погрешности измерения температуры с помощью термопар в среднем около $\sigma_T = \pm 1,8 \%$. Полученные в настоящей работе значения погрешностей не превышают погрешности экспериментов приведенные в работах [73-75].

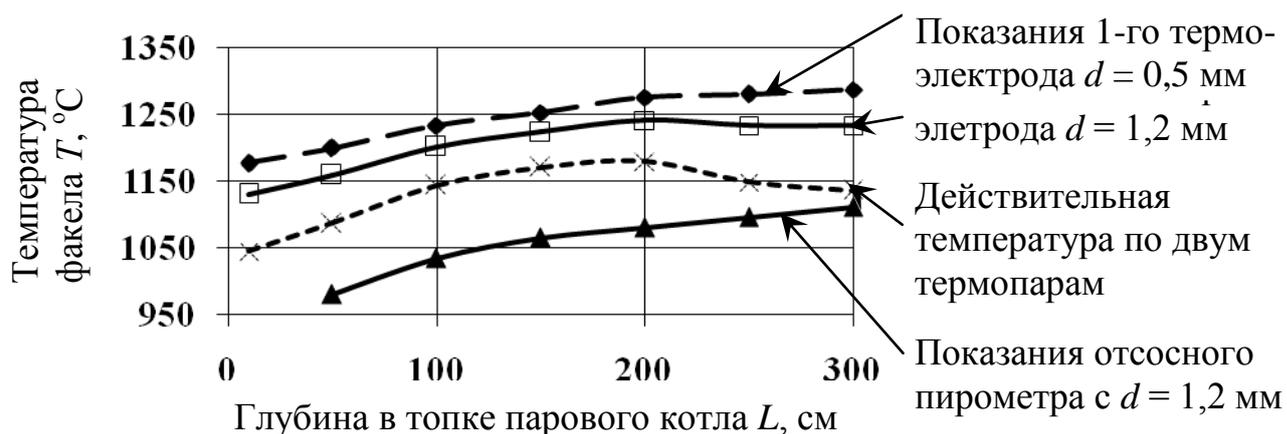


Рисунок. 2.9. Экспериментальные значения температуры факела T по глубине топki L через лючок №5 на отметке 11,2 метров котла ТГМ-84Б при паропроизводительности 280 т/ч

2.4. Разработка оборудования для измерения интенсивности излучения факела

Измерения интенсивности излучения факела в топках котлов проводились при помощи радиометра полного излучения ТЕРА-50 с градуировкой РК-15, представленного на рисунке 2.10.

Принцип действия телескопа основан на измерении теплового излучения нагретого тела. Лучистый поток, испускаемый нагретым телом, концентрируется линзой на термодатчик, который преобразует энергию излучения в электрическую.

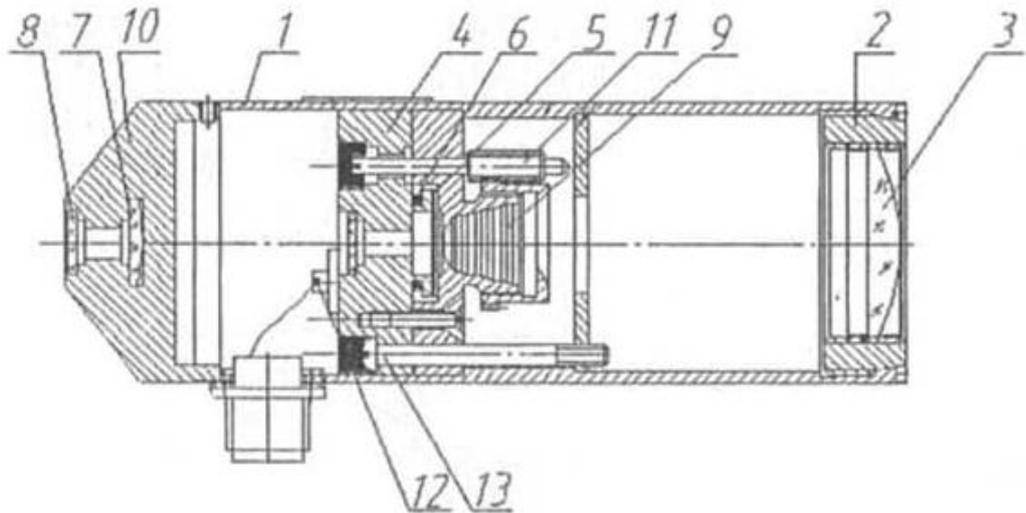


Рисунок 2.10. Составляющие телескопа ТЕРА -50 РК-15

1 - корпус, 2 - оправа, 3 - линза, 4 - корпус термобатареи; 5 - термобатарея, 6 - компенсационное сопротивление, 7 - линза окуляра, 8 - защитное стекло; 9 - диафрагма, 10 - крышка, 11 - трубка, 12 - контактный винт, 13 - винт.

Техническая характеристика:

Диапазон измеряемых температур, °С.....400-2500
 Показатель визирования телескопа: РК-151/15
 Время установления показаний телескопа, s, не более10
 Максимальное давление в кожухе и патрубке водяного охлаждения, Р:.....6x10⁵

Масса, кг, не более:

телескопа1,4
защитной арматуры.....12

Габаритные размеры, мм, не более:

телескопаD56x170
защитной арматуры.....D125x200

Номинальное рабочее расстояние, м.....1±0,02

Принципиальная упрощенная схема оптической части радиометра приведена на рисунке 2.11.

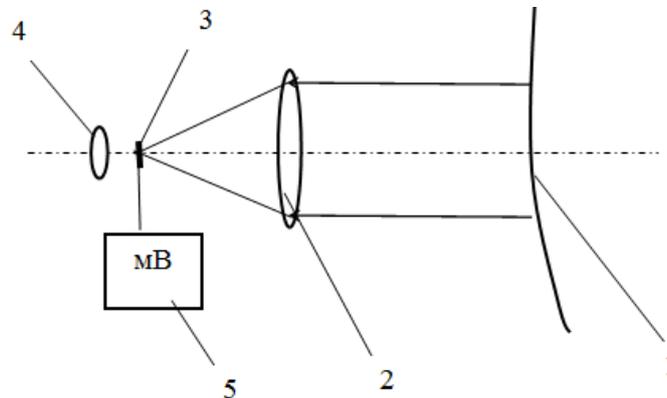


Рисунок 2.11. Принципиальная схема оптической части радиометра:

1- излучающий объем факела в топке котла; 2 – флюоритовая линза объектива; 3 – приемник интенсивности излучения – термостолбик; 4 – линза окуляра; 5 – регистрирующий вторичный прибор – цифровой милливольтметр

Приемник интенсивности излучения 3 снабжен системой термостатирования, учитывающей изменение температуры окружающего воздуха и сохраняющей постоянство градуировки. Окуляр 4 служит для контроля заполнения линзы объектива падающим лучистым потоком.

При измерениях регистрируется тепловой поток E_0 в виде электрического сигнала U_0 в мВ, отнесенного к градуировке РК-15 при степени черноты излучающего объекта (абсолютно черного тела), равной $\varepsilon_0=1$. Переход от

температуры абсолютно черного тела к энергетическим единицам осуществлялся по формуле Стефана-Больцмана [77-79]:

$$E = \varepsilon \sigma T^4, \quad (2.7)$$

где ε - реальная степень черноты продуктов сгорания, определяемая по содержанию трехатомных газов; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ - постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м²·К⁴); T - абсолютная температура излучающего объекта, К.

Из этой формулы температура продуктов сгорания определяется как

$$T = (E/\varepsilon\sigma)^{0,25}. \quad (2.8)$$

Стандартная зависимость термо-э.д.с. в милливольтках от температуры объекта при коэффициенте излучения объекта $\varepsilon=1$ приведена в таблице 2.1 [80].

Таблица 2.1. Напряжение на выходе радиометра РК-15 в зависимости от температуры объекта

Температура $t_{\text{фп}}, \text{ }^\circ\text{C}$	Напряжение в мВ при температуре, $^\circ\text{C}$									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
400	0,16	0,18	0,20	0,22	0,24	0,26	0,29	0,32	0,35	0,38
500	0,41	0,44	0,47	0,51	0,54	0,58	0,63	0,67	0,72	0,77
600	0,82	0,88	0,94	1,01	1,08	1,15	1,22	1,30	1,38	1,47
700	1,56	1,66	1,77	1,88	2,00	2,12	2,24	2,37	2,50	2,64
800	2,79	2,95	3,11	3,27	3,44	3,62	3,80	3,98	4,17	4,37
900	4,58	4,79	5,00	5,23	5,46	5,70	5,96	6,23	6,50	6,77
1000	7,05	7,31	7,60	7,90	8,20	8,52	8,86	9,20	9,56	9,93
1100	10,31	10,69	11,10	11,51	11,92	12,34	12,76	13,19	13,63	14,07
1200	14,50	14,97	15,45	15,93	16,42	16,92	17,44	17,97	18,52	19,08
1300	19,64	20,23	20,83	21,41	22,03	22,66	23,30	23,95	24,62	25,30
1400	26,00	26,71	27,43	28,16	28,91	29,68	30,47	31,27	32,08	32,91
1500	33,75	-	-	-	-	-	-	-	-	-

В таблице 2.1 в вертикальной графе даны значения температуры через интервалы 100 $^\circ\text{C}$, а в горизонтальной – через интервалы 10 $^\circ\text{C}$.

График градуирования радиометра приведен на рисунке 2.12.

Градуировка радиометра

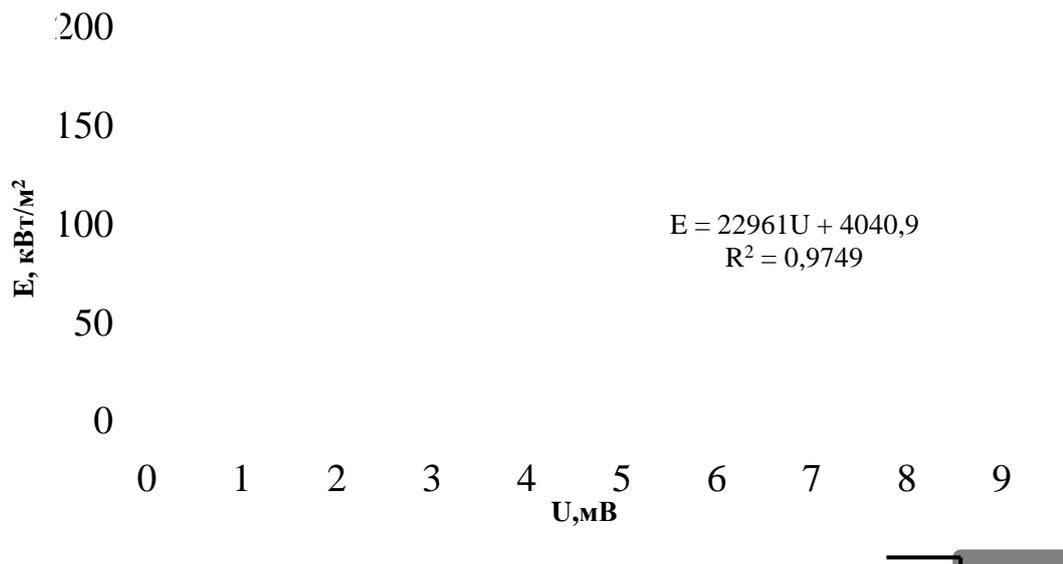


Рисунок 2.12. Градуирование радиометра по АЧТ:

U - показания радиометра в мВ; E - соответствующая этим показаниям плотность излучения абсолютно черного тела (АЧТ) в Вт/м²

Для радиометра аппроксимирующая формула перевода показаний U (выраженных в милливольтгах) в энергетические единицы E (Вт/м²) имеет вид:
 $E = 22961 U + 4040,9$.

Дополнительный контроль и тестирование температуры излучающей полости абсолютно черного тела выполнялось при снятом радиометре с помощью инфракрасного пирометра АК ИП -9306. Измеренная температура является радиационной температурой.

По температуре $t_{\text{фп}}$ тепловой поток от факела также определялся расчетным путем по формуле:

$$q_{\text{л}} = 5,67 \cdot 10^{-11} \varepsilon_{\text{ф}} \cdot (t_{\text{фп}} + 273)^4, \text{ кВт/м}^2, \quad (2.9)$$

где $\varepsilon_{\text{ф}}$ – степень черноты факела.

Степень черноты [81] или иначе - коэффициент излучения факела определяется как

$$\varepsilon_{\text{ф}} = 1 - \exp(-k_{\text{г}}^0 ps), \quad (2.10)$$

где k_r^0 – коэффициент ослабления лучей продуктами сгорания, определяемый в зависимости от содержания водяного пара в продуктах сгорания r_{H_2O} , м·МПа; p – парциальное давление водяного пара в продуктах сгорания, МПа; s – эффективная длина излучающего слоя, м.

Эффективная длина излучающего слоя рассчитывается по формуле

$$s = 3,6V/F, \quad (2.11)$$

где V , F – соответственно излучающий объем топки и площадь ограничивающих поверхностей.

2.5. Определение параметров крутки факела

Во многих горелках воздух подают к месту смешения с мазутом закрученным потоком. Наиболее распространенные устройства для крутки: направляющие лопаточные аппараты с постоянным или регулируемым углом установки лопаток, улиточная форма корпуса горелки, тангенциальная подача воздуха в цилиндрический корпус. В горелках для котлов большой производительности применяют также тангенциальные лопаточные закручиватели. Увеличение степени крутки интенсифицирует процессы смесеобразования и горения топлива, но при этом возрастает сопротивление горелки и расход электроэнергии. Параметр крутки факела можно определить для тангенциального и осевого завихрителя (приложение 4).

Расчетная формула параметра крутки n для тангенциального завихрителя будет следующим [82,83]:

$$n = (\pi(D_H^2 - D_0^2)^{0,5} / 2Lz_{л}) [\sin(\beta) / (\sin(\pi/z_{л}) \times \cos(\beta - \pi/z_{л}))], \quad (2.13)$$

где D_H , D_0 – наружный 1,09 м и внутренний 0,88 м диаметры цилиндрического кольцевого канала; $L = 1$ м – длина лопатки; $z_{л}$ – число лопаток 32; β – угол наклона лопатки по номерам горелок и направления крутки воздуха 45лев/45прав/45лев/45прав/45лев /45прав;

$$\beta = (\pi g / 180), \quad (2.14)$$

При $g = 45^\circ$ и $\beta = 0,785$, параметр крутки $n = 1,049$

Все горелки имеют направление осевой крутки, по номерам горелок совпадающей с периферийной круткой. Для расчета параметра осевой крутки используется следующая формула [82,83]:

$$n_o = 2 \times 3,14 \times R_z \times D_3 \times \text{tg}(\beta_o) / (\varepsilon \times 18 \times (0,73 - 0,325)), \quad (2.15)$$

где $D_3 = (0,73^2 - 0,325^2)^{0,5}$ – эквивалентный диаметр, м; $R_z = [0,125(0,73^2 + 0,325^2)]^{0,5}$ – радиус приложения равнодействующей скорости потока, м; $\beta_o = \pi/3$; $\varepsilon = [3,14(0,73 + 0,325)/(2 \times 18)]$ – расстояние между серединами лопаток во входном сечении регистра, м.

Подставляя значения в формулу 2.15 получим, что $n_o = 3,095$.

2.6 Определение КПД котла

Тепловая эффективность работы котла оценивается коэффициентами полезного действия брутто $\eta_{бр}$ и нетто $\eta_{нт}$. Величина КПД брутто $\eta_{бр}$ равна отношению полезно использованной рабочей средой теплоты в котле к подведенной.

Для ТГМ-84Б КПД котла по прямому балансу формула имеет следующий вид, % [84-90]:

$$\eta_{бр}^{пр} = q_1 = 100 Q_1 / B Q_H^p. \quad (2.16)$$

где $Q_1 = D_{пп}(h_{п.п} - h_{п.в}) + D_{пр}(h_{к.в} - h_{п.в})$ – полезно использованное тепло, кДж/кг; $D_{пе}$ – расход перегретого пара, кг/с; $D_{пр}$ – расход воды с продувкой из барабана, кг/с; $h_{п.п}$, $h_{п.в}$, $h_{к.в}$ – энтальпии перегретого пара, питательной и котловой воды соответственно, кДж/кг.

Метод определения КПД по обратному балансу предпочтительнее метода прямого баланса, так как обратный баланс дает меньшую погрешность в величине КПД. При этом ошибка в определении КПД обусловлена, в основном, в наибольшей из потерь – теплом, теряемым с уходящими газами q_2 .

КПД котла брутто определяется из обратного баланса, %:

$$\eta_{к}^{бр} = 100 - q_2 - q_3 - q_4 - q_5 - q_6, \quad (2.17)$$

где $q_2 = (h_{yx} - \alpha_{yx} h_{x.в.})(100 - q_4)/Q_p^p$ – потеря теплоты с уходящими газами, %;
 $q_3 = V_{сг}(126,4 \cdot CO + 358,2 \cdot CH_4 + 108 \cdot H_2)/Q_p^p$ – потеря теплоты с химическим недожогом, %;
 $q_5 = D_{ном} \cdot (60/D_{ном})^{0,5}/D \cdot \log D_{ном}$ – потеря теплоты от наружного охлаждения, %;
 h_{yx} – энтальпия уходящих газов, кДж/кг(кДж/м³);
 α_{yx} – коэффициент избытка воздуха уходящих газов.

Коэффициент избытка воздуха за котлом определяется по данным полного газового анализа продуктов горения и для наиболее общего случая, когда в дымовых газах имеются продукты химического недожога CO, H₂, CH₄, выражается формулой

$$\alpha = \left(1 - \frac{79 \cdot O_2 - 0,5CO - 0,5H_2 - 2CH_4}{N_2 - N_2^T/V_{с.г}} \right)^{-1}, \quad (2.18)$$

В случае полного горения, с учетом того, что содержание азота в сухих дымовых газах близко к содержанию его в воздухе (~79 %), формула (2.18) может быть представлена в виде так называемой кислородной формулы:

$$\alpha = \frac{21 - \rho \cdot O_2}{21 - O_2} \quad (2.19)$$

где ρ – постоянный коэффициент, характерный для данного вида топлива.

КПД котельного агрегата нетто $\eta_k^{нетто}$, который учитывает затраты электроэнергии на собственные нужды определяется по формуле, %:

$$\eta_k^{нетто} = \cdot \eta_k^б - q_{с.н.}^T - q_{с.н.}^{эл.}, \quad (2.20)$$

где $q_{с.н.}^T = 100 D_{пр} (h_{x.в.} - h_{п.в.}) / BQ_p^p$ – относительный расход теплоты на собственные нужды,

$q_{с.н.}^{эл.} = 100 \sum N_{с.н.}^{эл.} / \eta_H^T BQ_p^p$ – относительный расход электроэнергии на собственные нужды, $N_{с.н.}^{эл.} = N_H + N_B + N_D$ – расход мощности на работу вспомогательного оборудования.

В настоящей работе составлена программа в Mathcad по определению КПД котла ТГМ-84Б прямым и обратным способом (приложение 5).

2.7. Анализ погрешностей экспериментов

Определение случайной погрешности производится из следующих предпосылок. При обработке экспериментальных данных за конечное значение принимается среднеарифметический результат измерений a_{cp} .

Оценка среднеквадратичного отклонения S описывается выражением

$$S = [\sum (x_i - a_{cp})^2 / n(n - 1)]^{0,5}, \quad (2.21)$$

где n , x_i – число и результат измерений.

Здесь суммирование ведется от 1 до n .

В соответствии со значением коэффициента надежности $\alpha_{нс} = 0,95$ и числом измерений n определяется коэффициент Стьюдента t_α .

При этом формула для расчета случайной погрешности записывается как $\Delta a = t_\alpha S$.

Отсюда, результат с границами случайной погрешности $a = a_{cp} \pm \Delta a$ и относительная случайная погрешность $\xi = (\Delta a/a)100\%$.

Общая погрешность измерений определяется как совокупность случайной и неисключенной систематической погрешностей:

$$\delta = 1,1(\xi^2 + \sigma^2)^{0,5}. \quad (2.22)$$

Так как в экспериментах по исследованию излучательной способности материалов получено $\sigma/\xi > 8$, то случайной погрешностью ξ можно пренебречь. Границы погрешностей результатов измерений можно оценивать по неисключенной систематической погрешности $\pm\sigma$ (%).

Формула для систематической погрешности определения температуры оптическим методом записывается как (в %):

$$\sigma_{оп} = 1,1(\sigma_{и.и}^2 + \sigma_p^2 + \sigma_{ст}^2 + \sigma_m^2)^{0,5}, \quad (2.23)$$

где $\sigma_{и.и} = 4\sigma_{T, T_0}^2$ – систематическая приборная погрешность измерения интенсивности излучения факела при помощи РК-15 ($\pm 1\%$); σ_p – погрешность регистрации сигнала с приемника излучения милливольтметром ($\pm 0,5\%$); $\sigma_{ст}$ – погрешность определения степени черноты факела ($\pm 1,5\%$); σ_m – методическая

погрешность ($\pm 0,3\%$); σ_T , σ_{T0} - погрешности измерения температуры излучающей среды в топке и излучающей полости абсолютно черного тела.

В настоящей работе погрешность измерения теплового потока бесконтактным способом оптическим методом составила $\pm 4,6\%$.

Основные погрешности связаны с измерением температуры излучающей топочной среды и полости абсолютно черного тела. Погрешность определения температуры излучающей среды и полости АЧТ рассчитывалась согласно рекомендациям [91-95]. Численные значения составляющих систематической погрешности измерения температуры приводятся в работах по пирометрии [95]. Полученные в настоящей работе значения погрешностей определения температуры газового потока не превышают погрешности экспериментов приведенные в работах [96 – 99].

2.8. Позонный тепловой расчет топочной камеры

Для подтверждения экспериментальных данных был проведен позонный расчет топочной камеры и адиабатических температур горения [81]. Для расчета распределения тепловых нагрузок по высоте топки последняя условно разбивается на несколько зон и температура газов определяется на выходе каждой из них. Предварительно рассчитывается топочная камера в целом и находится температура газов на выходе из нее.

Температура газов на выходе из зоны максимального тепловыделения рассчитывается методом последовательных приближений по уравнению :

$$g'' = \frac{\frac{100}{100 - q_4} \beta_{CG} Q_n^p + Q_B + i_{TЛ} + rI_{Г.отб} - Q_{бшл}}{Vc''} - \frac{4,9 \cdot 10^{-8} \alpha_T T''^4}{B_p Vc''} \psi F, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.24)$$

где β_{CG} - степень выгорания, характеризующая долю топлива, сгоревшего в рассматриваемой зоне.

Q_B и $rI_{Г.отб}$ - количества тепла, вводимые в топку с воздухом и газами рециркуляции, ккал/кг .

$Q_{бшл}$ - потери тепла с удаляемым из зоны шлаком, ккал/кг .

Vc'' - средняя суммарная теплоемкость продуктов сгорания 1 кг топлива, ккал/(кг·°C);

ψF - произведение коэффициента эффективности на суммарную поверхность, ограничивающую зону:

$$\psi F = F_{ст} \psi_{ср} + \psi' F_{c1} + \psi'' F_{c2}, \quad (2.25)$$

$F_{ст}$ – поверхность стен зоны, м²;

$\psi_{ср}$ - средний коэффициент тепловой эффективности стен зоны,

F_{c1} и F_{c2} - сечения топочной камеры, ограничивающие зону сверху и снизу, м²;

ψ' -коэффициент, характеризующий отдачу тепла излучением в вышерасположенную зону, принимается равным 0,1- для пылеугольных топок с твердым шлакоудалением и топок, работающих на газе, 0,2- для топок с жидким шлакоудалением, а также работающих на мазуте;

ψ'' - коэффициент, характеризующий отдачу тепла излучением в сторону пода топки или холодной воронки, принимается равным коэффициенту $\psi_{ср}$;

α_T - степень черноты топки в зоне максимального тепловыделения.

Температура газов на выходе из зон, расположенных выше зоны максимального тепловыделения, рассчитывается по уравнению:

$$g'' = \frac{\Delta\beta_{сг} Q_n^p}{Vc''} + \frac{c'}{c''} g' - \left[1 + \left(\frac{T''}{T'} \right)^4 \right] \cdot \frac{4,9 \cdot 10^{-8} \alpha_T T'^4 [F_{с.ср} (\psi'' - \psi') + \psi_{ср} F_{см}]}{B_p Vc''}, \quad (2.26)$$

где $\Delta\beta_{сг} = \beta''_{сг} - \beta'_{сг}$ – доля выгорания топлива в зоне.

g' и T' ; g'' и T'' – температуры газов на входе и выходе из рассматриваемой зоны, °C и K;

c' и c'' – средние значения теплоемкости газов при температурах g' и g'' , ккал/(кг·°C);

$F_{ст}$ – поверхность стен рассматриваемой зоны, м²; для последней зоны в $F_{ст}$ включают площадь окна в выходном сечении топки $F_{ок}$. Для зоны с ширмами в величину $F_{ст}$ включают поверхность ширм $F_{ст}$, $F_{ш}$ определяют без учета коэффициентов неравномерности освещенности Z ;

Ψ_{cp} - средний коэффициент тепловой эффективности стен зоны,
 $F_{c.ср} = \frac{F'_c + F''_c}{2}$ - средняя площадь сечения топочной камеры в зоне, м²;

ψ' - коэффициент, характеризующий передачу тепла излучением из нижерасположенной зоны;

ψ'' - то же в вышерасположенную зону.

Температура газов в конце зоны, включающей ширмы рассчитывается по формуле:

$$g'' = \frac{2\Delta\beta_{cr}\beta_p Q_u^p}{2B_p Vc'' + \alpha_k F_k} + g' \left[\frac{2B_p Vc' - \alpha_k F_k}{2B_p Vc'' + \alpha_k F_k} \right] + t_3 \frac{2\alpha_k F_k}{2B_p Vc'' + \alpha_k F_k} - \left[1 + \left(\frac{T''}{T'} \right)^4 \right] \frac{\sigma_0 \alpha_T T''^4}{2B_p Vc'' + \alpha_k F_k} \psi F_{CT}, \quad (2.27)$$

Здесь ψF_{CT} - произведение коэффициента эффективности,

F_k - поверхность нагрева экранов и ширм, воспринимающая тепло конвекций;

α_k - коэффициент теплоотдачи конвекцией от газов к стенке,

$t_3 = T_3 - 273$ - температура слоя загрязнения на трубах; величина T_3 определяется по формуле:

$$T_3 = T_{\text{cp}} \sqrt{\alpha_T} \left(1 - \frac{\psi}{\alpha_n} \right), \text{ К} \quad (2.28)$$

T_{cp} - средняя температура газов в зоне:

$$T_{\text{cp}}^4 = 0,5(T^4 + T''^4), \text{ К}. \quad (2.29)$$

После расчета температуры газов на входе и выходе каждой зоны тепловая нагрузка ее радиационных поверхностей находится по формуле:

$$q_{\text{л}} = 4,9 \cdot 10^{-8} \psi \alpha_T T_{\text{cp}}^4, \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}), \quad (2.30)$$

где ψ - коэффициент эффективности радиационных поверхностей зоны.

Результаты позонного расчета котла ТГМ -84 Б приведены в приложении 6.

Расчет адиабатической температуры горения производится при следующих допущениях: нет диссоциации в дымовых газах; процесс полного сгорания топлива происходит при постоянном давлении; пространство, где происходит горение топлива и находятся дымовые газы, изолировано от окружающей

среды. При этом вся химическая энергия сгоревшего топлива передается только дымовым газам.

При сгорании 1 кг или 1 нм^3 топлива химическая энергия может быть определена как низшая рабочая теплота сгорания топлива Q_{H}^{P} .

В таких условиях (без диссоциации) объем дымовых газов складывается из:

$$V_{\Gamma} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} = \sum_{i=1}^5 V_i, \quad (2.31)$$

где V_i – приведенный объем i -го компонента дымовых газов, $\text{нм}^3 / \text{кг}$, $\text{нм}^3 / \text{нм}^3$.

$$Q_{\text{H}}^{\text{P}} = \sum_{i=1}^5 C_{pi} \cdot V_i \cdot (t_a - 0) = t_a \cdot \sum_{i=1}^5 C_{pi} \cdot V_i, \quad (2.32)$$

где C_{pi} – средняя объемная теплоемкость при постоянном давлении i -го компонента дымовых газов, $\text{кДж} / (\text{нм}^3 \cdot \text{К})$.

$$t_a = \frac{Q_{\text{H}}^{\text{P}}}{\sum_{i=1}^5 C_{pi} \cdot V_i}, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (2.33)$$

Расчет адиабатической температуры горения представлен в приложении 7.

Разработанное оборудование позволяет провести экспериментальное исследование по определению температур и интенсивности излучения факела внутри топочного объема котла. Это позволяет настроить крутку воздуха в горелочных устройствах и определить недожог топлива, таким образом оценить эффективность сжигания топлива.

3. ИЗЛУЧЕНИЕ ФАКЕЛА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КОНСТРУКЦИИ МАЗУТНЫХ ФОРСУНОК

3.1. Конструкция мазутных форсунок

Для исследования эффективности сжигания мазута взята горелка ГМУ-45 производства ТКЗ для котла ТГМ-84Б. Преимущество этой горелки – наличие регистра центральной изменяемой (поз. 8 на рисунке 3.1.) и осевой (поз. 7) крутки воздуха.

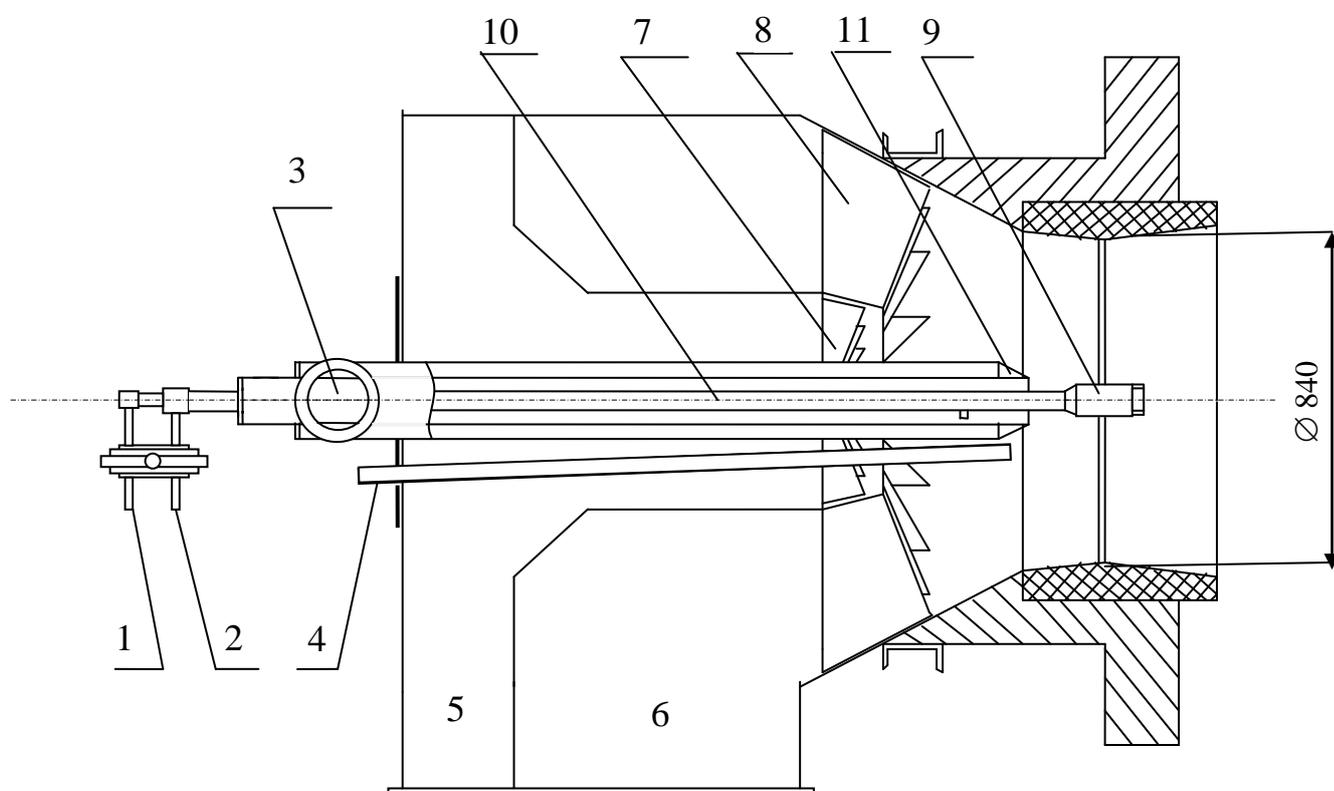


Рисунок 3.1. Горелка газомазутная котла ТГМ-84Б:

1 – подача мазута; 2 – подача пара; 3 – подача газа; 4 – электрический запальник; 5 – подача воздуха в центральный короб; 6 – подача воздуха в наружный короб; 7 – лопатки осевого завихрителя; 8 – лопатки тангенциального завихрителя; 9 – форсунка; 10 – труба форсунки; 11 – газоподающая центральная труба.

Ствол форсунки задвигается вместе с посадкой в центральную трубу горелки. Исследования проводились с использованием механической форсунки, паромеханической форсунки ФУЗ-5000 и форсунки[100], разработанной в данной работе, представленных на рисунке 3.2.

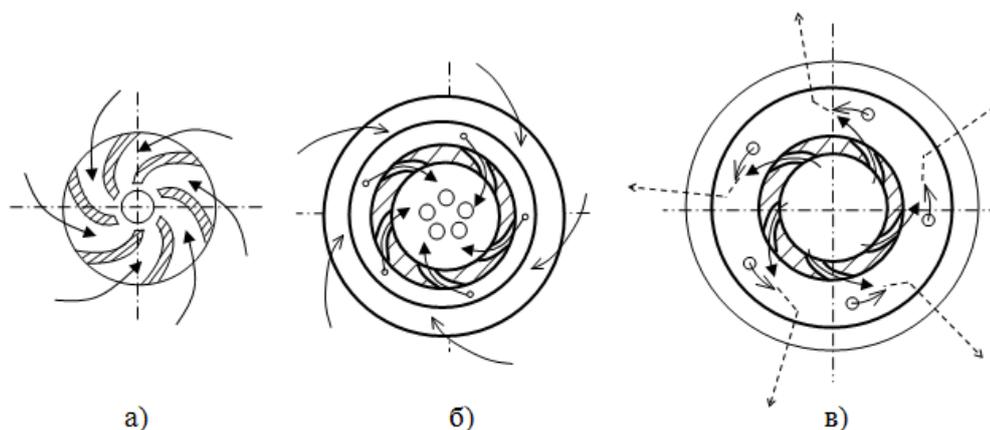


Рисунок 3.2. Исследуемые форсунки для сжигания мазута:

а) механическая форсунка типа «Ильмарине»; б) паромеханическая форсунка типа «ФУЗ»; в) – паромеханическая форсунка с соударением струй:

← мазут; ← пар;

←----- закрученная распыленная струя мазута с паром

Головка механической форсунки Ильмарине «Чебоксарские» ФМ 5200/2500. ОСТ 1 08.836.01-80 представлена на рисунке 3.3.

Мазут под большим давлением подается в форсунку через ствол и распыляется через тангенциальные каналы. В этих форсунках сопло и камера завихривания выполнены одной деталью. При снижении производительности ниже допустимой производится количественное регулирование путем отключения ряда горелок.

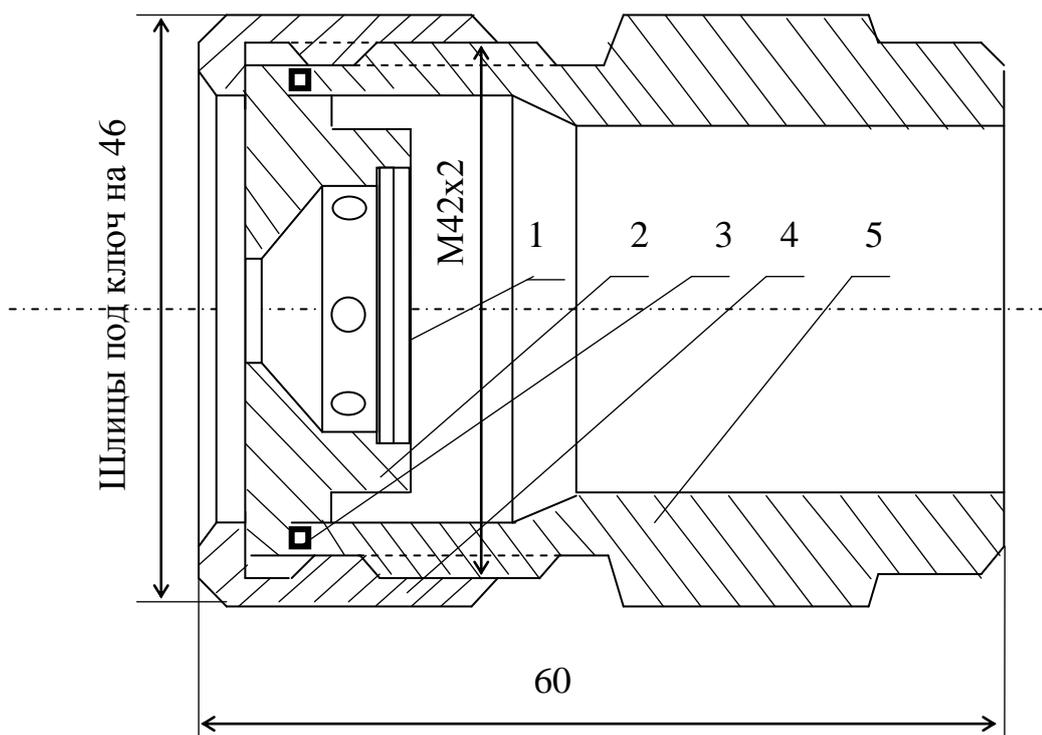


Рисунок 3.3. Головка форсунки:

1 – доньшко с отверстиями в качестве сетки; 2 – распылитель с тангенциальными каналами; 3 – прокладка из медной проволоки; 4 – гайка со шлицами под ключ на 46; 5 – корпус со шлицами под ключ на 46.

Пароакустические (ультразвуковые) форсунки «Факел» (ФУЗ) предназначены для экономичного и низкотоксичного сжигания жидкого топлива в составе горелок энергетических котлов, для розжига и подсвечивания в пылеугольных котлах, с диапазоном регулирования расхода от 20...100 процентов. Форсунки выпускаются в двух исполнениях: короткофакельные «Факел» и длиннофакельные «Факел-Д».

Общий вид форсунки «Факел» приведён на рисунке 3.4. Корпус 1 и сопло 4 изготовлены из легированной стали; паровой излучатель 3 и топливный завихритель 2 - из высококачественной стали с упрочнением поверхностного слоя; основание 6 - из углеродистой конструкционной стали.

Форсунки на расходы от 500 кг/час и выше в настоящее время работают на ряде ТЭЦ России: Воркутинские ТЭЦ, Заинской ГРЭС, Красноярские ТЭЦ,

Рефтинской ГРЭС, Экибастузская ГРЭС, Камчатские ТЭЦ, Хабаровской ТЭЦ-3 и др. ОА «Татэнерго» и многие промышленные предприятия республики Татарстан для сжигания мазута используют только пароакустические форсунки «Факел».

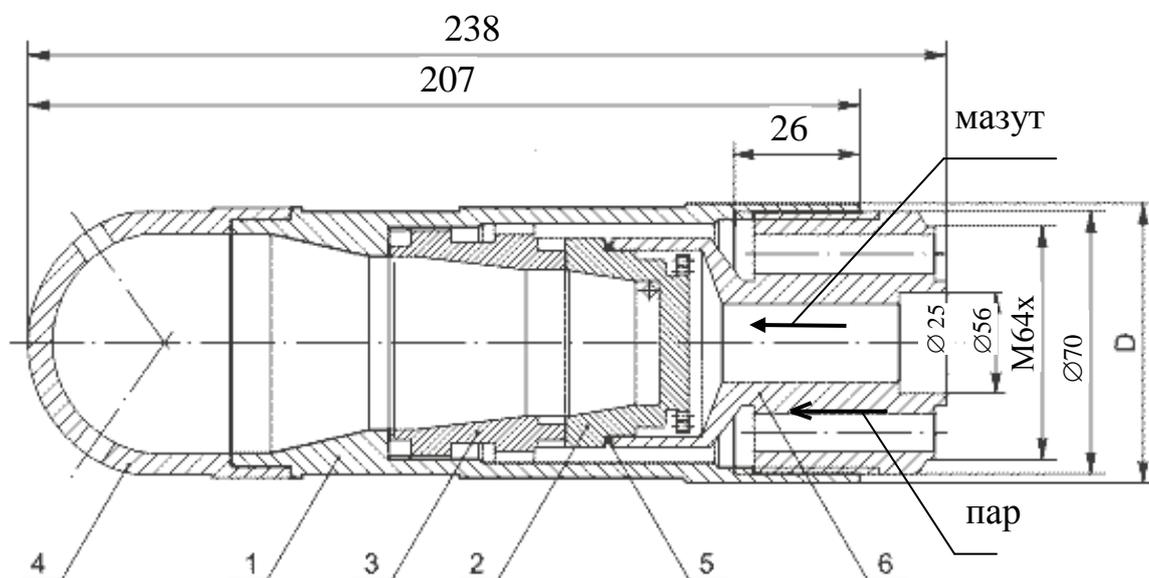


Рисунок 3.4. Форсунка «Факел»:

- 1 - корпус, 2 - топливный завихритель, 3 - паровой излучатель, 4 - сопло,
5 - медная прокладка, 6 - основание

В головке реализован комбинированный способ распыливания топлива, совмещающий использование эффекта закрученной струи жидкости, кинетической энергии вихревого потока распылителя и акустических колебаний среды.

Форсунки рассчитаны для топочных мазутов [101] при вязкости топлива не более 10 ВУ ГОСТ 6258-52, на расходы топлива 0,1 - 9,0 т/ч. Давление топлива перед форсункой рекомендуется поддерживать не менее 3 атм, пара - не менее 5 атм. Удельный расход пара на распыление составляет не более 0,06 кг/кг.

Форсунка содержит встроенный фильтр очистки мазута, не требует специальной тарировки на стенде. Тарировочные характеристики, техническое руководство по монтажу и эксплуатации и переходные детали для монтажа

входят в комплект поставки. Для более надёжной работы форсунок топливо должно быть профильтровано с помощью фильтров с ячейками не более 1,0 x 1,0 мм.

Форсунка работает следующим образом: топливо по центральной трубе подаётся в тангенциальные отверстия топливного завихрителя 2 и в виде закрученного потока поступает в центральную полость форсунки. Распылитель (пар) проходит по периферии к профилированным каналам парового излучателя 3, достигая при выходе из каналов звуковых и сверхзвуковых скоростей истечения. Взаимодействие высокоскоростных потоков распылителя приводит к возникновению акустических колебаний, которые значительно усиливают процесс дробления мазута и перемешивания его с паром в вихревых потоках. На выходе из сопла 4 происходит формирование факела с углом раскрытия от 80 до 110 градусов и дальнейшее распространение акустических колебаний.

К недостаткам известной форсунки «Факел» можно отнести следующее:

1. Невозможность поддержания постоянного угла распыливания топлива при регулировании зазора между корпусом и распыливающей насадкой, что вызывает ухудшение условий сжигания топлива;

2. Закоксование форсунки «Факел» при длительной работе.

Указанные недостатки устранены в форсунке (рисунок 3.5), предлагаемой в настоящей работе [100]. Данная форсунка направлена на решение задачи унификации присоединения штуцеров форсунки к существующим на котлах конструкциям трубопроводов подвода топлива и распыливающей среды и повышения эффективности сжигания топлива при смене режимов работы форсунки.

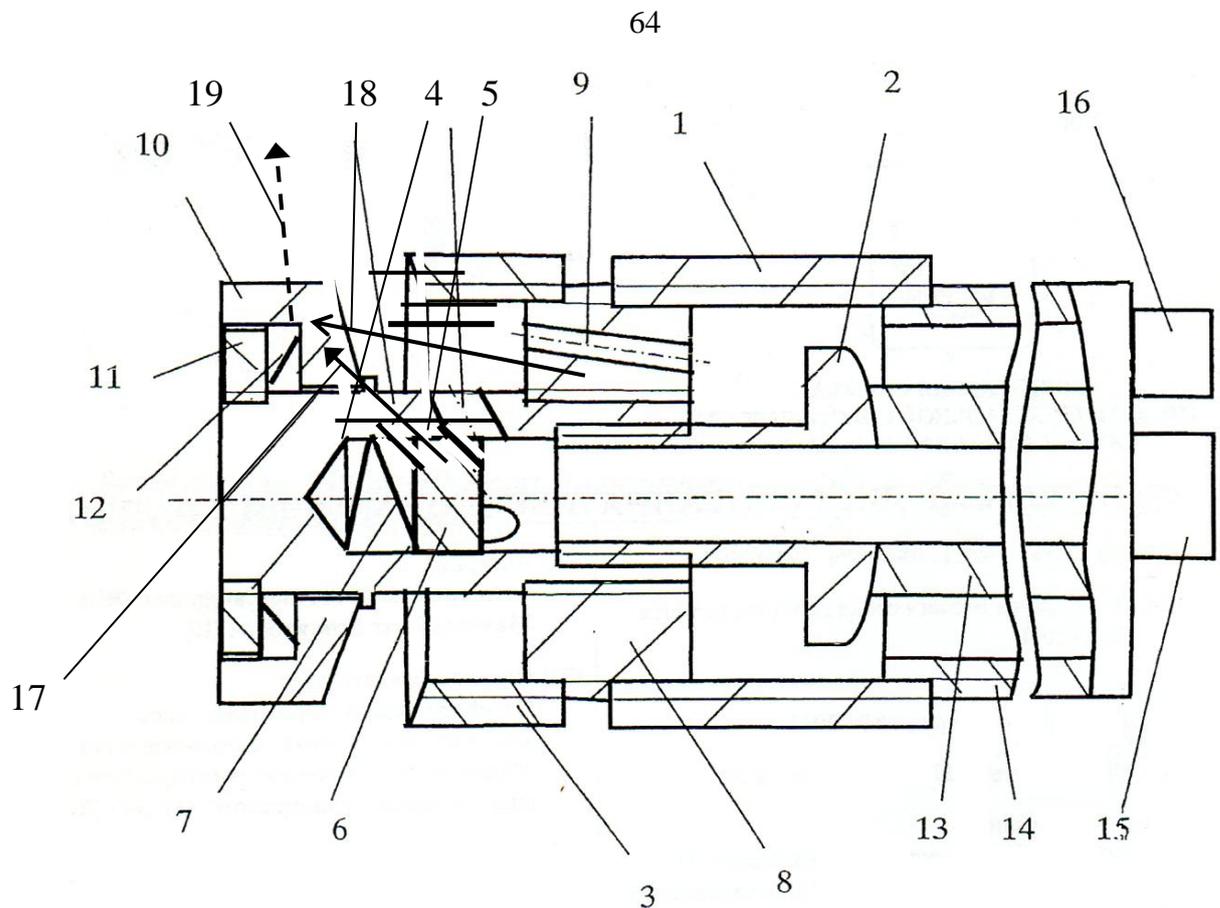


Рисунок 3.5. Форсунка для сжигания мазута, разработанная в данной работе:

1-крепежная обойма, 2-штуцер для подвода топлива, 3-регулирующая втулка, 4-сопло, 5- отверстия для подвода топлива, 6-плунжер, 7-осевая тарированная пружина, 8-шайба, 9 – отверстия для подвода распылителя, 10 – распыливающий насадок, 11-стопорная гайка, 12- торцевая тарированная пружина, 13- центральная стволовая труба для подачи топлива, 14- наружная стволовая труба, 15 - штуцер стволовой трубы для подачи топлива, 16 – штуцер стволовой трубы для подачи распылителя; 17 – мазут; 18 – пар; 19 – первично распыленная струя мазута с паром

Торцевая часть штуцера 2 для подвода топлива выполнена сферической, совпадающей по конфигурации с посадочным местом штуцера для подачи топлива большинства находящихся в эксплуатации на энергетическом котлах насадков мазутных форсунок. Корпус форсунки выполнен из двух частей: крепежной обоймы 1 и регулирующей втулки 3. Крепежная обойма 1 служит

для присоединения с помощью резьбы заявляемой конструкции форсунки к наружной ствольной трубе 14 (рисунок 3.5) форсунки, находящейся в эксплуатации.

Втулка 3 имеет в торцевой части фаску, выполненную под углом 60° к оси форсунки. Торцевая часть распыливающей насадки 10 выполнена также под углом 60° к оси форсунки и относительно фаски регулирующей втулки 3 образует щелевой кольцевой канал, наклоненный под углом 60° к оси форсунки, и совпадающий с углом наклона отверстий 5 для подвода топлива. Крепежная обойма 1 и регулирующая втулка 3 могут перемещаться в осевой направлении по резьбовой части шайбы 8. Плунжер 6 может перемещаться в осевом направлении преодолевая сопротивление пружины 7 и увеличивая при этом проходное сечение отверстий 5. При закоксовывании щелевого зазора давление пара и топлива возрастает и распыливающий насадок 10 преодолевая сопротивление пружины 12, перемещается в осевом направлении и увеличивает проходное сечение щелевого зазора, то есть работа заявляемой форсунки при частичном закоксовывании щели между распыливающим насадком 10 и торцевой частью регулирующей втулки 3 не прекращается.

У находящейся в эксплуатации на котле паромеханической мазутной форсунки от наружной ствольной трубы 14 отвертывается распыливающий насадок. Заявляемая форсунка своим штуцером 2 вставляется в центральную ствольную трубу 13 паромеханической форсунки до полного контакта сферической поверхности штуцера 2 с посадочным местом в центральной ствольной трубе 13 и с помощью внутренней резьбы крепежной обоймы 1 жестко фиксируется на наружной ствольной трубе 14. Вращением регулирующей втулки 3 устанавливается величина щелевого зазора между распыливающим насадком 10 и торцевой частью регулирующей втулки 3 в зависимости от требуемой производительности форсунки. Наружная ствольная труба 14 вместе с присоединенной заявляемой форсункой устанавливается в горелочную амбразуру на котел и подсоединяется через существующие штуцера подачи топлива 15 и подачи распылителя 16 к трубопроводам для

подачи мазута и распыливающего водяного пара на котле. Через штуцер 15 подается мазут, который проходит через центральное отверстие штуцера 2 и через отверстия 5. Через штуцер 16 подается пар, который проходит в форсунке по отверстиям 9. При соударении струй из отверстий 5 и 9 происходит предварительное первичное дробление мазута на капли. При ударе предварительно диспергированных потоков пара и мазута о распыливающий насадок 10 происходит вторичное дробление капель мазута, а при попадании вторично диспергированного мазутно-парового потока в щелевой зазор между распыливающим насадком 10 и торцевой частью регулирующей втулки 3 происходит дополнительное третичное дробление мазутно-парового потока за счет диффузорного эффекта.

При случайном попадании в штуцер 2 коллоидных частиц мазута и забивании отверстий 5 за счет возрастания давления плунжер 6 преодолевает сопротивление пружины 7 и увеличивает проходное сечение отверстия 5 и коллоидное загрязнение выбрасывается через отверстие 5 и через щелевой зазор в факел для сгорания. Применение угла наклона 60° для торцевой части распыливающего насадка 10 и угла наклона 60° для торцевой части регулирующей втулки 3 позволяет добиться геометрической конфигурации факела, при которой не происходит наброса факела на задний и на боковой экраны котла.

3.2 Исследование температуры и интенсивности излучения в топке котла ТГМ-84Б при сжигании газа и мазута с использованием различных форсунок

Эксперименты проводились в филиале АО «Татэнерго» Набережночелнинская ТЭЦ (НчТЭЦ) на котле ТГМ-84Б №4. При экспериментах измерялись режимные параметры работы котла, распределение температур внутри топочных объемов и интенсивность излучения факела.

Котел ТГМ-84Б имеет П-образную компоновку и состоит из топочной камеры, являющейся восходящим газоходом, опускной конвективной шахты и горизонтального газохода, соединяющего топку с конвективной шахтой. В топочной камере размещены испарительные экраны, радиационный пароперегреватель. В верхней части топки и в горизонтальном газоходе установлен ширмовый пароперегреватель. Потолок топочной камеры горизонтального газохода экранирован трубами потолочного пароперегревателя. В конвективной шахте размещены конвективный пароперегреватель и водяной экономайзер. В области водяного экономайзера конвективная шахта разделена на два газохода. Топочная камера имеет призматическую форму и в плане представляет прямоугольник с размерами 6016x17710. Боковые и задние стенки топочной камеры полностью экранированы трубами $\varnothing 60 \times 6$ мм (сталь 20) с шагом 64 мм.

Основные характеристики котла ТГМ-84Б:

номинальная паропроизводительность 420 т/ч;

рабочее давление за главной паровой задвижкой $P_{ПЕ} = 14$ МПа;

рабочее давление в барабане $P_B = 15,5$ МПа;

температура перегретого пара 570 °С;

температура питательной воды 230 °С;

температура горячего воздуха при сжигании газа 238 °С;

температура горячего воздуха при сжигании мазута 268 °С.

Топочная камера оборудована 6 газомазутными горелками, установленными в два яруса в ряд вершинами на фронтальной стене. Горелки предназначены для отдельного сжигания газа и мазута. Производительность горелки на газе 5200 $\text{м}^3/\text{час}$.

Топочная камера разделена двухсветным экраном. Нижняя часть каждого бокового экрана переходит в слегка наклонный подовый экран, нижние коллекторы которого прикреплены к коллекторам двухсветного экрана и совместно перемещаются при тепловых деформациях во время растопки и остановок котла. Наклонные трубы пода защищены от излучения факела слоем

огнеупорного кирпича и хромитовой массы. Наличие двухсветного экрана обеспечивает интенсивное охлаждение топочных газов [116].

Методика исследования и оборудование подробно описана во второй главе. Измерение интенсивности излучения факела выполнено бесконтактным способом при помощи радиометра ТЕРА-50 с градуировкой РК-15 через лючки в стенах топок. Температура уходящих газов измерялась по методу двух термопар. Измерения содержания оксидов азота и содержания кислорода в уходящих продуктах сгорания в режимном сечении проводились при помощи газоанализатора ДАГ-500. Температура светящегося факела измерялась с помощью инфракрасного пирометра АК ИП с погрешностью измерений $\pm 2,5$ °С при 1500 °С [112-113,122].

Эксперимент 1: котел ТГМ-84Б №4 был переведен на сжигание газа. Котлоагрегат работал с паропроизводительностью 355 т/ч.

Эксперимент 2: котел ТГМ-84Б №4 работал на мазуте М-100 все 6 горелок с паропроизводительностью 405 т/ч с форсунками ФУЗ-5000.

Эксперимент 3: котел ТГМ-84Б №4 работал на газу (горелки 2, 3, 5, 6) и на мазуте (горелки 1, 4 с разработанными форсунками), паропроизводительность котла составляла 300 т/ч.

Эксперимент 4: котел ТГМ-84Б №4 работал на мазуте М-100 все 6 горелок с паропроизводительностью 360 т/ч с использованием механических форсунок. Данные из режимной карты при сжигании газа, газа с мазутом и мазута представлены в таблице 3.1.

Из-за сжигания мазута (сернистого топлива) необходимо повышать температуру уходящих газов, таблица 3.1, что влияет на увеличение температуру горячего воздуха и температуру питательной воды.

При сжигании мазута необходимо увеличивать коэффициент избытка воздуха, что влияет на содержание кислорода в уходящих газах.

Для сжигания мазута также необходимо увеличивать давление воздуха, в сравнении со сжиганием газа на 60 – 80 %.

Таблица 3.1. Данные при сжигании газа и мазута в котле ТГМ-84Б при паропроизводительности 355-360 т/ч

Режимный параметр и размерность	Вид сжигаемого топлива			
	Газ во всех горелках	Мазут во всех горелках (Механическая)	Мазут во всех горелках (ФУЗ-5000)	Мазут во всех горелках (КГЭУ)
Теплота сгорания топлива $Q_{н}^p$, ккал/м ³ (ккал/кг)	8028	9073,73	9533,75	8031-газ, 8961-мазут
Паропроизводительность котла D_k , т/ч	355	360	405	300
Продувка котла $D_{пр}$, т/ч (или % от D_k)	3,5	3,6	4	3
Расход топлива B , тыс. м ³ /ч (или т/ч) газ/мазут	30 м ³ /ч – газ	25 т/ч – мазут	34,5 т/ч – мазут	16 – газ, 8,1 – мазут
Температура питательной воды $t_{п.в.}$, °С	217	226	224	226
Давление питательной воды $p_{п.в.}$, кг/см ²	172	171	172	169
Расход питательной воды G_b , т/ч	355	355	420	300
Давление в барабане p_b , кг/см ²	155	149	158	150
Температура перегретого пара $t_{п.п.}$, °С	560	559	560	560
Давление перегретого пара $p_{п.п.}$, кг/см ²	140	137	139	139
Температура уходящих газов $t_{ух.}$, °С	107/108	147/134	148/147	135
Температура холодного воздуха $t_{х.в.}$, °С	20	15	21	13
Содержание O_2 в уходящих газах в режимном сечении, %	1	2,4/3,3	2,1/1,9	3/1,6
Температура воздуха после калорифера, °С	-	67/79	78/87	68
Коэффициент избытка воздуха	1,045	1,116/1,168	1,095	1,15/1,074
Температура мазута, °С	-	105	-	93/102
Давление воздуха перед горелками, кг/м ²	103	160	178/187	100
Давление мазута перед котлом, кг/см ²	-	31	9,5	8
Давление распыливающего пара перед горелками, кг/см ²	-	-	10	10
Температура горячего воздуха $t_{гор.возд.}$, °С	217/208	233	227/223	215/220
Разрежение вверху топки $p_{в.топ.}$, кг/м ²	- 3	- 3	- 5	- 3

Для анализа экспериментальных результатов на рисунке 3.6 представлена схема сечений топки котла ТГМ-84Б №4 НЧТЭЦ.

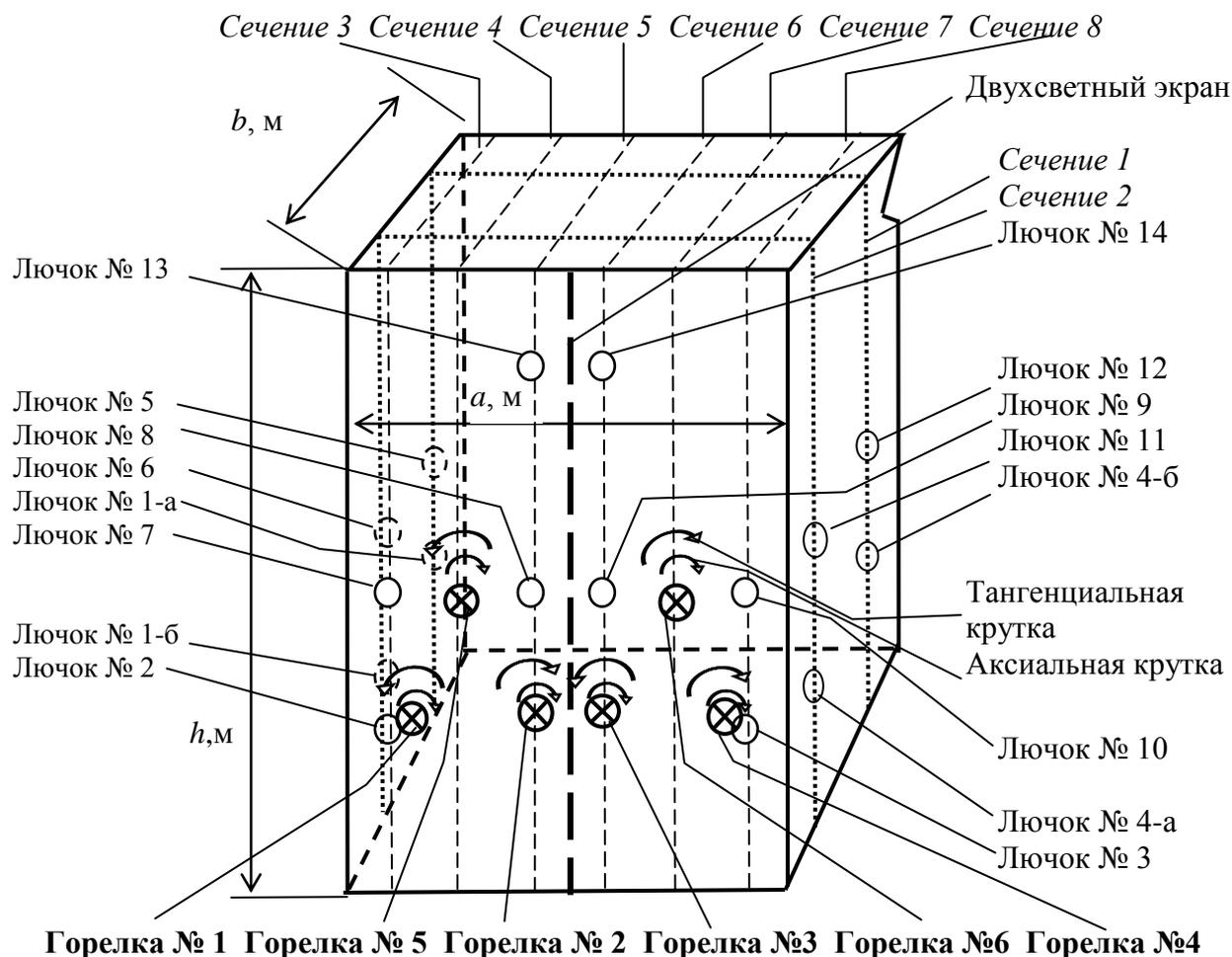


Рисунок 3.6. Схема сечений топки котла ТГМ-84Б при анализе результатов измерений температуры факела :

⊗ - горелки фронтальной стены топочной камеры, ○ - лючки

Котел ТГМ-84Б укомплектован горелками типа ГМУ-45. Нумерация горелок по фронтальному экрану, паспортные характеристики направлений и параметров крутки воздуха по режимным картам приведены на рисунке 3.5. Горелки 1-4 расположены на отметке высоты первого яруса 7,2 м, горелки 5-6 расположены на отметке высоты второго яруса 10,2 метра. На данном котле 16 лючков: на отметке 6,6 метра (с 1-го по 4б); на отметке 11,2 метра (с 5-го по 12-й); на отметке 22,3 метра (13-й и 14-й).

На рисунке 3.6 условно представлены два сечения по глубине топок: сечение №1 проходит через лючки левого экрана (№1-а на отм. 6,6 м, №5 на отм. 11,2 м) и через лючки правого экрана №12 на отм. 11,2 м, №4-б на отм. 6,6 м); сечение №2 проходит через лючки левого экрана (№1-б на отм. 6,6 м, №6 на отм. 11,2 м) и через лючки правого экрана (№11 на отм. 11,2 м, №4-а на отм. 6,6 м). А также условно представлены 6 сечений по ширине топок: сечение №3 проходит через лючки (№2 на отм. 6,6 м, лючок №7 на отм. 11,2 м); сечение №4 проходит через горелку №5 на отм. 10,2 м; сечение №5 проходит через горелку №2 на отм. 7,2 м, лючок №8 на отм. 11,2 м и лючок №13 на отм. 22,3 м; сечение №6 проходит через горелку №3 на отм. 7,2 м, лючок №9 на отм. 11,2 м и лючок №14 на отм. 22,3 м; сечение №7 проходит через горелку №6 на отм. 10,2 м; сечение №8 проходит через лючки (№3 на отм.6,6 м, лючок №10 на отм.11,2 м).

На рисунках 3.7 – 3.8 представлены значения интенсивности излучения факела для различных сечений левой и правой стороны котла.

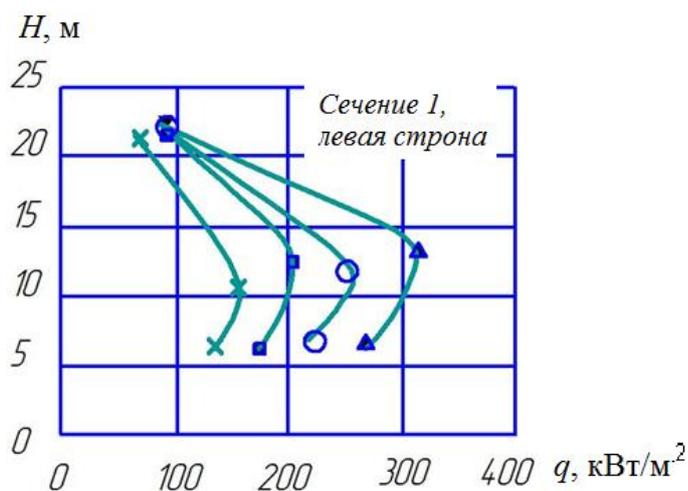


Рисунок 3.7. Интенсивность излучения факела в сечение 1, левая сторона котла

ТГМ-84Б НчТЭЦ:

- - при D_k 355 т/ч, топливо газ все горелки;
- - при D_k 360 т/ч, топливо мазут (механические форсунки);
- ▲ - при D_k 405 т/ч, топливо мазут (ФУЗ-5000);
- × - при D_k 300 т/ч, топливо мазут в горелках № 1, № 2 (КГЭУ), газ в горелках № 3, 4, 5, 6

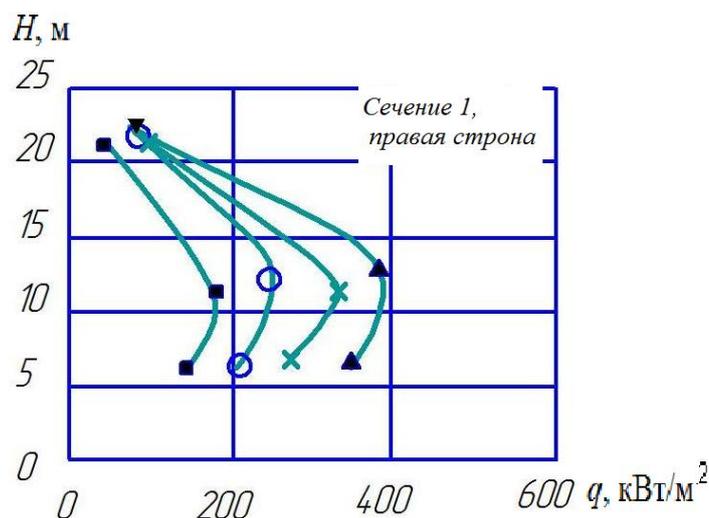


Рисунок 3.8. Интенсивность излучения факела в сечении 1, правая сторона котла котла ТГМ-84Б НчТЭЦ:

- - при D_k 355 т/ч, топливо газ все горелки;
- - при D_k 360 т/ч, топливо мазут (механические форсунки);
- ▲ - при D_k 405 т/ч, топливо мазут (ФУЗ-5000);
- × - при D_k 300 т/ч, топливо мазут в горелках № 1, № 2 (КГЭУ), газ в горелках № 3, 4, 5, 6

Интенсивность излучения факела на отметке 22,3 метра не превышает значения 100 кВт/м^2 как при сжигании газа, мазута или совместного сжигания газа с мазутом.

При сжигании газа максимальное значение интенсивности излучения факела достигалось на отметке 11,2 метра в сечении 1, т.е. возле задних экранов, значение q достигало 247 кВт/м^2 . При сжигании мазута через механические форсунки максимальное значение интенсивности излучения факела достигалось на отметке 11,2 метра в сечении 1 левой стороны котла, значение q достигало 238 кВт/м^2 .

Сжигая мазут через форсунки ФУЗ-5000, значение интенсивности излучения факела достигало 555 кВт/м^2 на отметке 6,6 метра в сечении 1 правой стороны котла, (сильное свечение факела).

В таблице 3.3 представлены результаты полученных температур из лючков и горелок для котла ТГМ-84Б №4 НчТЭЦ. Значения яркостной температуры получены преимущественно измерениям пирометром АКПП-9306. В области неустойчивых показаний АКПП-9306, связанных с малой толщиной светящегося факела, температура измерена с помощью термозонда при расположении рабочего спая на расстоянии от внутренней стенки котла не менее 1,1 м [118-119].

Таблица 3.2. Значение температур на котле ТГМ-84Б при сжигании газа, мазута через различные форсунки

Место отбора температур	Значение температур, °С			
	Газ все горелки 355 т/ч	Мазут во всех горелках Механические 360 т/ч	Мазут во всех горелках ФУЗ-5000 405 т/ч	Мазут в горелках № 1, 4 (форсунки КГЭУ) Газ – остальные 300 т/ч
Лючок № 1-а	1242	1164	1396	1196
Лючок № 1-б	1181	1176	1416	1181
Горелка № 1	1144	-	-	1159
Горелка № 3	1154	-	-	-
Горелка № 2	1210	-	-	-
Горелка № 4	1198	-	-	1308
Лючок № 4-а	1184	1155	1224	1183
Лючок № 4-б	1214	1268	1553	1443
Лючок № 5	1126	1191	1402	1172
Лючок № 6	1194	1157	1256	1123
Горелка № 5	1184	-	-	1195
Горелка № 6	1169	-	-	1215
Лючок № 11	1097	1171	1173	1042
Лючок № 12	1248	1167	1391	1275
Лючок № 13	1192	1174	1216	1170
Лючок № 14	1202	1159	1153	1157
Суммарное значение температур	20036	12953	14353	17861

Примеры распределения температуры факела по высоте топки представлена в приложении 9.

Если не суммировать температуры в горелках № 2 и № 3, то суммарное значение температур при D_k 300 т/ч, сжигая мазут в горелках № 1, 4 с

использованием форсунок КГЭУ, будет больше на 1 %, чем при D_k 355 т/ч сжигая газ во всех горелках.

При сжигании мазута через форсунки ФУЗ-5000 (D_k 405 т/ч) суммарное значение температур на 11 % больше, чем при сжигании мазута через механические форсунки D_k 360 т/ч.

Таким образом, в данной главе приведены результаты экспериментов по исследованию температуры и теплового излучения в топке котла ТГМ-84Б при сжигании топлива с использованием различных форсунок. Разработана форсунка, которая позволяет добиться геометрической конфигурации факела, при которой не происходит наброса факела на задний и боковой экраны котла за счет большого угла распыливания.

4. ВЛИЯНИЕ СХЕМЫ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА НА ТЕМПЕРАТУРУ ФАКЕЛА И КПД КОТЛА

4.1. Исследование схем сжигания газа и мазута с использованием механических форсунок на котле ТГМ-84Б

При экспериментах сжигался мазут М-100 с влажностью 5,2 % и теплотой сгорания 9074 ккал/м³ с использованием механических форсунок при нагрузках 350 – 360 т/ч. Газ сжигался уренгойский с теплотой сгорания 8028 ккал/м³. В таблице 4.1 представлены значения интенсивности излучения факела при сжигании газа и с различными схемами сжигания мазута с использованием механических форсунок.

На отметке 6,6 метров значения интенсивности излучения факела снижаются при переводе котла с сжигания газа на мазут (лючок № 1-а, № 1-б, № 4-а, № 4-б).

Значения интенсивности излучения факела сильно отличаются по глубине топки котла (лючок № 5, № 6, № 11, № 12), как при сжигании газа, так и при сжигании мазута.

На отметке 22,3 метра значение интенсивности излучения факела снижается при переводе котла ТГМ-84Б с газа на мазут, лючки № 13, 14.

Максимальное значение интенсивности излучения факела было зафиксировано при сжигании газа в горелках № 2, 3, 5, 6 и мазута в горелках № 1,4. При данной схеме сжигания мазута происходило неравномерное распределение падающих потоков по глубине топки на отметке 11,2 метра.

В таблице 4.2 представлены значения температур на котле ТГМ-84Б при сжигании газа и с различными схемами сжигания мазута с использованием механических форсунок.

Таблица 4.1. Значение интенсивности излучения факела на котле ТГМ-84Б при сжигании газа и с различными схемами сжигания мазута с использованием механических форсунок

Место регистрации тепловых потоков	Значения тепловых потоков, кВт/м ²				
	Газ все горелки 355 т/ч	Газ в гор. № 2, 3, 5, 6 Мазут в горелках № 1, 4 350 т/ч	Газ в гор. № 1 – 4 Мазут в горелках № 5, 6 360 т/ч	Газ в гор. № 1, 4 Мазут в горелках № 2, 3, 5, 6 355 т/ч	Мазут во всех горелках 360 т/ч
Лючок № 1-а	209	195	171	187	169
Лючок № 1-б	133	131	130	131	125
Горелка № 1	91	-	94	95	-
Горелка № 3	94	-	-	-	-
Горелка № 2	110	-	-	-	-
Горелка № 4	106	-	95	104	-
Лючок № 4-а	149	153	174	225	174
Лючок № 4-б	194	183	227	256	224
Лючок № 5	211	258	199	197	195
Лючок № 6	105	102	96	98	95
Горелка № 5	128	-	-	-	-
Горелка № 6	123	-	-	-	-
Лючок № 11	107	110	98	95	99
Лючок № 12	228	263	176	187	183
Лючок № 13	78	78	70	74	75
Лючок № 14	81	89	78	65	72

Топка котла ТГМ-84Б разделена двухсветным экраном, топочные процессы в левой и правой стороне котла неодинаковы, т.к. аксиальная крутка воздуха на всех горелках правого направления и тангенциальная крутка воздуха горелок в левой и правой стороне котла ассиметричны.

Процесс смешивания топлива в горелках влияет на процесс сжигания топлива, это видно из полученных данных таблиц 4.1 и 4.2. Сравнивая полученные данные из лючков № 1-а, 1-б и данные из лючков № 4-а, 4-б, видно, что значения интенсивности излучения факела на отметке 6,6 м правой стороны котла выше, чем в левой стороне котла.

Таблица 4.2. Значение температур на котле ТГМ-84Б при сжигании газа и с различными схемами сжигания мазута с использованием механических форсунок

Место регистрации температур	Значения температур, °С				
	Газ все горелки 355 т/ч	Газ в гор. № 2, 3, 5, 6 Мазут в горелках № 1, 4 350 т/ч	Газ в гор. № 1 – 4 Мазут в горелках № 5, 6 360 т/ч	Газ в гор. № 1, 4 Мазут в горелках № 2, 3, 5, 6 355 т/ч	Мазут во всех горелках 360 т/ч
Лючок № 1-а	1242	1215	1168	1200	1164
Лючок № 1-б	1200	1194	1190	1193	1176
Горелка № 1	1144	-	1155	1156	-
Горелка № 3	1154	-	-	-	-
Горелка № 2	1210	-	-	-	-
Горелка № 4	1198	-	1158	1190	-
Лючок № 4-а	1240	1250	1300	1405	1300
Лючок № 4-б	1214	1193	1273	1320	1268
Лючок № 5	1220	1296	1198	1195	1191
Лючок № 6	1194	1185	1163	1170	1157
Горелка № 5	1184	-	-	-	-
Горелка № 6	1169	-	-	-	-
Лючок № 11	1200	1210	1168	1158	1171
Лючок № 12	1248	1304	1154	1175	1167
Лючок № 13	1192	1191	1150	1171	1174
Лючок № 14	1202	1239	1188	1123	1159

Ввиду различия процесса смешивания топлива и воздуха температура факела в правой стороне котла выше, чем в левой, как при сжигании газа, так и при сжигании мазута.

На рисунках 4.1 и 4.2 представлены результаты температур факела при различных схемах сжигания мазута с использованием механических форсунок на отметке 6,6 метров через лючки № 1-б - 0,3 метра, № 1-а - 5, 7 метра.

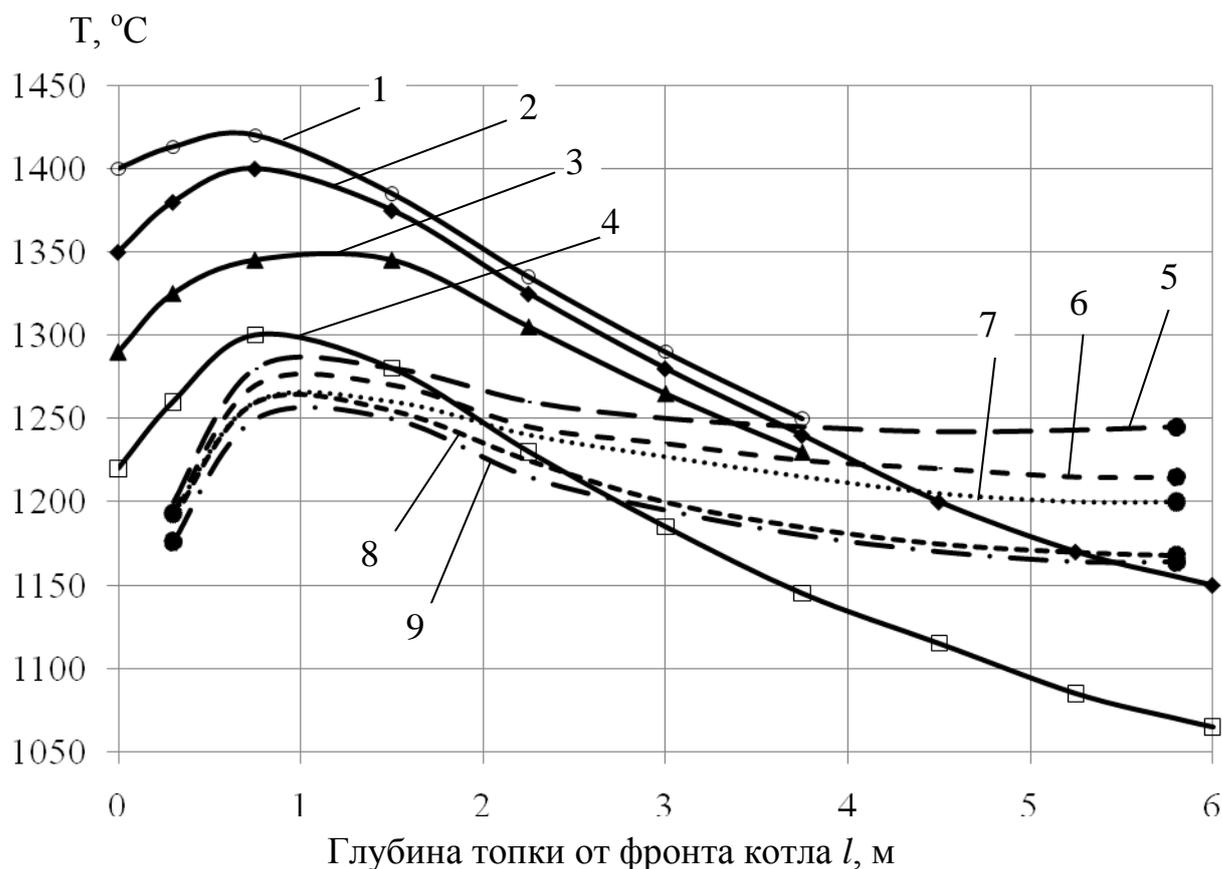


Рисунок 4.1. Влияние схемы сжигания мазута с использованием механических форсунок на отметке 6,6 м и сравнение с другими авторами:

1 – 4 – котел ЦКТИ-75-39Ф [19-20];

5 – 9 – данные настоящей работы, котел ТГМ-84Б, $D_k = 355$ т/ч:

1 – $z = 2,6 d$, $n = 1,06$, $\alpha = 1,05$, крутка горелок правое - левое;

2 – $z = 3 d$, $n = 1,06$, $\alpha = 1,05$, крутка горелок правое - левое;

3 – $z = 3,5 d$, $n = 1,06$, $\alpha = 1,05$, крутка горелок правое - левое;

4 – $z = 3 d$, $n = 1,06$, $\alpha = 1,05$, крутка горелок левое - правое;

5 – $z = 4 d$, $n = 3,1$, $\alpha = 1,045$, крутка горелок левое – правое, при сжигании газа во всех горелках;

6 – $z = 4 d$, $n = 3,1$, $\alpha = 1,095$, крутка горелок левое – правое, при сжигании газа в горелках № 2, 3, 5, 6 и мазута в горелках № 1, 4;

7 – $z = 4 d$, $n = 3,1$, $\alpha = 1,105$, крутка горелок левое – правое, при сжигании газа в горелках № 1, 4 и мазута в горелках № 2, 3, 5, 6;

8 – $z = 4 d$, $n = 3,1$, $\alpha = 1,095$, крутка горелок левое – правое, при сжигании газа в горелках № 1 – 4 и мазута в горелках № 5, 6;

9 – $z = 4 d$, $n = 3,1$, $\alpha = 1,16$, крутка горелок левое – правое, при сжигании мазута во всех горелках.

z – расстояние между горелок, d

n – коэффициент крутки воздуха.

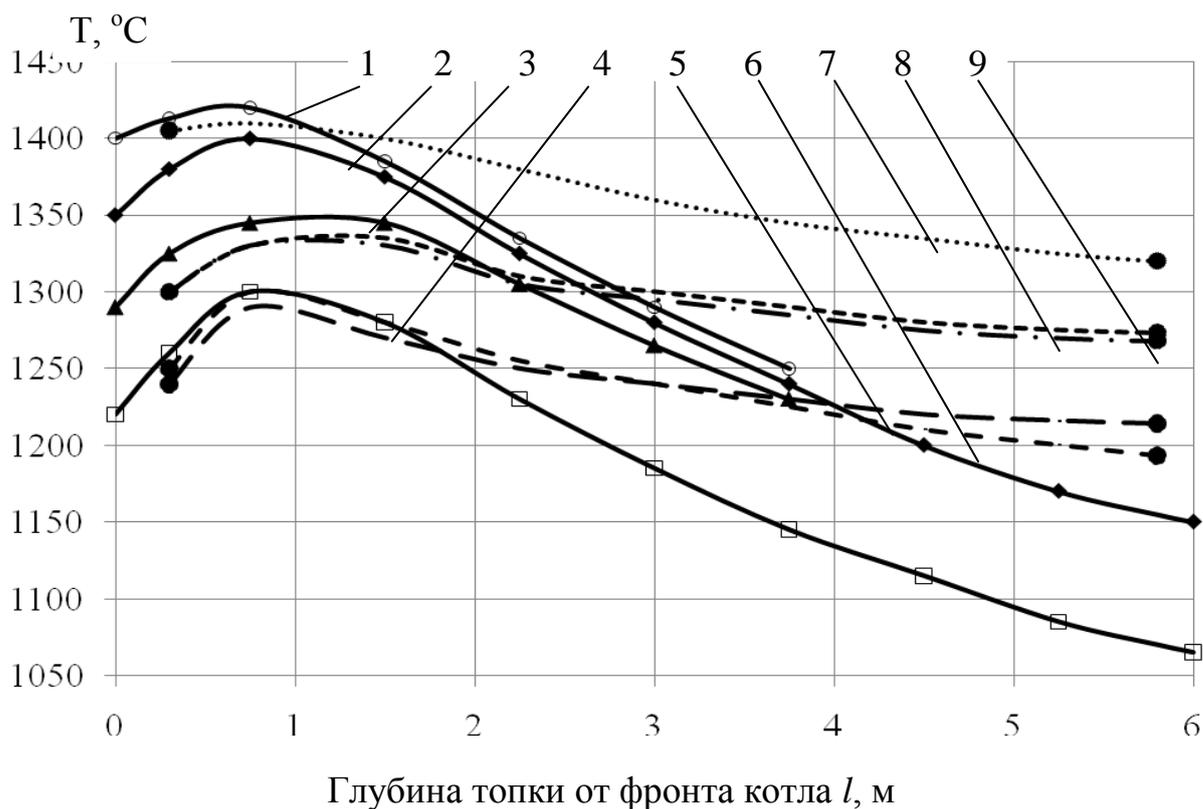


Рисунок 4.2. Влияние схемы сжигания мазута с использованием механических форсунок на отметке 6,6 м и сравнение с другими авторами;

1 – 4 – котел ЦКТИ-75-39Ф [19-20];

5 – 9 – данные настоящей работы, котел ТГМ-84Б, $D_k = 355 \text{ т/ч}$:

1 – $z = 2,6 d$, $n = 1,06$, $\alpha = 1,05$, крутка горелок правое - левое;

2 – $z = 3 d$, $n = 1,06$, $\alpha = 1,05$, крутка горелок правое - левое;

3 – $z = 3,5 d$, $n = 1,06$, $\alpha = 1,05$, крутка горелок правое - левое;

4 – $z = 3 d$, $n = 1,06$, $\alpha = 1,05$, крутка горелок левое - правое;

5 – $z = 4 d$, $n = 3,1$, $\alpha = 1,045$, крутка горелок левое – правое, при сжигании газа во всех горелках;

6 – $z = 4 d$, $n = 3,1$, $\alpha = 1,095$, крутка горелок левое – правое, при сжигании газа в горелках № 2, 3, 5, 6 и мазута в горелках № 1, 4;

7 – $z = 4 d$, $n = 3,1$, $\alpha = 1,105$, крутка горелок левое – правое, при сжигании газа в горелках № 1, 4 и мазута в горелках № 2, 3, 5, 6;

8 – $z = 4 d$, $n = 3,1$, $\alpha = 1,095$, крутка горелок левое – правое, при сжигании газа в горелках № 1 – 4 и мазута в горелках № 5, 6;

9 – $z = 4 d$, $n = 3,1$, $\alpha = 1,16$, крутка горелок левое – правое, при сжигании мазута во всех горелках.

z – расстояние между горелок, d

n – коэффициент крутки воздуха.

По данным [82-83,109] температура факела в топке котла ЦКТИ-75-39Ф выше при меньшем расстоянии между горелок $z = 2,6 d$, чем при $z = 3,5 d$. Крутка горелок правое – левое. Из рисунка 4.1 видно, что при крутке горелок правое-левое температура факела на 100°C выше, чем при крутке левое-правое, не меняя расстояние между горелками.

Температура факела возле заднего экрана ниже, чем возле фронта котла. Значения температур факела по глубине топке котла ТГМ-84Б сопоставляются с результатами Ахмедова Р.Б. [82-83].

На рисунках 4.3-4.4 представлены результаты по интенсивности излучения факела при сжигании мазута с использованием механических форсунок. Средняя нагрузка котла 355 т/ч.

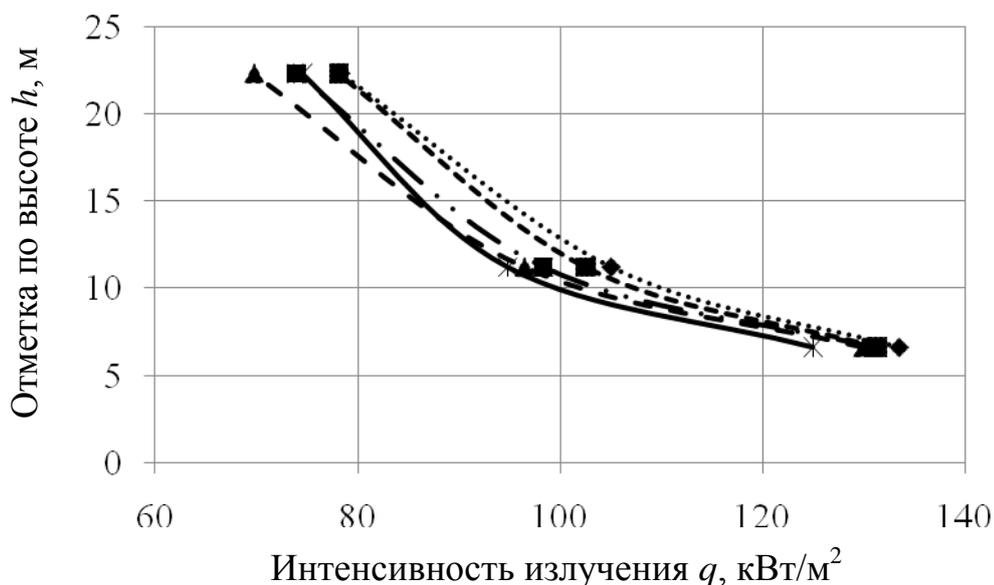


Рисунок 4.3. Интенсивность излучения факела в сечение 2 левой стороны котла ТГМ-84Б при сжигании мазута марки М 100 с использованием механических форсунок:

- ◆ – 355 т/ч при сжигании газа во всех горелках;
- ---- – 350 т/ч при сжигании газа в горелках № 2, 3, 5, 6 и мазута в горелках № 1, 4;
- ▲ — — - 360 т/ч при сжигании газа в горелках № 1 – 4 и мазута в горелках № 5, 6;
- — · — — – 355 т/ч при сжигании газа в горелках № 1, 4 и мазута в горелках № 2, 3, 5, 6;
- ж — — — — — – 360 т/ч при сжигании мазута во всех горелках

При сжигании газа во всех горелках котла ТГМ-84Б значения интенсивности излучения факела выше, чем при сжигании мазута во всех горелках (рисунок 4.3-4.4). Значения интенсивности излучения факела левой стороны котла отличаются от значений правой стороны котла. Интенсивность излучения факела по высоте топки котла на отметке 6,6 м в правой стороне выше на 15 – 50 кВт/м² в сравнение с левой стороной.

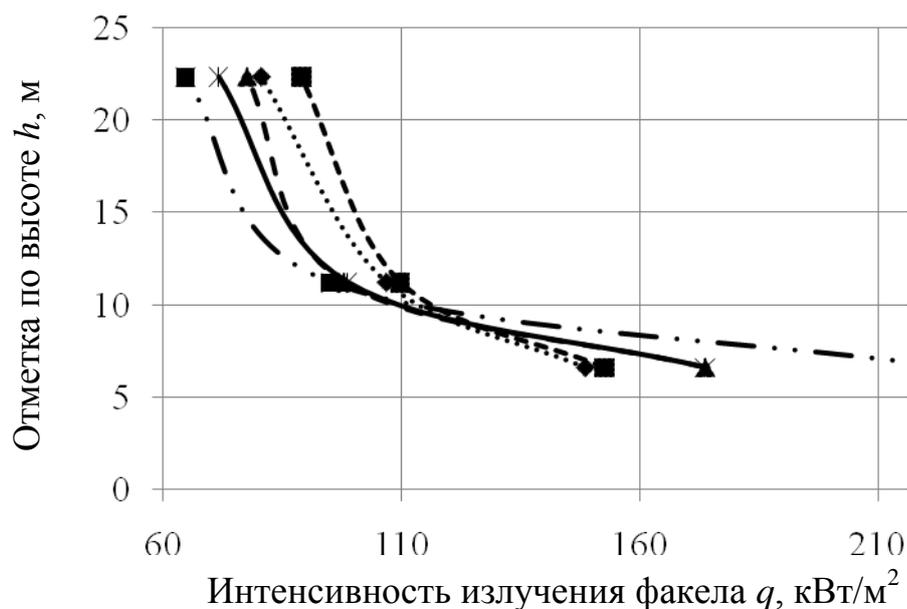


Рисунок 4.4. Интенсивность излучения факела в сечении 2 правой стороны котла ТГМ-84Б при сжигании мазута марки М 100 с использованием механических форсунок:

- ◆ – 355 т/ч при сжигании газа во всех горелках;
- --- – 350 т/ч при сжигании газа в горелках № 2, 3, 5, 6 и мазута в горелках № 1, 4;
- ▲ — — - 360 т/ч при сжигании газа в горелках № 1 – 4 и мазута в горелках № 5, 6;
- — · · — – 355 т/ч при сжигании газа в горелках № 1, 4 и мазута в горелках № 2, 3, 5, 6;
- ж — — – 360 т/ч при сжигании мазута во всех горелках

На рисунке 4.5 видно, что при переводе котла с топлива газ на мазут температура факела понижается по всему объему топочного пространства кроме правой стороны котла на отметке 6,6 м.

Максимальная температура факела 1405 °С фиксировалась на отметке 6,6 метров.

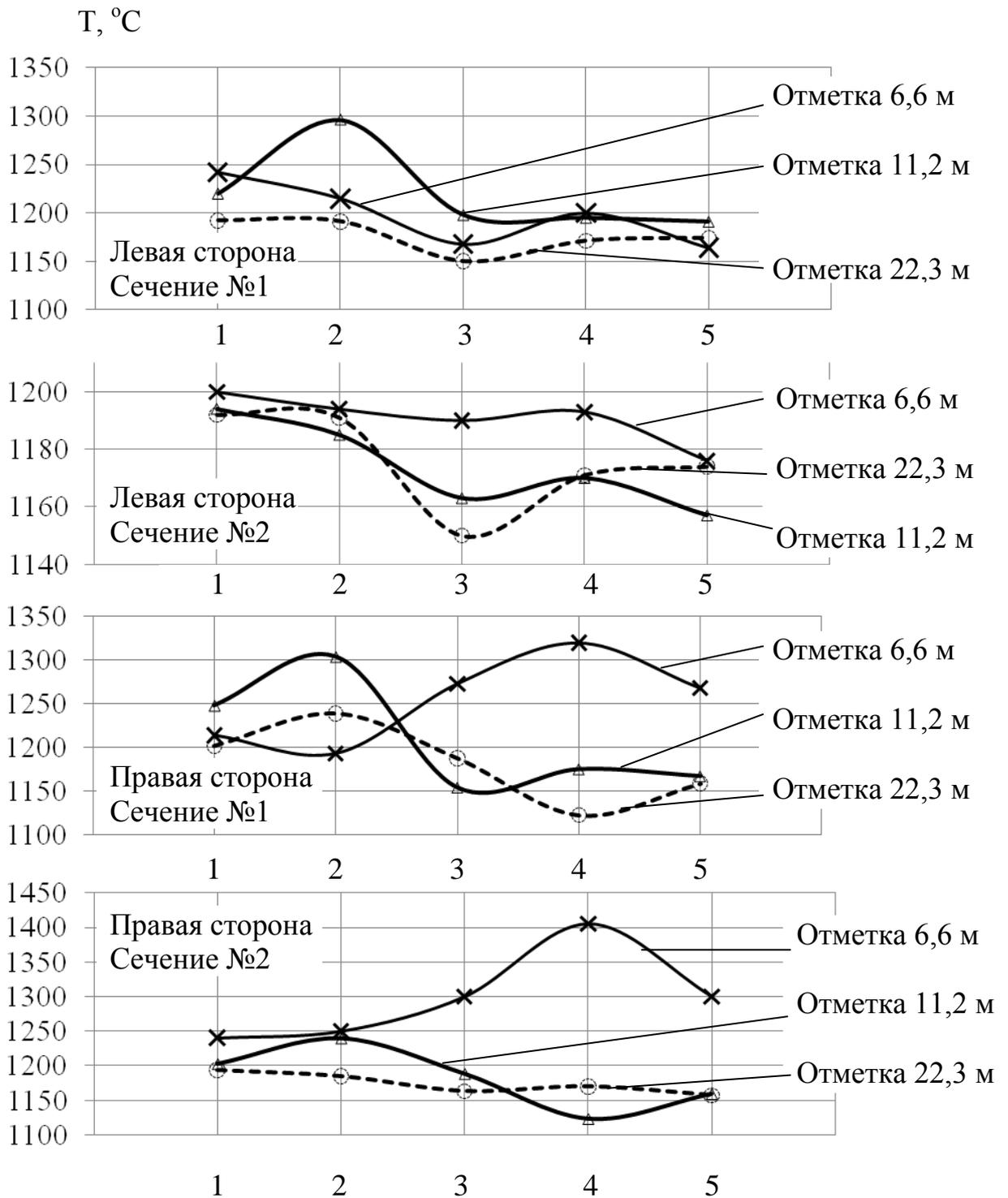


Рисунок 4.5. Влияние схемы сжигания мазута на температуру факела в левой и правой стороне котла ТГМ-84Б с паропроизводительностью 355 т/ч с использованием механических форсунок:

- 1 – газ во всех горелках;
- 2 – мазут в горелках № 1, 4;
- 3 – мазут в горелках № 5, 6;
- 4 – мазут в горелках № 2, 3, 5, 6;
- 5 – мазут во всех горелках,

4.2. Исследование схем сжигания газа и мазута с использованием паромеханических форсунок на котле ТГМ-84Б

В данном разделе проведено исследование схем сжигания мазута с использованием паромеханических форсунок:

- 1-ая схема – газ во всех горелках;
- 2-ая схема – мазут в горелках № 1, 4 и газ в горелках № 2, 3, 5, 6;
- 3-я схема – мазут в горелках № 2, 3 и газ в горелках № 1, 4, 5, 6;
- 4-ая схема – мазут в горелках № 1, 2, 3, 4 и газ в горелках № 5, 6;
- 5-ая схема – мазут в горелках № 2, 3, 5, 6 и газ в горелках № 5, 6;
- 6-ая схема – мазут во всех горелках.

Таблица 4.3. Значение интенсивности излучения факела на котле ТГМ-84Б при сжигании газа и с различными схемами сжигания мазута с использованием паромеханических форсунок

Место регистрации тепловых потоков	Значения тепловых потоков, кВт/м ²					
	Газ все горелки 355 т/ч	Мазут в горелках № 1, 4 Газ в гор. № 2, 3, 5, 6 337 т/ч	Мазут в горелках № 2, 3 Газ в гор. № 1, 4, 5, 6 313 т/ч	Мазут в горелках № 1 – 4 Газ в гор. № 5, 6 370 т/ч	Мазут в горелках № 2, 3, 5, 6 Газ в гор. № 1, 4 360 т/ч	Мазут во всех горелках 405 т/ч
Лючок № 1-а	215,3	121,1	447,2	350,8	307,1	334,7
Лючок № 1-б	167,1	2,1	362,2	399	341,6	364,5
Горелка № 1	123,4		353	-	217,6	-
Горелка № 3	164,8	176,2	-	-	-	-
Горелка № 2	137,2	451	-	-	-	-
Горелка № 4	132,6		337	-	185,4	-
Лючок № 4-а	174	107,4	415	355,3	185,4	199,2
Лючок № 4-б	196,9	151	511,5	295,6	500	555,1
Лючок № 5	247,4	203,8	348,5	343,9	467,9	334,7
Лючок № 6	105,1	128	79,8	634,7	-	77,5
Горелка № 5	153,3	192,3	213	-	-	-
Горелка № 6	171,7	242,8	265,8	-	-	-
Лючок № 11	50	52,26	36,19	66	68,43	86,7
Лючок № 12	242,8	233,7	477	624	523	330,1
Лючок № 13	91,3	70,6	52,3	59,15	61,4	75,22
Лючок № 14	91,3	54,56	52,3	79,8	79,8	22,3

При сжигании мазута по 3-ей и 5-ой схеме низшая теплота сгорания топлива мазута составляла $9561,5 \text{ ккал/м}^3$. Мазут М-100 с низшей теплотой сгорания $9533,75 \text{ ккал/м}^3$ сжигался по 2-ой, 4-ой и 6-ой схемах. Низшая теплота сгорания газа при всех исследованных схемах сжигания мазута составляла 8028 ккал/м^3 .

На рисунке 4.6. представлено влияние схемы сжигания мазута на отметках 6,6 м, 11,2 м 22,3 м на температуру факела в левой и правой стороне котла ТГМ-84Б при различных схемах сжигания мазута с использованием паромеханических форсунок. В исследованных схемах сжигания мазута производительность пара котла была различной.

При переводе горелок № 1, 4 с сжигания газа на мазут (с использованием паромеханических форсунок) температура факела:

- на отметке 6,6 метра снижается на $100 \text{ }^\circ\text{C}$ в сечение 1 левой стороны котла и в сечение 2 правой стороны котла; на $50 \text{ }^\circ\text{C}$ снижается в сечение 1 правой стороны котла; не меняется в сечение 2 левой стороны котла;
- понижается на $10 - 20 \text{ }^\circ\text{C}$ по всему сечению топки на отметке 11,2 метра;
- левой стороне котла повышается на $10 - 20 \text{ }^\circ\text{C}$ и понижается в правой стороне котла на отметке 11,2 метра.

При переводе горелок № 2, 3 с сжигания газа на мазут (с использованием паромеханических форсунок) температура факела:

- на отметке 6,6 метра повышается на $300 \text{ }^\circ\text{C}$ в правой стороне котла в сечение 1, в остальных исследуемых точках на отметке 6,6 м температура факела повышается на $250 \text{ }^\circ\text{C}$;
- на отметке 11,2 метра повышается на $200 \text{ }^\circ\text{C}$ в левой стороне котла в сечение 1; в правой стороне котла в сечение 1 повышается на $250 \text{ }^\circ\text{C}$; в сечение 2 температура факела не меняется в левой стороне котла;
- на отметке 22,3 метра не меняется.

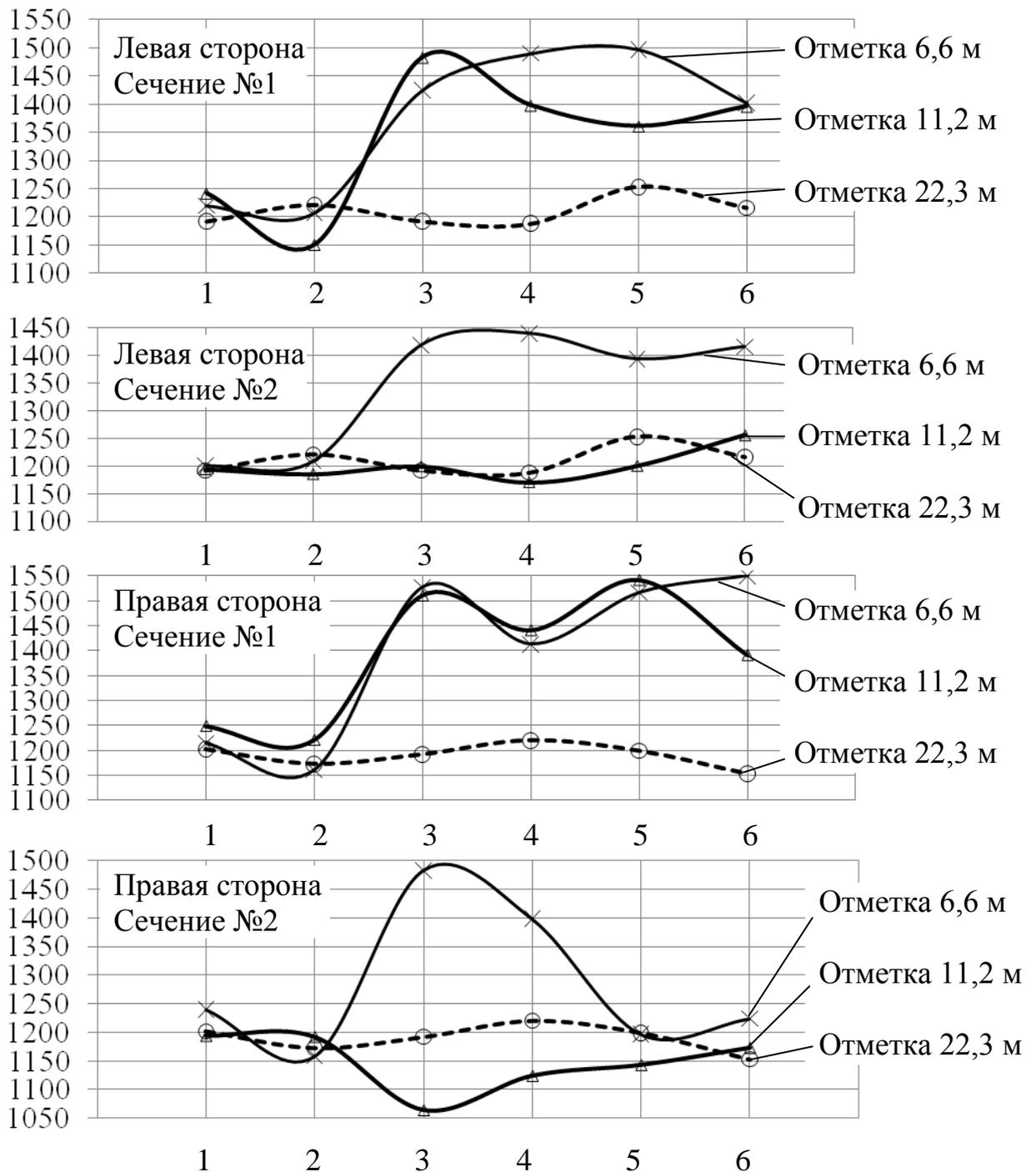


Рисунок 4.6. Влияние схемы сжигания газа и мазута на температуру факела в левой и правой стороне котла ТГМ-84Б с использованием паромеханических

форсунок:

- 1 – газ во всех горелках, 355 т/ч;
- 2 – мазут в горелках № 1, 4, 337 т/ч;
- 3 – мазут в горелках № 2, 3, 313 т/ч;
- 4 – мазут в горелках № 1, 2, 3, 4, 370 т/ч;
- 5 – мазут в горелках № 2, 3, 5, 6, 360 т/ч;
- 6 – мазут во всех горелках, 405 т/ч,

При переводе горелок № 1, 2, 3, 4 с сжигания газа на мазут (с использованием паромеханических форсунок) температура факела:

– на отметке 6,6 метра повышается на 150 °С в левой стороне котла в сечение 1; на 250 °С повышается в левой стороне котла в сечение 2; на 200 °С повышается в правой стороне котла в сечение 1 и сечении 2;

– на отметке 11,2 метра повышается на 270 °С в левой стороне котла в сечение 1; повышается на 200 °С в правой стороне котла в сечение 1; повышается на 200 °С в правой стороне котла в сечение 1; в сечение 2 температура факела понижается на 20 и 70 °С в левой и правой стороне котла соответственно;

– на отметке 22,3 метра в левой стороне котла не меняется, а в правой стороне увеличивается на 25 °С.

При переводе горелок № 2, 3, 5, 6 с сжигания газа на мазут (с использованием паромеханических форсунок) температура факела:

– на отметке 6,6 метра повышается на 120 °С в левой стороне котла в сечение 1; повышается на 200 °С в левой стороне котла в сечение 2; повышается на 300 °С в правой стороне котла в сечение 1; понижается на 50 °С в правой стороне котла в сечение 2;

– на отметке 11,2 метра повышается на 270 °С в левой стороне котла в сечение 1; повышается на 300 °С в правой стороне котла в сечение 1; в сечение 2 в левой стороне котла температура факела не меняется, в правой стороне котла снижается на 50 °С;

– на отметке 22,3 метра повышается на 70 °С в левой стороне котла и не меняется в правой стороне котла.

При переводе всех горелок с сжигания газа на мазут (с использованием паромеханических форсунок) температура факела:

– на отметке 6,6 метра повышается на 150 °С в левой стороне котла в сечение 1; повышается на 220 °С в левой стороне котла в сечение 2; повышается на 330 °С в правой стороне котла в сечение 1; понижается на 10 °С в правой стороне котла в сечение 2;

– на отметке 11,2 метра повышается на 170°C в левой стороне котла в сечение 1; повышается на 70°C в левой стороне котла в сечение 2; повышается на 150°C в правой стороне котла в сечение 1; понижается на 20°C в правой стороне котла в сечение 2;

– на отметке 22,3 метра в левой стороне котла повышается на 30°C , в правой стороне котла в понижается на 50°C .

Схема сжигания мазута с использованием паромеханических форсунок существенно влияет на температуру факела (рисунок 4.6.). При сжигании мазута в крайних горелках 1-го яруса (горелки № 1, 4) температура факела на отметках 6,6, 11,2 и 22,3 метра понижается в среднем на 50°C . Данная схема сжигания мазута не рекомендуется.

Сжигание мазута по схеме № 3 (мазут в горелках № 2, 3) при паропроизводительности 313 т/ч позволяет достичь больших температур факела в топочном объеме котла, чем при остальных исследованных схемах сжигания мазута.

Для исследования схемы сжигания мазута в горелках № 1 и № 4 на рисунке 4.7 представлено сравнение температуры факела в топке котла ТГМ-84Б с использованием паромеханических форсунок двух видов.

Суммарная температура во всех исследованных лючках котла ТГМ-84Б при сжигание газа больше, чем при сжигание мазута с использованием форсунок предлагаемые КГЭУ и еще больше, чем при сжигание мазута с использованием форсунок ФУЗ-5000.

При сжигании газа с производительностью пара 310 т/ч максимальная температура факела составляла 1300°C возле задних экранов топки; возле фронта котла температура факела составляла $1160 - 1194^{\circ}\text{C}$.

При сжигании мазута в горелках № 1 и № 4 с использованием форсунок ФУЗ-5000 и газа в остальных горелках максимальная температура факела возле задних экранов составляла 1220°C в левой стороне на отметке 22,3м и в правой стороне на отметке 11,2 м. Минимальная температура факела возле задних экранов составляла 1150 и 1160°C на отметке 6,6 м в левой и правой сторон

котла соответственно. Возле фронта в левой стороне котла температура факела составляла 1209, 1185 и 1220 °С на отметках 6,6, 11,2 и 22,3 м соответственно. Возле фронта в правой стороне котла температура факела составляла 1159, 1192 и 1173 °С на отметках 6,6, 11,2 и 22,3 м соответственно.

При использовании форсунок, разработанных в данной работе, мазут сжигался с теплотой сгорания 8961 ккал/кг. При использовании форсунок ФУЗ-5000 мазут сжигался с теплотой сгорания 9534 ккал/кг. При сжигании газа теплота сгорания топлива составляла 8028 ккал/м³.

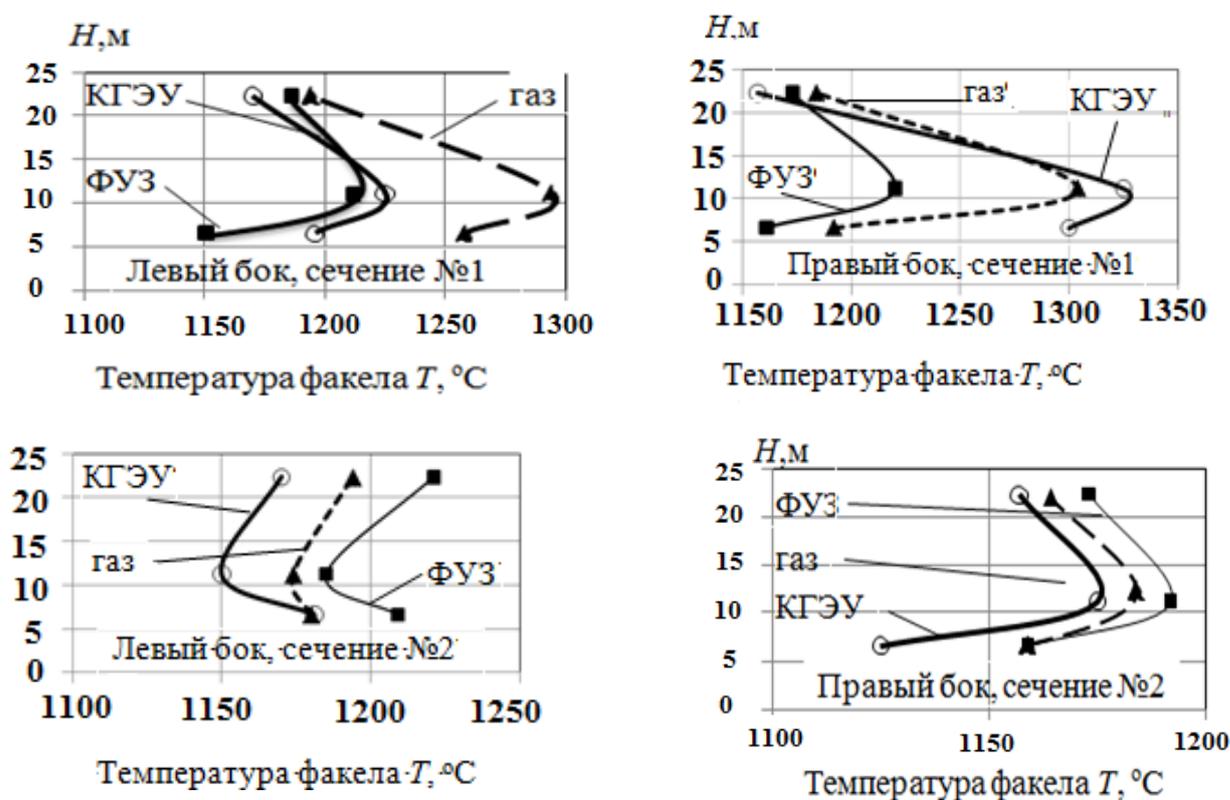


Рисунок 4.7. Температура факела по высоте топки (H) котла ТГМ-84Б при сжигании газа и мазута в горелках № 1 и № 4 с использованием форсунки ФУЗ и форсунки, предлагаемой в данной работе:

газ – все горелки работают на газу; ФУЗ – горелки № 1 и № 4 работают на мазуте с использованием паромеханических форсунок ФУЗ-5000, остальные на газу; КГЭУ – горелки № 1 и № 4 работают на мазуте с использованием паромеханических форсунок предлагаемые КГЭУ, остальные на газу

При сжигании мазута в горелках № 1 и № 4 с использованием форсунок, предлагаемых в данной работе, и газа в остальных горелках, температура факела на выходе из топки котла была ниже, чем при сжигании газа или газа и мазута с использованием форсунок ФУЗ-5000 (рисунок 4.7).

Температура факела возле заднего экрана котла больше, чем при сжигание мазута с использованием форсунок ФУЗ-5000. Возле фронта котла при использовании форсунок, разработанных в данной работе, температура факела ниже, чем при сжигании мазута с использованием форсунок ФУЗ-5000.

4.3 Исследование схем сжигания топлива на котлах ТГМ-84А

В данном разделе представлены полученные экспериментальные данные по исследованию схем сжигания газа и мазута на котле ТГМ-84А. Эксперименты проводились в филиалах ОАО «ТГК-16» Казанская ТЭЦ-3 (КТЭЦ-3) и Нижнекамская ТЭЦ-1 (НкТЭЦ-1).

На каждом из котлов ТГМ-84А НкТЭЦ-1 (станционные №№4,5) на фронтальной стене топки в 2 яруса установлены по 4 горелки ХФ-ЦКБ-ВТИ-ТКЗ единичной мощностью при работе на газе 76,7 МВт, на мазуте - 79,7 МВт с улиточным завихрителем, тангенциальным и осевым завихрителями воздуха.

Вид круток воздуха, показанный на рисунке 4.8 для котлов ТГМ-84А ст.№4,5 НкТЭЦ, аналогичен для котлов ТГМ-84А ст. №1,2 КТЭЦ-3.

Разница состоит в газораздаче для котлов ТГМ-84А КТЭЦ-3 и НкТЭЦ-1. Для котлов ТГМ-84А КТЭЦ-3 газораздача трубная периферийная (рисунок 4.9), а на НкТЭЦ-1 смешанная трубная и центральная.

Схема расположения тангенциального и аксиального завихрителей в продольном и поперечном разрезе с газораздачей для котла ТГМ-84А КТЭЦ-3 приведена на рисунках 4.9 и 4.10. Параметры крутки: улиточной 4,966, осевой 3,095, тангенциальной при 45° 1,049.

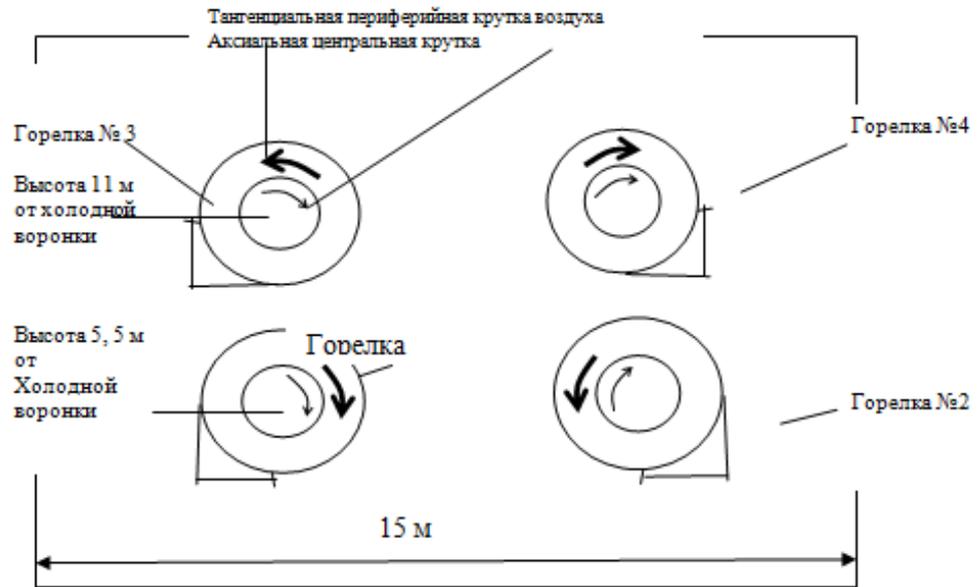


Рисунок 4.8. Схема нумерации горелок, круток воздуха в горелках и расположения горелок ХФ-ЦКБ-ВТИ-ТКЗ на фронтальной стене топки котлов ТГМ-84А №4,5 НкТЭЦ-1

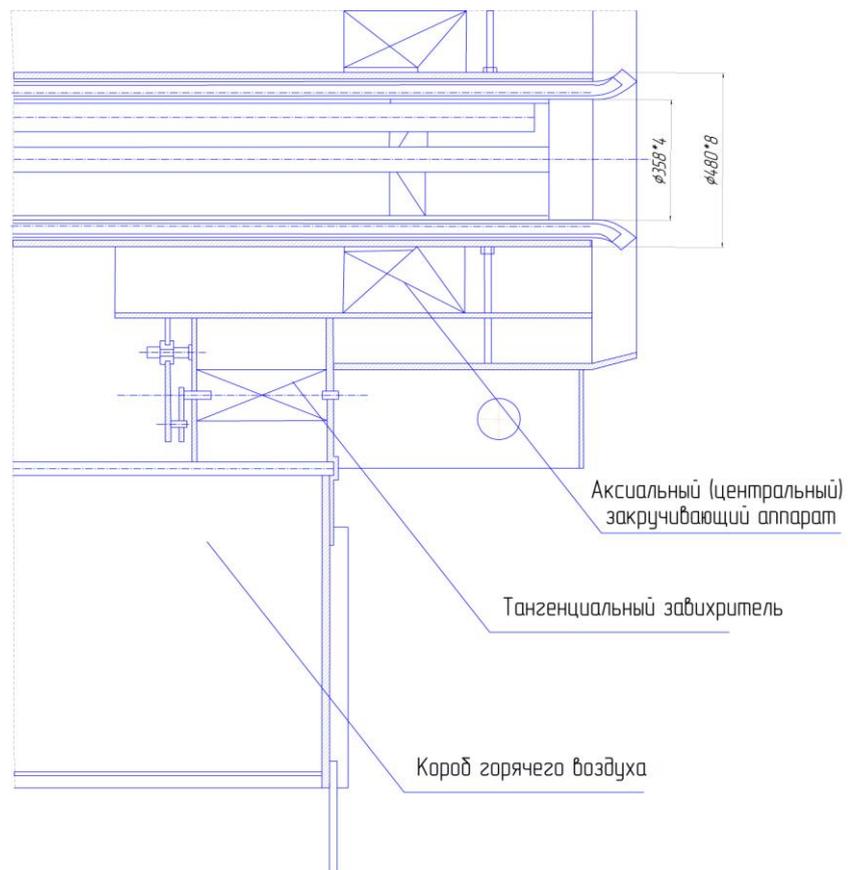


Рисунок 4.9. Схема механизма осуществления крутки воздуха и периферийная газораздача в горелках ХФ-ЦКБ-ВТИ-ТКЗ котлов ТГМ-84А КТЭЦ-3

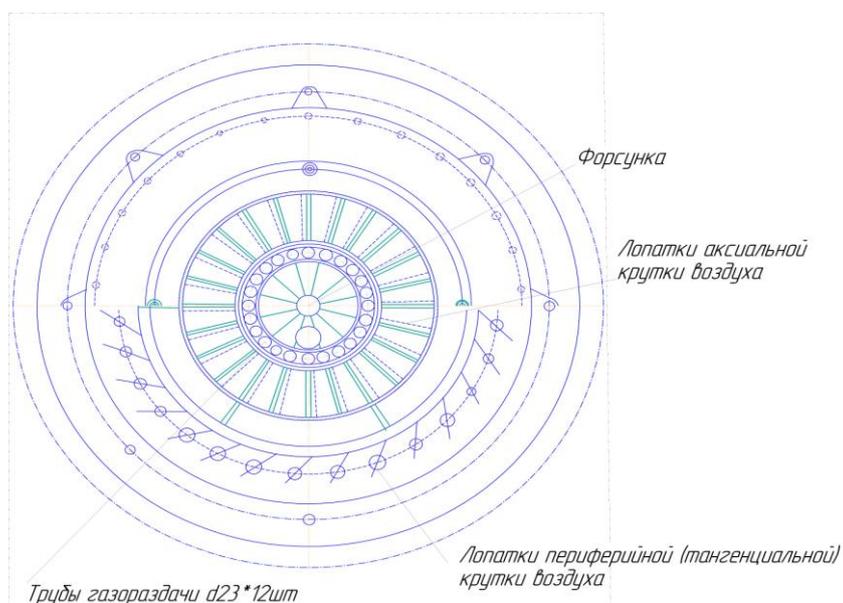


Рисунок 4.10. Схема расположения круток воздуха в поперечном разрезе горелок XF-ЦКБ-ВТИ-ТКЗ котлов ТГМ-84А КТЭЦ-3
Схема сечений приведена котла ТГМ-84А на рисунке 4.11.

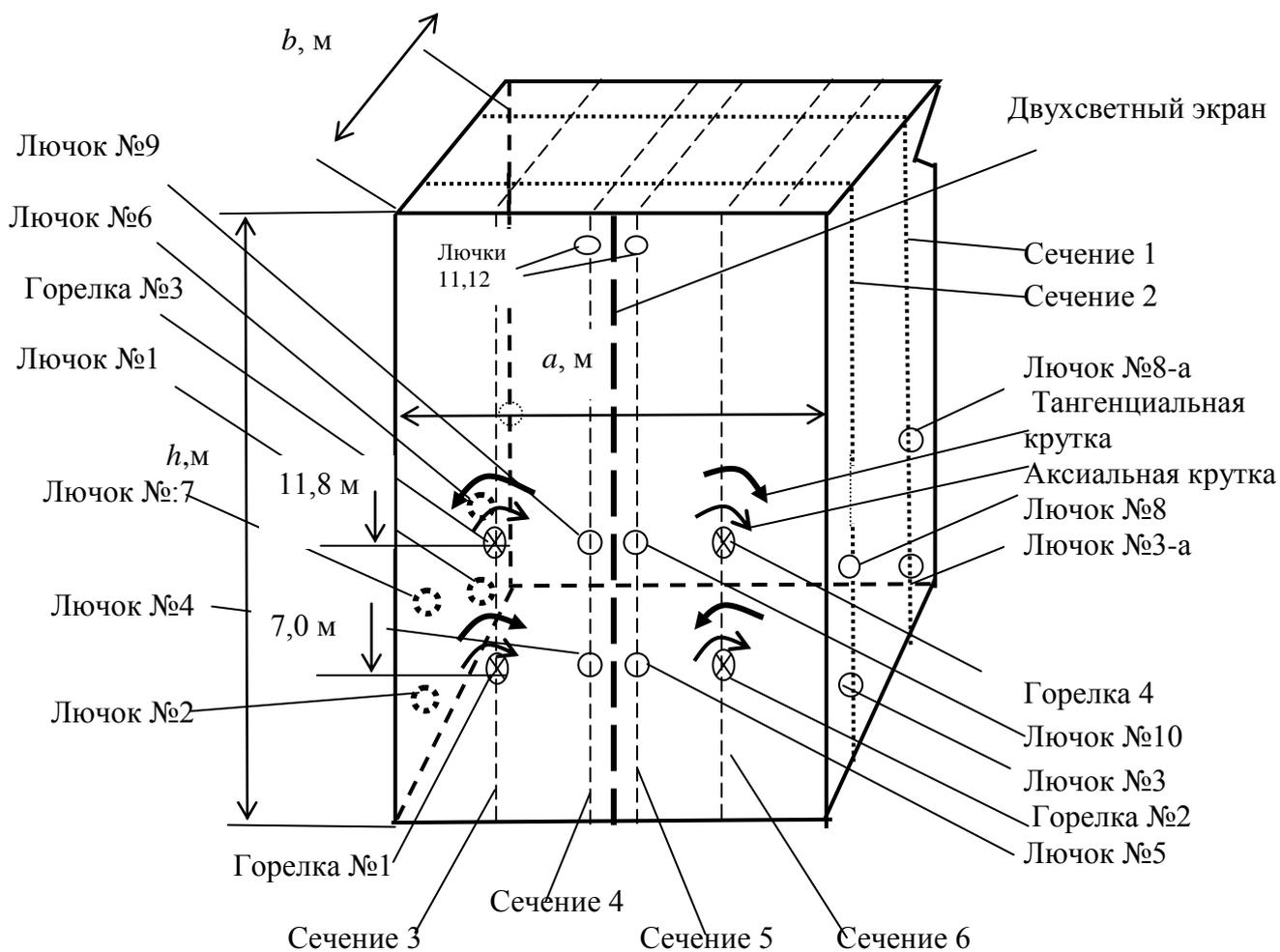


Рисунок 4.11. Схема сечений топок котлов ТГМ-84А:

⊗ - горелки фронтальной стены топочной камеры, ○ лючки

Сечения по глубине топок :

- сечение №1 проходит через лючки левого экрана (№1 на отм. 5,5 м, №6 на отм. 9,9 м) и через лючки правого экрана (№3-а на отм. 5,5 м, №8-а на отм. 9,9 м);

- сечение №2 проходит через лючки левого экрана (№2 на отм. 5,5 м, №7 на отм. 9,9 м) и через лючки правого экрана (№3 на отм. 5,5 м, №8 на отм. 9,9 м);

Сечения по ширине топок:

- сечение №3 проходит через горелки (№1 на отм. 7,1м, №3 на отм. 11,8 м);

- сечение №4 проходит через лючки (№4 на отм. 7,1м, №9 на отм. 11,8 м, №11, на отм. 21 м);

- сечение №5 проходит через лючки (№5 на отм. 7,1м, №10 на отм. 11,8 м, №12, на отм. 21 м);

- сечение №6 проходит через горелки (№2 на отм. 7,1м, №4 на отм. 11,8 м);

На рисунках 4.12 и 4.13 приведены данные по зависимости КПД и температуры уходящих газов $t_{у.г.}$ от нагрузки при сжигании мазута и смешанного топлива.

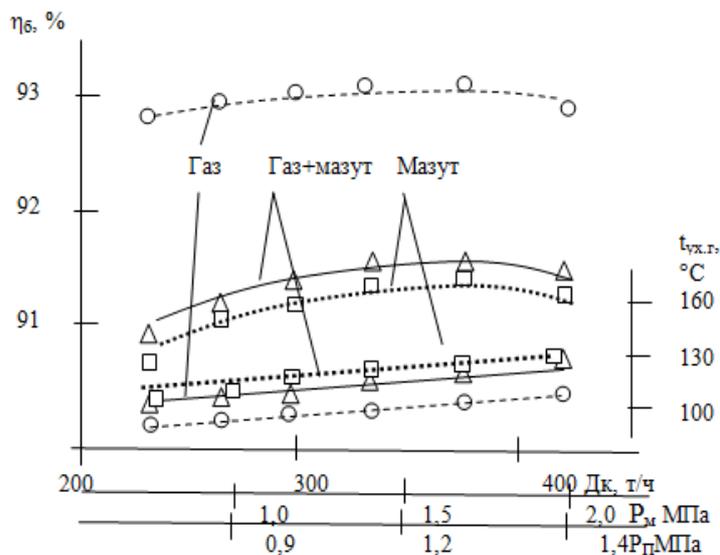


Рисунок 4.12 Зависимость КПД брутто и температуры уходящих газов $t_{у.г.}$ от нагрузки D_k котла ТГМ-84А №1 КТЭЦ-3 при сжигании: Δ - смешанного топлива: газа (горелки №№3,4) и мазута в паромеханических форсунках ФУЗ (горелки №№1,2), \square - мазута (горелки №№1-4), \circ - газа (горелки №№1-4)

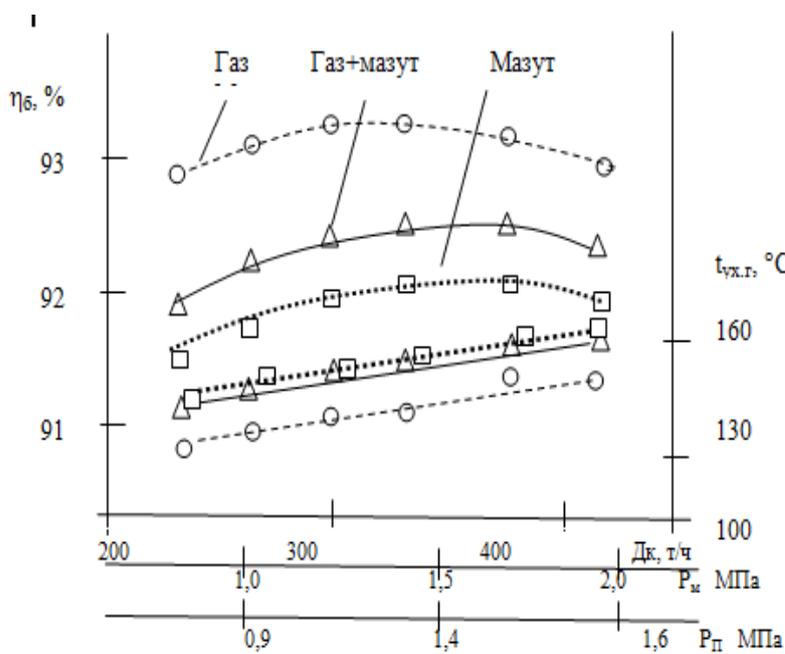


Рисунок 4.13. Зависимость КПД брутто и температуры уходящих газов $t_{ух.г}$ от нагрузки Дк котла №2 КТЭЦ-3 при сжигании: Δ -смешанного топлива: газа (горелки №№3,4) при давлении мазута P_m и пара P_p в паромеханических форсунках ФУЗ-7000 (горелки №№1,2), \square - мазута (горелки №№1-4), \circ - газа (горелки №№1-4).

При экспериментах, данные по которым приведены на рисунках 4.12, 4.13, сжигался мазут с теплотой сгорания 9230 ккал/кг. Теплота сгорания газа составляла 7950 ккал/м³. Как видно, при использовании для сжигания мазута форсунок ФУЗ КПД с увеличением крутки воздуха снижается на 1,1 %.

На рисунке 4.14 приведены данные по КПД и температуры уходящих газов $t_{ух.г}$ при сжигании смешанного топлива: газа и мазута в механических форсунках в котле ТГМ-84А №4 НкТЭЦ-1. Теплота сгорания мазута М-100 в опытах равнялась 9230 ккал/кг, обводненность 1% и содержание серы 2,5 % и газа 7950 ккал/м³.

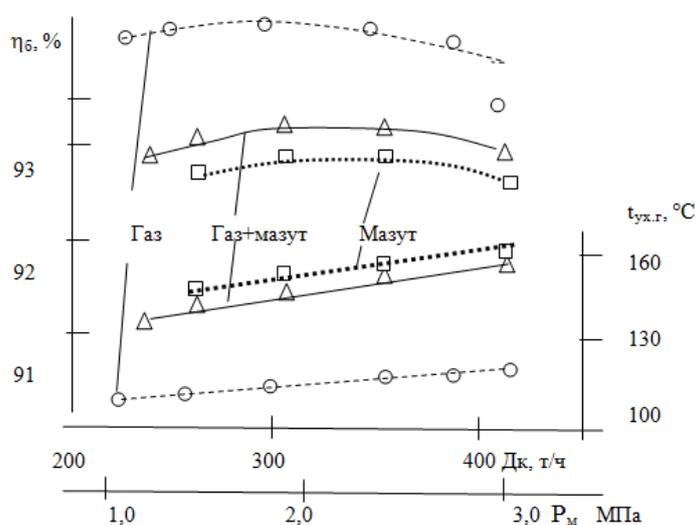


Рисунок 4.14. Зависимость КПД брутто и температуры уходящих газов $t_{ух.г}$ от нагрузки Дк котла ТГМ-84А №4 при сжигании: Δ -смешанного топлива: газа (горелки №№3,4) и мазута в механических форсунках при давлении P_m (горелки №№1,2), \square - мазута (горелки №№1-4) \circ - газа (горелки №№1-4)

Как видно из рисунка 4.14, зависимость КПД котла ТГМ-84А №4 НкТЭЦ-1 от нагрузки имеет максимум области нагрузки 310 т/ч. На газе работали горелки №№3 и 4 второго верхнего яруса, на мазуте работали горелки №№1 и 2 с использованием механических форсунок.

Сравнивая данные рисунка 4.14 с данными рисунков 4.12, 4.13 видно, что КПД котла ТГМ-84А №4 НкТЭЦ-1 выше в среднем на 1 % по сравнению с котлами ТГМ-84А №1 и №2 КТЭЦ-3. Высокие значения КПД при сжигании газа во всех горелках №№1-4 (см. рисунок 4.14) обусловлены сравнительно низкими температурами уходящих газов 110...125 °С.

У всех исследованных котлов ТГМ-84А НкТЭЦ -1 и КТЭЦ-3 направление вращения тангенциальной определяющей крутки воздуха встречное с восходящим потоком у боковых стенок для горелок №№1,2 нижнего яруса и с восходящим потоком для горелок №№3,4 верхнего яруса. Принятая ориентация вращения тангенциальной крутки дополнительно увеличивает тепловые потоки от факела на под топки.

На рисунке 4.15 приведены значения интенсивности излучения факела по высоте топки у заднего экрана для нагрузки 420 т/ч при измерениях радиометром со стороны левой стены котла ТГМ-84А №1 КТЭЦ-3 при сжигании газа, мазута и смешанного топлива: газа и мазута.

На уровне горелок при $h=10$ м интенсивность излучения факела при сжигании мазута в 1,7 раза превышает интенсивность излучения факела при сжигании газа.

Совпадающие с результатами настоящего исследования данные Митора В.В. для котла ПК-19 показывают также снижение интенсивности излучения факела при сжигании газа по сравнению сжиганием мазута.

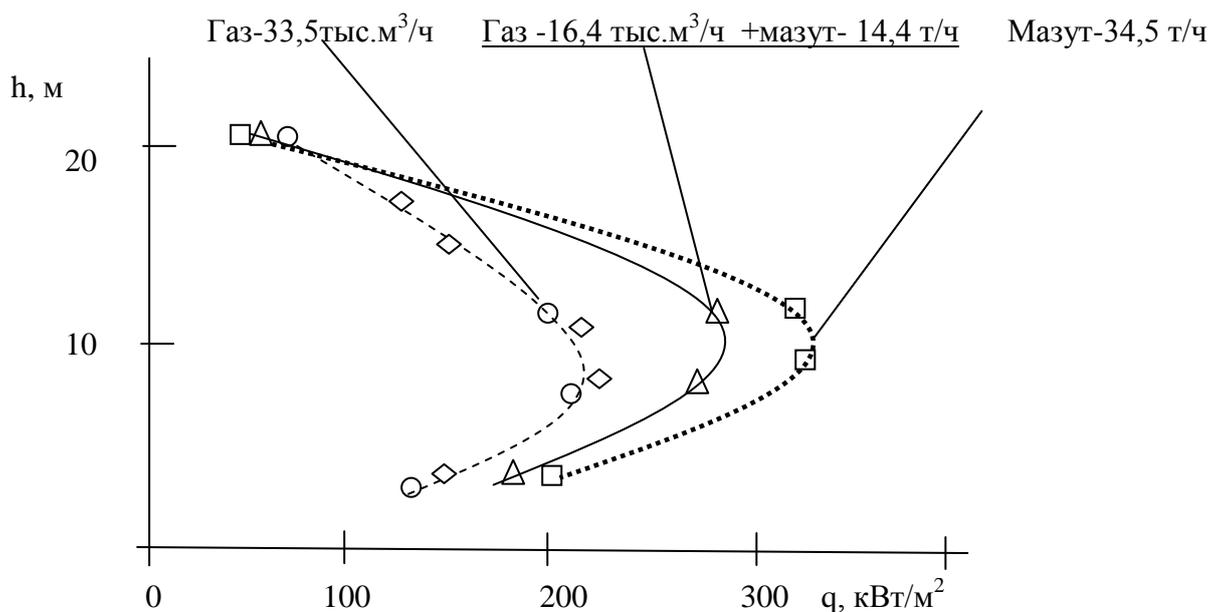


Рисунок 4.15. Интенсивности излучения факела q по высоте топки h у заднего экрана для нагрузки 420 т/ч со стороны левой стены котла ТГМ-84А №1 КТЭЦ-3 при сжигании:

- - газа, □ - мазута и смешанного топлива : △ - газа и мазута,
- ◇ - данные Митора В.В. [8] для котла ПК-19 при сжигании газа

Зависимости КПД от нагрузки показывают, что с ростом нагрузки в области до 350...400 т/ч несмотря на рост температуры уходящих газов, для сжигания мазута наблюдается рост КПД, что обуславливается ростом тепловых потоков, падающих на капли мазута в начальной зоне факела. Для сжигания газа такой зависимости не наблюдается. Поэтому для эффективного сжигания мазута котлы должны работать на нагрузке не менее 300...320 т/ч и при давлении мазута не менее 1,8...2,0 МПа.

Снижение КПД при увеличении интенсивности излучения факела при сжигании мазута с ростом нагрузки связано с конструктивными особенностями по распределению теплоты между поверхностями нагрева котла [81].

При среднем давлении 4 МПа теплоты, получаемой радиацией, недостаточно для покрытия полной потребности на парообразование (62 %), в связи с чем часть теплоты, затрачиваемой на испарение воды, передают в

экономайзер. Поэтому в барабанных котлах среднего давления экономайзер выполняют кипящего типа, то есть таким, в котором питательная вода не только подогревается до насыщения, но и частично превращается в пар.

Таблица 4.4. Распределение теплоты между поверхностями нагрева котлов

Давление перегретого пара, МПа	Температура перегретого пара, °С	Температура питательной воды, °С	Распределение теплоты между поверхностями нагрева котла, %		
			парообразующие	пароперегревательные	экономайзерные
4	440	145	62	19	19
10	540	215	49	30	21
14	570	230	39	36	25
14	570/5	230	32	46	22
25,5	565/5	260	-	58	42

В барабанных котлах высокого давления (14 МПа и выше) доля теплоты, используемая на парообразование, в значительной мере снижается (таблица 4.4), и теплоты, передаваемой в топочной камере, становится достаточно для образования требуемого количества пара, в связи с чем, экономайзер выполняют некипящего типа.

Прямоточные котлы также имеют некипящие экономайзеры, из которых вода переходит в парообразующие трубы через распределительный коллектор. Подача в коллектор не воды, а пароводяной смеси вызвала бы резко неравномерное ее распределение по параллельным трубам.

В барабанных котлах среднего давления, кроме кипящих экономайзеров, для покрытия недостающей парообразующей поверхности нагрева иногда применяют конвективные парообразующие поверхности нагрева – конвективные пучки.

Конвективной парообразующей поверхностью нагрева в прямоточных котлах докритического давления является переходная зона, вынесенная в конвективный газоход. Вынесенная переходная зона, по конструкции напоминает змеевиковый экономайзер. Она располагается между

пароперегревателем и экономайзером. В переходной зоне заканчивается парообразование, и пар доводится до слабого перегрева (на 10–20°C). Парообразующие поверхности при давлении выше 14 МПа для котлов всех систем почти исключительно располагают в топочной камере в виде топочных экранов, которые воспринимают тепловое излучение от факела. В связи с изложенным, при экспериментах на котлах ТГМ-84А очень важно оценить теплонапряженность топочного пространства для диагностирования эффективности сжигания топлива для повышения КПД топки [102-103].

На рисунке 4.15 приведена схема регулирования температуры пара на выходе из котла ТГМ-84Б путем впрыска собственного конденсата в пароохладители первой, второй и третьей ступени.

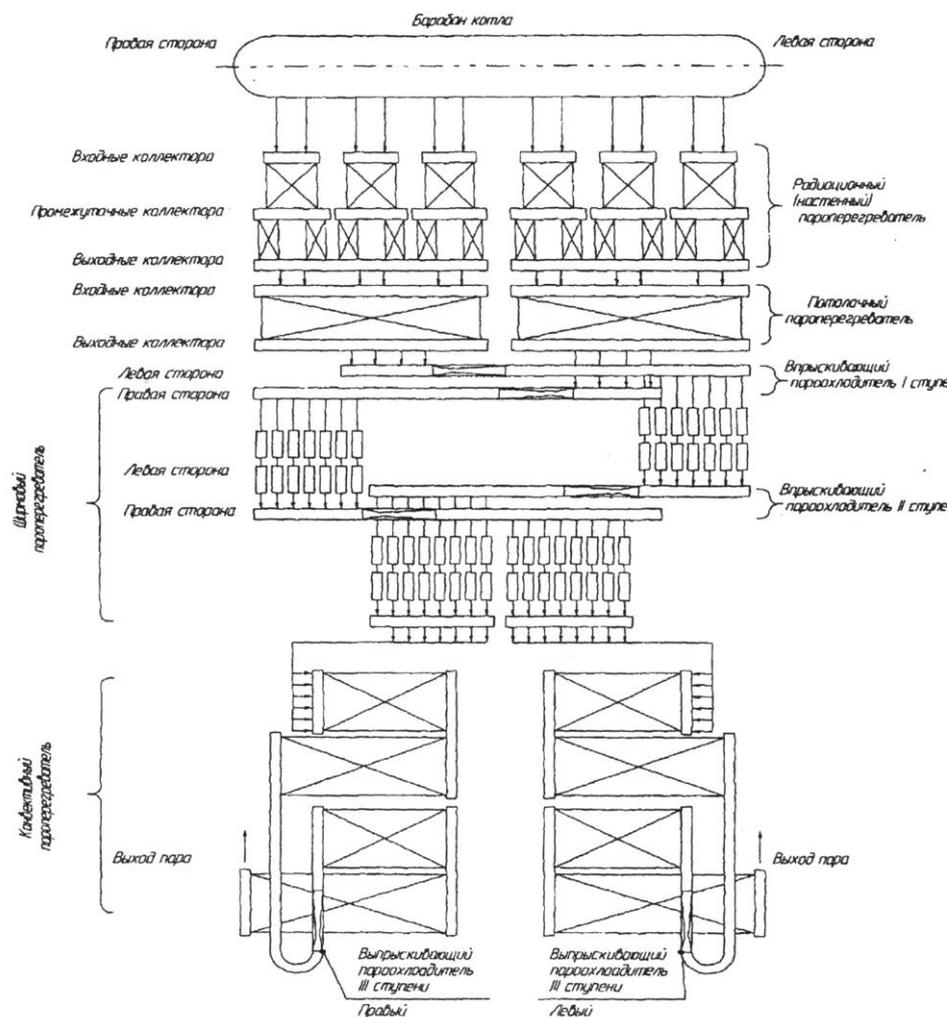


Рисунок 4.15. Схема впрыскивающих пароохладителей котла ТГМ-84Б (средний расход конденсата по впрыскам: 1-й -10 т/ч, 2-й- 2 т/ч, 3-й – 1 т/ч)

Система впрыска собственного конденсата для ТГМ-84Б аналогична для котлов ТГМ-84А и ТГМ-96Б.

4.4. Сжигание топлива в котлах ТГМ-84Б при различных крутках воздуха

На рисунке 4.16 приведены зависимости КПД от нагрузки при сжигании мазута М100 с теплотой сгорания 9230 ккал/кг для котла ТГМ-84Б. Теплота сгорания газа составляла 7950 ккал/м³.

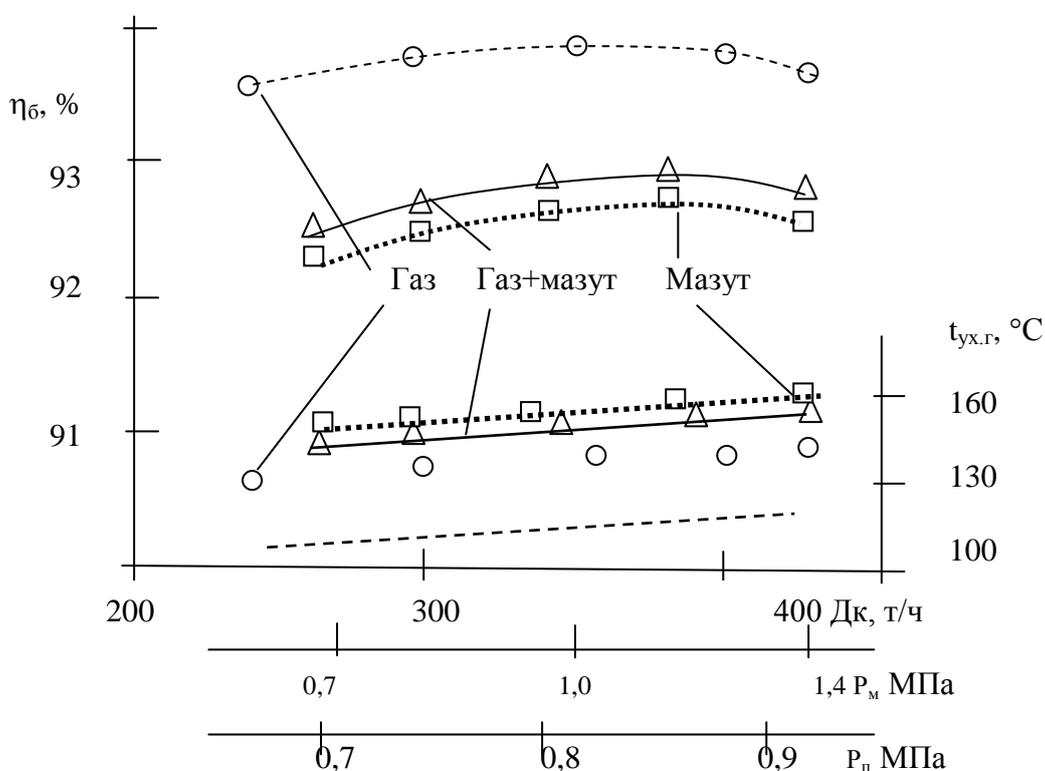


Рисунок 4.16. Зависимость КПД брутто и температуры уходящих газов $t_{ух.г}$ от нагрузки D_k котла ТГМ-84Б при сжигании :

- Δ - смешанного топлива: мазут (горелки №№1-4), газ – (горелки 5,6) ,
 \square - мазута в паромеханических форсунках ФУЗ-5000 при давлении мазута P_m и пара P_p на распыл (горелки №№1-6) и \circ - газа (горелки №№1-4).

Угол наклона лопаток тангенциальных завихрителей 45°. Параметр крутки лопаток тангенциальных завихрителей 1,049.

Из сравнения данных рисунков 4.13-4.16 видно, что при механическом распыливании КПД котла ТГМ-84А при сжигании мазута выше, чем для котла ТГМ-84Б с применением паромеханических форсунок. Направления круток воздуха в горелках котла ТГМ-84Б №9 НкТЭЦ-1 дано в таблице 4.5. Угол наклона лопаток тангенциальных завихрителей 45° , что соответствует параметру крутки 1,049.

Таблица 4.5. Направления круток в горелках котла ТГМ-84Б №9 НкТЭЦ-1

Распределение тепловых мощностей по ярусам горелок составляет: верхний ярус 100 МВт, нижний ярус 200 МВт. Горелка ГМУ-45 двухпоточная по воздуху. 1-й поток воздуха идет через направляющую тангенциальную крутку в количестве около 78%. Второй поток идет через аксиальную крутку (около 22%). Как правило, ориентация вращения направляющей тангенциальной крутки воздуха по горелкам 2-го яруса сходящаяся по типу правая крутка + левая крутка. Для горелок первого нижнего яруса при виде с фронтальной стены котла крутка идет попарно встречная сходящаяся. Такое сочетание круток обеспечивает восходящий поток от горелок 2-го яруса. Однако крутка воздуха в горелках первого яруса снижает тепловые потоки на нижнюю часть экранов. Поскольку результирующая закрутка определяется горелками второго яруса, то в целом восходящий по центру половинки топки с учетом двухсветного экрана увеличивает температуру продуктов сгорания на входе в ширмовый пароперегреватель. При работе на мазуте получаемый восходящий поток продуктов сгорания не обеспечивает достаточной температуры на выходе из топки. Результаты измерений интенсивности излучения факела радиометром и температуры факела на котле ТГМ-84Б №9 НкТЭЦ-1 приведены на рисунке 4.17.

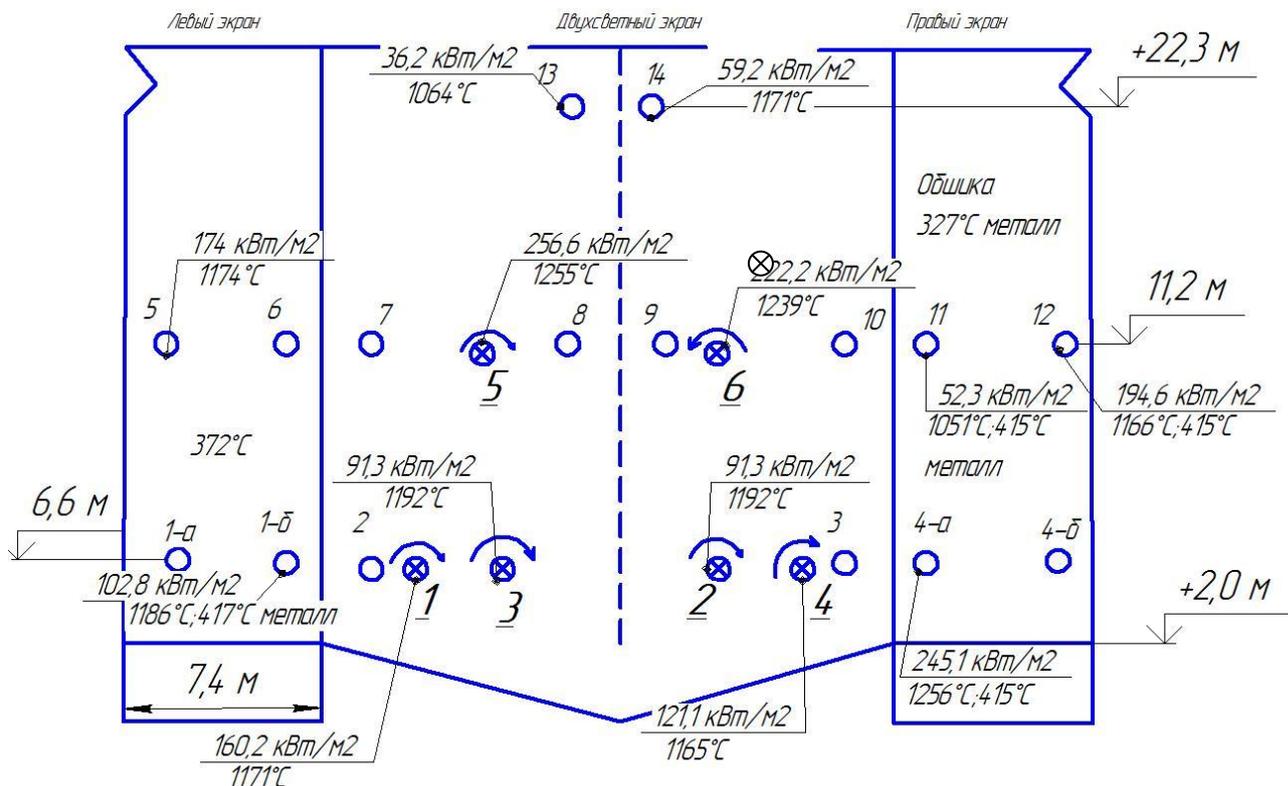


Рисунок 4.17. Интенсивность излучения факела по лючкам и горелкам котла ТГМ-84Б НкТЭЦ-1:

○ - лючки, ⊗ - горелки

При проведении экспериментов нагрузка составляла 313 т/ч, расход газа 15,8 тыс.м³/час, расход мазута 9 т/час. Горелки 2,3 работают на мазуте, остальные - на газе. Крутка воздуха по номерам горелок 1-6 и по положениям лопаток в угловых градусах 20пр/50пр/ 50пр /60пр /60пр /60лев. КПД - 93,77%. Температура уходящих газов 129 °С. Избыток воздуха 1,12. Форсунки механические. Давление мазута 2,6 МПа .

Как видно из рисунка 4.17, крутка воздуха горелок 1-4 нижнего яруса односторонняя правая по часовой стрелке приводит к повышенному значению температуры на выходе из топки в правой половине полутопки. За счет взаимодействия факелов в правой половине создается восходящий поток продуктов сгорания, который и приводит к повышению температуры на

выходе из топки. КПД котла повышается. Поэтому следует считать, что сходящаяся кривка, показанная в таблице 4.5 не является оптимальной.

Результаты измерений интенсивности излучения факела на котле ТГМ-84Б № 6 НкТЭЦ-1 при работе горелок 1-4 на мазуте М100 и горелок 5,6 на газе приведены на рисунке 4.18.

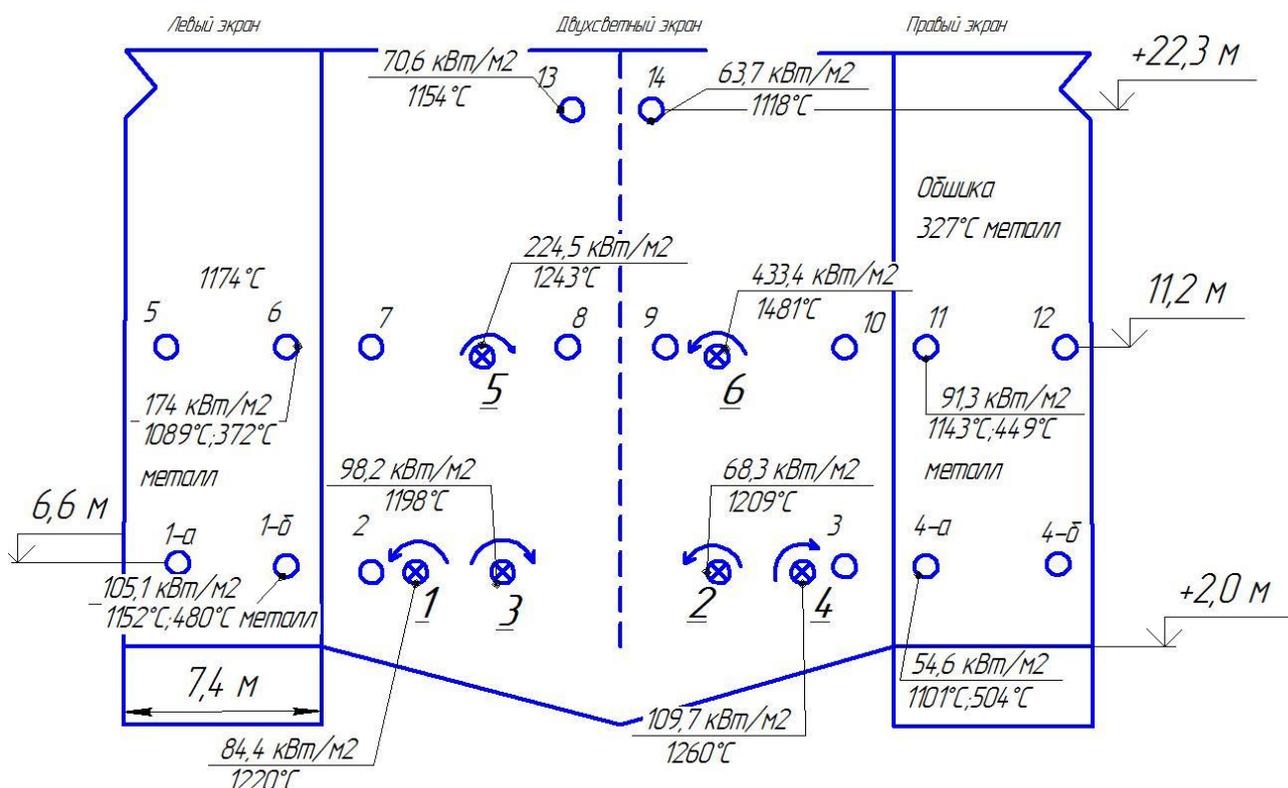


Рисунок 4.18. Значения температур по лючкам и горелкам котла ТГМ-84Б №6 НкТЭЦ-1:

○ - лючки, ⊗ - горелки,

горелки на мазуте 1-4, на газе 5-6.

При проведении экспериментов нагрузка составляла $D = 300$ т/ч, расход газа - 8 тыс.м³/час, расход мазута - 15 т/час. Кривка воздуха по горелкам 1-6: 20лев/25пр/25лев/30пр/45лев. КПД составляло 93,5 %. Температура уходящих газов 125 °C. Избыток воздуха 1,1. Мазут сжигался с использованием механических форсунок, давление мазута $P_m = 2,6$ МПа.

Как видно из рисунка 4.18, измененная, по сравнению с таблицей 4.5, крутка при работе всех горелок нижнего яруса на мазуте также дает повышенные значения КПД. Некоторой причиной повышенных значений КПД по сравнению с рисунком 4.16, являлась более низкая температура уходящих газов.

4.5. Теплоэнергетические характеристики факела при сжигании мазута

На горение мазутного факела, как уже отмечено в предыдущих главах, влияет множество факторов: температура мазута перед горелкой, давление распыливающего агента и его тип, конструктивные особенности мазутной форсунки, параметр крутки воздуха и т.д. Обобщенные данные в Нормативном методе теплового расчета котлов не дают точного распределения полей падающих потоков в топочном объеме парового котла, способствующего для повышения эффективности совместного сжигания газа и мазута.

Распад жидкости зависит от режима ее истечения. При малой относительной скорости жидкости и окружающего газа после распылителя образуется сплошная струя или пленка. При увеличении скорости струя начинает распадаться на отдельные капли, а длина сплошного участка сокращается.

При дальнейшем увеличении скорости дробление происходит в непосредственной близости от распыливающего устройства. Этот режим и принято считать распыливанием.

Для количественной оценки параметров факела распыла введены следующие характеристики: дисперсные, определяющие факел как некоторую совокупность частиц различных размеров. Характеристики распределения отражают профиль отдельных потоков по сечению факела. К ним относятся коэффициенты радиальной $k_{НР}$ и окружной $k_{НО}$ неравномерности. Характеристики формы позволяющие определить габариты факела на заданном расстоянии h от распылителя. Энергетические характеристики - используются для оценки экономичности способа распыливания и распыливающего

устройства. Гидродинамические параметры, которые включают скорости капель и газа в любом сечении факела.

Закрученная струя имеет большой угол раскрытия и большую интенсивность перемешивания капель топлива с окислителем, а также большую эжектирующую способность. Рециркуляция раскаленных продуктов горения к свежей топливовоздушной смеси к корню факела происходит как с наружной образующей горящего факела, так и внутри факела, в зоне обратных токов.

На рисунке 4.19 приведены результаты экспериментов на котле ТГМ -84Б работающего на смешанном топливе, при разных долях природного газа в смеси с мазутом М100.

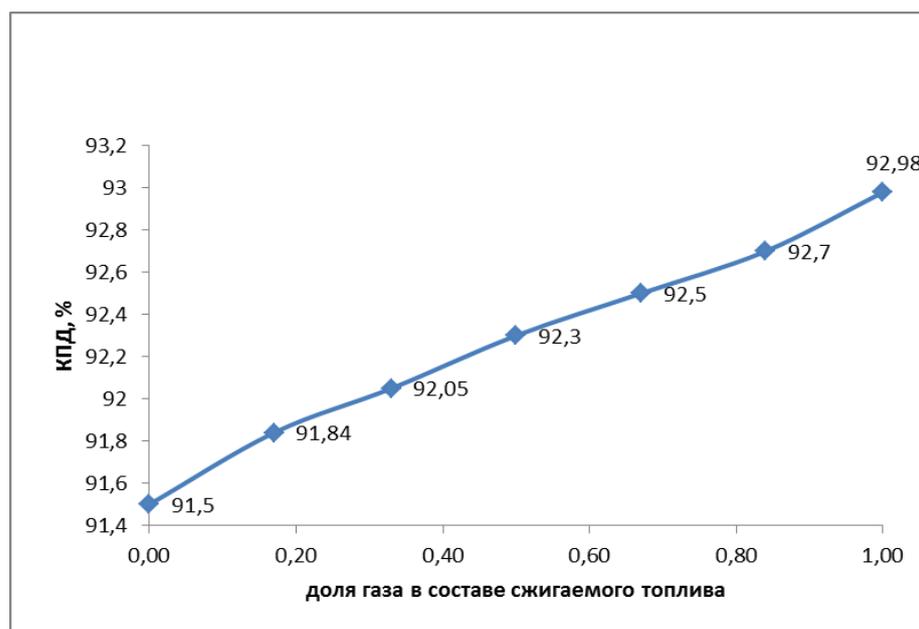


Рисунок 4.19 Зависимость КПД брутто котла ТГМ-84Б от доли газа (по тепловыделению) при совместном сжигании газа и мазута, при нагрузке 420 т/час

Факел при увеличении газа в составе смешанного топлива обладает меньшей излучающей способностью. При переводе котла с сжигания мазута на природный газ тепловосприятие топочной камеры снижается, а температура продуктов сгорания на выходе из топки становится выше. Это расхождение

температур при номинальной нагрузке для топочной камеры открытого типа составляет около 100 °С, что неизбежно сказывается на изменении тепловой работы последующих поверхностей нагрева и прежде всего перегревателя. За счет конвективного теплообмена доля теплоты, воспринимаемой пароперегревателем увеличивается и расчет температура и количество перегретого пара.

При сжигании мазута, факел которого обладает сильными радиационными свойствами, экранные поверхности поглощают большое количество тепла, и температура дымовых газов на выходе из топочной камеры сильно снижается. При сжигании же газа экранные поверхности поглощают значительно меньше тепла, и температура дымовых газов оказывается чрезмерно высокой. По указанной причине при переходе с мазута на газ температура перегретого пара обычно увеличивается на 30...50°С. Однако перегретый пар на турбину поступает с регламентной температурой не свыше 560 °С, которая поддерживается автоматически впрыскивающими пароохладителями.

В механических форсунках для диспергирования мазута используется перепад давлений на форсунке. В паромеханических форсунках распыливание вызвано взаимодействием высокоскоростного потока распыливающего газового агента - водяного пара со струей мазута. Применяется пар с избыточным давлением 0,3...2,5 МПа/м² и с удельным расходом пара 0,3...0,6 кг на 1 кг мазута.

При истечении мазута из сопла или отверстия форсунки на поверхности струи в результате начальных возмущений возникают колебания с различными частотами. Некоторые колебания неустойчивы и, возрастая по амплитуде, ведут к распаду струи на капли.

Начальные возмущения зависят от режима и формы организации движения потока в форсунке, состояния поверхности и эллиптичности сопла, вибрации распылителя, изменения физических свойств мазута (плотности, вязкости, содержания механических примесей) в процессе распыливания, пульсации давления и других факторов.

4.6. Распределение температуры по высоте, ширине и глубине топки при сжигании газа и мазута при различных нагрузках

По измерениям интенсивности излучения факела через горелки, расположенные на отметках высоты $h=6,6$ м и 11,2 м и лючки на отметке 22,3 м левой и правой половины топок относительно двухсветного экрана (рисунок 4.20, 4.21), видно, что с ростом паровой нагрузки D_K на 10 т/ч интенсивность излучения факела q увеличивается в среднем на 7 кВт/м^2 .

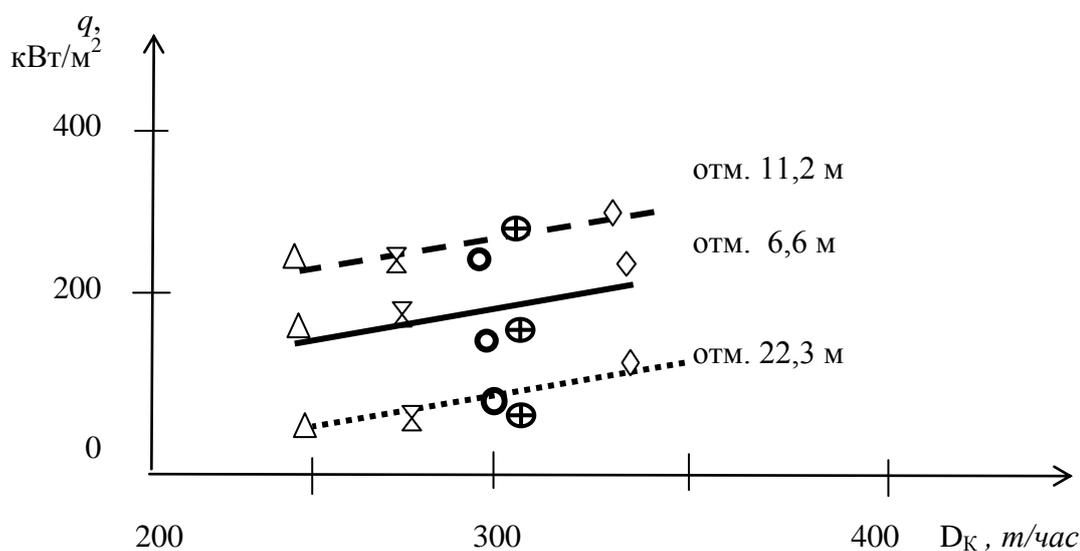


Рисунок 4.20. Значения интенсивности излучения факела, измеренные по высоте левой половины топок котлов ТГМ-84Б через горелку 5 на отм. 11,2 м (сечение 5), через горелку 2 на отм. 6,6 м (сечение 5) и через лючок 13 на отм. 22,3 м при сжигании газа и мазута :

○	котел №6 НкТЭЦ-1, нагрузка 300 т/ч, расход газа 8 тыс.м ³ /час, расход мазута 15 т/ч, $t_{yx,\Gamma} = 120/127^\circ\text{C}$. $\alpha=1,105$.
⊕	котел №9 НкТЭЦ -1, нагрузка 313 т/ч, расход газа 15,8 тыс.м ³ /час, расход мазута 9 т/ч. $t_{yx,\Gamma} = 129/140^\circ\text{C}$. $\alpha=1,122$.
◇	котел №6 НкТЭЦ-1, нагрузка 342 т/ч, $t_{yx,\Gamma} = 129^\circ\text{C}$, $\alpha=1,18/1,14$, топливо - газ на все горелки
△	котел №6 НкТЭЦ-1, нагрузка 242 т/ч, $t_{yx,\Gamma} = 123^\circ\text{C}$, $\alpha=1,05/1,084$, топливо - газ на все горелки
⊗	котел №8 НкТЭЦ-1, нагрузка 272 т/ч, $t_{yx,\Gamma} = 138^\circ\text{C}$, $\alpha=1,05$, топливо - газ на все горелки

Выявленная закономерность, позволяет оценивать возможные допустимые пределы увеличения теплонапряженности топок, исходя из желаемых значений паропроизводительности котла. Данные экспериментов для условий работы котлов ТГМ-84Б №№6, 8, 9 при пониженных паровых нагрузках от 240 до 350 т/час показывают, что на увеличение неравномерности обогрева экранных труб на всех отметках оказывает влияние не только высота топки, но и ширина топки. Между левой и правой половинами топок относительно двухсветных экранов имеется неравномерность в значениях величин падающих от факела на экраны тепловых потоков.

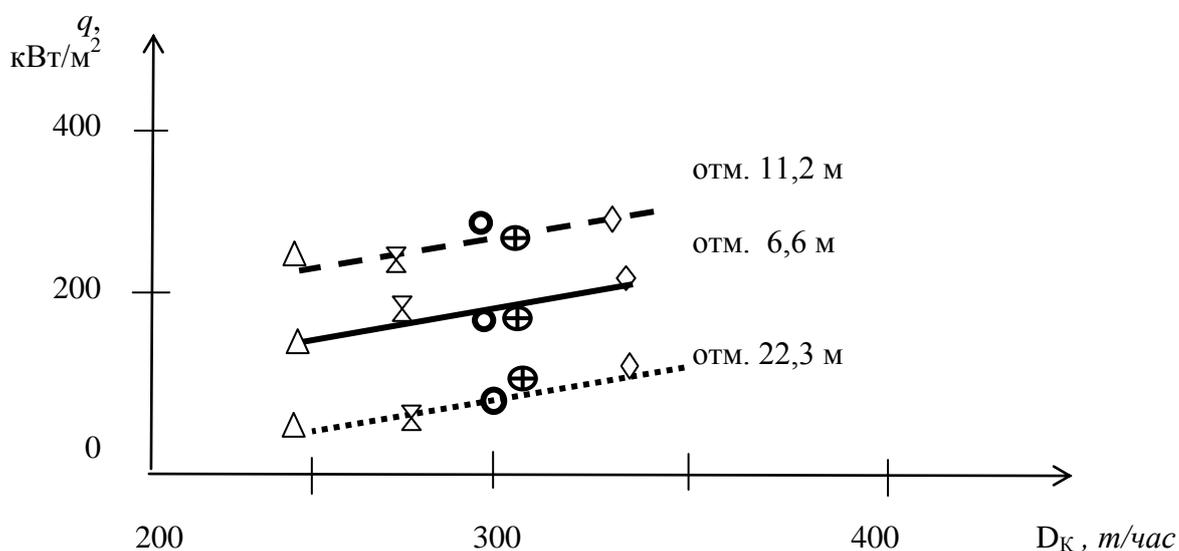


Рисунок 4.21. Значения интенсивности излучения факела, измеренные по высоте правой половины топок котлов ТГМ-84Б через горелку 6 на отм. 11,2 м (сечение 8), через горелку 3 на отм. 6,6 м (сечение 8) и через лючок 14 на отм. 22,3 м при сжигании газа и мазута :

○	котел №6 НкТЭЦ-1, нагрузка 300 т/ч, расход газа 8 тыс.м ³ /час, расход мазута 15 т/ч . $t_{yx.г} = 120/127^{\circ}C$. $\alpha=1,105$.
⊕	котел №9 НкТЭЦ-1, нагрузка 313 т/ч, расход газа 15,8 тыс.м ³ /час, расход мазута 9 т/ч . $t_{yx.г} = 129/140^{\circ}C$. $\alpha=1,122$.
◇	котел №6 НкТЭЦ-1, нагрузка 342 т/ч, $t_{yx.г} = 129^{\circ}C$, $\alpha=1,18/1,14$, топливо - газ на все горелки
△	котел №6 НкТЭЦ-1, нагрузка 242 т/ч, $t_{yx.г} = 123^{\circ}C$, $\alpha=1,05/1,084$, топливо - газ на все горелки
⊗	котел №8 НкТЭЦ-1, нагрузка 272 т/ч, $t_{yx.г} = 138^{\circ}C$, $\alpha=1,05$, топливо - газ на все горелки

Неравномерность обогрева сохраняется во всем исследованном диапазоне изменения паровых нагрузок D_k . как при сжигании газа, так и при сжигании мазута.

Совместное влияние глубины и высоты топки на неравномерность обогрева экранных труб проявляется в том, что в сечении 1 на отметке 11,2 м интенсивности излучения факела в среднем 2,3 раза больше по сравнению с интенсивности излучения факела на отметке 6,6 м в сечении 2 рисунок 4.22.

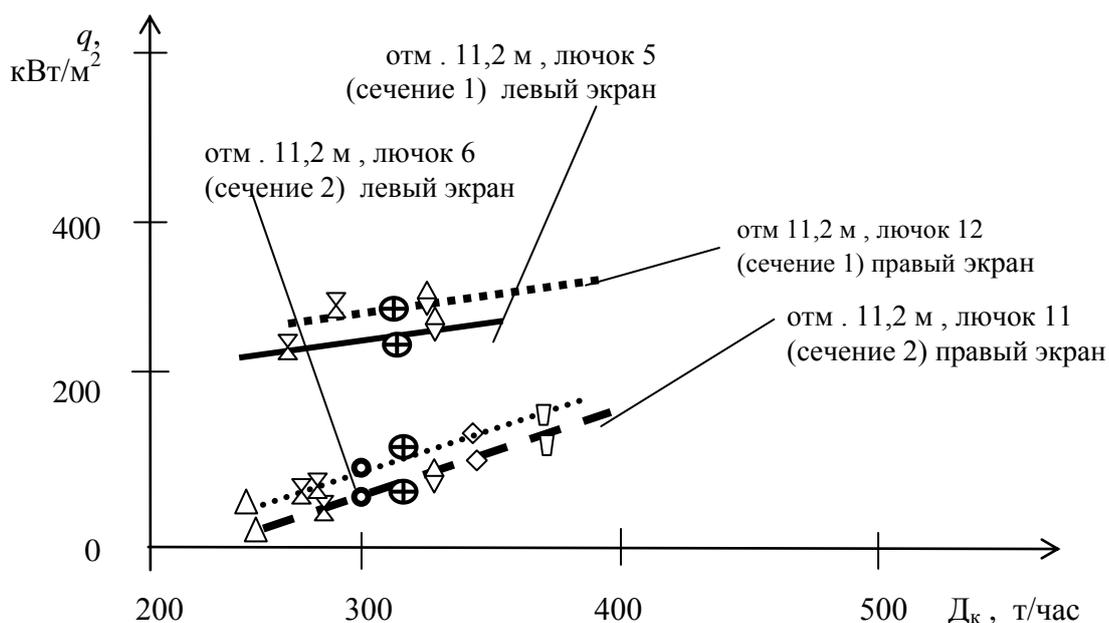


Рисунок 4.22. Результаты измерений через лючки 5,6 левого экрана и лючки 11, 12 правого экрана интенсивности излучения факела по отметке высоты топки 11,2 м для котла ТГМ-84Б НкТЭЦ-1 при работе на газе и мазуте:

○	котел №6 НкТЭЦ-1, нагрузка 300 т/ч, расход газа 8 тыс.м³/час, расход мазута 15 т/ч. $t_{yx.g} = 120/127^{\circ}C$. $\alpha=1,105$.
⊕	котел №9 НкТЭЦ -1, нагрузка 313 т/ч, расход газа 15,8 тыс.м³/час, расход мазута 9 т/ч . $t_{yx.g} = 129/140^{\circ}C$. $\alpha=1,122$.
◇	котел №6 НкТЭЦ-1, нагрузка 342 т/ч, $t_{yx.g} = 129^{\circ}C$, $\alpha=1,18/1,14$, топливо - газ на все горелки
△	котел №6 НкТЭЦ-1, нагрузка 242 т/ч, $t_{yx.g} = 123^{\circ}C$, $\alpha=1,05/1,084$, топливо -газ на все горелки
⊗	котел №8 НкТЭЦ-1, нагрузка 272 т/ч, $t_{yx.g} = 138^{\circ}C$, $\alpha=1,05$, топливо -газ на все горелки
▽	котел №6 НкТЭЦ-1, нагрузка 380 т/ч, $t_{yx.g} = 128^{\circ}C$, $\alpha=1,045$, топливо -газ на все горелки
◊	котел №8 НкТЭЦ-1, нагрузка 320 т/ч $t_{yx.g} = 140^{\circ}C$, $\alpha=1,04$, топливо -газ на все горелки

Приведенные на рисунке 4.22 результаты измерений интенсивности излучения факела через лючки 5,6 левого экрана и лючки 11, 12 правого экрана, на той же отметке высоты топки 11,2 м показывают, наибольшая неравномерность обогрева боковых экранов по глубине топки имеется для правой стороны топки.

Таким образом, необходимо выравнивание падающих на экраны тепловых потоков слева и справа от двухсветного экрана. Техническим решением может быть рассверливание отверстий с диаметра 27 мм до диаметра 29 мм через одно отверстие для подачи газа в горелке № 5 на котлах ТГМ-84Б №№6,8,9.

Интенсивность излучения факела на выходе из топки на отметке 22,3 м по измерениям через лючки 13 (левая половина топки) меньше, по сравнению с измерениями через лючки 14 (правая половина топки) котлов ТГМ-84Б НкТЭЦ-1 стационарные №№6,8,9 в среднем в 1,3 раза.

Исключение составляют измерения при работе котлов 6, и 9 на смеси: газ+мазут. Однако при работе на смеси имеют место более низкие значения интенсивности излучения факела а по измерениям через лючок 6 по сравнению с измерениями через лючок 11 для котла №6 и более низкие значения по измерениям через лючок 5 по сравнению с измерениями через лючок.

Распределение температуры продуктов сгорания по высоте левой и правой половины топок котлов станц. №№ 6, 8 и 9 ТГМ-84Б НкТЭЦ-1 при сжигании газа и мазута приведено на рисунках 4.23, 4.24.

Как видно из графиков (см. рис. 4.23, 4.2) по высоте топки температура факела в правой половине топок для исследованных котлов ТГМ-84Б НкТЭЦ-1 (станц. №№ 6, 9) выше по сравнению с левой половиной топки в среднем на 80... 100 °С как при работе на газе так и на мазуте. Для котла ТГМ-84Б №8 наоборот температура в правой половине топки ниже по сравнению с температурой факела в левой части в среднем на 60... 90 °С.

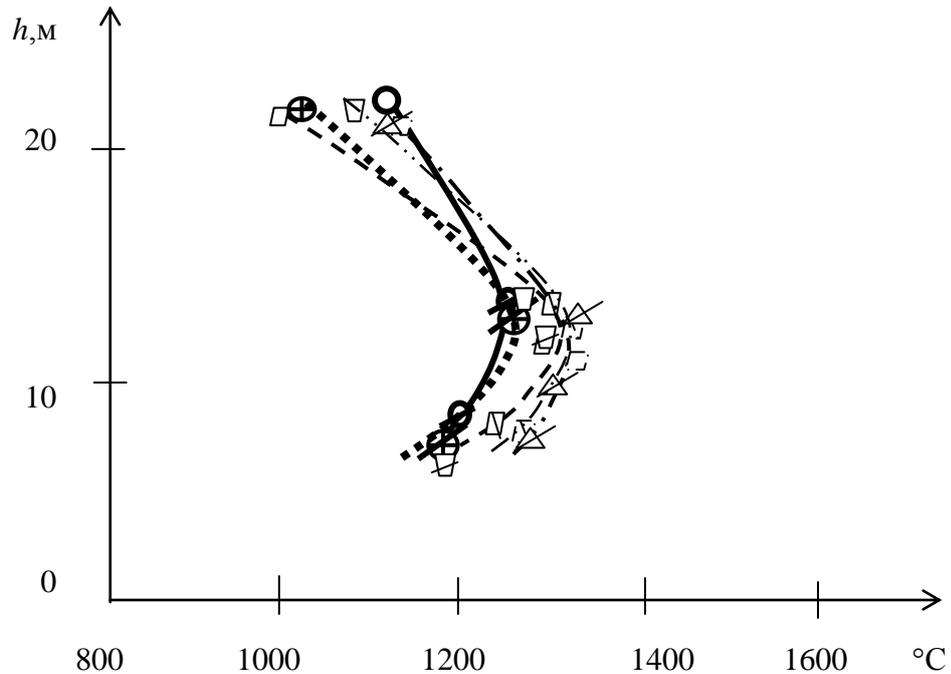


Рисунок 4.23. Распределение температуры факела по высоте левой половины топки h при различных паровых нагрузках котла ТГМ-84Б при сжигании газа и мазута при крутках воздуха в горелках:

<ul style="list-style-type: none"> ○ - лючки, ⊙ - горелки 	котел №6 НкТЭЦ-1, нагрузка 300 т/ч, расход газа 8 тыс.м ³ /час, расход мазута 15 т/ч, $t_{yx.g} = 120/127^{\circ}\text{C}$, $\alpha=1,105$. Измерения через лючок 13, горелки 2, 5 (сечение 5)
<ul style="list-style-type: none"> ⊕ - лючки ⊕⊙ - горелки 	котел №9 НкТЭЦ-1, нагрузка 313 т/ч, расход газа 15,8 тыс.м ³ /час, расход мазута 9 т/ч, $t_{yx.g} = 129/140^{\circ}\text{C}$, $\alpha=1,122$. Измерения через лючок 13, горелки 2,5 (сечение 5)
<ul style="list-style-type: none"> □ - лючки, □⊙ - горелки 	котел №9 ТГМ-84Б НкТЭЦ-1, нагрузка 340 т/ч. $t_{п.в}=204^{\circ}\text{C}$, $t_{yx.g}=124^{\circ}\text{C}$. Измерения через лючки 8,13 в сечении 5 и через горелки 2, 5 в сечении 6
<ul style="list-style-type: none"> △ - лючки, △⊙ - горелки 	котел №6 НкТЭЦ-1, нагрузка 314 т/ч, расход газа 26 тыс.м ³ /час. $t_{yx.g} = 120/127^{\circ}\text{C}$. $\alpha=1,105$. Измерения через лючок 13, горелки 2, 5 (сечение 5).
<ul style="list-style-type: none"> □⊙ - лючки □⊙⊙ - горелки 	котел №8 НкТЭЦ -1, нагрузка 320 т/ч, расход газа 26,1 тыс.м ³ /час, $t_{yx.g} = 143/140^{\circ}\text{C}$, $\alpha=1,04/1,06$. Измерения через лючок 8,13 горелки 2, 5 (сечение 5).

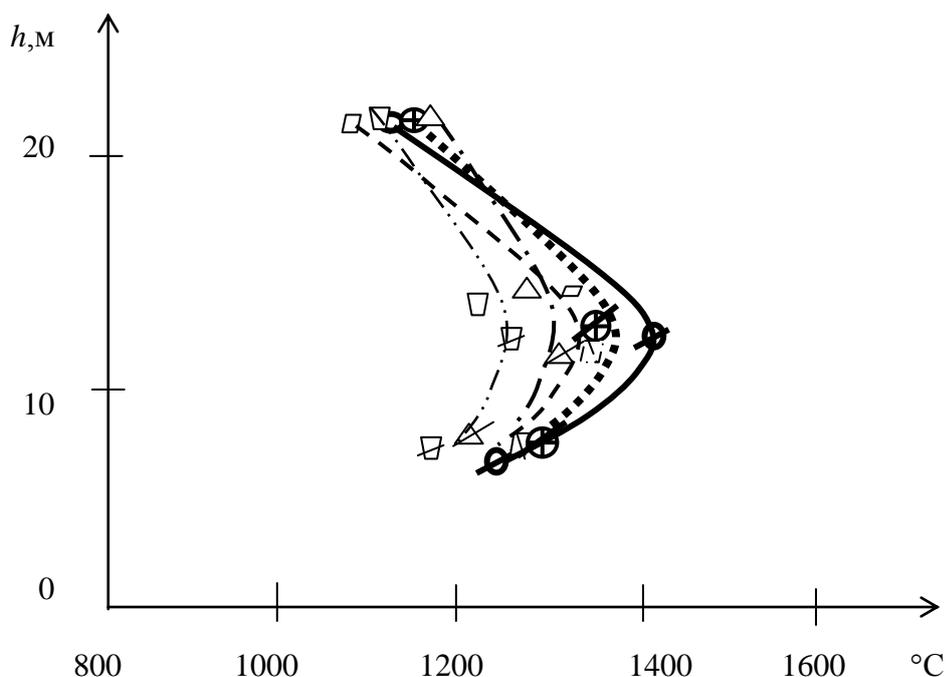


Рисунок 4.24. Распределение температуры факела по высоте правой половины топки h при различных паровых нагрузках котла ТГМ-84Б при сжигании газа и мазута при кратках воздуха в горелках :

<ul style="list-style-type: none"> ○ - лючки, ⊙ - горелки 	котел №6 НкТЭЦ-1, нагрузка 300 т/ч, расход газа 8 тыс.м ³ /час, расход мазута 15 т/ч, $t_{yx.g} = 120/127^{\circ}\text{C}$, $\alpha=1,105$. Измерения через лючок 13, горелки 2, 5 (сечение 5)
<ul style="list-style-type: none"> ⊕ - лючки ⊕ - горелки 	котел №9 НкТЭЦ-1, нагрузка 313 т/ч, расход газа 15,8 тыс.м ³ /час, расход мазута 9 т/ч, $t_{yx.g} = 129/140^{\circ}\text{C}$, $\alpha=1,122$. Измерения через лючок 13, горелки 2,5 (сечение 5)
<ul style="list-style-type: none"> □ - лючки, ▣ - горелки 	котел №9 НкТЭЦ-1, нагрузка 340 т/ч. $t_{п.в.}=204^{\circ}\text{C}$, $t_{yx.g}=124^{\circ}\text{C}$ Измерения через лючки 8,13 в сечении 5 и через горелки 2, 5 (в сечении 6).
<ul style="list-style-type: none"> △ - лючки, ▴ - горелки 	котел №6 НкТЭЦ-1, нагрузка 314 т/ч, расход газа 26 тыс.м ³ /час, $t_{yx.g} = 120/127^{\circ}\text{C}$. $\alpha=1,105$. Измерения через лючок 13, горелки 2, 5 (сечение 5).
<ul style="list-style-type: none"> ▽ - лючки ▾ - горелки 	котел №8 НкТЭЦ-1, нагрузка 320 т/ч, расход газа 26,1 тыс.м ³ /час, $t_{yx.g} = 143/140^{\circ}\text{C}$. $\alpha=1,04/1,06$. Измерения через лючки 9, 14, горелки 2, 5 (сечение 5).

Из сравнения данных по распределению температуры по высоте топок котлов ТГМ-84 станц. №№6,9 при работе на газе и на смеси :газ+мазут видно, что переход к работе горелок на мазуте сопровождается резким увеличением неравномерности температуры факела на уровне 2-го яруса горелок между левой и правой половинами топок.

Распределение температуры факела в топке по ширине топки котлов ТГМ-84Б №№6,8,9 на отметке 6,6 м при работе на газе и мазуте приведено на рисунке 4.25.

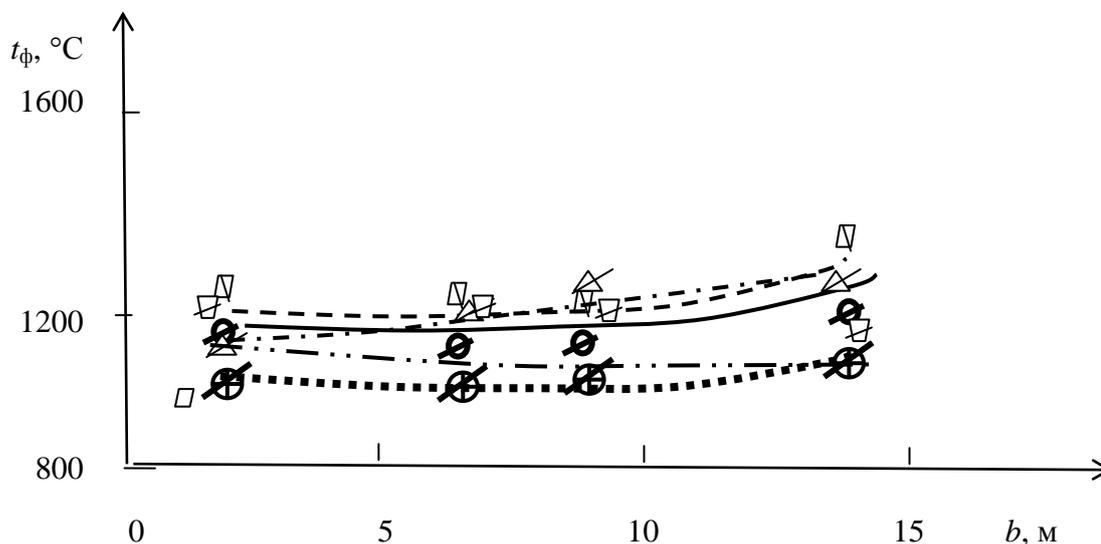


Рисунок 4.25. Распределение температуры факела по t_{ϕ} по ширине топок b на отметке 6,6 м при различных паровых нагрузках котла ТГМ-84Б при сжигании газа и мазута при крутках воздуха в горелках:

<ul style="list-style-type: none"> ○ - лючки, ⊗ - горелки 	котел №6 НкТЭЦ-1, нагрузка 300 т/ч, расход газа 8 тыс.м ³ /час, расход мазута 15 т/ч, $t_{yx.г} = 120/127^{\circ}\text{C}$, $\alpha=1,105$.
<ul style="list-style-type: none"> ⊗ - лючки ⊗ - горелки 	котел №9 НкТЭЦ-1, нагрузка 313 т/ч, расход газа 15,8 тыс.м ³ /час, расход мазута 9 т/ч, $t_{yx.г} = 129/140^{\circ}\text{C}$, $\alpha=1,122$.
<ul style="list-style-type: none"> □ - лючки, ▽ - горелки 	котел №9 НкТЭЦ-1, нагрузка 340 т/ч, $t_{п.в}=204^{\circ}\text{C}$, $t_{yx.г}=124^{\circ}\text{C}$,
<ul style="list-style-type: none"> △ - лючки, △ - горелки 	котел №6 НкТЭЦ-1, нагрузка 314 т/ч, расход газа 26 тыс.м ³ /час. $t_{yx.г} = 120/127^{\circ}\text{C}$. $\alpha=1,105$. Все горелки работают на газе
<ul style="list-style-type: none"> ▽ - лючки ▽ - горелки 	котел №8 НкТЭЦ-1, нагрузка 320 т/ч, расход газа 26,1 тыс.м ³ час. $t_{yx.г} = 143/140^{\circ}\text{C}$. $\alpha=1,04/1,06$. Все горелки на газе

Из представленных данных рисунка 4.25 видно, что температура по измерениям через горелки на уровне первого яруса на отметке 6,6 м при работе на газе несколько выше, чем при работе на мазуте.

4.7. Исследование КПД котла при сжигании газа и мазута

При исследовании температуры факела в топочном объеме также определялся КПД котла брутто по обратному балансу.

Для сравнения экспериментальных данных по КПД котла использовалась режимная карта эксплуатации котлоагрегата типа ТГМ-84Б (приложение 10).

На рисунке 4.26 представлены КПД котла брутто при сжигании газа.

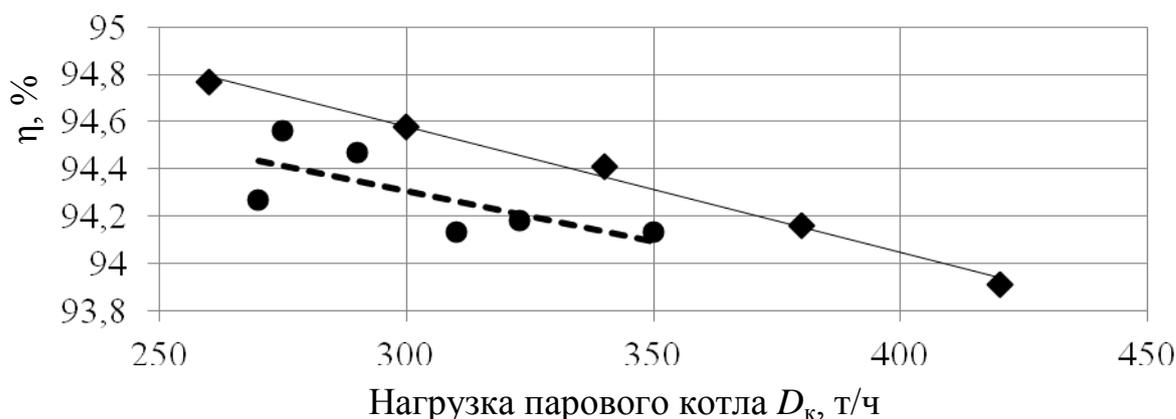


Рисунок 4.26 Влияние паропроизводительности котла ТГМ-84Б на КПД брутто при сжигании газа:

—◆— — расчет;
 - -●- - эксперимент

Расчетные значения КПД брутто снижаются с 94,77 до 93,91 при увеличении паропроизводительности котла от 260 до 420 т/ч .

КПД котла брутто, определенное при экспериментах, ниже, чем расчетные значения. При увеличении паропроизводительности котла от 270 до 355 т/ч, КПД брутто снижается с 94,4 до 94,1%.

На КПД котла брутто по обратному балансу оказывает влияние температуры уходящих газов, в режимной карте эксплуатации котлоагрегата температура уходящих газов увеличивается с увеличением нагрузки котла (приложение 10).

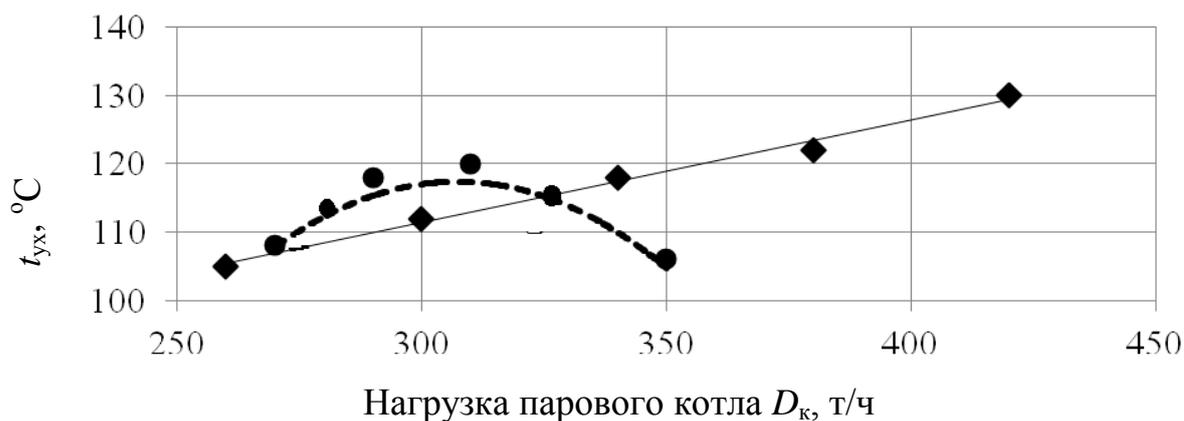


Рисунок 4.27. Температура уходящих газов ($t_{ух}$) в зависимости от нагрузки котла ТГМ-84Б при сжигании газа:

—◆— — расчет;
 - -●- - эксперимент

Температура уходящих газов увеличивалась с 105 до 130 °C при увеличении паропроизводительности котла от 260 до 420 т/ч (рисунок 4.27).

Экспериментальный КПД котла различен от расчетных значений. При паропроизводительности 290 и 310 т/ч температура уходящих газов составляла 118 и 120 °C соответственно, выше расчетных значений. При паропроизводительности 350 т/ч температура уходящих газов составляла 106 °C.

При сжигании мазута расчетные значения КПД котла составляет 92,7 % и не изменяется с увеличением паровой производительности котла от 260 до 420 т/ч.

При сжигании мазута с использованием механических форсунок температура уходящих газов фиксировалась ниже расчетных значений на 30 – 25 °C. Что в свою очередь увеличивало КПД котла брутто на 1,5 % в сравнение с режимными значениями.

При сжигании мазута с использованием паромеханических форсунок температура уходящих газов составляла 146 °C, а КПД котла по обратному балансу составляла 93,1 % .

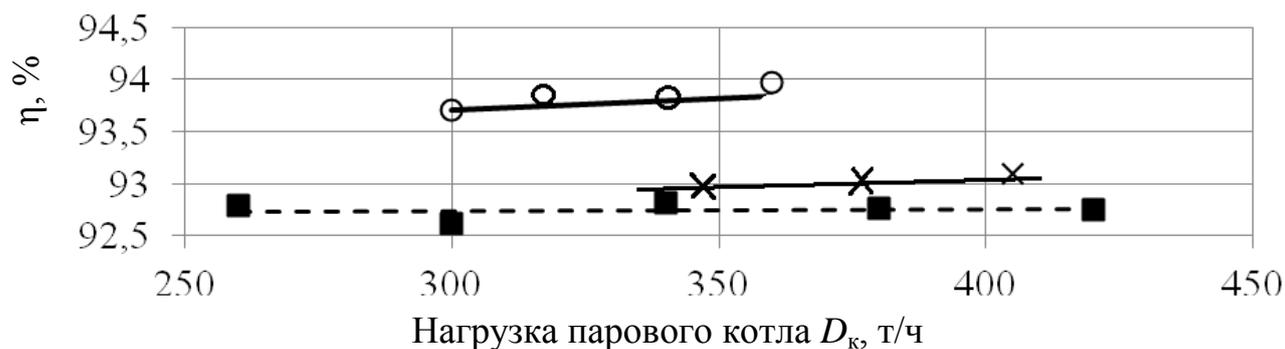


Рисунок 4.28 Влияние паропроизводительности котла ТГМ-84Б

на КПД брутто (η) при сжигании мазута во всех горелках:

—○— — эксперимент с использованием механических форсуноки;

-■- — расчет с использованием механических форсуноки;

x — эксперимент с использованием паромеханических форсуноки

Расчетные значения КПД котла представлены при температуре уходящих газов в зависимости от нагрузки котла на рисунке 4.29.

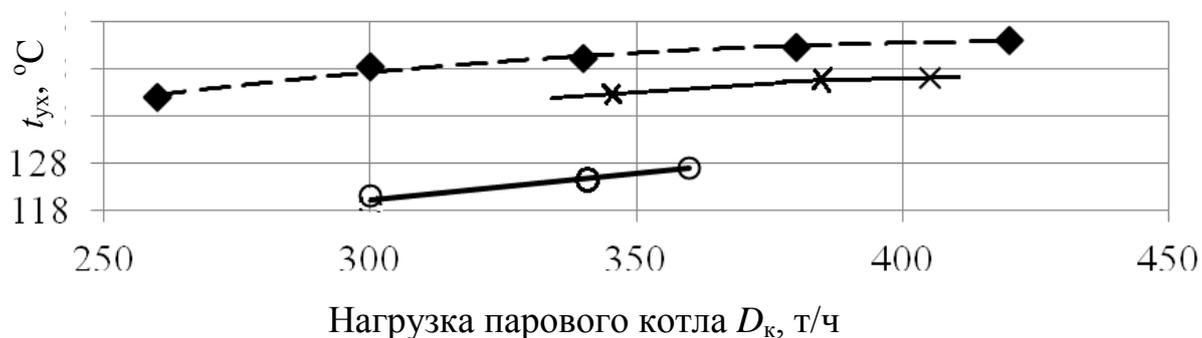


Рисунок 4.29. Температура уходящих газов ($t_{ух}$) в зависимости

от нагрузки котла ТГМ-84Б при сжигании мазута во всех горелках:

—○— — эксперимент с использованием механических форсуноки;

-◆- — расчет с использованием механических форсуноки;

x — эксперимент с использованием паромеханических форсуноки

В данной работе проводилось сравнение экспериментального КПД котла брутто с режимными значениями при сжигании мазута в 4-х горелках и газа в 2-х горелках, которое представлено на рисунке 4.30.

КПД котла брутто из режимной карты в зависимости от нагрузки котла меняется не прямолинейно, максимальные значения КПД котла брутто составляет 92,43 % при паропроизводительности 350 т/ч. КПД котла брутто из режимной карты ниже, чем значения КПД при проведении экспериментов. Режимная карта эксплуатации котлоагрегата типа ТГМ-84Б составленная для топлива газа в 4-х горелках и мазута в 2-х горелках использовала механические форсунки.

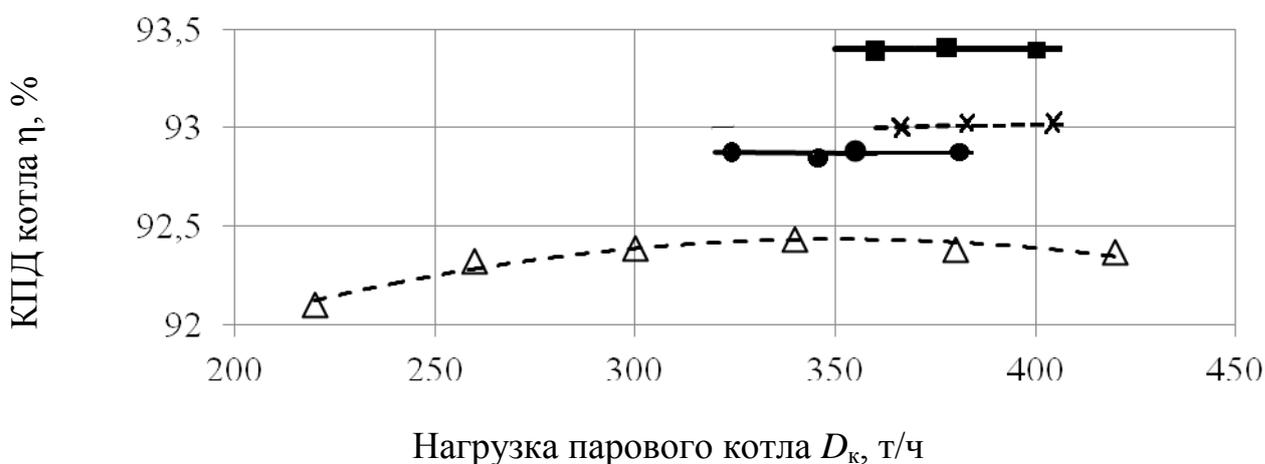


Рисунок 4.30. Влияние паропроизводительности котла ТГМ-84Б на КПД (η) при сжигании мазута в 4-х горелках и газа в 2-х горелках:

- эксперимент с использованием механических форсунок (мазут в горелках № 2, № 3, № 5 и № 6);
- x-- эксперимента с использованием паромеханических форсунок (мазут в горелках № 1, № 2, № 3 и № 4);
- эксперимент с использованием паромеханических форсунок (мазут в горелках № 2, № 3, № 5 и № 6);
- △- расчет с использованием механических форсунок в горелках № 1, № 2, № 3 и № 4.

При сжигании мазута с использованием механических форсунок в горелках №2, №3, №5, №6 среднее КПД котла брутто для паропроизводительности котла 322 – 355 т/ч при проведении эксперимента составлял 92,85 %.

При сжигании мазута с использованием паромеханических форсунки в горелках №1, №2, №3 и №4 среднее КПД котла брутто для паропроизводительности котла 370 т/ч при проведении эксперимента составлял 93,05 %.

При сжигании мазута с использованием паромеханических форсунки в горелках № 2, № 3, № 5 и № 6 КПД котла брутто для паропроизводительности котла 360 т/ч при проведении эксперимента составлял 93,39 %.

Экспериментальные значения показывают, что КПД котла брутто больше на 0,35 % при схеме сжигания мазута в горелках № 2, № 3, № 5 и № 6, чем при схеме сжигания мазута в горелках № 1, № 2, № 3 и № 4 с использованием паромеханических форсунок.

Сжигание мазута в горелках № 2, № 3, № 5 и № 6 с использованием паромеханических форсунок дает большее значение КПД на 0,54%, чем с использованием механических форсунок.

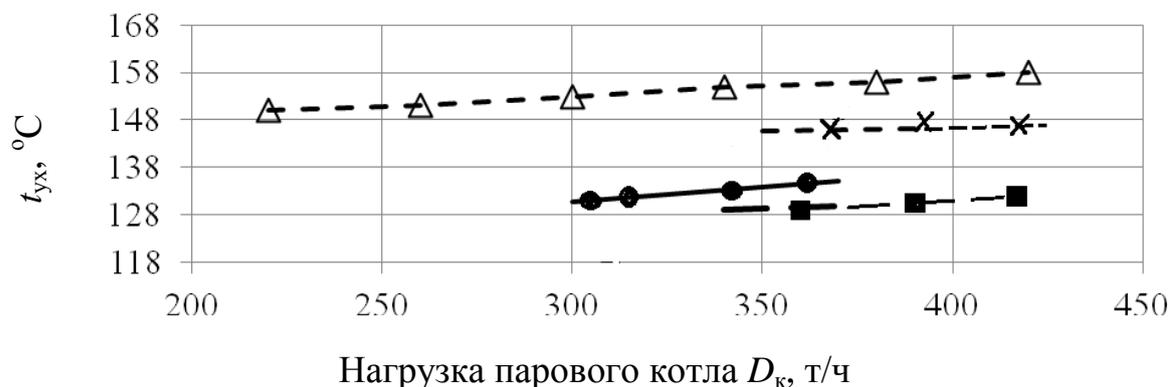


Рисунок 4.31. Температура уходящих газов ($t_{ух}$) в зависимости от нагрузки котла ТГМ-84Б при сжигании мазута в 4-х горелках и газа в 2-х горелках:

—●— эксперимент с использованием механических форсунок (мазут в горелках № 2, № 3, № 5 и № 6);

—×— — эксперимента с использованием паромеханических форсунок (мазут в горелках № 1, № 2, № 3 и № 4);

—■— эксперимент с использованием паромеханических форсунок (мазут в горелках № 2, № 3, № 5 и № 6);

—△— — расчет с использованием механических форсунок в горелках № 2, № 3, № 5 и № 6.

При исследовании температур факела и КПД котла, температура уходящих газов отличалась от режимных значений. Из рисунка 4.31 видно, чем ниже температура уходящих газов, тем выше КПД котла.

В данной работе рисунок 4.32, проводилось сравнение экспериментального КПД котла брутто с режимными значениями при сжигании мазута в 2-х горелках и газа в 4-х горелках.

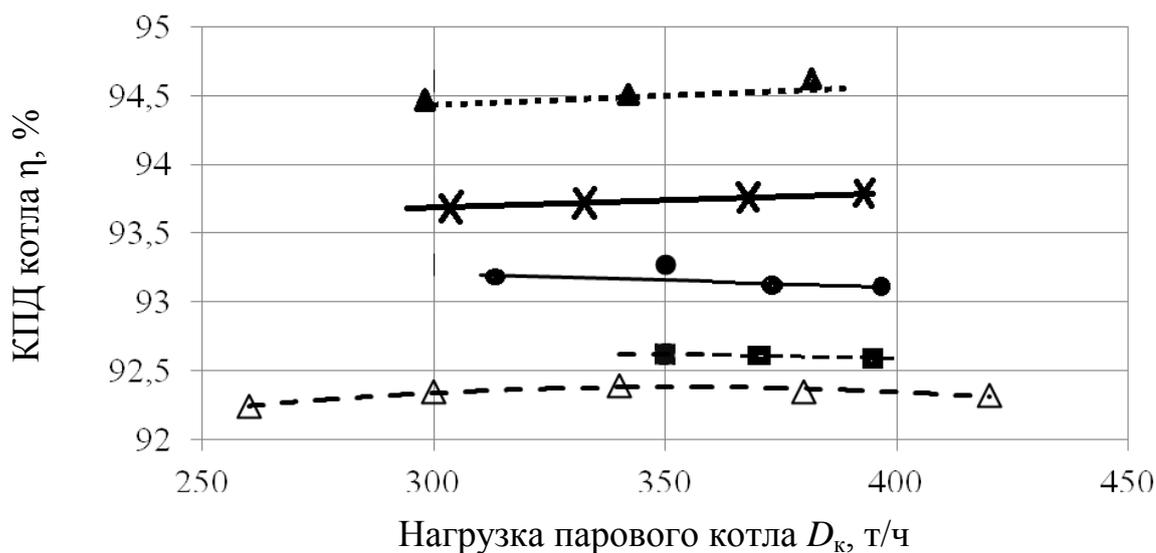


Рисунок 4.32. Влияние паропроизводительности котла ТГМ-84Б на КПД при сжигании мазута в 2-х горелках и газа в 4-х горелках:

—●— — эксперимент с использованием механических форсунок (мазут в горелках № 5 и № 6);

—·×·— — эксперимента с использованием паромеханических форсунок (мазут в горелках № 1 и № 4);

—■— — эксперимент с использованием механических форсунок (мазут в горелках № 1 и № 4);

—△— — расчет с использованием механических форсунок в горелках № 1 и № 4;

—○— — эксперимент с использованием механических форсунок (мазут в горелках № 2 и № 3);

—▲— — эксперимент с использованием паромеханических форсунок, предлагаемые КГЭУ (мазут в горелках № 1 и № 4).

Расчетный КПД котла с увеличением паропроизводительности с 260 до 340 т/ч увеличивается с 92,24 до 92,39 %. При дальнейшем увеличении паропроизводительности до 420 т/ч КПД котла снижается до 92,32% .

При сжигании мазута с использованием механических форсунок в горелках № 1 и № 4 среднее КПД котла брутто для паропроизводительности котла 350 т/ч при проведении эксперимента составлял 92,62 %.

При сжигании мазута с использованием механических форсунок в горелках № 5 и № 6 среднее КПД котла брутто для паропроизводительности котла 310 – 360 т/ч при проведении эксперимента составлял 93,2 %.

При сжигании мазута с использованием паромеханических форсунок в горелках № 1 и № 4 среднее КПД котла брутто для паропроизводительности котла 325 – 337 т/ч при проведении эксперимента составлял 93,27 %.

При сжигании мазута с использованием механических форсунок в горелках № 2 и № 3 среднее КПД котла брутто для паропроизводительности котла 300 – 313 т/ч при проведении эксперимента составлял 93,64 %.

При сжигании мазута с использованием паромеханических форсунок, предлагаемых в данной работе, в горелках № 1 и № 4 среднее КПД котла брутто для паропроизводительности котла 300 т/ч при проведении эксперимента составлял 93,8 %.

На КПД котла влияет схема сжигания мазута, при сжигании жидкого топлива в горелках № 2 и № 3 КПД котла ТГМ-84 на 0,37% выше, чем при сжигании мазута в горелках № 1 и № 4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработано экспериментальное оборудование и стенд для тарировки мазутных форсунок, который позволяет определять диаметр и длину факела в зависимости от производительности форсунки и степени дробления капель.

2. Разработана форсунка, которая позволяет добиться геометрической конфигурации факела, при которой не происходит наброса факела на задний и боковой экраны котла за счет большого угла распыливания.

3. Получены экспериментальные данные о влиянии применяемого типа форсунок на повышение эффективности сжигания мазута. При сжигании мазута с использованием механических форсунок с паропроизводительностью 360 т/ч значение интенсивности излучения факела ниже, чем при сжигании газа во всех горелках. Использование паромеханических форсунок вместо механических дает большее значение интенсивности излучения факела во всем объеме топки котла, что в дальнейшем отражается большими температурами факела на уровне 1-го и 2-го ярусов горелок.

4. Проведено экспериментальное исследование радиационного теплообмена в топках котлов ТГМ-84А и ТГМ-84Б при различных паровых нагрузках с различной организацией топочного процесса. Сжигание мазута по схеме мазут в горелках № 2, 3 с использованием паромеханических форсунок ФУЗ-5000 позволяет достичь больших температур факела в топочном объеме котла, чем при остальных исследованных схемах сжигания мазута.

5. Экспериментами установлено, что при сжигании мазута в горелках № 1 и № 4 с использованием паромеханических форсунок, предлагаемых в данной работе, значение КПД котла ТГМ-84Б на 0,54% выше, чем с использованием паромеханических форсунок ФУЗ-5000.

Итоги выполненного исследования, рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

Результаты выполненной работы могут быть использованы для дальнейшего развития тематики сжигания различных видов топлив.

Исследование температурных полей, теплового излучения факела в топках энергетических котлов позволяет внести уточнения в теорию теплообмена в топочных устройствах котельных агрегатов. Полученные экспериментальные данные по температуре факела и разработанное оборудование позволяет совершенствовать конструкции высокотемпературных агрегатов.

Перспективным является использование результатов работы для разработки новых конструкций горелок для сжигания метано-водородной фракции в энергетических котлах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Назмеев Ю.Г. Мазутные хозяйства ТЭС / Ю.Г. Назмеев. М.: МЭИ, 2002. 612 с.
2. Адамов В.А. Сжигание мазута в топках котлов / В.А. Адамов. Л.: Недра, 1989. 304 с.
3. Зверева Э.Р. Ресурсо-, энергосберегающие технологии в мазутных хозяйствах тепловых электрических станций: монография / Э.Р. Зверева. Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2010. 184 с.
4. Давыдова С.Л. Нефть и нефтепродукты в окружающей среде: учебное пособие / С.Л. Давыдова, В.И. Тагасов. М.: РУДН, 2004. 163 с.
5. Слепченко В.С. Повышение эффективности функционирования мазутного хозяйства отопительных котельных / В.С. Слепченко, В.К. Тучков, В.В. Черников // Новости теплоснабжения, 2004. № 3. С.8-11.
6. Белосельский Б.С. Подготовка и сжигание высокоподогретых мазутов на электростанциях и в промышленных котельных / Б.С. Белосельский, Б.Ф. Глухов. М.: МЭИ, 1993. 72 с.
7. Кормилицын В.И. Подготовка мазута к сжиганию для улучшения технико-экономических и экологических характеристик котельных установок / В.И. Кормилицын, М.Г. Лысков, А.А. Румынский // Новости теплоснабжения. 2000. №. 4. С. 19-21.
8. Геллер З.И. Мазут как топливо / З.И. Геллер. М.: Недра, 1965. 496 с.
9. Кривоногов Б.М. Мазутное хозяйство котельных / Б.М. Кривоногов. Л.: ЛИСИ, 1975. 97 с.
10. Таймаров М.А. Исследование схем сжигания мазута на котле ТГМ-84Б с использованием механических форсунок / М.А. Таймаров, В.А. Егоров // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т.15. №.10.
11. Зройчиков Н. А. Оптимизация режимов сжигания мазута в топках котлов большой мощности / Н.А. Зройчиков, М.Г. Лысков, В.Б. Прохоров // Теплоэнергетика. 2007. №. 6. С. 23-26.

12. Блинов Е.А. Топливо и теория горения: учеб.- методич. комплекс (учеб. пособие) / Е.А. Блинов. СПб.: Изд-во СЗТУ, 2007. 119 с.
13. Блох А.Г. Теплообмен в топках паровых котлов / А.Г. Блох. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд., 1984. 240 с.
14. Варшавский Г.А. Горение капли жидкого топлива (диффузионная теория) / Г.А. Варшавский. Бюро новой техники НКАП. М.: Гостехиздат. 1945. №. 6. С. 87-106.
15. Кузнецов Н.М. Топливо. Материальный баланс процесса горения: учеб. пособие / Н.М. Кузнецов, Е.А. Блинов, А.Н. Кузнецов. Л.: СЗПИ. 1989. 86 с.
16. Кузнецов Н.М. Основы теории топочных процессов: учеб. пособие / Н.М. Кузнецов, Е.А. Блинов. Л.: СЗПИ. 1990. 70 с.
17. Хзмалян Д.М. Теория горения и топочные устройства / Д.М. Хзмалян, Я.М. Каган. М.: Энергия, 1976 г. 488 с.
18. Ахмедов Р.Б. Дутьевые газогорелочные устройства / Р.Б. Ахмедов. М.: Недра, 1977. 272 с.
19. Павлов В.А. Условия оптимизации процессов сжигания жидкого топлива и газа в энергетических и промышленных установках / В.А. Павлов, И.Н. Штейнер. Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1984. 120 с.
20. Селиванов С.Е. Кинетика испарения капель жидких топлив / С.Е. Селиванов, М.И. Кулик // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета, 2011. №. 52.
21. Сполдинг Д.Б. Основы теории горения / Д.Б. Сполдинг. М.: Госэнергоиздат, 1959.
22. Померанцев В.В. Основы практической теории горения / В.В. Померанцев. Л.: Энергия, 1973. 263 с.
23. Кнорре Г.Ф. Теория топочных процессов / Г.Ф. Кнорре, К.М. Арефьев, А.Г. Блох, Е.А. Нахапетян, И.И. Палеев, В.Б. Штейнберг. М.: Энергия, 1966. 492 с.
24. Lavoie G.A. Spectroscopic measurements of nitric oxide in spark ignition engines / G.A. Lavoie // Combustion and Flame, 1970. №. 2. С. 97-108.

25. Варшавский Г.А. Квазистационарная теория воспламенения капли жидкого топлива / Г.А. Варшавский, Д.В. Федосеев, А.Д. Франк-Каменецкий // Физика аэродисперсных систем, 1969. №. 1. С. 101-107.

26. Demidenko N. D. Stationary and dynamic processes in process furnaces / N.D. Demidenko, L.V. Kulagina // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2016. Т. 9. №1. С.6.

27. Кулагин Л.В. Сжигание тяжелых жидких топлив / Л.В Кулагин. 1967. 280 с.

28. Жихар Г. И. Влияние различных факторов на процесс горения жидкого топлива при двухступенчатом сжигании / Г.И. Жихар, И.Г. Жихар // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ, 2018. №. 3. С. 57-64.

29. Спейшер В.А. Повышение эффективности использования газа и мазута в энергетических установках / В.А. Спейшер, А.Д. Горбенко. М.: Энергоатомиздат, 1991. 88 с.

30. Горелки газомазутные и амбразуры стационарных паровых котлов. ОСТ 108.836.05-82. 55 с.

31. Зверева Э.Р. Энергоресурсосберегающие технологии и аппараты ТЭС при работе на мазутах / Э.Р. Зверева, Т.М. Фарахов. Под ред. А.Г. Лаптева. М.: Теплотехник, 2012. 181 с.

32. Витман Л.А. Распыливание жидкости форсунками / Л.А. Витман, Б.Д. Кацнельсон, И.И. Палеев. (под ред. СС Кутателадзе, 1962.

33. Лисиенко В.Г. Топливо. Рациональное сжигание, управление и технологическое использование / В.Г. Лисиенко. М.: Теплотехник, 2004. 608 с.

34. Карауш С.А. Расчет параметров процессов горения / С.А. Каруш. Томск: Изд-во Том.гос.архит.-строит.ун-та, 2015. 120 с.

35. Akhmetova R.V. Calculation of fuel oil drop burnup time dependence on intensity of flame radiation / R.V. Akhmetova, M.A. Taimarov // Research Journal of Applied Sciences, 2016. Volume: 11, P. 1660-1665.

36. Хитрин Л.Н. Физика горения и взрыва / Л.Н. Хитрин. Изд-во Московского университета, 1957. 452 с.
37. Верховский Н.И. Сжигание высокосернистого мазута на электростанциях / Н.И. Верховский, Г.К. Красноселов, Е.В. Машилов, Л.М. Цирульников. М.: Энергия, 1970.
38. Хзмалян Д.М. Введение в теорию горения / Д.М. Хзмалян. Изд. МЭИ, 1953.
39. Кумагаи С. Горение / С. Кумагаи. Пер. с японского С.К. Орджоникидзе: Химия, 1979.
40. Глинков М.А. Общая теория печей / М.А. Глинков, Г.М. Глинков. М.: Metallurgy, 1978.
41. Goldsmith W. Impact, the theory and physical behavior of colliding solid / W. Goldsmith, 1964.
42. Altman D. Combustion of liquid propellants / D. Altman, S.S Penner // Combustion Processes, 1956. –470 с.
43. Пашков Л.Г. Основы теории горения / Л.Г. Пашков. М.: МЭИ, 2002. 136 с.
44. Киселев Н.А. Котельные установки / Н.А. Киселев. М.: Высшая школа, 1986. 375 с.
45. Бойко Е.А. Котельные установки и парогенераторы (тепловой расчет парового котла) / Е.А. Бойко, И.С. Деринг, Т.И. Охорзина. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2005. 92 с.
46. Роддатис К.Ф. Котельные установки / К.Ф. Роддатис. М.: Энергоиздат, 1977. 402 с.
47. Таймаров М.А. Котлы ТЭС большой мощности и сверхкритические Ч.1. учеб. пособие по дисциплине «Котельные установки и парогенераторы» / М.А. Таймаров, В.М. Таймаров . Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2009 г. 152 с.
48. Киселев Н.А. Котельные установки / Н.А. Киселев. М.: Высшая школа, 1986. 375 с.

49. Ахметова Р.В. Способы повышения эффективности сжигания топлива в энергетических котлах / Р.А Ахметова, М.А. Таймаров, Э.А. Ахметов Э.А. // Сб. мат. межд. научно-техн. конф. «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы». 2016. С.255-261.

50. Ахметова Р.В. Экономичность сжигания мазута в котлах ТГМ-84А с использованием механических и паромеханических форсунок / Р.В. Ахметова, М.А. Таймаров // Сб. мат. докл. XII межд. молодежной науч. конф. «Гинчуринские чтения», 2017. Т.3. С.10.

51. Винтовкин А.А. Горелочные устройства промышленных печей и топок / А.А. Винтовкин, М.Г. Ладыгичев, В.Л. Гусовский, Т.В.Калинова. М.: Интермет Инжиниринг, 1999. 552 с.

52. Винтовкин А.А. Горелочные устройства обжиговых агрегатов металлургического производства / А.А. Винтовкин, В.М. Удилов. Челябинск: Металлургия, 1991. 336с.

53. Таймаров М.А. Горелочные устройства / М.А Таймаров, В.М. Таймаров. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2007. 147 с.

54. Стенд для тарировки мазутных форсунок: пат. №170170 Рос. Федерация №2016135455; заявл. 31.08.2016;опубл.03.05.2017, бюл.13.

55. Антоновский В.И. Методы и приборы для исследования теплообмена в топках котлоагрегатов / В.И. Антоновский, О.В. Киселев. Н.: Калининградский государственный университет, 1974. 197 с.

56. Способ определения излучательных характеристик пламени / Антоновский В.И., Киселев О.В., Резник О.А. // № 385179 (СССР). Опубл. в бюл. «Открытия. Изобретения. Пром. образцы. Товарные знаки», 1973. № 25. С. 34-36.

57. Внуков А.К. Экспериментальные работы на парогенераторах / А.К Внуков. М.: Энергия, 1971. 296 с.

58. Мурин Г.А. Теплотехнические измерения / Г.А. Мурин. М.: Энергоиздат, 1990. 544 с.

59. Эстеркин Р.И. Эксплуатация, наладка и испытание теплотехнического оборудования промышленных предприятий / Р.И. Эстеркин. Энергия, 1976.
60. Антоновский В.И. Лучистый теплообмен на поверхности выходного окна топки парового котла / В.И. Антоновский, О.В. Киселев // Теплоэнергетика, 1979. № 1. С. 23 -27.
61. Антоновский В.И. Экспериментальное изучение лучистого теплообмена на поверхности выходного окна топки / В.И. Антоновский, О.В. Киселев // Теплоэнергетика, 1976. № 2. С. 56-59.
62. Ахмедов Р.Б. Погрешность измерения температуры газов на выходе из топки парогенератора / Р.Б. Ахмедов, М.Л. Гамбарин, З.С. Талибжанов // Теплоэнергетика, 1975. № 1. С. 24-28.
63. Menguc M. P. (ed.). Radiative Transfer-I: Proceedings of the First International Symposium on Radiation Transfer, Kuşadası, Turkey, August 13-18, 1995. Begell House Publishers, 1996. Т. 1.
64. Воротников Е.Г. Измерение и усреднение температур на выходе из топки / Е.Г. Воротников, Л.И. Дураченко, П.Л. Магидей. Труды ЛПИ, 1969. С.117-122.
65. Магидей П.Л. Поправка к локальным значениям температуры факела, измеренным отсосным пирометром / П.Л. Магидей, И.И. Лысаков // Энергетика: Известия ВУЗов, 1974. № 6.С.51-56.
66. Олейник Б.М. Приборы и методы температурных измерений / Б.М. Олейник. М.: Издательство стандартов, 1987. 293 с.
67. ГОСТ Р 8.585-2001. Государственная система обеспечения единства измерений. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования.
68. ГОСТ 3044-84. Преобразователи термоэлектрические. Номинальные статические характеристики преобразования.
69. ГОСТ 492-2006. Никель, сплавы никелевые и медно-никелевые, обрабатываемые давлением. Марки.

70. Трёмбовля В.И. Теплотехнические испытания котельных установок / В.И. Трёмбовля. М.: Энергия, 1977. 297 с.
71. Геращенко О.А. Температурные измерения: справочник / О.А. Геращенко. Киев: Наукова думка. 1984. 495 с.
72. Гордов А.Н. Основы температурных измерений / А.Н. Гордов. М.: Энергоатомиздат, 1992. 304 с.
73. Блох А.Г. Основы теплообмена излучением / А.Г. Блох. М. Л.: Энергоиздат, 1962. 331 с.
74. Оцисик М.Н. Сложный теплообмен / М.Н. Оцисик. М.: Мир, 1976. 616 с.
75. Зигель Л. Теплообмен излучением / Л. Зигель, Дж. Хауэлл. М.: Мир, 1975. 934 с.
76. Блох А.Г. Теплообмен излучением / А.Г. Блох, Ю.А. Журавлев, Л.Н. Рыжков. М.: Энергоатомиздат, 1991. 432 с.
77. Шестаков Е.Н. Методы определения оптических постоянных металлов и сплавов при высоких температурах / Е.Н. Шестаков, Л.Н. Латыев, В.Я. Чеховской // Теплофизика высоких температур. 1978. Т. 16. № 1. с. 178-189.
78. Пришивалко А.П. О точности определения оптических постоянных поглощающих веществ методом зеркального отражения / А.П. Пришивалко // Инженерно-физический журнал. 1959. Т.3. №9. С. 74-82.
79. Bither T.A. Transition metal pyrite dichalcogenides. High-pressure synthesis and correlation of properties / T.A. Bither //Inorganic Chemistry. 1968. Т. 7. № 11. С. 2208-2220.
80. ГОСТ 10627-71. Телескопы пирометров суммарного излучения. Градуировочные таблицы.
81. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод) / Под ред. Н. В. Кузнецова, В. В. Митора, И.Е. Дубовского, Э. С. Карасиной. М.: Энергия, 1973. 296 с.

82. Ахмедов Р.Б. Влияние аэродинамического взаимодействия закрученных факелов на рабочие процессы в топках котлов / Р.Б. Ахмедов, Д.М. Ахмедов, А.Х. Асадуллаев // Теплоэнергетика, 1981. № 4. С. 51-54.

83. Ахмедов Р.Б. Взаимодействие факелов вихревых горелок и его влияние на теплообмен в топке / Р.Б. Ахмедов, Д.М. Ахмедов, А.Х. Асадуллаев // Теплоэнергетика, 1977. № 4. С. 25-30.

84. Липов Ю.М. Компоновка и тепловой расчет парового котла / Ю.М. Липов, Ю.Ф. Самойлов, Т.В. Виленский. М.: Энергоатомиздат, 1988. 208 с.

85. Таймаров М.А. Тепловой расчет котельных агрегатов / М.А. Таймаров. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2001. 156 с.

86. Таймаров М.А. Курсовое и дипломное проектирование по тепловым сетям, котельным и парогазовым установкам / М.А. Таймаров. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2006. 264 с.

87. Таймаров М.А. Практические занятия на ТЭЦ. Учебное пособие / М.А. Таймаров. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т. 2003. 64 с.

88. Таймаров М.А. Котлы ТЭС и котельных Часть I. Уч. пос. по дисциплине «Котельные установки и парогенераторы» / М.А. Таймаров. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2010 г. 230 с.

89. Cornet I. Emulsified fuels in compression ignition engines / I. Cornet, W.E. Nero // Industrial & Engineering Chemistry. 1955. Т. 47. №. 10. С. 2133-2141.

90. Takahisa Y. N2O emission from fossil fuel fired at power plants / Y. Takahisa, N. Shaw, M. Hiromitsu // Environmental Science and Technology. 1991. Vol.25. P.347-348.

91. Таймаров М.А. Оптические постоянные вещества частиц конверторной пыли / М.А. Таймаров // Инженерно-физический журнал, 1998. Т. 71. № 6. С. 1056-1058.

92. Шестаков Е.Н. Методы определения оптических постоянных металлов и сплавов при высоких температурах / Е.Н. Шестаков, Л.Н. Латыев, В.Я.Чеховской // Теплофизика высоких температур, 1978. Т. 16. № 1. С. 178-189.

93. Пришивалко А.П. О точности определения оптических постоянных поглощающих веществ методом зеркального отражения / А.П. Пришивалко // Инженерно-физический журнал, 1959. Т.3. №9. С. 74-82.

94. Гарифуллин Ф.А. Расчет теплоотдачи излучением в котлах-утилизаторах при сильной запыленности газовых потоков / Ф.А. Гарифуллин, М.А. Таймаров, М.М. Кочеров, К.А. Русев // Радиационный и комбинированный теплообмен. Мат. УП Всесоюзной конф. по теплообмену. Минск, 1984.Т.2. С. 95-99.

95. Брамсон М.А. Инфракрасное излучение нагретых тел / М.А. Брамсон. М.: Наука, 1964. 226 с.

96. Ахмедов Р.Б. К определению температуры продуктов сгорания на выходе из топки парогенератора / Р.Б. Ахмедов, М.Л. Гамбарин, З.С. Талибджанов // Теплоэнергетика, 1974. № 8. С. 25-32.

97. Ослопов, О.И. Исследование теплообмена в топке котла БКЗ-320 при сжигании экибастузского угля / О.И. Ослопов, Э.С. Карасина // Теплоэнергетика, 1973. № 4. С.72-75.

98. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых и факельных печах и топках паровых котлов / А.Н. Макаров. Тверь: ТГТУ, 2003. 348 с.

99. Рубцов Н.А. Теплообмен излучением в сплошных средах / Н.А. Рубцов. Новосибирск: Наука, 1984. 277 с.

100. Форсунка: пат. №174497 Рос. Федерация №2016127723; заявл. 08.07.2016 ;опубл.17.10.2017, бюл.29.

101. ГОСТ 10585-75 Топливо нефтяное. Мазут. Технические условия.

102. Макаров А.Н. Методика расчета рационального пространственного положения факела с целью оптимизации теплообмена в промышленной печи / А.Н. Макаров, Е.И. Кривнев // Промышленная энергетика, 2000. №2. С.39-42.

103. Макаров А.Н. Расчет распределения излучения факела в топке парового котла / А.Н. Макаров, Е.И. Кривнев // Промышленная энергетика, 2000. №11. С. 33-36.

104. Макаров А.Н. Применение модели линейного источника для определения падающих потоков излучений в топке парового котла / А.Н. Макаров // Теплоэнергетика, 2001. №7. С.39-43.

105. Макаров А.Н. Влияние геометрических размеров факела на распределение падающих потоков излучений в топке парового котла / А.Н. Макаров, Е.И. Кривнев // Промышленная энергетика, 2001. №8. С. 30-32.

106. Горелка для сжигания газа: пат. №2396488 Рос. Федерация. № 2009112151; заявл.01.04.2009; опубл. 10.08.2010. 9 с.

107. Воропаев В.В. Автоматизация контроля теплообмена в топках парового котла / В.В. Воропаев, А.Н. Макаров // Проблемы энергосбережения. Тверь: ТГТУ, 2004. С.134-136.

108. Антоновский В.И. Теплообмен в топках паровых котлов. Ретроспективный взгляд на разработку нормативного метода расчета / В.И. Антоновский // Теплоэнергетика, 2004. № 9. С.53-62.

109. Ахмедов Д.Б. Влияние способа сжигания топлива на теплообмен и шлакование экранов топки / Д.Б. Ахмедов, А.П. Парамонов, О.Ю. Гурылев // Энергомашиностроение. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2004. С. 122-127.

110. Вафин Д.Б. Сложный теплообмен в энергетических установках: автореф. дис. д-ра техн. наук. Казань, 2009.43 с.

111. Таймаров М.А. Образования оксидов азота в котлах ТГ-104 с прямоточно-вихревыми горелками и периферийной подачей газа / М.А. Таймаров, Р.В. Ахметова, Д.Е. Чикляев, Е.Г. Чикляев, Р.Г. Сунгатуллин // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. 2016. № 9-10. С. 83-90.

112. Таймаров М.А. Расчет оптимальных режимных параметров работы котлов ТГМ-84А / М.А. Таймаров, Р.В. Ахметова, Д.Е. Чикляев, Е.Г. Чикляев, Р.Г. Сунгатуллин // Вестник Казанского государственного энергетического университета, 2016. № 4. С. 83-95.

113. Таймаров М.А. Измерения тепловых потоков и температуры в топке котла ТГМ-84А / М.А. Таймаров, Р.В. Ахметова, Р.Г. Сунгатуллин // Наука и образование сегодня, 2016.№ 6 (7). С. 21-28.

114. Таймаров М.А. Особенности сжигания метано-водородной фракции в радиантных топках / М.А Таймаров, Н.Е. Кувшинов, Р.В. Ахметова, Р.Г. Сунгатуллин, Д.Е Чикляев // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики, 2016. № 11-12. С. 83-90.

115. Котельная установка / М.А. Таймаров, Р.В. Ахметова, Р.Г. Сунгатуллин // пат. на полезную модель № 169930 заявка №2016128163 от 11.07.2016.

116. Ахметова Р.В. Выбор режимов работы котла ТГМ-84Б при сжигании высокосернистого мазута М-100 с содержанием влаги от 3,4 до 10,4 %: материалы / XX асп.-магист. семинар, посвященного Дню энергетика. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2017.Т.2. С. 8-10.

117. Таймаров М.А. Влияние кавитационной обработки на выгорание частиц мазута в топках котлов / М.А. Таймаров, Р.В. Ахметова, С.М. Маргулис // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20. № 9-10, С. 52-59.

118. Таймаров М.А. Тепловые потоки от факела в котлах с различной компоновкой горелок / М.А. Таймаров, Р.В. Ахметова, Р.Г. Сунгатуллин, Е.А. Салтанаева // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. Казань, 2017. № 9-10. С. 50-58.

119. Таймаров М.А. Сжигание мазута в котлах при различных компоновках горелок /М.А. Таймаров, Р.В. Ахметова, В.К. Ильин, С.М. Маргулис // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. Казань. 2018. № 7-8. С. 55-62.

120. Zhou L. X. Large-eddy simulation of turbulent combustion using different combustion models / L. X. Zhou, L. Y. Hu, F. Wang //Fuel. 2008. Т. 87. №. 13-14. С. 3123-3131.

121. I rannejad A. Large eddy simulation of turbulent spray combustion / A. Irannejad, A. Banaeizadeh, F. Jaber //Combustion and Flame. 2015. Т. 162. №. 2. С. 431-450.

122. Грибков А.М. Системы диагностирования элементов ТЭС / А.М. Грибков. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2016. 138 с.

Расчет параметров мазутного факела котла ТГМ-84Б

Скорость истечения мазута из сопла, м/сек . Расчет сделан на 2500 кг/час и на 5000 кг/ч по мазуту при давлении мазута 9 и 14 атм при давлении в камере смешения 150000 Па (1,5 атм)

$$i := 1..2 \quad b_{m_1} := \begin{array}{|c|} \hline 2500 \\ \hline 5000 \\ \hline \end{array} \quad \mu := 0.2 \quad \rho_m := 960 \quad p_{mm_1} := \begin{array}{|c|} \hline 900000 \\ \hline 1400000 \\ \hline \end{array} \quad w_{m_1} := \mu \cdot \left[2 \cdot \frac{(p_{mm_1} - 150000)}{\rho_m} \right]^{0.5} \quad w_{m_1} = \begin{array}{|c|} \hline 7.906 \\ \hline 10.206 \\ \hline \end{array}$$

Диаметр мазутного сопла, мм

$$d_m = (10^6 \cdot B_m / (2826 \cdot w_m \cdot \rho_m))^{0.5} \quad d_{m_1} := \left(10^6 \cdot \frac{b_{m_1}}{2826 \cdot w_{m_1} \cdot \rho_m} \right)^{0.5} \quad d_{m_1} = \begin{array}{|c|} \hline 10.796 \\ \hline 13.438 \\ \hline \end{array}$$

Площадь сечения мазутного сопла, кв. м

$$f_{s_1} := 3.14 \cdot \frac{(0.001 \cdot d_{m_1})^2}{4} \quad f_{s_1} = \begin{array}{|c|} \hline 9.15 \cdot 10^{-5} \\ \hline 1.418 \cdot 10^{-4} \\ \hline \end{array}$$

Площадь сечения каждого из шести отверстий кв. м

$$f_{3s_1} := \frac{f_{s_1}}{6} \quad f_{3s_1} = \begin{array}{|c|} \hline 1.525 \cdot 10^{-5} \\ \hline 2.363 \cdot 10^{-5} \\ \hline \end{array}$$

Диаметр каждого из шести отверстий, м

$$d_{3_1} := \sqrt{\frac{4 \cdot f_{3s_1}}{3.14}} \quad d_{3_1} = \begin{array}{|c|} \hline 4.408 \cdot 10^{-3} \\ \hline 5.486 \cdot 10^{-3} \\ \hline \end{array}$$

Наружный диаметр мазутного сопла, мм

$$d_{m.c.n} = d_{m.c.y} + 2 \cdot \delta_{ст}$$

$$d_{mn_1} := d_{m_1} + 2 \cdot 3.5 \quad d_{mn_1} = \begin{array}{|c|} \hline 17.796 \\ \hline 20.438 \\ \hline \end{array}$$

Скорость распылителя в критическом сечении при избыточном давлении в смесителе 0,4 атм, м/с

при давлении распыливающего пара 9 атм

$$w_{0kr_1} := 0.8 \cdot 0.685 \cdot (p_{v_1} - 150000) \cdot \left(\frac{273}{4.5 \cdot t_{v_1} + 150000} \right)^{0.5}$$

$p_{v_1} :=$	$t_{v_1} :=$
900000	453
900000	453

$w_{0kr_1} =$
388.349
388.349

при давлении распыливающего пара 12 атм
плотность пара 5.78 кг/куб м
при давлении 16 кг/см² плотность 6,906 кг/куб м

$$w_{0kr_1} := 0.8 \cdot 0.685 \cdot (p_{v_1} - 150000) \cdot \left(\frac{273}{5.78 \cdot t_{v_1} + 150000} \right)^{0.5}$$

$p_{v_1} :=$	$t_{v_1} :=$
1200000	473
1600000	523

$w_{0kr_1} =$
469.473
616.552

При коэффициенте истечения $\varphi=0,8$ площадь критического сечения, мм²

при расходе пара 0,4 кг пара на 1 кг мазута
для давления распыливающего пара 12 атм

$$f_{kr_1} := 10^3 \cdot b_{m_1} \cdot \frac{q_1}{3.6 \cdot w_{0kr_1} \cdot 5.78}$$

$q_1 :=$
0.4
0.4

$f_{kr_1} =$
102.367
155.894

Внутренний диаметр промежуточной трубы, мм

$$d_{krvn_1} := \left[(d_{mn_1})^2 + \frac{f_{kr_1}}{0.785} \right]^{0.5}$$

$d_{krvn_1} =$
21.145
24.825

Отношение p_0/p_p

$otn_1 :=$	$otn_1 =$
$\frac{150000}{1200000}$	
0.125	0.125
0.125	

при показателе адиабаты для пара $k=C_p/C_v=1.13$ [34,с.233, 234]

$$\begin{aligned} \Pi &:= \left(\frac{1200000}{250000} \right) & \Pi &= 1.188 \\ A1 &:= \left[\left(\frac{2}{2.13} \right)^{1.69} \right] \cdot \left(\frac{1200000}{250000} \right)^{0.884} & A1 &= 3.597 \\ A2 &:= \sqrt{16 \cdot \left[1 - \left(\frac{250000}{1200000} \right)^{0.11} \right]} & A2 &= 1.592 \\ A &:= \frac{A1}{A2} & A &= 2.259 \end{aligned}$$

Площадь выходного сечения, мм² $f_{v1} := f_{k1} \cdot 2.259$

$f_{v1} =$

231.246
352.165

Плотность распылителя в выходном сечении кг/м³
при давлении пара 12 атм

$$\begin{aligned} \rho_{01} &:= & T_{01} &:= \\ \begin{array}{|c|} \hline 5.78 \\ \hline 6.906 \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline 473 \\ \hline 523 \\ \hline \end{array} & \rho_{v1} &:= \rho_{01} \cdot 460 \cdot \frac{1.188}{T_{01}} & \rho_{v1} &= \\ \begin{array}{|c|} \hline 6.678 \\ \hline 7.216 \\ \hline \end{array} & & & & & \end{aligned}$$

Скорость распылителя в выходном сечении, м/с

$$\begin{aligned} w_{v1} &:= b_{m1} \cdot q_1 \cdot \frac{10^3}{3.6 \cdot f_{v1} \cdot \rho_{v1}} & w_{v1} &= \\ \begin{array}{|c|} \hline 179.88 \\ \hline 218.616 \\ \hline \end{array} & & & \end{aligned}$$

Температура распылителя в выходном сечении

$$\begin{aligned} t_{v1} &:= \frac{473}{1.188} & t_{v1} &= \\ \begin{array}{|c|} \hline 398.148 \\ \hline 398.148 \\ \hline \end{array} & & & \end{aligned}$$

Суммарная кинетическая энергия в начальном сечении, Дж/кг

$$\begin{aligned} E_{nath1} &:= 0.5 \cdot (w_{m1})^2 + 0.5 \cdot q_1 \cdot (w_{v1})^2 & E_{nath1} &= \\ \begin{array}{|c|} \hline 6.503 \cdot 10^3 \\ \hline 9.611 \cdot 10^3 \\ \hline \end{array} & & & \end{aligned}$$

Расход энергии на смешение, Дж/кг

$$Esm_1 := (wvih_1 - wm_1)^2 \cdot 0.5 \cdot \frac{q_1}{(1 + q_1)} \quad Esm_1 =$$

4.225·10 ³
6.205·10 ³

Радиус капли распыленного мазута, м

$$r_1 := \frac{0.275}{(wvih_1)^2 \cdot \rho vih_1} \quad r_1 =$$

1.273·10 ⁻⁶
7.974·10 ⁻⁷

Расход энергии на распыливание мазута, кДж/кг

$$\sigma := 0.028 \quad Erasp_1 := 3 \cdot \frac{\sigma}{\rho m \cdot r_1} \quad Erasp_1 =$$

68.751
109.733

Кинетическая энергия в выходном сечении, Дж/кг

$$\eta_{sm} := 0.8 \quad Ekon_1 := \frac{(Enath_1 \cdot \eta_{sm} - Esm_1 - Erasp_1)}{\eta_{sm}} \quad Ekon_1 =$$

1.135·10 ³
1.717·10 ³

Скорость смеси в выходном сечении, м/с

$$wsm_1 := \left(2 \cdot \frac{Ekon_1}{1 + q_1} \right)^{0.5} \quad wsm_1 =$$

40.274
49.531

Энтальпия мазута и распылителя, поступивших в смеситель при 14 и 12 атм, Дж/кг

$$cp_1 := 1000 \quad Tm_1 := 363 \quad cm_1 := 1960 \quad inath_1 := cm_1 \cdot Tm_1 + cp_1 \cdot tvih_1 \cdot q_1 \quad inath_1 =$$

8.707·10 ⁵
8.707·10 ⁵

Теплота смешения и трения Дж/кг

$$ip_1 := Enath_1 - Ekon_1 - Erasp_1$$

$$ip_1 =$$

5.298·10 ³

7.784·10 ³

Температура смеси в выходном сечении, К

$$Tsm_1 := \frac{(inath_1 + ip_1)}{(cm_1 + cp_1 \cdot q_1)}$$

$$Tsm_1 =$$

371.202

372.255

Плотность смеси в выходном сечении, кг/м³

$$T0 := 398$$

$$\rho0rasp_1 := 6.68$$

$$\rho sm_1 := \rho0rasp_1 \cdot \frac{T0}{Tsm_1}$$

$$\rho sm_1 =$$

7.162

7.142

Длина факела [21, с.37], м

$$lf_1 := 1.1 \cdot 0.97^2 \cdot (1.03 - 1)^{-0.48} \cdot \left(\frac{bm_1}{1000} \right)^{0.35}$$

$$lf_1 =$$

7.677

9.785

Относительное выгорание мазута по длине факела [21, с.37]

$$mk_1 := 1 - 0.03 \cdot \left(\frac{1}{lf_1} \right)^{0.8}$$

$$mk_1 =$$

0.994

0.995

Программа и результаты расчета времени выгорания капли мазута

$$i := 1..4$$

$$\xi_i :=$$

100
150
200
250

$$\tau_i :=$$

$1.27 \cdot 10^{-5}$
$0.79 \cdot 10^{-5}$

Время выгорания, рассчитанное по диффузионной теории, сек

$$\tau_i := 998 \cdot [(99 - 70) \cdot 5.88 + 200] \cdot \frac{(1.27 \cdot 10^{-5})}{\xi_i}$$

$$\tau_i =$$

0.047
0.031
0.023
0.019

Время выгорания, рассчитанное по длине факела по кинетической теории, сек

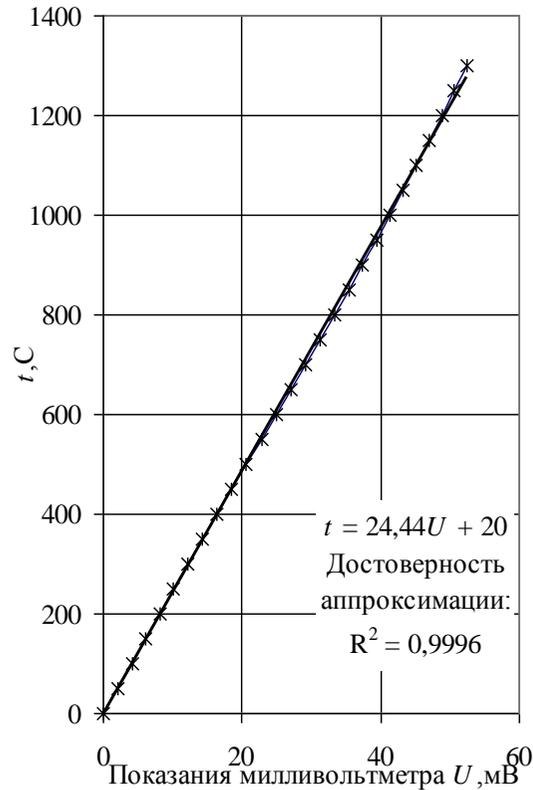
$$\tau_l := \frac{1.5}{30}$$

$$\tau_l = 0.05$$

Приложение 3

Протокол первичных экспериментальных данных по градуировки термопары пирометрического термозонда, типа хромель алюминель.

Температура АЧТ	Показания милливольтметра
0	0
50	2,02
100	4,1
150	6,13
200	8,13
250	10,15
300	12,21
350	14,29
400	16,39
450	18,5
500	20,64
550	22,77
600	24,9
650	27,03
700	29,14
750	31,23
800	33,31
850	35,35
900	37,36
950	39,35
1000	41,31
1050	43,24
1100	45,14
1150	47,01
1200	48,85
1250	50,65
1300	52,41



Пример обработки данных по температуре факела от милливольтметра для котла № 9 ТГМ-84Б при нагрузке 370 т/ч.

Глубина топки, l	Показания милливольт, U_1	Показания милливольт, U_2	t_1	t_2	Погрешность в определение температур Δt_2	Действительная температура t
мм	мВ	мВ	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
10	31,16	31,63	780	793	7,76	800
20	35,19	35,72	880	893	7,76	900
30	37,23	38,05	930	950	9,72	960
40	38,87	39,69	970	990	9,72	1000
50	39,69	40,71	990	1015	11,12	1030
60	41,33	42,14	1030	1050	9,72	1060
70	43,37	43,58	1080	1085	5,52	1090
80	43,37	43,99	1080	1095	8,32	1100
90	43,37	44,19	1080	1100	9,72	1110
100	43,78	44,6	1090	1110	9,72	1120
110	43,78	44,80	1090	1115	11,12	1130
120	44,19	45,42	1100	1130	12,52	1150
130	45,01	46,03	1120	1145	11,12	1160
140	45,42	46,64	1130	1160	12,52	1180
150	45,83	47,05	1140	1170	12,52	1185
160	46,24	47,26	1150	1175	11,12	1190
170	46,24	47,46	1150	1180	12,52	1200
180	47,87	48,69	1190	1210	9,72	1220
190	48,28	49,1	1200	1220	9,72	1230
200	48,28	49,71	1200	1235	13,92	1240

$t_1 = 24,44 U_1 + 20, (^{\circ}\text{C}); t_2 = 24,44 U_2 + 20, (^{\circ}\text{C}); t = t_1 + A_o(t_2 - t_1), (^{\circ}\text{C});$
 $\Delta t_2 = (2 A_o + 1) + (t_2 - t_1) \Delta A_o, (^{\circ}\text{C});$
 $A_o = 1 / (1 - (d_2 / d_1)^{1-m}) = 1,56, \Delta A_o = \pm 0,28$

Программа и результаты расчета параметров крутки воздуха в горелках котла
№4 ТГМ-84Б НЧТЭЦ

Расчет параметра тангенциальной крутки:

$$i := 1..6$$

$$\xi_i :=$$

45
45
45
45
45
45

$$\beta_i := \left(\frac{\pi \cdot \xi_i}{180} \right)$$

$$\beta_i =$$

0.785
0.785
0.785
0.785
0.785
0.785

$$n_i := \left[3.14 \cdot \frac{(1.06^2 - 0.71^2)^{0.5}}{2 \cdot 0.34 \cdot 28} \right] \cdot \frac{(\sin(\beta_i))}{\sin\left(\frac{3.14}{28}\right) \cdot \cos\left(\beta_i - \frac{3.14}{28}\right)}$$

$$n_i =$$

1.049
1.049
1.049
1.049
1.049
1.049

Расчет параметра осевой крутки . Все горелки имеют направление осевой крутки, по номерам горелок совпадающей с периферийной круткой

$$Rz := \sqrt{0.125 \cdot (0.73^2 + 0.325^2)} \quad De := \sqrt{(0.73^2 - 0.325^2)} \quad \beta_o := \frac{\pi}{3}$$

$$\varepsilon := \left[\frac{3.14 \cdot (0.73 + 0.325)}{2 \cdot 18} \right] - 0.003 \quad no := 2 \cdot 3.14 \cdot Rz \cdot De \cdot \frac{\tan(\beta_o)}{\varepsilon \cdot 18 \cdot (0.73 - 0.325)} \quad no = 3.095$$

Расчет параметра улиточной крутки для котла ТГМ-96Б

$$nu := 3.14 \cdot \sqrt{1.18^2 - 0.53^2} \cdot \frac{1.8}{1 \cdot 1.2} \quad nu = 4.966$$

Программа расчета КПД котла ТГМ-84Б № 4 НчТЭЦ (Крутка 45 газ. 350 т/ч)

k := 1..2

$$\begin{array}{l}
 Q_{nr_k} := \\
 \boxed{\frac{7920}{7920}}
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 Dk_k := \\
 \boxed{\frac{350 \cdot 10^3}{350 \cdot 10^3}}
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 ipp_k := \\
 \boxed{\frac{833.9}{833.9}}
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 ipv_k := \\
 \boxed{\frac{228.3}{228.3}}
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 ikv_k := \\
 \boxed{\frac{366.77}{366.77}}
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 Bg_k := \\
 \boxed{\frac{29 \cdot 10^3}{29 \cdot 10^3}}
 \end{array}$$

n := 1..2

$$\begin{array}{l}
 Bm_n := \\
 \boxed{\frac{20.1 \cdot 10^3}{20.1 \cdot 10^3}}
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 Q_{nr_n} := \\
 \boxed{\frac{9561.5}{9561.5}}
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 Dpr_k := \\
 \boxed{\frac{3.5}{3.5}}
 \end{array}$$

l := 1..2

$$\eta_k = \frac{[Dk_k \cdot (ipp_k - ipv_k) + Dpr_k \cdot (ikv_k - ipv_k)] \cdot 100}{Bg_k \cdot Q_{nr_k}}$$

$$\eta_k = \boxed{\frac{92.285}{92.285}}$$

$$q_{3_1} = 0.06 \quad q_{5_1} = 1.3 \quad O_{2_1} = \begin{array}{|c|} \hline 1. \\ \hline 1. \\ \hline \end{array} \quad tuh_1 = \begin{array}{|c|} \hline 142 \\ \hline 142 \\ \hline \end{array} \quad thv_1 = \begin{array}{|c|} \hline 14 \\ \hline 14 \\ \hline \end{array} \quad Q_{nr_1} = 8022 \quad \alpha_{uh_1} = \frac{(21 - 0.1 \cdot O_{2_1})}{(21 - O_{2_1})}$$

$$I_{hv_1} = 301 \cdot \frac{thv_1}{100} \quad I_{hv_1} = \begin{array}{|c|} \hline 42.14 \\ \hline 42.14 \\ \hline \end{array} \quad I_{uh_1} = 353 \cdot \frac{tuh_1}{100} \quad I_{uh_1} = \begin{array}{|c|} \hline 501.26 \\ \hline 501.26 \\ \hline \end{array} \quad \alpha_{uh_1} = \begin{array}{|c|} \hline 1.045 \\ \hline 1.045 \\ \hline \end{array}$$

$$q_{2_1} = 100 \cdot \frac{I_{uh_1} - \alpha_{uh_1} \cdot I_{hv_1}}{Q_{nr_1}} \quad q_{2_1} = \begin{array}{|c|} \hline 5.7 \\ \hline 5.7 \\ \hline \end{array} \quad \eta_{o1} = 100 - q_{2_1} - q_{3_1} - q_{5_1} \quad \eta_{o1} = \begin{array}{|c|} \hline 92.94 \\ \hline 92.94 \\ \hline \end{array}$$

Позонный расчет топочной камеры котла ТГМ-84Б

Характеристика топлива			
Мазут сернистый			
влажносодержание	Wp		3
золосодержание	Ap		0,1
содержание серы	Sp		1,4
содержание углерода	Cp		83,8
содержание водорода	Hp		11,2
содержание азота	Np		0,5
содержание кислорода	Op		0,5
низшая теплота сгорания	Qрн	ккал/кг	9030
паровое распыливание мазута	Gф	кг/кг	
коэффициент избытка воздуха в топке	α		1,2
расчет объемов продуктов сгорания			
теоретическое количество сухого воздуха	Vo	м3/кг	10,44784
теоретическая масса сухого воздуха	Lo	кг/кг	13,50623
теоретический объем азота	VoN2	м3/кг	8,257796
объем трехатомных газов	VRO2	м3/кг	1,573505
теоретический объем водяных паров	VoH2O	м3/кг	1,44861
объем водяных паров	VH2O	м3/кг	1,45183
объем дымовых газов	Vг	м3/кг	13,3727
объемные доли трехатомных газов, равные парциальным давлениям газов при общем давлении 1 кгс/см ²	rRO2		0,117665
	rH2O		0,108567
	rП		0,226232
полное давление парционныхгазов	Pп	Мпа	0,237544

конструктивные характеристики котла			
зона 1			
суммарная экранированная поверхность стен	Fст	м2	250
сечение топочной камеры, ограничивающее зону сверху	Fсеч1	м2	84
зона 2			
суммарная поверхность	Fст2	м2	220
средняя площадь сечения топки	Fсеч.сред	м2	84
зона 3			
суммарная поверхность стен	Fст3	м2	220
зона 4			
суммарная поверхность стен	Fст4	м2	220

зона 5			
суммарная поверхность стен	Fст5	м2	188
поверхность выходного окна в ширмовый подогреватель	Фокна ширмы	м2	45
средняя площадь сечения топки в зоне	Fсеч среднее	м2	84
общая высота топки	Hт	м	23,9
высота каждой зоны	hз	м	4,7

расчет 1 зоны				
относительная высота зоны	$h1/Hт$	по рис VIII-2		0,197
степень выгорания топлива на выходе из зоны (на поданное топливо)	$\beta_{ср1}$	по табл. XXII		0,91
тепло вносимое в топку воздухом	Qв	ккал/кг	из расета топки в целом	720
температура газов на выходе из зоны	v''	С	принята предварительно	1825
энтальпия	I''	ккал/кг		4823
теплоемкость продуктов сгорания	$Vс''$	ккал/(кг*С)		2,643
трехатомными газами	Rг	$1/(м*кгс/см2)$	по номограмме 3	0,21
золыми частицами	Rзл	$1/(м*кгс/см2)$	по номограмме 4	0,75
безразмерные параметры	x1			0,49
	x2			0,42
концентрация золы	$\mu_{зл}$			0,02
оптическая толщина	RpS			0,063
степень черноты факела		по номограмме 2		0,8
средний коэффициент тепловой эффективности экранов зоны	$\psi_{ср}$			0,194
коэффициент, характеризующей отдачу тепла в вышерасположенную зону	ψ'	по п. 6.38		0,2
произведение коэффициента тепловой эффективности на суммарную поверхность, ограждающую зону	ψF			112
степень черноты топки в зоне				0,95
температура газов на выходе из зоны	v''	С		1847
средняя тепловая нагрузка радиационных поверхностей в зоне	ql1	ккал/(м2*ч)		175651

расчет 2 зоны				
относительная высота зоны	$h1/Hт$	по рис VIII-2		0,197
степень выгорания топлива на выходе из зоны (на поданное топливо)	$\beta_{сг2}$	по табл. XXII		0,92
доля сгоревшего топлива в зоне	$\Delta\beta_{сг2}$			0,01
температура газов на входе в зону	v'	С	из расчета зоны 1	1847
энтальпия на входе в зону	I'	ккал/кг	из расчета зоны 1	4823
температура газов на выходе из зоны	v''	С	принята предварительно	1700
энтальпия на выходе из зоны	I''	ккал/кг		4185
теплоемкость продуктов сгорания	$V_{с''}$	ккал/(кг*С)		2,611
отношение теплоемкостей	C'/C''			1,009
средняя температура газов в зоне	v	С		1773
коэффициент тепловой эффективности стен зоны	ψ		по табл. 6.2 равен 0,55	0,605
степень черноты топки в зоне	альфа Т			0,94
коэффициент переизлучения в данную зону	$\psi''-\psi'$		по п. 6-39, для мазута	-0,1
температура газов на выходе из зоны 2		С		1691
средняя тепловая нагрузка радиационных поверхностей в зоне	$q_{л2}$	ккал/(м ² *ч)		422267

расчет 3 зоны				
относительная высота зоны	$h1/Hт$	по рис VIII-2		0,197
степень выгорания топлива на выходе из зоны (на поданное топливо)	$\beta_{сг3}$	по табл. XXII		0,93
доля сгоревшего топлива в зоне	$\Delta\beta_{сг3}$			0,02
температура газов на входе в зону	v'	С	из расчета зоны 1	1725
энтальпия на входе в зону	I'	ккал/кг	из расчета зоны 1	4198
температура газов на выходе из зоны	v''	С	принята предварительно	1420
энтальпия на выходе из зоны	I''	ккал/кг		3854
теплоемкость продуктов сгорания	$V_{с''}$	ккал/(кг*С)		2,434
отношение теплоемкостей	C'/C''			1,007
средняя температура газов в зоне	v	С		1573
коэффициент тепловой эффективности стен зоны	ψ		по табл. 6.2 равен 0,55	0,605

степень черноты топки в зоне	альфа Т			0,93
коэффициент переизлучения в данную зону	$\psi''-\psi'$		по п.6-39, для мазута	-0,1
температура газов на выходе из зоны 2		С		1414
средняя тепловая нагрузка радиационных поверхностей в зоне	ql3	ккал/(м2*ч)		319809

расчет 4 зоны				
относительная высота зоны	$h1/Hт$		по рис VIII-2	0,197
степень выгорания топлива на выходе из зоны (на поданное топливо)	$\beta_{сг3}$		по табл. XXII	0,94
доля сгоревшего топлива в зоне	$\Delta\beta_{сг4}$			0,03
температура газов на входе в зону	v'	С	из расчета зоны 1	1414
энтальпия на входе в зону	I'	ккал/кг	из расчета зоны 1	3850
температура газов на выходе из зоны	v''	С	принята предварительно	1100
энтальпия на выходе из зоны	I''	ккал/кг		3200
теплоемкость продуктов сгорания	$V_{с''}$	ккал/(кг*С)		2,723
отношение теплоемкостей	C'/C''			1,004
средняя температура газов в зоне	v	С		1257
коэффициент тепловой эффективности стен зоны	ψ		по табл.6.2 равен 0,55	0,605
степень черноты топки в зоне	альфа Т			0,925
коэффициент переизлучения в данную зону	$\psi''-\psi'$		по п.6-39, для мазута	-0,1
температура газов на выходе из зоны 2		С		1103
средняя тепловая нагрузка радиационных поверхностей в зоне	ql4	ккал/(м2*ч)		150265

расчет 5 зоны				
доля сгоревшего топлива в зоне	$\Delta\beta_{сг4}$			0
температура газов на входе в зону	v'	С	из расчета зоны 1	1103
энтальпия на входе в зону	I'	ккал/кг	из расчета зоны 1	3305
температура газов на выходе из зоны	v''	С	принята предварительно	940
энтальпия на выходе из зоны	I''	ккал/кг		2980
теплоемкость продуктов	$V_{с''}$	ккал/(кг*С)		2,996

сгорания				
отношение теплоемкостей	C'/C''			1,004
средняя температура газов в зоне	v	С		1022
коэффициент тепловой эффективности стен зоны	ψ		по табл.6.2 равен 0,55	0,605
степень черноты топки в зоне	альфа T			0,925
коэффициент переизлучения в данную зону	$\psi''-\psi'$		по п.6-39, для мазута	0,0
температура газов на выходе из зоны 2		С		941
средняя тепловая нагрузка радиационных поверхностей в зоне	$q_{л4}$	ккал/(м ² *ч)		77002

Расчет адиабатической температуры горения

Характеристика топлива					
Мазут сернистый					
влагосодержание	Wp		3		
золосодержание	Ap		0,1		
содержание серы	Sp		1,4		
содержание углерода	Cp		83,8		
содержание водорода	Hp		11,2		
содержание азота	Np		0,5		
содержание кислорода	Op		0,5		
паровое распыливание мазута	Gф	кг/кг			
коэффициент избытка воздуха в топке	α		1,2		
На практике для расчета низшей теплоты сгорания твердого или жидкого рабочего топлива по известному элементарному составу пользуются эмпирической формулой Д.И. Менделеева					
определение низшей теплоты сгорания	Qpн	39827,0	39763,1		
Расчет объемов продуктов сгорания					
теоретическое количество сухого воздуха	V _о	м ³ /кг	10,4478	0,9148	9,55768
теоретическая масса сухого воздуха	L _о	кг/кг	13,5062		
объем избыточного воздуха	V _и	м ³ /кг	2,08956		
теоретический объем углекислого газа	VCO ₂	м ³ /кг	1,58046	0,8148	1,28776
теоретический объем окисла серы	VSO ₂	м ³ /кг	0,0098	0,607	0,00594
теоретический объем азота	VoN ₂	м ³ /кг	8,25779	1,0304	8,50883
объем трехатомных газов	VRO ₂	м ³ /кг	1,57350		
теоретический объем водяных паров	VoH ₂ O	м ³ /кг	1,44861	1,8594	2,69354
объем водяных паров	VH ₂ O	м ³ /кг	1,45183		
объем дымовых газов	V _г	м ³ /кг			22,0537
адиабатическая температура	t _а	С			1805,90

Примеры распределения интенсивности излучения факела по высоте топки

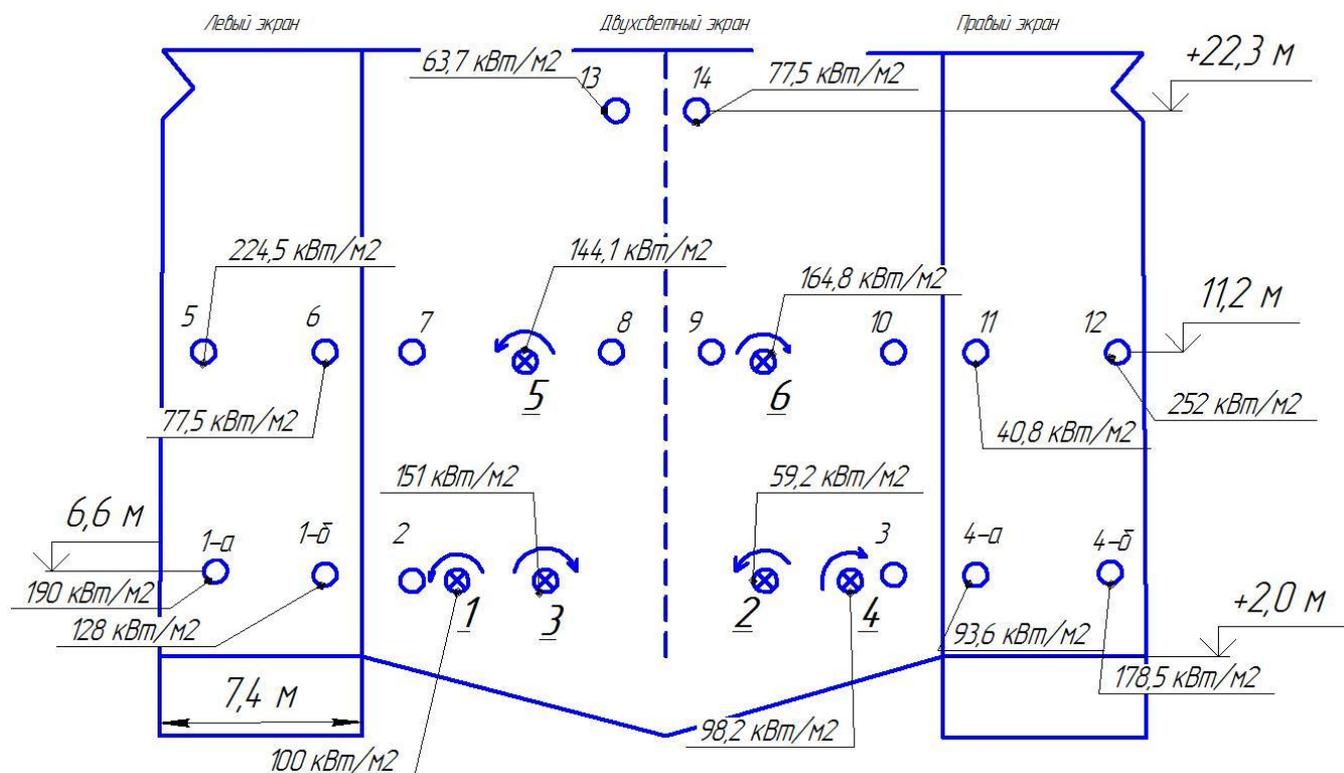


Рисунок 8.1. Интенсивность излучения факела котла ТГМ-84Б № 4:

топливо газ,

○ - лючки, ⊗ - горелки ;

нагрузка 275 т/ч, расход газа 23тыс.м³/час, угол крутки 45

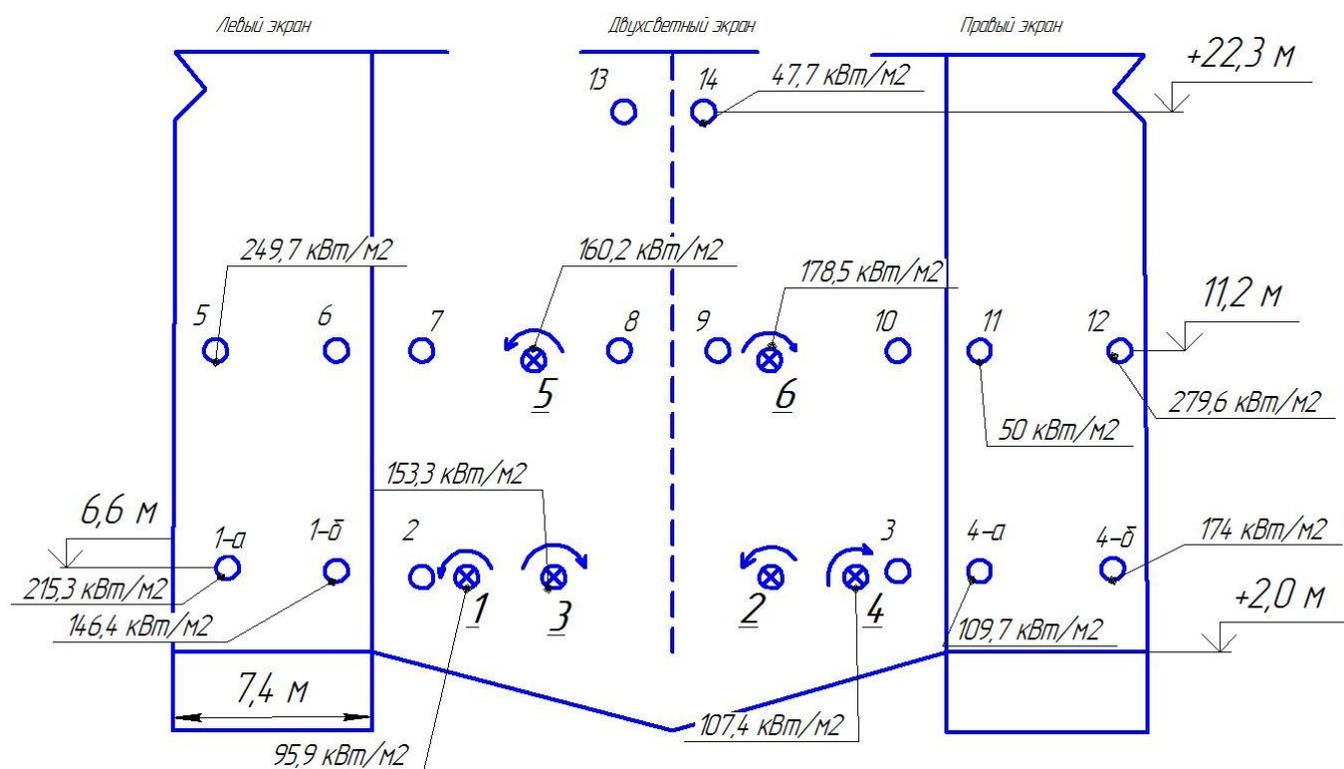


Рисунок 8.2 Интенсивность излучения факела котла ТГМ-84Б № 4:

газ во всех горелках:

○ лючки, ⊗ - горелки ; нагрузка 333 (310) т/ч, расход газа 28,3 тыс.м³/час,
угол крутки 45.

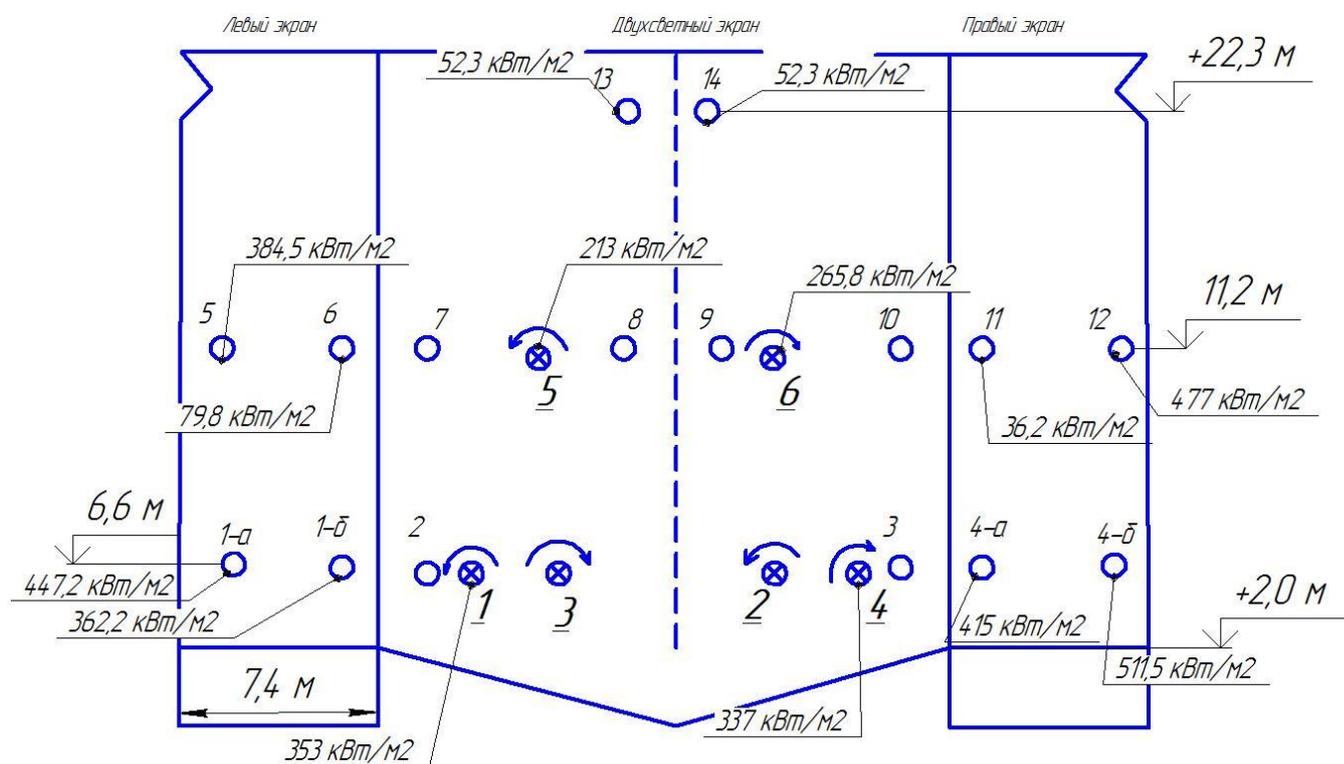


Рисунок 8.3. Интенсивность излучения факела котла ТГМ-84Б № 4:

мазут – горелки №2, №3, газ - остальные,

- - лючки, ⊗ - горелки ; нагрузка 313 т/ч, расход газа 14,5 тыс.м³/час,
расход мазута 11 т/ч, угол крутки 45.

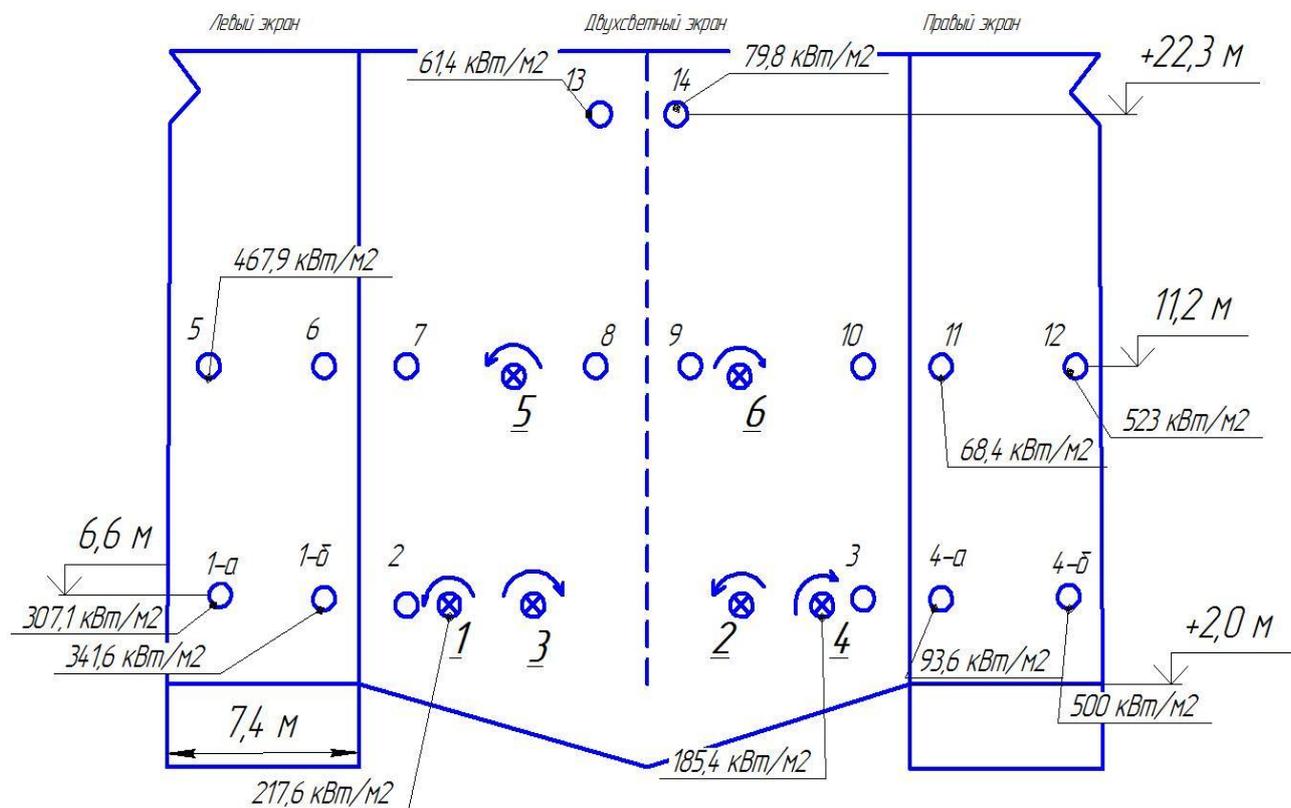


Рисунок 8.4. Интенсивность излучения факела котла ТГМ-84Б № 4:

мазут – горелки №2, №3, №5, №6; газ – №1, №4,

- - лючки ⊗ - горелки, нагрузка 360 т/ч, расход газа 8,6 тыс. м³/час, расход мазута 20,1 т/ч, угол крутки 45.

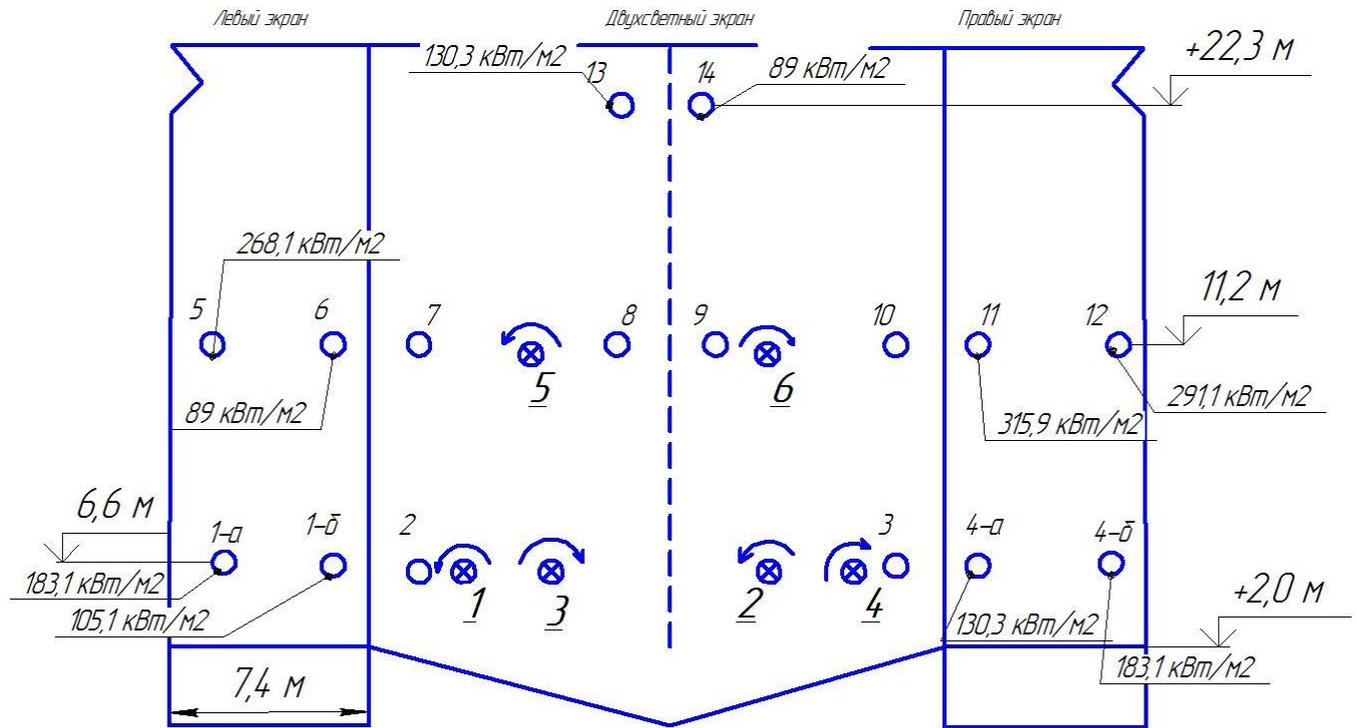


Рисунок 8.5. Интенсивность излучения факела котла ТГМ-84Б № 4:

мазут - горелки №1, №4, газ остальные,

○ - лючки, ⊗ - горелки ;

нагрузка 350 т/ч, расход газа 23 тыс.м³/час,

расход мазута 5,9 т/ч, угол крутки 45

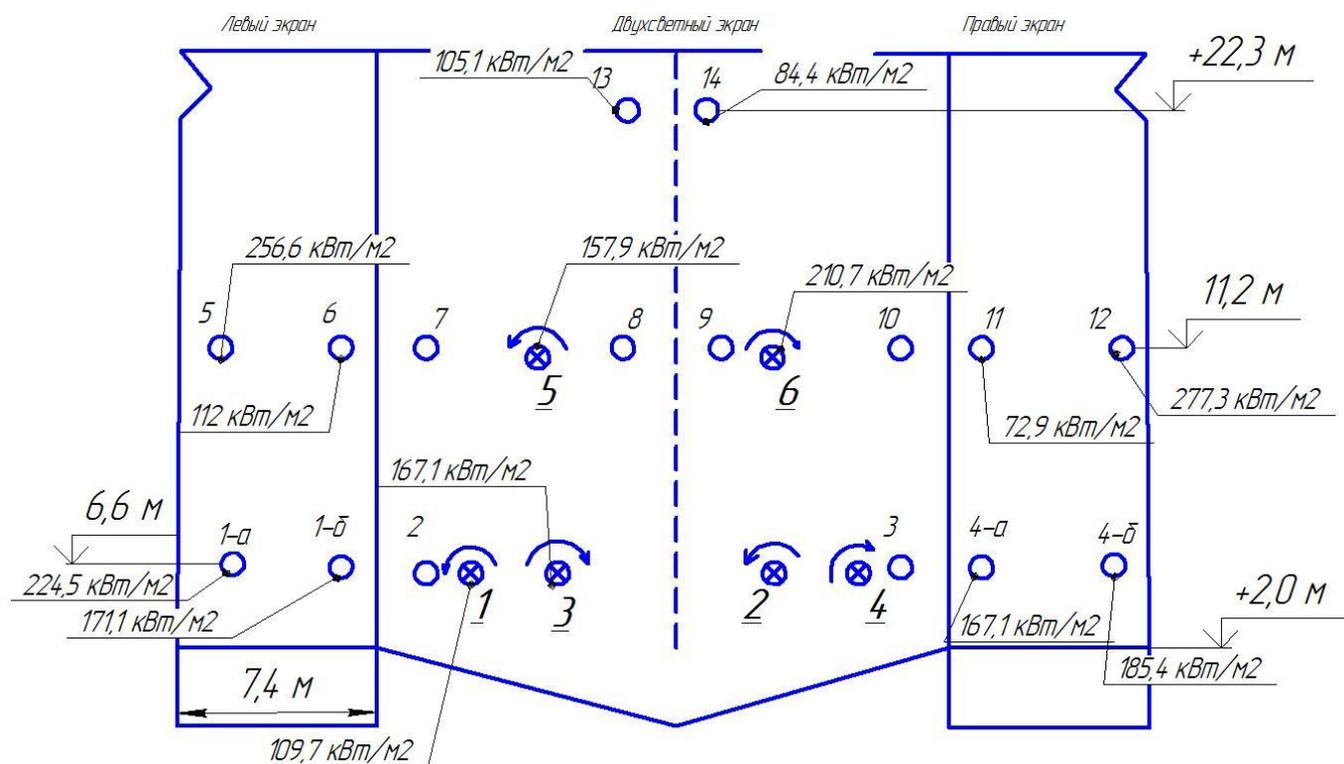


Рисунок 8.6. Интенсивность излучения факела котла ТГМ-84Б № 4:

газ во всех горелках,

○ - лючки, ⊗ - горелки ; нагрузка 310 т/ч, расход газа 27 тыс.м³/час,
угол крутки 45.

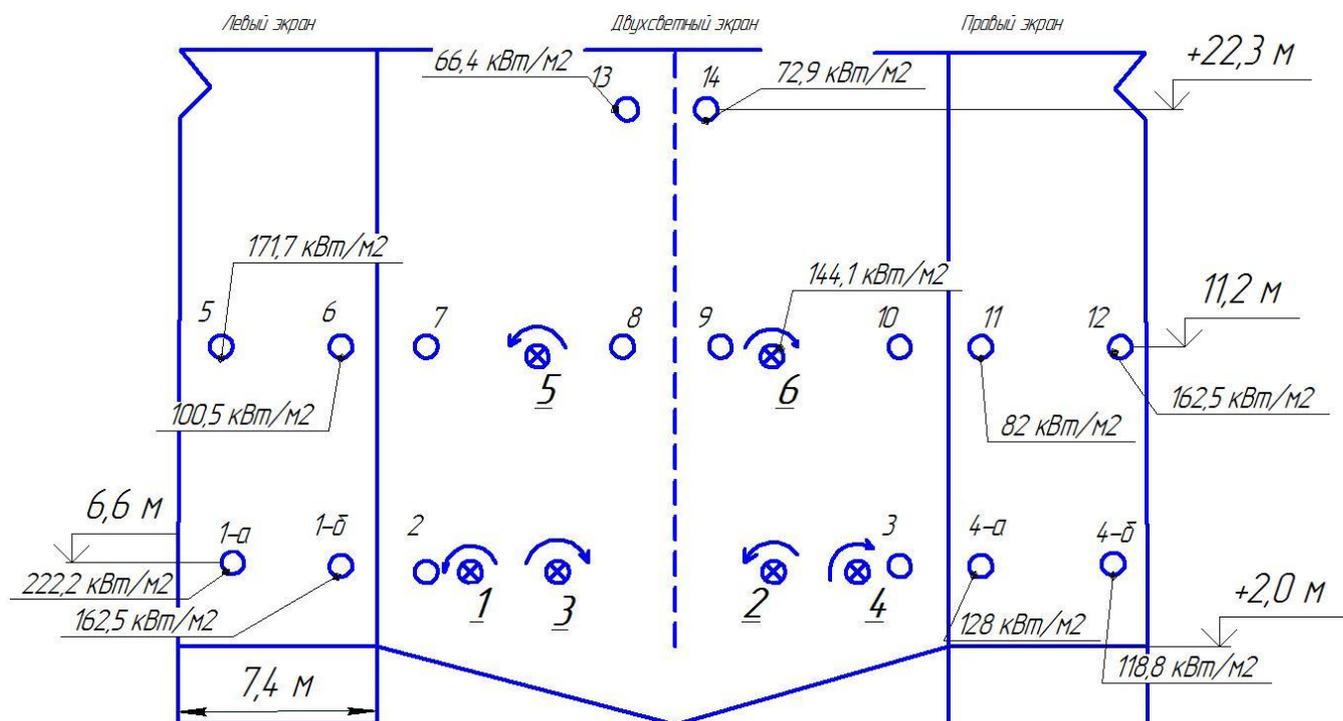


Рисунок 8.7. Интенсивность излучения факела котла ТГМ-84Б:

газ в горелках 1-4, мазут - горелки 5,6,

- - лючки, ⊗ - горелки ; нагрузка (310) т/ч, расход газа 20 тыс.м³/час,
расход мазута 7,2 т/ч, угол крутки 45.

Горелки 5,6 на мазуте механич форсунка. Горелки 1-4 на газе
Механич. форсунки 5,6 бьют в задний экран. На заднем экране черные отметины
от капель мазута. На отм 22,3 м полосы от горящих капель мазута. Пламя
выбивает на отм. 22,3 м не очень сильно.

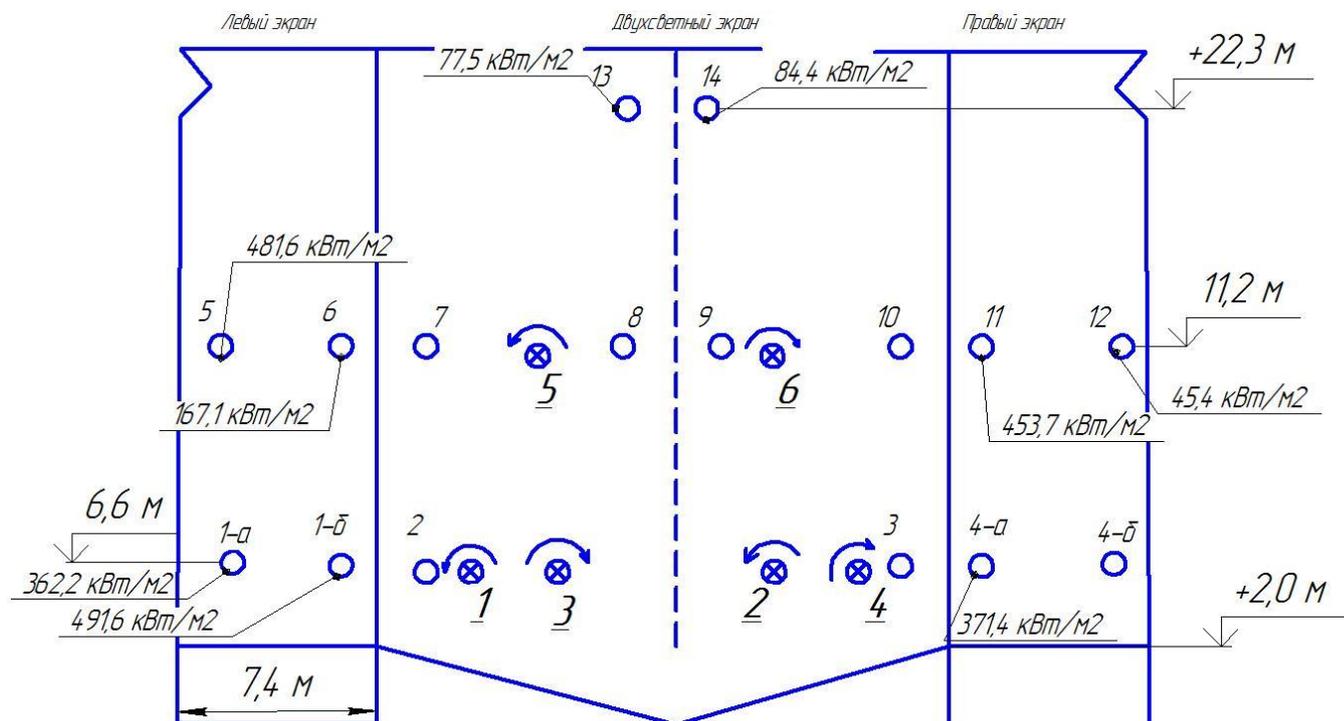


Рисунок 8.8. Первичные инструментальные результаты по лючкам и горелкам котла ТГМ-84Б № 4:

газ в горелках 5,6, мазут в гор. 1-4,

○ - лючки, ⊗ - горелки, нагрузка 370 т/ч, расход газа 8 тыс.м³/час, расход мазута 22 т/ч, угол крутки 45.

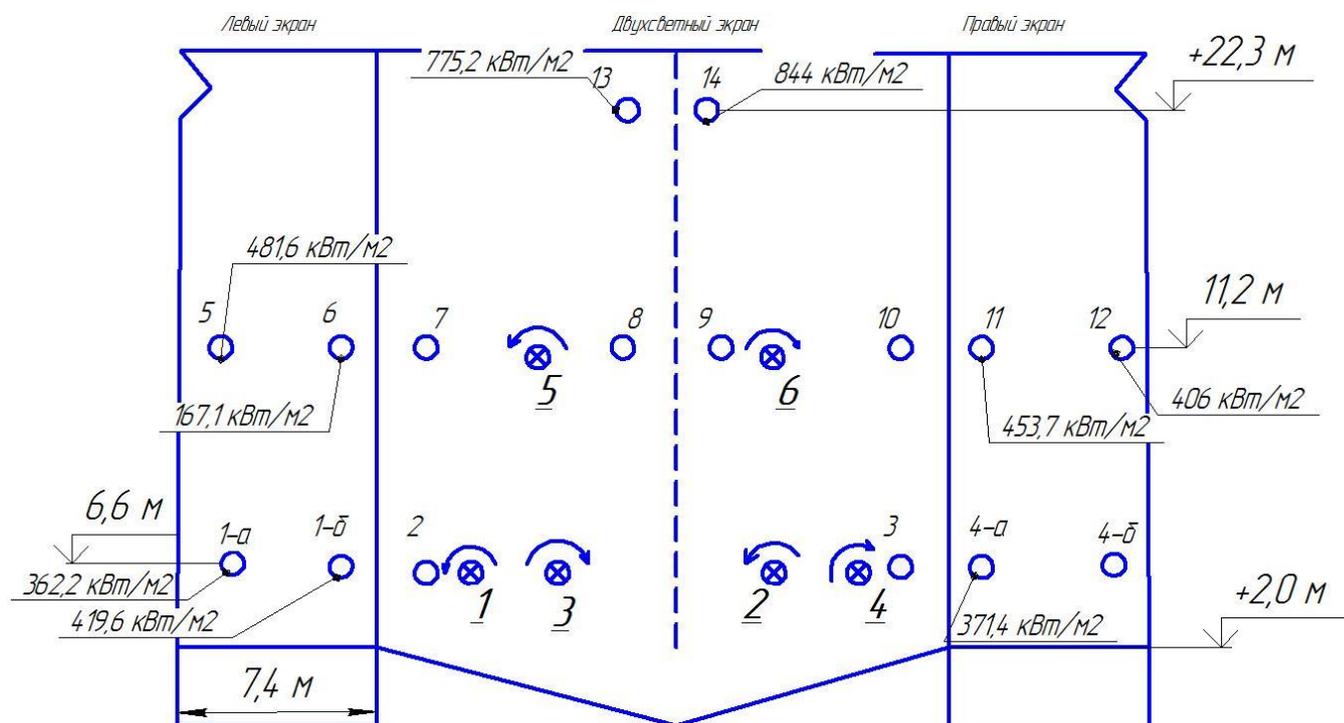


Рисунок 8.9. Первичные инструментальные результаты по лючкам и горелкам котла ТГМ-84Б № 4:

горелки 2,3 - мазут (форсунки механические), остальные - газ,

○ - лючки, ⊗ - горелки ; нагрузка 300 т/ч, расход газа 18 тыс.м³/час,
расход мазута 6 т/час, угол крутки 45

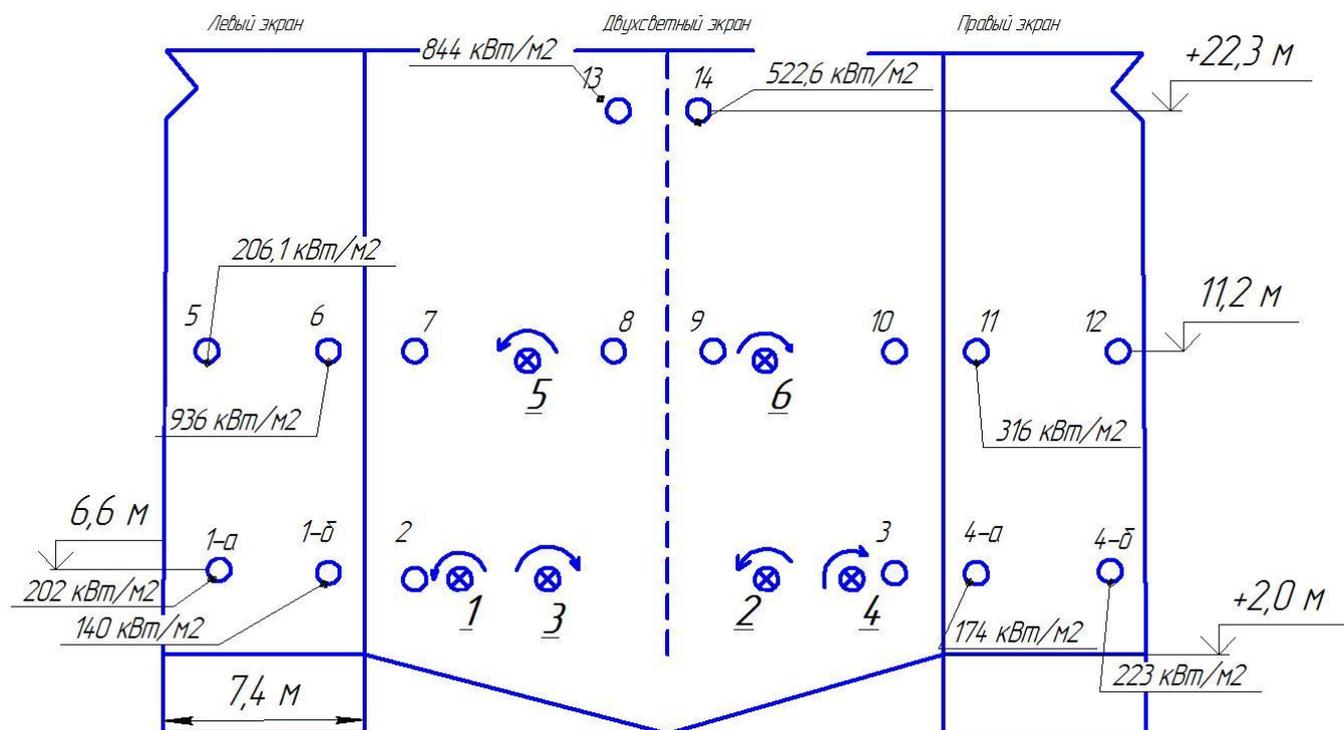


Рисунок 8.10. Первичные инструментальные результаты по лючкам и горелкам котла ТГМ-84Б № 4:

горелки 2,3 - мазут, горелки 1,4,5,6 - газ,

○ - лючки, ⊗ - горелки ;

нагрузка 300 т/ч, расход газа 18 тыс.м³/час, расход мазута 6 т/час,

форсунки механические, угол крутки 45

Примеры распределения температуры факела по высоте топки

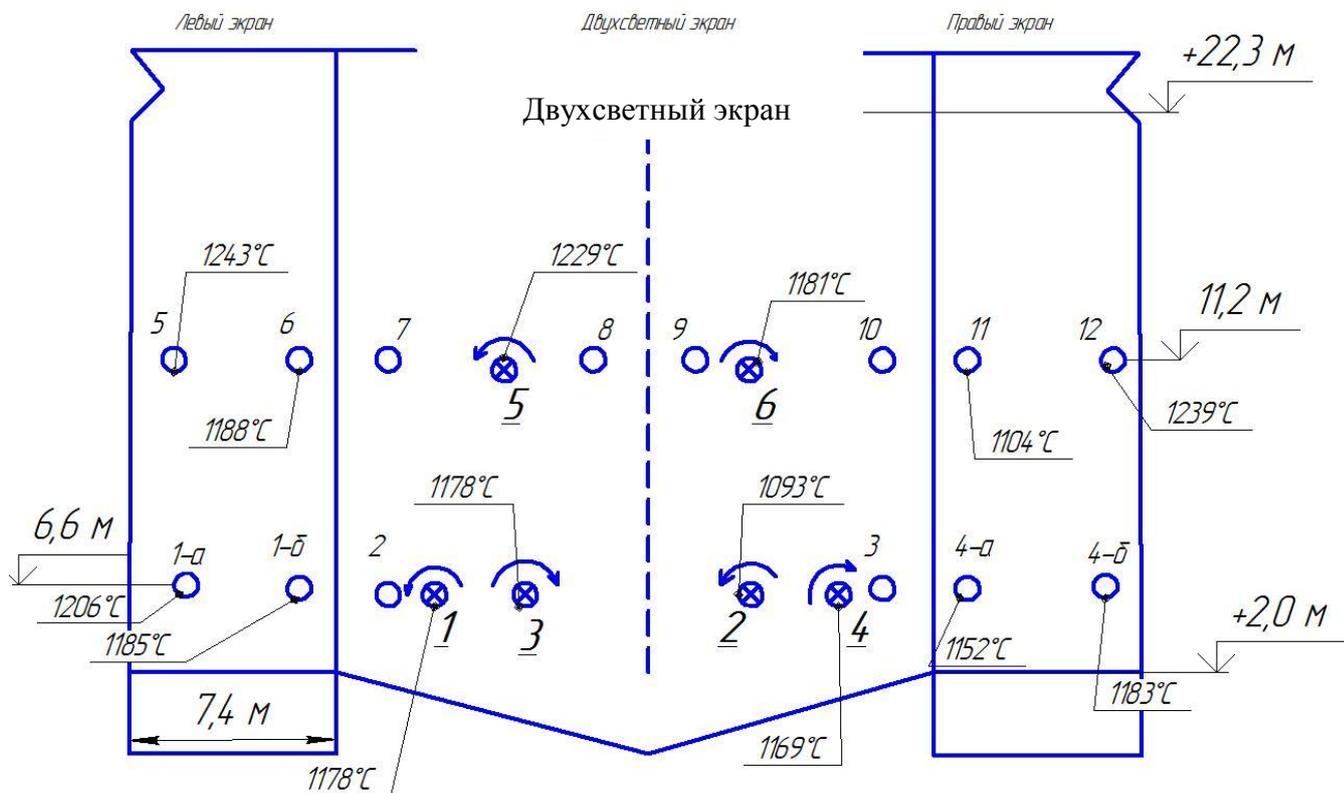


Рисунок 9.1. Температура в топке по лючкам и горелкам котла

ТГМ-84Б № 4: топливо газ,

○ - лючки, ⊗ - горелки ;

нагрузка 275 т/ч, расход газа 23тыс.м³/час, угол крутки 45

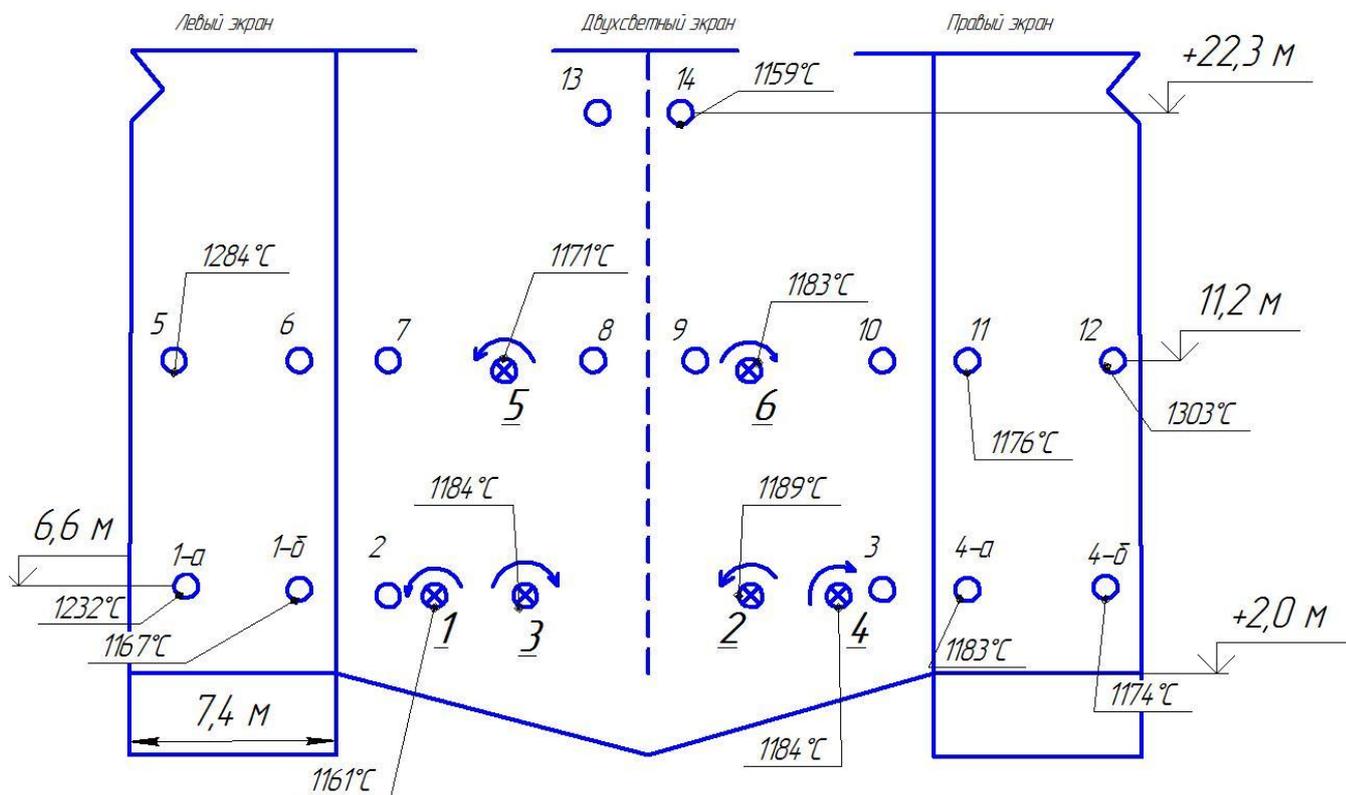


Рисунок 9.2. Температура в топке по лючкам и горелкам котла ТГМ-84Б № 4:

газ во всех горелках,

○ - лючки, ⊗ - горелки, нагрузка 323 т/ч, расход газа 28,3 тыс.м³/час,
угол крутки 45.

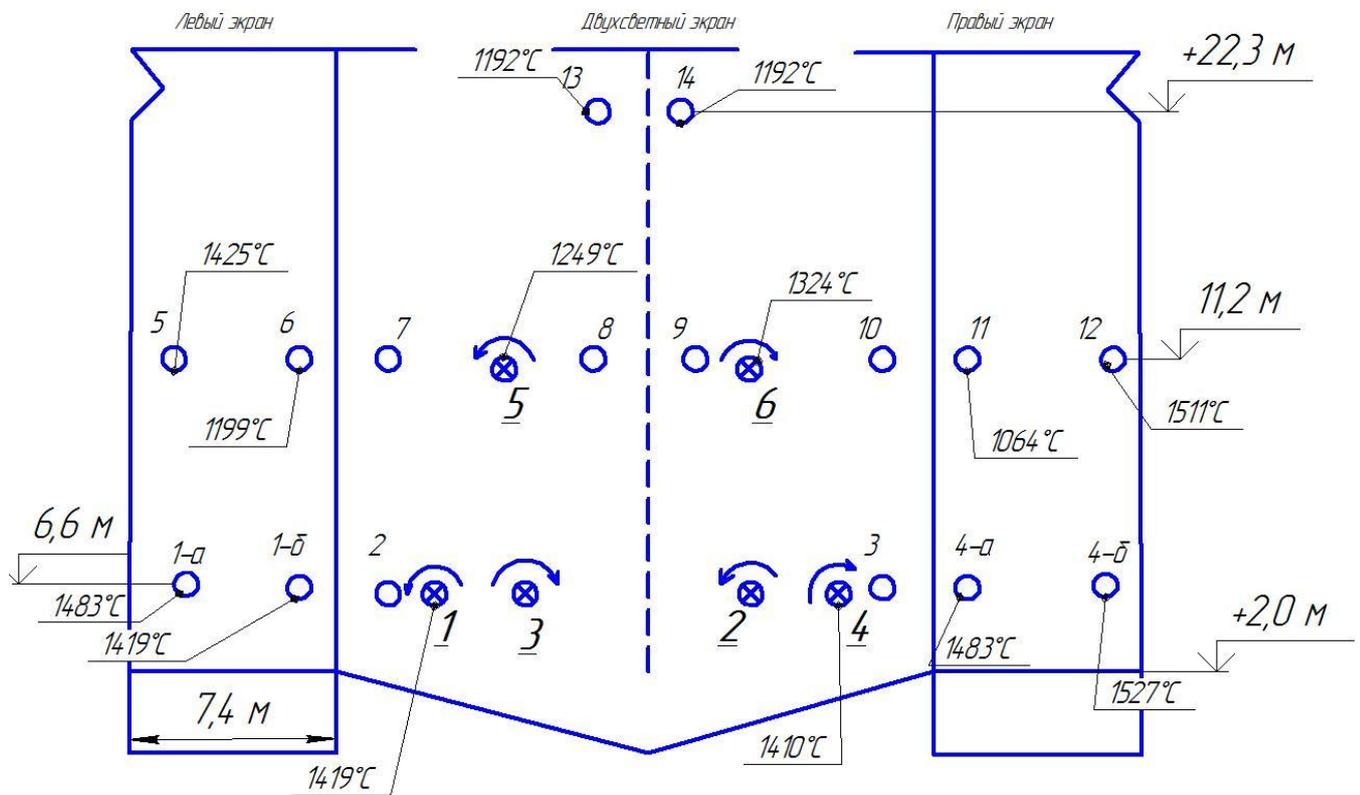


Рисунок 9.3. Температура по лючкам и горелкам котла ТГМ-84Б № 4:

мазут – горелки 2, 3, газ - горелки 1,4,5,6,

○ - лючки, ⊗ - горелки ;

нагрузка 313 т/ч, расход газа 14,5 тыс.м³/час, расход мазута 11 т/ч,

угол крутки 45, форсунки ФУЗ паромеханические

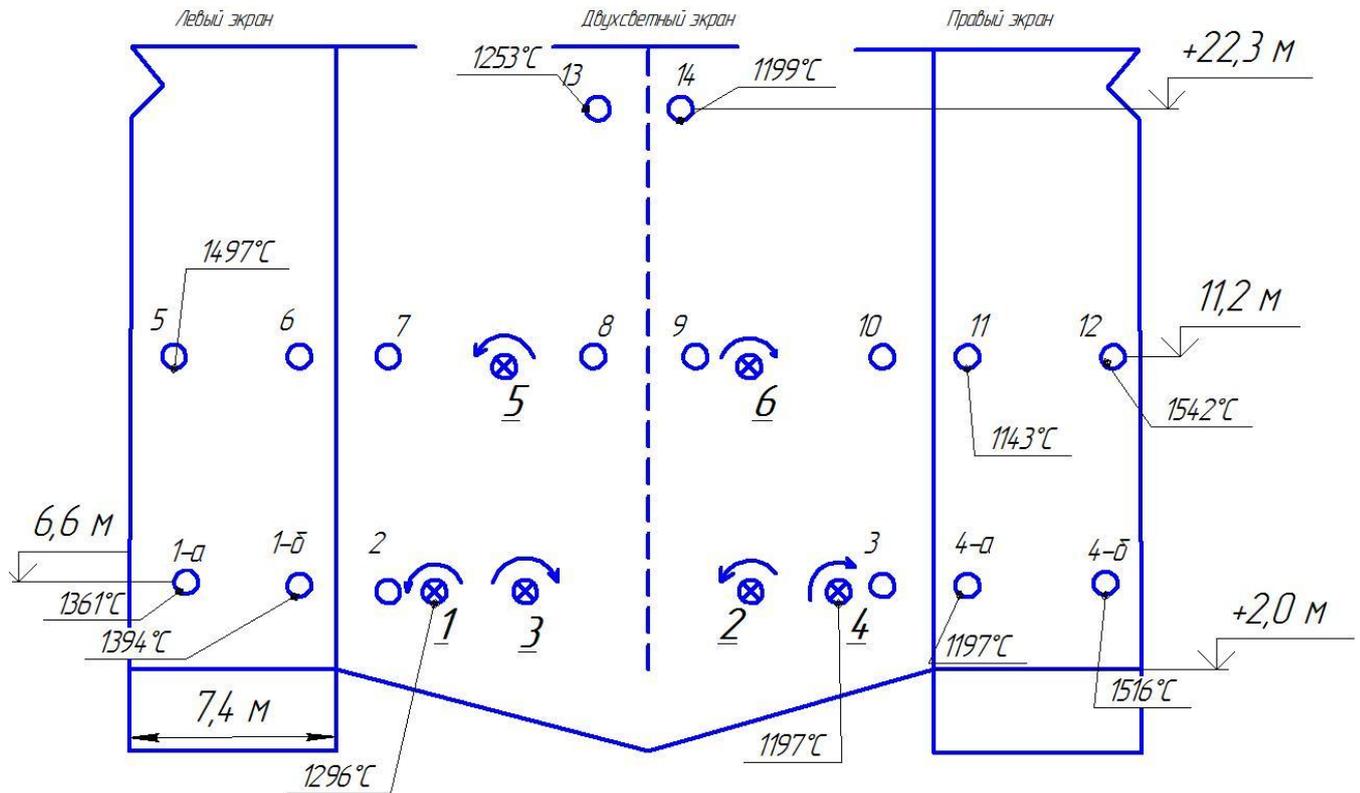


Рисунок 9.4. Температура по лючкам и горелкам котла ТГМ-84Б № 4:

мазут – горелки 2, 3, 5, 6; газ – 1, 4,

○ - лючки, ⊗ - горелки ; нагрузка 360 т/ч, расход газа 8,6 тыс.м³/час, расход мазута 20,1 т/ч, угол крутки 45, форсунки ФУЗ паромеханические

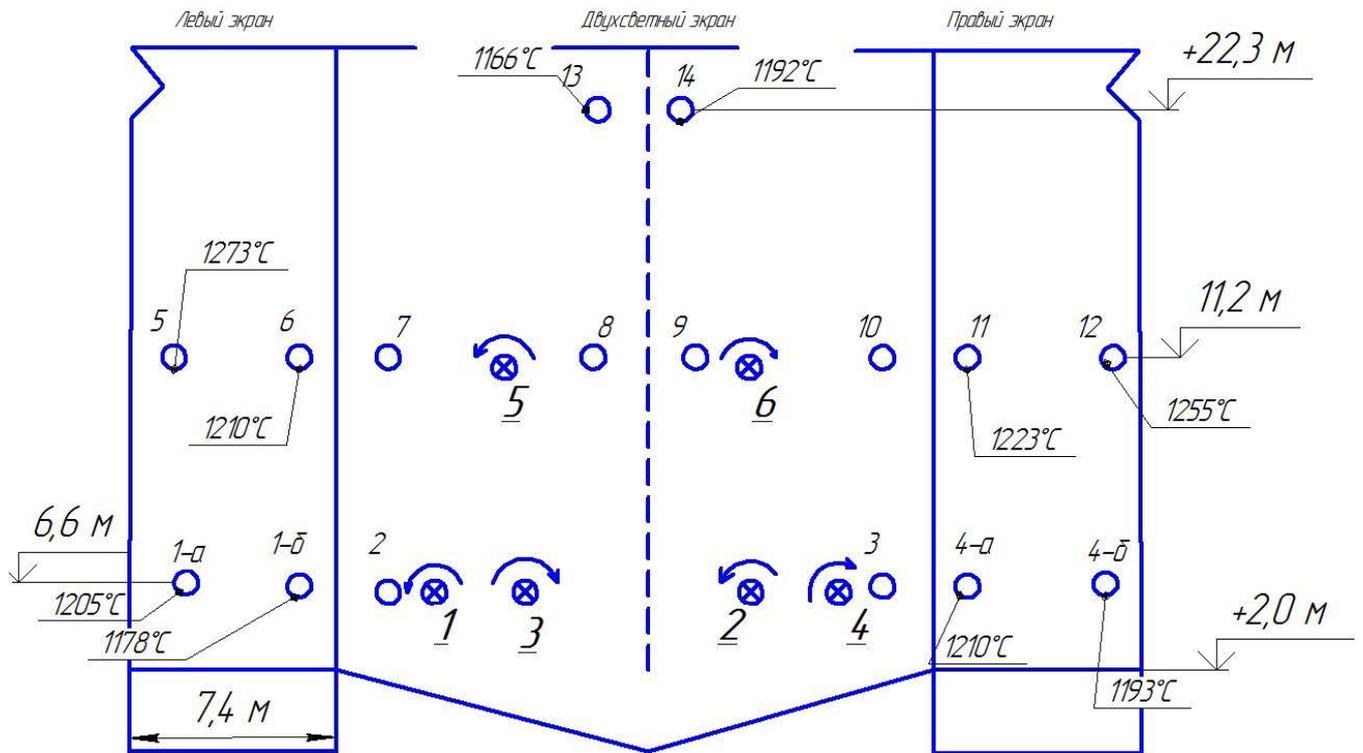


Рисунок 9.5. Температура в топке по лючкам и горелкам котла ТГМ-84Б № 4:
 ○ - лючки, ⊗ - горелки ; нагрузка 350 т/ч, расход газа 29 тыс.м³/час,
 угол крутки 45

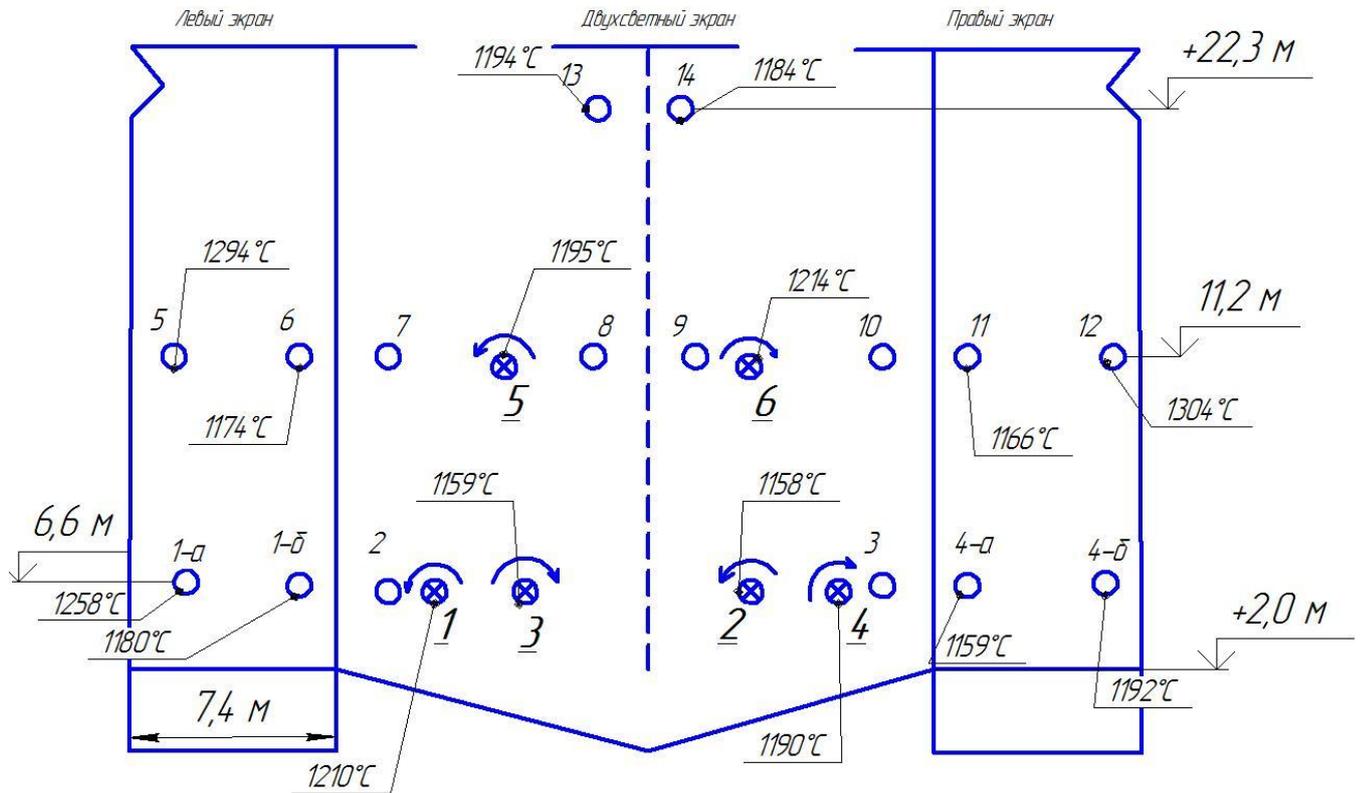


Рисунок 9.6. Температура в топке по лючкам и горелкам котла ТГМ-84Б:

газ во всех горелках

○ - лючки, ⊗ - горелки ;

нагрузка 310 т/ч, расход газа 27 тыс.м³/час, угол крутки 45

Протокол первичных данных по испытаниям котла №4 ТГМ-84Б НчТЭЦ при сжигании
смешанного топлива: газ, газ+мазут.

Режимный параметр и размерность	Станционный номер и марка котла				
	НчТЭЦ №4 ТГМ-84Б	НчТЭЦ №4 ТГМ-84Б	НчТЭЦ №4 ТГМ-84Б	НчТЭЦ №4 ТГМ-84Б	НчТЭЦ №4 ТГМ-84Б
Вид топлива и теплота сгорания Q _{нр} , ккал/м ³ (или ккал/кг)	Газ уренг 8033,45	Газ уренг 8033,45	Газ уренг 8028,06	Газ уренг (4 горелки) 8028,06-газ Мазут М-100 (2 горелки) 9561,5-мазут	Газ уренг (2 горелки) 8028,06-газ Мазут М-100 (4 горелки) 9561,5-мазут
Плотность кг/м ³	0,683	0,683	0,682	0,682-газ	0,682-газ
Расход топлива В, тыс.м ³ /ч (или т/ч) газ/мазут	23	23	28,3	Газ 14,5 тыс.м ³ /ч Мазут 11 т/ч	Газ 8,6 тыс.м ³ /ч Мазут 20,1 т/ч
Паропроизводительность котла D _к , т/ч	275	270	323	313	360
Продувка котла D _{пр} , т/ч (или % от D _к)	2,75 т/ч	2,7 т.ч	3,2 т/ч	3,13	3,6
Температура питательной воды t _{п.в} , °C	210	210	222	219	218
Давление питательной воды p _{п.в} , кг/см ²	167	167	176	169	190
Расход питательной воды G _в , т/ч	280	279	347	324	345
Давление в барабане p _б , кг/см ²	147	147	150	150	164
Температура перегретого пара t _{п.п} , °C	559	559	560	557/555	558
Давление перегретого пара p _{п.п} , кг/см ²	137	137	140	137	139
Температура уходящих газов t _{ух} , °C	108	108	115/107	124/127	129/130
Температура холодного воздуха t _{х.в} , °C	17 (24/20)	17 (24/19)	11	11	11
Содерж. O ₂ в уход. Газах после дымососа, %					
Содержание O ₂ в уходящих газах в режимном сечении, %*	1,1	1,1	1,5/1,4	1,9/1,5	1,9/1,5
Температура пара до впрысков, °C					
Коэффициент избытка воздуха	1,05	1,05	1,065	1,08	1,08
Содержание NO _x в уход. Газах, ppm (мг/м ³)* за дымососом					
Давление воздуха перед горелками, кг/м ²	64	63	102	140/133	211/216
Давление газа перед горелками, кг/см ²	0,13	0,13	0,18	0,11	0,14
Давление мазута перед котлом, кг/см ²				10	9,5
Давление распыливающего пара перед горелками, кг/см ² :				6	6
КПД по режимной карте					
КПД по обратному балансу по данным настоящей работы	94,56	94,27	94,18	93,63	93,39
КПД по прямому балансу по данным настоящей работы	91,53	90,36	88,64	85,6	83,7
Температура горячего воздуха t _{гор.возд.} , °C	206/211	205/211	217	209/215	211/216
Температура продуктов сгорания в конце горизонтального газохода в поворотной камере t _{т.п.к} , °C			-		
Температура воздуха после калорифера, °C				52	50/53
Температура продуктов сгорания за водяным экономайзером t _{в.эк} , °C	275	275			
Разрежение вверху топки p _{в.топ} , кг/м ²	-2	-2	-3,2	-3,2	-2
Марка горелок и их количество, шт.	6	6	6	6	6
Подача газа центральная 1-й ряд 12 отв. Ø13,3, 2-й 12 отв. Ø27					
Ампераж вентиляторов, А					
Ампераж дымососов, А					
Производ. дымососа, тыс.куб. м/ч при 200°C. 1-я скорость 500 об/мин, 2-я 750 об/мин					
Производ. вентилятора, тыс.куб. м/ч при 20°C 1-я скорость 500 об/мин, 2-я 750 об/мин					
Тепловая мощность горелки Q _{гор} , МВт					
Угол крутки по указателю в %	Гор.№1-№6	45	45	45	45

Первичные данные по испытаниям котла №4 ТГМ-84Б НЧТЭЦ при сжигании смешанного топлива: газ, газ+мазут

Режимный параметр и размерность	Станционный номер и марка котла						
	НЧТЭЦ №4 ТГМ-84Б	НЧТЭЦ №4 ТГМ-84Б	НЧТЭЦ №4 ТГМ-84Б	НЧТЭЦ №4 ТГМ-84Б	НЧТЭЦ №4 ТГМ-84Б	НЧТЭЦ №4 ТГМ-84Б	НЧТЭЦ №4 ТГМ-84Б
Вид топлива и теплота сгорания Q _{нр} , ккал/м ³ (или ккал/кг)	Газ уренг 7920	Газ уренг 7920 4 горелки Мазут 9370 2 горелки (№№1,4)	Газ уренг (6 горелок) 8028-газ	Газ (№№1-4) 8028газ\ Мазут М-100 (5,6 горелки) 8611-мазут	Газ уренг (№№1-6) 8028-газ\	Газ (№№5,6) 8028газ\ Мазут М-100 (1-4 гор) 8611мазут	Газ уренг (1-3,5,6горелки) 8028,06-газ Мазут М-100 (4-я горелка) 9370 -мазут
Плотность кг/м ³	0,679	0,679	0,682-газ	0,682газ, 0,996мазут	0,682газ,	0,682газ, 0,996мазут	0,682газ, 0,996мазут
Расход топлива В, тыс.м ³ /ч (или т/ч) газ/мазут	29 газ	23 –газ 5,9 -мазут	Газ 27 тыс.м ³ /ч	Газ 20 тыс.м ³ /ч Мазут 7,2 т/ч	30	22 мазут, 8 газ	Газ 20 тыс.м ³ /ч Мазут 2,5 т/ч
Паропроизводительность котла D _к , т/ч	350	350	310	310	355	370	300
Продувка котла D _{пр} , т/ч (или % от D _к)	3,5	3,5	3,1	3,1	3,5	3,7	3
Температура питательной воды t _{п.в} , С	222	221	190	190	217	217	221
Давление питательной воды p _{п.в} , кг/см ²	170	171	173	173	172	172	170
Расход питательной воды С _в , т/ч	350	350	310	310	355	375	290
Давление в барабане p _б , кг/см ²	151	154	155	153	155	155	151
Температура перегретого пара t _{п.п} , °С	560	560	560	560	560	560	560
Давление перегретого пара p _{п.п} , кг/см ²	137	140	140	140	140	140	140
Температура уходящих газов t _{ух} , °С	142	149	119/121	126	107/108	148/150	97 (без калориф)
Температура холодного воздуха t _{х.в} , °С	14	15	20	20	20	20	20
Содерж. O ₂ в угод. газах после дымососа, %							
Содержание O ₂ в уходящих газах в режимном сечении, %	1	2	1,0	1,0	1,0	1,6	1,5/1,9
Температура пара до впрысков, °С							
Коэффициент избытка воздуха	1,045	1,095	1,045	1,045	1,045	1,074	1,076
Содержание NO _x в угод. газах, ppm (мг/м ³) за дымососом							75
Давление воздуха перед горелками, кг/м ²	101	155/154	75	143	103	160	100
Давление газа перед горелками, кг/см ²	0,19	0,28	0,17	0,2	0,2	0,16	0,15
Давление мазута перед котлом, кг/см ²		13		16,5		9	8
Давление распыливающего пара перед горелками, кг/см ² :		Механич форсунка		Механич форсунка		6	9
КПД по режимной карте							
КПД по обратному балансу по данным настоящей работы	92,94	92,62	94,13	93,88	94,72	92,94	94,61
КПД по прямому балансу по данным настоящей работы	92,28	89,18	82,5	88,95	93,06	91,95	93,3
Температура горячего воздуха t _{гор.возд} , °С	224/231	230/234	208/212	209	217/208	222/226	203
Температура продуктов сгорания в конце горизонтального газохода в поворотной камере t _{п.кз} , °С			750	690/650	740/700	710/720	680/650
Температура воздуха после калорифера, °С		66/74	48	48	75	75	Не включен
Температура продуктов сгорания за водяным экономайзером t _{в.эк} , °С							
Разрежение вверху топки p _{в.топ} , кг/м ²	-2	-2	-2	-2	-3	-3	-3
Марка горелок и их количество, шт.	Все 6 гор газ	№1,4 – мазут, остальные. -газ	Все 6 гор газ	2- мазут, 4- газ	Все 6 гор газ	Паромех анич. ФУЗ-5000	КГЭУ зазор 1,5... 1,9 мм 6 отв. под мазут
Подача газа центральная 1-й ряд 12 отв. Ø13,3, 2-й 12 отв. Ø27							
Ампераж вентиляторов, А							
Ампераж дымососов, А							
Производ. дымососа, тыс.куб. м/ч при 200°С. 1-я скорость 500 об/мин, 2-я 750 об/мин							
Производ. вентилятора, тыс.куб. м/ч при 20°С 1-я скорость 500 об/мин, 2-я 750 об/мин							
Температура мазута, °С						101	100
Угол крутки в %	45	45	45	45	45	45	45

Протокол первичных режимных данных по испытаниям котла №4 ТГМ-84Б НЧТЭЦ при сжигании смешанного топлива: газ, газ+мазут, (паромеханические форсунки ФУЗ-5000)

Режимный параметр и размерность	Станционный номер и марка котла						
	НЧТЭЦ №4 ТГМ-84Б	НЧТЭЦ №4 ТГМ-84Б	НЧТЭЦ №4 ТГМ-84Б	НЧТЭЦ №4 ТГМ-84Б	НЧТЭЦ №4 ТГМ-84Б	НЧТЭЦ №4 ТГМ-84Б	НЧТЭЦ №4 ТГМ-84Б
Вид топлива и теплота сгорания Q _{нр} , ккал/м ³ (или ккал/кг)	Газ уренг 8028,72	Газ уренг 8028,72 (2,3,5,6 гор) Мазут 9533,75 2 гор(№№1,4)	Газ уренг 8028,72 (2,3,5,6 гор) Мазут 9533,75 2гор(№№1, 4)	Газ уренг (№№5,6) 8028,72; Мазут М-100 (1-4 горелки) 9533,75	Мазут М-100 (1-6 горелки) 9533,75	Газ уренг 8028,72	Газ уренг 8031 (2,3,5,6 горелки) Мазут 8961 2 горелки (№№1,4)
Плотность кг/м ³	0,683	0,683, 0,999	0,683, 0,999	0,683, 0,999	0,999 мазут	0,683	0,683, 0,997
Расход топлива В, тыс.м ³ /ч (или т/ч) газ/мазут	27 газ	14,7 –газ 12,7 –мазут	14,5 –газ 11,5 –мазут	Газ 8,7 тыс.м ³ /ч Мазут 21,7 т/ч	34,5	28,5	16 –газ 8,1 –мазут
Паропроизводит. котла D _к , т/ч	335	337	325	370	405	340	300
Продувка D _{пр} , т/ч (или % от D _к)	3,3	3,4	3,2	3,7	4	3,4	3,0
Температура питат. воды t _{п.в} , °С	224	224	224	224	224	223	226
Давление питат. воды p _{п.в} , кг/см ²	173	172	172	173	172	172	169
Расход питательной воды G _в , т/ч	340	343	335	389	420	344	300
Давление в барабане p _б , кг/см ²	149	152	152	155	158	151	150
Температ. перегретого пара t _{п.п} , °С	560	556/553	558/557	561/560	560	560/558	560
Давл. перегретого пара p _{п.п} , кг/см ²	136,5	138	138,4	139	139	151	139
Температура уходящих газов t _{ух} , °С	106/111	117/125	143/135	148/139	148/144	109	135
Температура холодного воздуха перед РВП t _{х.в} , °С	17	17	17	22	21	19	13
Содерж. O ₂ в угод. газах после дымососа, %							
Содержание O ₂ в уходящих газах в режимном сечении, %	1,0	2,4/2,0	2,4/2,2	2,4/2,0	2,1/1,9	1,1/1,2	3/1,6
Температура мазута, °С							93/102
Коэффициент избытка воздуха	1,045	1,116	1,116	1,105	1,095	1,045	1,15/1,074
Давление воздуха перед горелками, кг/м ²	86/90	118/117	115/118	159/168	178/187	86/90	100
Давление газа перед горелками, кг/см ²	0,17	0,12	0,11	0,16	Все на мазуте	0,18	0,15
Давление мазута перед котлом, кг/см ²		12,4	10,3	9,6	9,5		8
Давление распыливающего пара перед горелками, кг/см ²		9	10	10	10		10
КПД по режимной карте							
КПД по обратному балансу по данным настоящей работы	92,51	92,22	94,22	93,11	93,1	94,6	93,266/93,23
КПД по прямому балансу по данным настоящей работы	90,2	89,4	91,65	89,96	87,28	92,29	93,754
Температура горячего воздуха перед горелками t _{гор.возд.} , °С	211/217	207/220	225/220	226/218	227/223	210/218	215/220
Температура продуктов сгорания в конце горизонтального газохода в поворотной камере t _{т.п.к} , °С						730/700	
Температура воздуха после калорифера, °С		55	69/60	72/63	78//87		68
Температура продуктов сгорания за водяным экономайзером t _{в.эк.} , °С	294/292	289/286	289/290	289/290	292/291		
Разрежение сверху топки p _{в.тон} , кг/м ²	-3	-7	-5	-6	-5	-3	-3
Марка горелок и их количество, шт.	Все 6 гор. на газе	№1,4 –мазут, остальные.- газ	№1,4 – мазут, ост.- газ	4 горелки мазут; 2 горелки -газ	Все 6 гор мазут	Все 6 гор. на газе	№1,4 –мазут, остальные.- газ
Подача газа центральная 1-й ряд 12 отв. Ø13,3, 2-й 12 отв. Ø27							Форсунка КГЭУ 2 шт. 6 отв.
Ампераж вентиляторов, А							
Ампераж дымососов, А							
Производ. дымососа, тыс.куб. м/ч при 200°С. 1-я скорость 500 об/мин, 2-я 750 об/мин							
Производ. вентилятора, тыс.куб. м/ч при 20°С 1-я скорость 500 об/мин, 2-я 750 об/мин							
Тепловая мощность горелки Q _{гор} , МВт							
Угол крутки в %	45	45	45	45	45	45	45

Продолжение приложения 10

Протокол первичных режимных данных по испытаниям котла №1 ТГМ-84Б НчТЭЦ при сжигании смешанного топлива: газ, газ+мазут, мазут (Использованы механические форсунки)

Режимный параметр и размерность	Станционный номер и марка котла						
	НчТЭЦ №1 ТГМ-84Б	НчТЭЦ №1 ТГМ-84Б	НчТЭЦ №1 ТГМ-84Б	НчТЭЦ №1 ТГМ-84Б	НчТЭЦ №1 ТГМ-84Б	НчТЭЦ №1 ТГМ-84Б	НчТЭЦ №1 ТГМ-84Б
Вид топлива и теплота сгорания Q _{нр} , ккал/м ³ (или ккал/кг)	Газ уренг 8028,14 ккал/м ³	Газ уренг 8028,14 (1,4,5,6 гор.) Мазут 9073,73, влага 5,2%. (№№2,3 гор.)	Газ 8028,14 ((№№1,4 гор.) 9073,73, влага 5,2%. (2,3,5,6 горелки)	Мазут М-100 (все горелки) 9073,73, влага 5,2%.	Мазут М-100 (1-6 гор.) 9073,73, влага 5,2%.	Газ 8028,14 ((№№1,4 гор.газ) 9073,73, влага 5,2%. (2,3,5,6 гор.мазут)	Газ 8028,14 (1-4 гор.газ) ((№№5,6 гор.маз.) 9073,73, влага 5,2%.
Плотность кг/м ³	0,683 кг/м ³ - газ	0,683 кг/м ³ - газ 0,991 г/см ³ -маз.	0,683 кг/м ³ - газ 0,991 г/см ³ -маз.	0,991 г/см ³ -маз.	0,991 г/см ³ -маз.	0,683 кг/м ³ - газ 0,991 г/см ³ -маз.	0,683 кг/м ³ -газ 0,991 г/см ³ -маз.
Расход топлива В, тыс.м ³ /ч (или т/ч) газ/мазут	22 газ	18 –газ 5,8 -мазут	10 –газ 13,5 -мазут	Мазут 21,7 т/ч	25,5 т/ч	10,3 –газ. мазут по давл.	3,5 мазут, 17 газ
Паропроизводит. котла D _к , т/ч	290	300	310	300	360	322	350
Продувка D _{пр} , т/ч (или % от D _к)	2,9	3,0	3,1	3,0	3,6	3,2	3,5
Температура питательной воды t _{п.в} , °C	222	222	222	223	226	224	221
Давл. питательной воды p _{п.в} , кг/см ²	175	175	176	175	178	173	174
Расход питательной воды G _в , т/ч	290	300	310	293	360	320	358
Давление в барабане p _б , кг/см ²	150	144	145	143	151	142	149
Температ. перегретого пара t _{п.п} , °C	560	560	560	557	560	560	560
Давл. перегретого пара p _{п.п} , кг/см ²	142	134	136	134	140	132	137
Температура уходящих газов t _{ух} , °C	122/114	120/118	118/120	121	127/128	125/124	129/130
Температ. холодного воздуха перед калориф. t _{х.в} , °C	5	7	8	9	10	9	8
Содерж. O ₂ в уход. газах после дымососа, %							
Содержание O ₂ в уходящих газах в режимном сечении, %	1,1	1,5/1,7	1,5/1,6	2,7/3,0	2,4/3,3	2,5/3,2	2,2
Температура мазута, °C		85/92	90/96	97/103	104/108	105/109	104/108
Коэффициент избытка воздуха	1,05	1,069/1,073	1,069/1,073	1,133/1,15	1,116/1,168	1,122/1,162	1,105/1,162
Давл. воздуха перед горелками, кг/м ²	70	70	110	130	170	120	90
Давл. газа перед горелками, кг/см ²	0,12	0,17	0,18			0,18	0,18
Давл. мазута перед котлом, кг/см ²		19,8	23	24	31,5	22,3	35
Давление распыливающего пара перед горелками, кг/см ²							
КПД по режимной карте							
КПД по обратному балансу по данным настоящей работы	94,47/94,82	93,64/93,74	93,77/93,7	93,7/93,71	93,97/93,95	93/90	93,265/93,586
КПД по прямому балансу по данным настоящей работы	94,89	91,95	92,37	92,054	92,196	92,766	91,25
Температура горячего воздуха перед горелками t _{гор.возд} , °C	228	217	214/217	216/220	222/227	221/225	222/228
Температура продуктов сгорания в конце горизонтального газохода в поворотной камере t _{п.к} , °C	690	660	660/670	630/640	645/670	645/670	650/670
Темпер. воздуха после калорифера, °C		54/57	54/57	56/58	53/56	55	54/57
Температура продуктов сгорания за водяным экономайзером t _{в.э} , °C							
Разрежение вверху топки p _{в.топ} , кг/м ²	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
Распределение топлива по горелкам	Все 6 гор. на газе	№2,3 – мазут, остальн.- газ	№1,4 – газ, остальн.- мазут	Все горелки на мазуте	Все горелки на мазуте	№1,4 – газ, остальн.- мазут	Горелки 5,6 мазут, остальн. газ
Ампераж вентиляторов, А					49/47	31/32	30/28
Ампераж дымососов, А					73/68	49/49	47/42
Производ. Дымос., тыс.куб. м/ч при 200°C. 1-я скор. 500 об/мин, 2-я 750 об/мин					Вторая скорость	Первая скорость	
Производ. вентилятора, тыс.куб. м/ч при 20°C 1-я скорость 500 об/мин, 2-я 750 об/мин							
Угол крутки в %	45	45	45	45	45	45	45

Номера горелок идут слева направо 1-й ярус- 1,3,2,4; 2-й ярус: 5,6

Продолжение приложения 10

Протокол режимных данных по испытаниям котла №1 ТГМ-84Б НЧТЭЦ при сжигании
смешанного топлива: газ, газ+мазут

Режимный параметр и размерность	Стационарный номер и марка котла					
	НЧТЭЦ №1 ТГМ-84Б	НЧТЭЦ №1 ТГМ-84Б	НЧТЭЦ №1 ТГМ-84Б	НЧТЭЦ №1 ТГМ-84Б	НЧТЭЦ №1 ТГМ-84Б	НЧТЭЦ №1 ТГМ-84Б
Вид топлива и теплота сгорания Q _{нр} , ккал/м ³ (или ккал/кг)	Газ уренгойский 8028,14 ккал/м ³ , все горелки на газе	Газ уренг. 8028,14 Мазут 9073,73, влага 5,2 %. Гор.5,6мазут, остальн. газ	Газ уренг 8028,14 Мазут 9073,73, влага 5,2 %. Гор. 2,3,5,6 мазут,1,4 газ	Мазут М100 9073,73. влага 5,2 %. Все горелки на мазуте	Газ уренг 8028,14 Мазут 9073,73, влага 5,2 %. Гор. 2,3,5,6 мазут,1,4 газ	Газ уренг 8028,14 Мазут 9073,73, влага 5,2 %. Гор.5,6 мазут,1, 2,3,4 газ
Плотность кг/м ³ или в г/см ³	0,683 кг/м ³ – газ	0,683 кг/м ³ 0,991 г/см ³	0,683 кг/м ³ 0,991 г/см ³	0,991 г/см ³	0,683 кг/м ³ 0,991 г/см ³	0,683 кг/м ³ 0,991 г/см ³
Расход топлива В, тыс.м ³ /ч (или т/ч) газ/мазут	28,3	21 газ, мазут по давлению	11,5 газ,15 мазут	Мазут 25 т/ч	Газ 11 тыс.м ³ /ч Мазут 14 т/ч	21 газ, мазут по давлению 7,2 мазут
Паропроизводительность котла D _к , т/ч	350	360	345	360	355	360
Продувка котла D _{пр} , т/ч (или % от D _к)	3,5 т/ч	3,6	3,4т/ч	3,6	3,5	3,6
Температура питательной воды t _{п.в} , С	226	226	226	226	225	226
Давл. питательной воды p _{п.в} , кг/см ²	170	170	169	171	171	171/153
Расход питательной воды С _в , т/ч	354	363	346	355	355	357
Давление в барабане p _б , кг/см ²	150	151	150	149	148	151
Температура перегретого пара t _{п.п} , °С	560	560	558	559	560	559
Давление перегретого пара p _{п.п} , кг/см ²	138	138	138	137	136	138
Температура уходящих газов t _{ух} , °С	106	145	146/138	147/134	144/139	144/142
Температура холодного воздуха t _{х.в} , °С	4	15	13	15	16	15
Содерж. O ₂ в уход. газах после дымососа, %						
Содержание O ₂ в уходящих газах в режимном сечении, %	1	2	2,3/2,9	2,4/3,3	2,2/2,9	1,9/2,1
Температ. воздуха после калориф., °С		69/79	67/79	67/79	70/78	70/78
Коэффициент избытка воздуха	1,045	1,095	1,111/1,144	1,116/1,168	1,105/1,147	1,09/1,1
Температура мазута, °С		104/108	104	105	107	107
Давл. воздуха перед горелками, кг/м ²				160	145	120
Давление газа перед горелками, кг/см ²						
Давление мазута перед котлом, кг/см ²		18,6	25	31	28	23
Давление распыливающего пара перед горелками, кг/см ²						
КПД по обратному балансу по данным ЦНИИ НКТЭЦ						
КПД по обратному балансу по данным настоящей работы	94,13	92,83	92,785/93,14	93,29/93,7	92,88/93,13	92,836/92,93
КПД по прямому балансу по данным настоящей работы	93,08	92,27	91,25	91,49	90,188	92,97
Температура горячего воздуха t _{гор.возд.} , °С	217/223	239	228/235	233	230	234
Температура продуктов сгорания в конце горизонтального газохода в поворотной камере t _{г.п.к} , °С				700		
Температура продуктов сгорания за водяным экономайзером t _{в.э.} , °С						
Разрежение вверху топки p _{в.топ} , кг/м ²	-3	-3	-3	-3	-3	-4
Подача газа центральная 1-й ряд 12 отв. Ø13,3, 2-й 12 отв. Ø27						
Ампераж вентиляторов, А	30/28	51/40	52/41	47/46	47/49	45/45
Ампераж дымососов, А	46/43	81/54	77/60	70/67	69/79	66/78
Производ. дымососа, тыс.куб. м/ч при 200°С. 1-я скорость 500 об/мин, 2-я 750 об/мин						
Производ. вентилятора, тыс.куб. м/ч при 20°С 1-я скорость 500 об/мин, 2-я 750 об/мин						
Тип форсунок		Механич.	Механич.	Механич.	Механич.	Механич.
Угол крутки гор. №1-№6 по указателю в %	45	45	45	45	45	45

«Утверждаю»

Директор филиала ОАО «ТГК-16»
Нижнекамская ТЭЦ (ПТК-1)

Олюнин С.Ю.

2017 г.

**АКТ****о внедрении разработок**

Настоящий акт составлен в том, что в филиале ОАО «ТГК-16» Нижнекамская ТЭЦ (ПТК-1) на котле ТГМ-84Б (станционный №9) внедрены разработки в виде рекомендаций по поддержанию оптимальных параметров при сжигании мазута М100.

Рекомендации разработаны под руководством профессора Таймарова М.А. на кафедре «Энергетическое машиностроение» Казанского государственного энергетического университета соискателем Ахметовой Р.В. при выполнении кандидатской диссертации. Их практическое применение сводится к следующим результатам.

В области паровых нагрузок около 300 т/ч при работе двух горелок на мазуте и четырех горелок на газе оптимальным является использование горелок №№3, 4 для сжигания мазута, а горелок №№1,2,5,6 для сжигания газа. Крутка воздуха в горелках №№5,6 второго верхнего яруса должна быть сходящейся (правая и левая), крутка воздуха в горелках №№1,2 левая, в горелках №№3,4 -правая, что позволяет получить восходящий поток в топке и повысить температуру продуктов сгорания перед ширмовым пароперегревателем при использовании механических форсунок.

Представитель предприятия

Нач. ПТО

Садиков А.С.

Представитель КГЭУ

Профессор

Таймаров М.А.