

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**БРАТСКИЙ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНЫЙ КОЛЛЕДЖ**

ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БРАТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Специальность 13.02.02

Теплоснабжение и теплотехническое оборудование

## **МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ**

*ПО ВЫПОЛНЕНИЮ САМОСТОЯТЕЛЬНЫХ И ДОМАШНИХ  
КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ С КОНСПЕКТОМ ЛЕКЦИЙ И ГЛОССАРИЕМ*

*по МДК 03.01 НАЛАДКА И ИСПЫТАНИЯ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО  
ОБОРУДОВАНИЯ И СИСТЕМ ТЕПЛО- И ТОПЛИВОСНАБЖЕНИЯ  
для студентов заочной формы обучения*

Братск 2021

Составила (разработала) Долотова И.В., преподаватель кафедры ЭиСД (энергетических и строительных дисциплин)

Данное методическое пособие разработано как курс лекций по МДК.03.01 Наладка и испытания теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения.

В методическом пособии собран материал по всем темам на основании рабочей программы. Материал подобран таким образом, что может быть использован студентами дневного обучения, при подготовке к лекциям и к сдаче квалификационного экзамена, также этот материал может использоваться студентами заочного обучения, при написании домашней контрольной работы и для подготовки к сдаче экзаменов, в межсессионный период.

Также в данном методическом пособии представлены задания для самостоятельной работы, словарь основных терминов которые встречаются при изучении предмета.

Для более глубокой и самостоятельной проработки материала студентам предлагается полный список использованной литературы.

Рассмотрено на заседании кафедры ЭиСД

«01» октября 2021 г.



(подпись зав. кафедрой)

## Содержание

Введение	7
1 Наладка котлоагрегатов	8
1.1 Постановка наладочных и исследовательских работ	8
1.1.1 Наладочные и исследовательские работы, их задачи и организация	8
1.1.2 Расчет погрешностей измерений	11
1.2 Наладка и исследование теплового и гидравлического режимов работы труб поверхностей нагрева	14
1.2.1 Измерение температуры материала труб в зоне обогрева	14
1.2.2 Измерение тепловых нагрузок, воспринимаемых экранными поверхностями нагрева	23
1.2.3 Измерение температуры металла труб в необогреваемой зоне	32
1.2.4 Измерение расхода среды в экранных трубах	37
1.2.5 Исследование температурного и гидравлического режимов работы экранных труб с помощью автономных и выделенных витков	38
1.2.6 Измерительная аппаратура и экспериментальный щит измерений	45
1.3 Нестандартные способы измерения параметров и характеристик теплоносителя	48
1.3.1 Измерение паросодержания (влажности) и энтальпии среды	48
1.3.2 Измерение уровня, перепада давления и расхода среды	51
1.4 Наладка и контроль водного режима котлоагрегата	59
1.4.1 Отбор проб среды из пароводяного тракта котлоагрегата	60
1.4.2 Термическая обработка добавочной воды. Проведение химических очисток оборудования блоков сверхкритического давления	62
1.4.3 Консервация и защита теплосилового оборудования от стояночной коррозии	66
1.4.4 Схемы и приборы автоматизированного химического контроля качества воды и пара	68
1.4.5 Применение пленочных и центробежных сепараторов	71
1.5 Свойства и условия работы металла котлоагрегатов	74
1.5.1 Основные характеристики котельных сталей	74
1.5.2 Стали для труб поверхностей нагрева и паропроводов, для крепления деталей и узлов	77
1.5.3 Наблюдение за металлом в процессе наладки и эксплуатации котлоагрегатов	82
1.6 Наладка топочного режима	85
1.6.1 Определение присосов воздуха и оптимального положения факела в топке	85
1.6.2 Определение оптимальных значений коэффициента избытка воздуха и тонкости помола пыли	90

1.6.3	Определение минимальной длительной и максимальной кратковременной нагрузки котла	91
1.7	Пусковая наладка теплотехнического оборудования	93
1.7.1	Организация пусконаладочных работ	93
1.7.2	Пусковая наладка котельных установок	95
1.7.3	Пусковая наладка теплоиспользующих установок, тепловых сетей предприятия	101
1.8	Режимная наладка теплоиспользующих установок	104
1.8.1	Схемы установки средств измерений при испытании	104
1.8.2	Методика испытаний и обработки результатов измерений	109
2	Испытания паровых котлов	111
2.1	Методика испытаний паровых котлов	111
2.1.1	Классификация и организация испытаний паровых котлов	111
2.1.2	Подготовка испытаний паровых котлов	115
2.2	Арматура котлов	116
2.2.1	Классификация арматуры котельного агрегата	116
2.2.2	Запорная арматура	116
2.2.3	Предохранительные, обратные и регулирующие клапаны	123
2.2.4	Водоуказательные приборы	126
2.3	Испытания и наладка систем пылеприготовления и их оборудования	127
2.3.1	Общие вопросы испытаний и наладки пылесистем	127
2.3.2	Наладка питателей сырого угля и угольной пыли	129
2.3.3	Испытания пылесистемы с шаровой барабанной мельницей	131
2.3.4	Испытания среднеходных, молотковых мельниц и мельниц-вентиляторов	133
2.4	Исследования аэродинамических характеристик топочных устройств. Наладка горелок.	135
2.4.1	Изучение аэродинамических характеристик воздушного и топливного трактов	135
2.4.2	Исследования аэродинамики топочных камер и горелочных устройств	137
2.4.3	Наладка горелок для газового и жидкого топлив	140
2.4.4	Наладка пылеугольных горелок	142
2.5	Исследование процесса горения в топочной камере	143
2.5.1	Определение полей скоростей, концентраций, температур	143
2.5.2	Определение тепловой эффективности топочных экранов	149
2.6	Исследование наружных загрязнений поверхностей нагрева парового котла	153
2.6.1	Классификация золовых отложений	153

2.6.2	Меры борьбы с наружными золовыми отложениями	157
2.6.3	Методика исследований наружных золовых отложений	159
2.6.4	Определение коэффициентов загрязнения и тепловой эффективности поверхностей нагрева	164
2.7	Исследование эрозионного и коррозионного износа поверхностей нагрева паровых котлов	165
2.7.1	Абразивный износ и меры по его ослаблению	165
2.7.2	Определение абразивных свойств уноса и интенсивности износа сталей	169
2.7.3	Коррозионный износ поверхностей нагрева	172
2.7.4	Методы контроля коррозионной активности дымовых газов	177
2.8	Исследование температурных неравномерностей и напряжений в барабанах паровых котлов	179
2.8.1	Причины образования трещин в барабанах	179
2.8.2	Температурные неравномерности в барабане и методы их расчета	181
2.8.3	Температурные напряжения в барабане и методика их расчета	184
2.8.4	Мероприятия по уменьшению температурных неравномерностей и напряжений в барабанах	187
2.8.5	Контроль распределения температур и напряжений в барабане	191
2.9	Испытания и наладка топочных экранов прямоточных котлов	197
2.9.1	Конструктивные и режимные факторы, влияющие на гидравлический режим контура при принудительном движении рабочего тела	197
2.9.2	Режимы испытания топочных экранов прямоточных котлов	204
2.9.3	Методы исследования топочных экранов прямоточных котлов	207
2.9.4	Обработка экспериментальных данных и наладка надежной работы панелей топочных экранов	210
2.10	Испытания и наладка пароперегревателей паровых котлов	216
2.10.1	Анализ проектных и эксплуатационных данных пароперегревателя до проведения испытания	216
2.10.2	Экспериментальные исследования пароперегревателей	219
2.11	Испытания и наладка конвективных экономайзеров, паропроводов и арматуры	230
2.11.1	Характерные повреждения экономайзеров. Испытания экономайзеров	230
2.11.2	Испытания паропроводов и арматуры	235
3	Задания для самостоятельной работы студентов заочной формы обучения	238
3.1	Методические указания по выполнению самостоятельной работы	238

3.2 Задания для выполнения домашней контрольной работы студентов заочной формы обучения	243
3.2.1 Указания к выполнению домашней контрольной работы	243
3.3 Критерии оценок	245
Глоссарий	246
Заключение	251
Список использованных источников	252

## Введение

Наладка котлов является сложным и трудоемким процессом. Его конечной целью является доведение показателей работы котла до проектных, а также выявление дефектов, влияющие на надежность и характеристики котла. Это касается не только головных образцов новых типов, но и котлов, подвергшихся по тем или иным причинам реконструкции. В настоящее время объем работ по реконструкции котлов достаточно велик, и особенностью современного состояния работ по наладке котлов является то, что не только наладочные, но и наиболее важные исследовательские работы в области котельной техники в основном проводятся на промышленных объектах.

Процессы, протекающие в котле и его вспомогательном оборудовании, отличаются разнообразием и сложностью. Тенденция развития котлостроения связана с увеличением единичной мощности, совершенствованием котла и вспомогательного оборудования, усложнением тепловой схемы котла, появлением новых конструктивных решений по тем или иным элементам оборудования. Очевидно, что успешное освоение новых образцов и элементов оборудования, анализ аварийных повреждений, оценка эффективности работающего котла, разработка мероприятий по модернизации оборудования, совершенствование методик расчета, рекомендации по созданию новых образцов невозможны без проведения испытаний и наладки парового котла.

# 1 Наладка котлоагрегатов

## 1.1 Постановка наладочных и исследовательских работ

### 1.1.1 Наладочные и исследовательские работы, их задачи и организация

Надежная и эффективная работа котлоагрегатов электростанций во многом зависит от правильной постановки и проведения наладочных и экспериментальных работ. Это особенно важно в настоящее время в связи с тем, что испытания проводятся, главным образом, на мощных блочных установках, характеризующихся сжатыми сроками ввода их в эксплуатацию и повышенными требованиями к надежности их работы.

*Исследовательские испытания* – это испытания, проводимые для изучения определенных характеристик объекта, они проводятся с целью:

- определения или оценки показателей качества функционирования испытуемого объекта в определенных условиях его применения;
- выбора наилучших режимов применения объекта или наилучших свойств объекта;
- сравнения вариантов реализации объекта при проектировании и аттестации;
- построения математической модели функционирования объекта;
- отбора существенных факторов, влияющих на показатели качества функционирования объекта.

*Сравнительные испытания* – это испытания аналогичных по характеристикам или одинаковых объектов, проводимые в идентичных условиях для сравнения характеристик и свойств.

*Государственные испытания* – это испытания установленных важнейших видов продукции, проводимые головной организацией по государственным испытаниям, государственной комиссией или испытательной организацией, которой представлено право их проведения.

*Межведомственные испытания* – это испытания, проводимые комиссией из представителей нескольких заинтересованных министерств и (или) ведомств.

*Ведомственные испытания* проводятся комиссией из представителей заинтересованного министерства или ведомства.

*Доводочные испытания* – это исследовательские испытания, которые проводятся при разработке объекта с целью оценки влияния вносимых изменений для достижения заданных значений его показателей.

*Приемочные испытания* – это контрольные испытания опытных образцов (опытного объекта), проводимые для решения вопроса о целесообразности постановки этой продукции на производство и (или) использования по назначению. Приемочные испытания изделий единичного производства проводятся при решении вопроса о целесообразности передачи этих изделий в эксплуатацию.

*Типовые испытания* – это контрольные испытания, проводимые для оценки эффективности и целесообразности вносимых изменений в конструкцию или технологический процесс.

*Аттестационные испытания* проводятся для оценки уровня качества продукции при ее аттестации по категориям качества.

*Натурные испытания* – это испытания объекта в условиях, соответствующих условиям его использования по прямому назначению.

*Сокращенные испытания* – это испытания по сокращенной программе.

Во всех случаях при проведении наладочных и исследовательских работ независимо от их назначения опыты должны дублироваться. При значительном расхождении между результатами дублированных опытов следует провести анализ возможных причин несовпадения, и после уточнения методики и контроля приборов опыты следует повторить.

Основными этапами любых видов испытаний являются:

- ознакомление с технической документацией котла (проектной, заводской, ремонтной, отчетной);
- осмотр котла и его вспомогательного оборудования для оценки состояния, оснащенности средствами измерения, регулирования и автоматики;
- разработка программы-методики испытаний с указанием объема и методов измерений и вида отчетности по результатам испытаний;
- согласование программы-методики с руководством ТЭС и заинтересованными организациями;
- комплектование экспериментальной бригады из числа специалистов и наблюдателей, инструктаж членов бригады;
- составление и передача задания на изготовление и монтаж приспособлений, устройств и аппаратуры;
- курирование изготовления и монтажа;
- тарировка средств измерений;
- проведение прикидочных учебно-тренировочных опытов, их обработка, анализ полученных данных;
- проведение основной серии опытов по программе;
- предварительная обработка результатов основной серии опытов;
- анализ опытных данных (часто после анализа предварительной обработки опытных данных возникает необходимость в проведении дополнительной серии опытов);
- окончательная обработка опытных данных и составление технического отчета с выдачей рекомендаций;
- демонтаж схемы измерений и приспособлений.

Ознакомление с объектом, на котором планируется выполнение наладочных или исследовательских работ, рекомендуется начинать с изучения проектных материалов: пояснительной записки, чертежей конструкции, а также тепловых, гидравлических, тепломеханических и других расчетов. После этого, если объектом работ является действующий котел, следует изучить эксплуатационные материалы (инструкцию, оперативные вахтенные журналы и

сводные эксплуатационные ведомости, отчеты о наладке и исследованиях данного или подобного ему котла и др.).

При разработке методики исходят из задач работ, ее характера, сложности и имеющихся в наличии средств измерений.

При проведении эксплуатационных экспресс-испытаний рекомендуется следующий примерный состав бригады, состоящий из работников наладочных цехов или режимных групп электростанций: инженер (руководитель испытаний) – 1, техник – 1, лаборанты-наблюдатели от 3 до 5 чел. В отдельных случаях, например на пусковых головных объектах, наладочные работы целесообразно выполнять в составе комплексной бригады – бригады, в составе которой имеются специализированные группы.

При исследованиях точность измерений, как правило, должна быть выше, чем при проведении наладочных работ. Однако не всегда следует стремиться к большому количеству измерений всех параметров с повышенной точностью. В отдельных случаях повышения надежности измерений (определяющих параметров) добиваются сопоставлением данных, полученных различными методами.

Программа испытаний на проведение всей работы утверждается представителями предприятия (электростанции) и организации, проводящей испытания, и согласуется с заводами-поставщиками оборудования.

Для рационального и экономичного использования имеющихся средств измерений проведению испытаний должно предшествовать составление рабочей программы. Эта программа составляется на один или группу опытов, и в ней содержатся следующие основные данные:

- а) название объекта испытаний;
- б) цели и задачи испытаний;
- в) перечень режимов;
- г) длительность и время проведения испытаний;
- д) особые условия;
- е) перечень лиц, ответственных за проведение испытаний и технику безопасности.

Рабочая программа составляется и подписывается руководителем испытаний и утверждается ответственными представителями предприятия. Для проведения испытаний должна быть оформлена соответствующая заявка на получение предусмотренных рабочей программой режимов.

Проведение испытаний на современном промышленном котельном агрегате связано с организацией большого количества измерений. Для этой цели широко используются одно- и многоточечные регистрирующие приборы. Кроме того, для проведения испытаний привлекаются наблюдатели, в задачу которых входит регистрация наиболее ответственных параметров.

Во время испытаний проводятся записи в журналах наблюдений. Особые условия отмечаются в оперативном журнале бригады. При проведении испытаний в переменных режимах, характеризующихся быстрым протеканием процессов, необходимо обеспечить одновременность записей всех приборов. В

некоторых случаях рекомендуется применение звукового или светового сигнала.

Записи показаний приборов, проводимых наблюдателями, заносятся в журнал наблюдений.

Большая часть измерений фиксируется с помощью различного типа регистрирующих приборов. Показания таких приборов переносятся из лент и диаграмм в соответствующие таблицы.

Перед обработкой журналы наблюдений должны быть просмотрены и проверены руководителем испытаний. По возможности подсчеты средних значений производятся 2 раза различными расчетчиками. После подсчета средних замеренных значений вводят поправки и определяют средние истинные значения.

Результаты испытаний могут быть представлены в виде графиков и таблиц.

Обычно таблицы составляются для представления усредненных за большой отрезок времени значений, характеризующих, как правило, стационарные условия работы оборудования.

Наиболее наглядным способом представления результатов экспериментов является графический способ. Графики желательно составлять на самых ранних стадиях обработки опытных данных, так как это позволяет анализировать полученные результаты и облегчает задачу выявления грубых ошибок.

Первичные приборы и записи в журналах наблюдений отражают изменение во времени того или иного параметра. В то же время в некоторых случаях необходимо выявить также зависимость этих параметров и от других величин (нагрузки, давления и т. д.), что и служит основанием для выбора координат при построении графиков.

В котлах имеют место сложные взаимосвязи отдельных параметров и режимных факторов. Поэтому целесообразно построение комплексных графиков, на которых в соответствующих масштабах наносят кривые изменения основных определяющих величин во времени. Такие графики облегчают поиск факторов, оказывающих преимущественное влияние на изменение параметра, представляющего основной интерес.

### **1.1.2 Расчет погрешностей измерений**

Для правильного анализа экспериментальных данных необходимо определить величину погрешности измерений. Различают грубые, систематические и случайные ошибки.

*Грубые ошибки (промахи)*, как правило, обнаруживаются при первичной обработке экспериментальных данных. Внешним признаком результата, содержащего грубую ошибку, является резкое отличие этой величины от остальных при примерно одинаковых условиях. Эти ошибки вызывают неправильностью отсчета по шкале измерительного прибора, ошибочной записью в журнале наблюдения и другими причинами, которые являются следствием невнимательности, недобросовестности или недостаточной

квалификации наблюдателя. Результаты измерений с грубыми ошибками отбрасываются.

*Систематические ошибки* вызываются факторами, действующими одинаковым образом при многократном повторении одних и тех же измерений. В зависимости от причин, вызывающих систематические ошибки, некоторые из них могут быть или устранены в процессе измерений, или учтены с помощью соответствующих поправок при обработке экспериментальных данных. Например, поправка на гидростатическое давление при сниженном расположении манометра и др. Для избежания или сведения к минимуму систематических ошибок необходимо заранее глубоко продумать методику испытаний и со всей тщательностью провести монтаж схемы измерения.

*Случайные ошибки* возникают в результате суммирования большого количества факторов, действие каждого из которых не может быть определено в отдельности. Случайные ошибки являются неустранимыми, а учет их влияния на оценку истинного значения измеряемой величины производится с помощью методов теории вероятностей.

Иногда, при обработке экспериментальных данных, интервал, в котором находится истинное значение измеряемой величины, определяется исходя только из класса точности прибора. Например, если вторичный прибор со шкалой 0 – 800 °С имеет класс точности 0,5, то возможные значения температуры, исходя из приведенного выше, лежат в диапазоне  $\pm 4$  °С, а наиболее вероятным значением считается измеренное значение. Такое заключение о точности измерения не содержит достаточно информации и само по себе малоэффективно и может привести к противоречивым результатам, ибо оно не учитывает вероятности того, что действительная температура может лежать вне этого диапазона.

До недавнего времени при обработке результатов промышленных исследований котлоагрегатов не использовались вероятностные методы оценки точности измерений. Экспериментаторы производили качественную оценку работы котлоагрегата на основании, в основном, средних значений и представляли большое количество графиков и таблиц, усложняющих анализ результатов, особенно при сопоставлении результатов исследования разных методик и авторов. Нередко оценка точности результатов экспериментов носила субъективный характер. В настоящее время вопросу определения точности измерений уделяется большое внимание, особенно на мощных энергетических блоках, в которых каждый процент ошибки существенно влияет на правильность определения их экономических показателей.

При обработке результатов эксперимента исследователю необходимо знать соотношение между средним значением измеряемой величины, вычисленной из последовательности нескольких измерений, и истинной величиной. Способ задания этого соотношения состоит в установлении границ около среднего значения, вне которых будет находиться, например, только 10 % полученных при дальнейших измерениях значений. Величина ошибки измерения не является самостоятельно существующей величиной, а зависит от принятого уровня вероятности  $P$ .

Таким образом, для характеристики случайной ошибки необходимо задать два числа, а именно: величину ошибки (или доверительного интервала) и величину доверительной вероятности.

Доверительной вероятностью называется вероятность  $P$  того, что искомая величина  $x$  находится в интервале  $x - \Delta x, x + \Delta x$ , который называется доверительным интервалом.

### 1.1.2.1 Основные принципы теплотехнических измерений

Измерение физических величин не может быть произведено абсолютно точно вследствие несовершенства методов и средств измерений, а так же из-за влияния условий измерения, индивидуальных особенностей наблюдателя и ряда случайных причин. Возникшие при этом отклонения результатов измерений от истинных значений измеряемой величины называются *погрешностями измерений*.

При каждом измерении должна быть известна степень точности его результата, оцениваемая погрешностью измерения. Только тогда полученное значение той или иной величины имеет практический смысл. Погрешность измерения может быть выражена в виде *абсолютной* или *относительной* величины и бывает *положительной* или *отрицательной*.

Абсолютная погрешность  $\Delta$ , выражаемая в единицах измерений, представляет собой разность между измеренным значением (показанием прибора)  $\chi$  и действительным значением измеряемой величины  $X_d$ , а относительная погрешность  $Y$ , указываемая в процентах есть отношение абсолютной погрешности к действительному значению, т.е.

$$\Delta = \chi - X_d, \quad (1)$$

$$Y = \frac{\Delta}{X_d} \cdot 100 \% \quad (2)$$

Случайные погрешности являются заведомо неопределенными по своей величине и природе. При повторных измерениях они не остаются постоянными, т.к. они возникают в итоге совместного воздействия на процесс измерения многих причин, каждая из которых проявляет себя по-разному и независимо друг от друга. При обработке результатов ряда повторных измерений, содержащих случайные погрешности, находится среднее значение  $X_{cp}$  представляющее собой конечный результат измерения, т.е.

$$X_{cp} = (x_1 + x_2 + x_3 + x_n)/n \quad (3)$$

где  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  – ряд измеряемых значений, условно обозначаемых  $x_i$ ;  
 $n$  – число измерений.

Для оценки случайной погрешности обычно служит среднее квадратичное отклонение результата измерения  $\sigma$ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{(x_i - x_{cp})^2}{n-1}} \quad (4)$$

Вероятная погрешность соответственно находится по формуле:

$$\Delta_v = 0,675 \cdot \sigma. \quad (5)$$

Смысл определения этой погрешности состоит в том, что при многократном измерении постоянной величины 50% случайных погрешностей будет меньше вероятной погрешности и 50% — больше ее.

## **1.2 Наладка и исследование топочного и гидравлического режимов работы труб поверхностей нагрева**

### **1.2.1 Измерение температуры материала труб в зоне обогрева**

Основным показателем, определяющим надежную работу котлов, является температурный режим труб поверхностей нагрева. Максимальная температура обогреваемых труб не должна, исходя из условия длительной прочности, превышать допустимую температуру для данной марки стали, из которой изготовлена труба. Если же имеются кратковременные выбеги температуры металла трубы, то необходимо знать характер этих выбегов для расчета их амплитудно-частотных и статистических показателей.

Температура трубы является параметром, суммирующим влияние целого ряда факторов: условий обогрева (значения и распределения теплового потока), термодинамического состояния среды и условий охлаждения (теплообмена внутри труб), состояния наружной и внутренней поверхностей, а также условий эксплуатации котла (подъем и сброс нагрузки, работа на скользящем давлении) и т. д.

При освоении головных котлов или изменившихся условий эксплуатации серийных котлов необходимо определить влияние как каждого фактора в отдельности, так и их совокупности для выявления безопасной с точки зрения надежности температурного режима труб эксплуатации поверхностей нагрева.

При этом возникает задача измерения температуры металла труб поверхностей нагрева, расположенных в топочной камере, зоне высоких газовых температур (пароперегреватель) и конвективной шахте, зоне умеренной температуры.

Наиболее сложной задачей при этом является измерение температуры металла экранных труб в топочной камере, из-за того что горячий спай термпары и ее выводы располагаются в среде агрессивных топочных газов,

имеющих высокую температуру. При этом важным является обеспечение требования к надежности измерения, так как контроль за состоянием термоэлектрического преобразователя, и особенно ее горячего спая, затруднен из-за недоступности места его заделки.

Ненадежные измерения в этом случае могут привести к получению случайных данных и неправильным выводам.

Измерение температуры металла труб пароперегревателя также является достаточно сложной задачей. В этом случае появляются дополнительные трудности, которые определяются отдаленностью точек, изменяя от обмуровки. Для мощных котлов это расстояние может превышать 8 – 10 м. Измерения температуры в области умеренной газовой температуры проводят значительно реже, а организация самих измерений особых затруднений не вызывает.

### **1.2.1.1 Температурные вставки**

В настоящее время известны различные конструкции устройств для измерения температуры металла труб в зоне обогрева. Эти устройства принято называть температурными вставками. Все конструкции температурных вставок по принципу закладки в них горячего спая термометрического преобразователя можно разбить на вставки со сверлениями в стенке трубы и вставки с фрезерованной канавкой.

Конструкция температурных вставок видоизменяется также в зависимости от поверхности нагрева (для установки), на которую они предназначены. Так, например, вставки для измерения температуры металла труб на настенных поверхностях нагрева (НРЧ, СРЧ, потолок) отличаются от вставок, применяемых в поверхностях нагрева, расположенных в топочном пространстве.

Ниже приводится описание наиболее распространенных температурных вставок, применявшихся различными организациями при наладке и исследованиях преимущественно прямоточных котлов.

На рисунке 1 изображена температурная вставка, применявшаяся при исследованиях нижней радиационной части газомазутных котлов сверхкритических параметров. Вставка изготовлена из отрезка экранной трубы 0 32×6 мм (сталь 12×1МФ). При отборе труб для вставки желательно проводить их калибровку любым из известных методов для уточнения диаметра. Длину вставки выбирают из условия минимально допустимого расстояния между двумя сварочными швами. В заготовленном отрезке трубы **1** необходимой длины с помощью кондуктора на расстоянии 1,5 мм от наружной образующей трубы просверливают отверстия диаметром 1,5 мм, глубиной 40 – 50 мм и протачивают круговую канавку **2** для вывода термопар. Затем с концов отрезка трубы **1** снимают фаску под сварку и вводят термоэлектрические преобразователи, изолированные нитью из кварцевого или керамзитового изоляционного материала, и на расстоянии 20 – 25 мм от торцов трубы **1** приваривают спай **3** термоэлектрического преобразователя. Термоэлектрические преобразователи изготавливаются из термоэлектродной проволоки хромель-алюмель (диаметром 0,5 мм). Для увеличения

изотермического участка термоэлектрические преобразователи 1 – 1,5 раза обматывают вокруг трубы 1 в канавке 2 и дополнительно защищают их прокладками из слюды. Затем приваривают защитное кольцо 4 (шириной 16—18 мм) и отводную трубку 5 (диаметром 13×1,5 мм или 16×1,5 мм).

В некоторых случаях в качестве показателя роста температуры металла трубы из-за формирования на внутренней ее поверхности железистоокисных образований необходимо знать изменение прироста температуры, измеряемое по разности между температурой металла трубы и температурой среды в этом же сечении. Тогда вставку целесообразно снабдить малогабаритной гильзой 6 (0 5X1,5), заканчивающейся примерно в центре внутреннего сечения трубы 1.

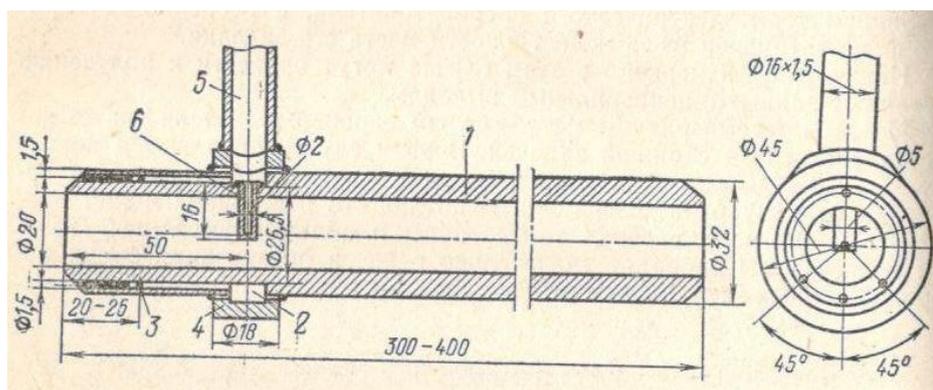


Рисунок 1 – Односторонняя температурная вставка

1 – труба; 2 – канавка; 3 – фиксация спая; 4 – защитное кольцо; 5 – отводная трубка; 6 – малогабаритная гильза.

Надежный контакт спая 3 со стенками сверления обеспечивают легким ударом керна по наружной поверхности трубы 1 в зоне расположения спая термоэлектрического преобразователя или ступенчатым сверлением. В последнем случае достигается более тонкая фиксация спая 3 на заданном расстоянии от торца трубы 1. Все металлические элементы вставки выполнены из стали 12×1МФ.

Наблюдения показали, что наиболее уязвимыми местами этого типа вставок при работе в условиях сжигания в топке мазута являются отводная трубка 5 и лобовая (со стороны топки) часть защитного кольца 4. Охлаждение обоих этих элементов происходит лишь за счет теплопроводности при контакте в сварочном стыке, соединяющем эти элементы с экранной трубой 1. Важное значение имеет надежность отводной трубки 5. При установке вставок в местах наброса факела, где он может попадать за экранные трубы, отводная трубка может перегореть, а образовавшийся в этом месте новый горячий спай будет фиксировать температуру, отличающуюся от температуры металла экранной трубы. Однако при работе котла на газообразном топливе температурные вставки этого типа вполне надежны и могут быть рекомендованы для длительного использования.

На рисунке 2 изображена другая модификация описанной выше температурной вставки, в конструкции которой учтены требования, вытекающие из особенностей работы высокофорсированных топочных устройств, предназначенных для сжигания в них мазута.

В отличие от вставки, изображенной на рисунке 1, здесь применен: уменьшенное по ширине до 13 мм защитное кольцо 4, закрывающее канавку 2. Для предотвращения пережогов отводной трубки 5 установлен защитный экран 6 из нержавеющей трубы диаметром 22×2,5 мм. Кроме того, после установки термоэлектрических преобразователей и приварки спая 3 (также методом электрического разряда) в отверстие для термоэлектрических преобразователей с торцевой стороны вставляется металлический стержень 7.

Для контроля достоверности измеряемых значений температуры металла при установке термоэлектродов в трубе 1 с двух сторон выполняются сверления, и с каждой стороны осуществляется их вывод в самостоятельные отводные экранированные описанным способом трубки 5. Вывод дублирующих термоэлектрических преобразователей в одну отводную трубку 5 не гарантирует от возникновения возможных ошибок.

Количество сверлений под горячий спай термодпар может быть большим, чем это показано на рисунке 2. Эта температурная вставка также может быть снабжена гильзой для измерения температуры среды с выводом термоэлектродов через самостоятельную отводную трубку.

При плотном шаге экранирования (обычно применяющемся в газомазутных котлах СКД) и надежном креплении экранных труб, а также при отсутствии наброса факела необходимость в установке гильзового термоэлектрического преобразователя отпадает, так как перепад температуры в стенке трубы на ее тыльной образующей мал и показания тыльного термоэлектрического преобразователя удовлетворительно совпадают со средней температурой потока по сечению трубы.

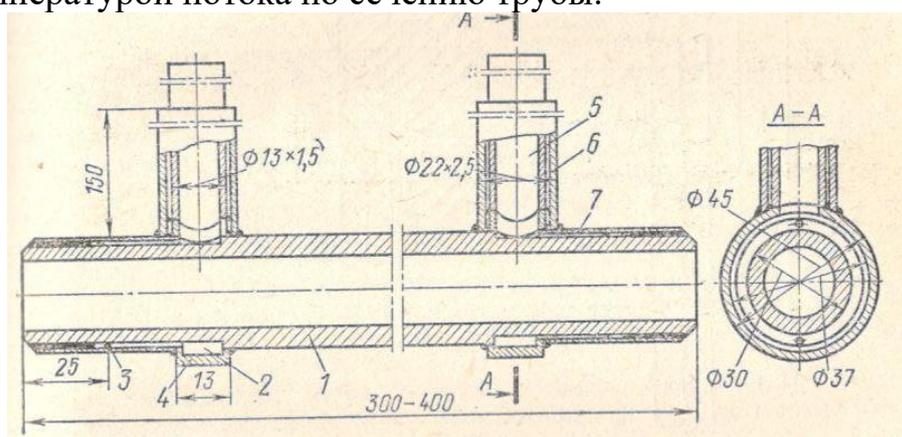


Рисунок 2 – Двусторонняя температурная вставка

1 – труба; 2 – канавка; 3 – приварка спая; 4 – защитное кольцо; 5 – отводная трубка; 6 – защитный экран; 7 – металлический стержень.

Описанная конструкция вставки обеспечивает измерение температуры металла на глубине 1,5 мм.

Одна из первых конструкций температурных вставок с продольными сверлениями в стенке трубы, изображена на рисунке 3. Вставки этой конструкции применялись успешно при испытаниях пылеугольных котлов.

Характерной особенностью вставки является несколько увеличений ее наружный диаметр, по сравнению с наружным диаметром экранной трубы. Увеличение толщины трубы при этом (равномерное на большей части длины вставки) в разных вариантах ее исполнения доходит до 3 – 3,5 мм.

Внутренний диаметр вставки равен внутреннему диаметру экранной трубы. Вставки изготавливаются из цельного куска металла той же марки стали, из которой изготовлены экранные трубы. Каналы для термоэлектрических преобразователей выполнены сверленными, их длина 40 – 45 мм при диаметре 2,5 – 2,8 мм. Расстояние оси канала от наружной поверхности вставки не превышает 2,5 – 3 мм. Температурное поле в теле такой вставки отличается от температурного поля экранной трубы, в связи с чем измеренную температуру металла следует пересчитать, чтобы получить истинное значение температуры металла экранной трубы. Для прикидочных расчетов при проведении такого перерасчета учитывают только различие в наружных диаметрах экранной трубы и температурной вставки.

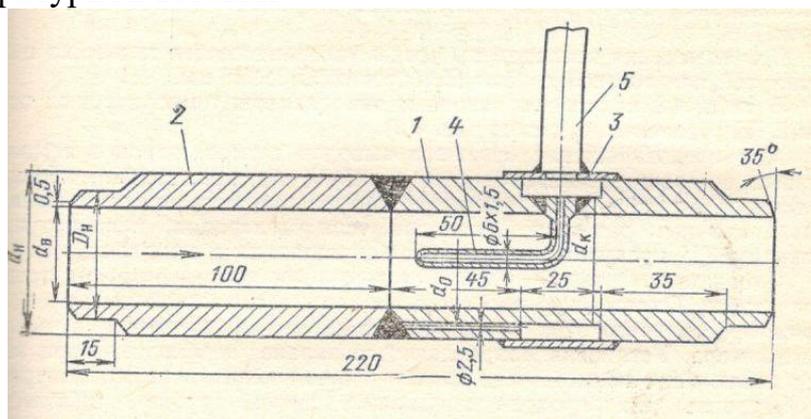


Рисунок 3 – Температурная вставка

1 – измерительный участок – труба со сверлениями; 2 – предвключенный участок; 3 – защитное кольцо; 4 – гильза; 5 – защитная трубка.

Температурная вставка состоит из двух частей, соединенных между собой сварным стыком. Сверление каналов производится до разделок кромок под сварку с утолщенной стороны, на которой также выполняется кольцевая выточка для вывода термоэлектродов. Усиление сварного шва снимается полностью для того, чтобы не вносить дополнительных погрешностей в измеряемую температуру. Толщина стенки в районе кольцевой выточки меньше толщины экранной трубы не более чем на 0,5 – 1 мм. Ширина кольцевой выточки принимается не более 15 – 25 мм; меньшая цифра принимается, если отсутствует необходимость установки гильзы во вставке. Защитное кольцо при этом имеет ширину 25 – 35 мм соответственно. Кольцо

выполняется из нержавеющей стали и приравнивается к телу вставки с одной стороны.

При установке температурных вставок в зоне максимальных локальных значений тепловых потоков (отметка горелок и несколько выше) во избежание пережога защитного кольца его следует выполнить; утопленным – по ширине кольцевой выточки. Из соображений удобств; монтажа защитное кольцо выполняется разрезным или из двух половинок.

Для измерения температуры среды устанавливается гильза из цельнотянутой или точеной трубки  $08 \times 2$  или  $06 \times 1,5$  мм.

Для предотвращения пережога выводов термоэлектродов температурных вставок, устанавливаемых в районе горелок, газами, проникающими за экран, и уменьшения дополнительных погрешностей, вызванных локальным разогревом выводов термоэлектродов, в конструкции вставок предусмотрен вариант с охлаждаемым выводом (рисунок 4).

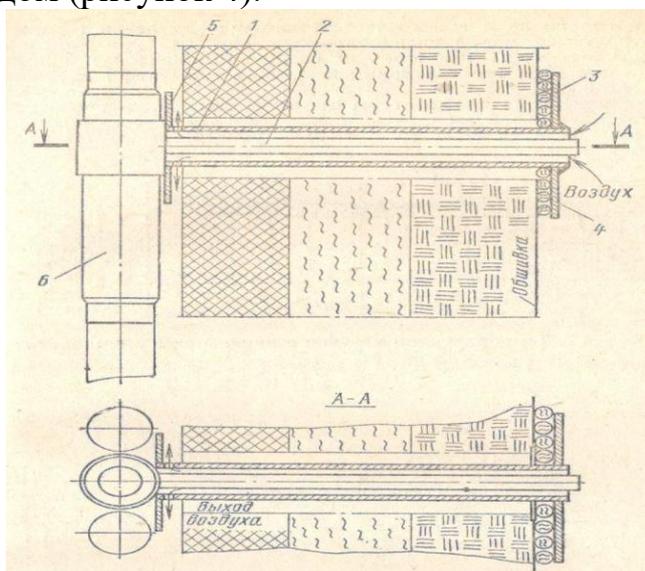


Рисунок 4 – Охлаждаемый вывод термоэлектродов температурных вставок

1 – наружная трубка с отверстиями; 2 – внутренняя выводная трубка; 3 – уплотнительный лист; 4 – асбестовый шнур; 5 – экран; 6 – температурная вставка.

Охлаждаемый вывод выполняется из двух concentric защитных трубок. Охлаждение производится воздухом, засасываемым в кольцевое пространство этих трубок или подаваемым из линии дутьевого вентилятора. Установка направляющего экрана необходима при этом для исключения возможности местного охлаждения вставки. Отверстие в обмуровке для прохода наружной защитной трубки выполняется; с учетом возможного перемещения этой трубки при тепловых расширениях экранов. Уплотнение из асбестового шнура, закладываемого за уплотнительный лист в месте выхода защитной трубки за обмуровку котла, не должно препятствовать перемещению этой трубки.

На рисунке 5 изображен другой еще вариант температурной вставки. В этой вставке утолщение стенки в зоне сверления выполнено за счет уменьшения внутреннего диаметра трубы. Такая конструкция воспроизводит идентичные условия работы вставки и трубы поверхности нагрева со стороны топочных газов. Однако за счет сужения потока изменяются гидравлический режим трубы и условия ее внутреннего охлаждения. Вставки, этого типа можно рекомендовать к применению в тех случаях, когда решающим в определении температурного режима является радиационный теплообмен.

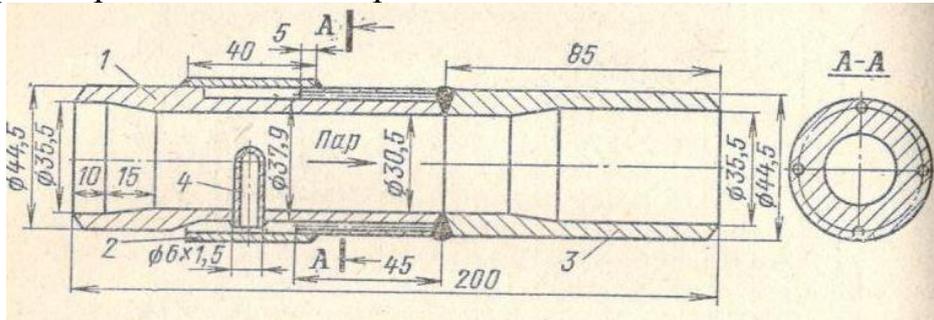


Рисунок 5 – Температурная вставка с внутренним утолщением

1 – измерительный участок, труба; 2 – защитное кольцо; 3 – переходный участок; 4 – гильза.

Одним из надежных способов защиты термоэлектродов от пережога является вывод их в защитной трубке, расположенной непосредственно внутри обогреваемой трубы. Конструкции вставок с таким выводом изображены на рисунке 6.

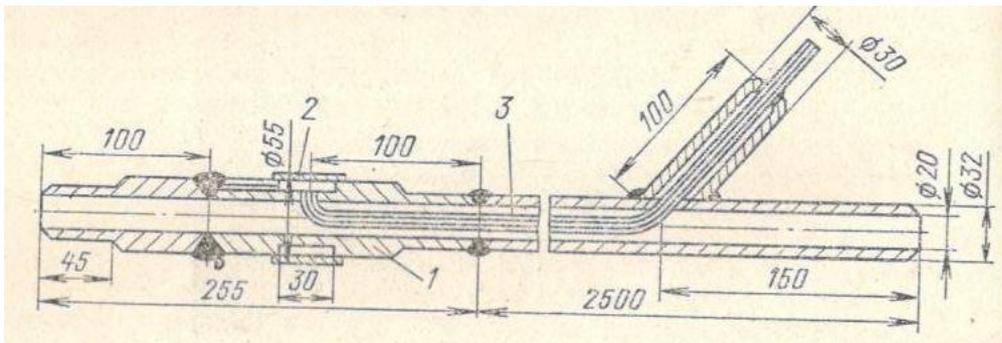


Рисунок 6 – Температурная вставка с внутренним выводом термоэлектродов

1 – измерительный участок; 2 – защитное кольцо; 3 – выводная труба.

Вывод термоэлектродов из кольцевой выточки вставки, изображенной на рисунке 6, осуществляется через трубку диаметром 10×1,5 мм, проходящую внутри вставки и обогреваемой трубы.

Выводную трубку изогнутым концом вставляют в соответствующее отверстие, выполненное в кольцевой выточке, и приваривают ее наружным плотным швом. При большой длине выводной трубки ее необходимо

центрировать направляющими, выполненными, например, в виде приваренных к выводной трубке пластин.

Охлаждение вывода термоэлектрического преобразователя производится рабочей средой, протекаемой внутри вставки. Надежность такого вывода высока, хотя и достигается путем некоторого конструктивного усложнения.

К недостаткам этой конструкции следует также отнести искажение гидродинамики, вносимое инородными телами (выводной трубкой и направляющими), что в свою очередь отразится на температуре металла.

Для уменьшения этого искажения выводную трубку с направляющими следует расположить по направлению потока, а не против него, а каналы для закладки термоэлектродов – перед выводной трубкой. В некоторых случаях, как это имеет место, например, в пароперегревательных поверхностях нагрева, влияние искажения гидродинамического поля на конечные значения температуры металла невелико и для практических целей может не учитываться. Поэтому такие вставки могут успешно применяться в указанных условиях.

В настоящее время широко применяются кабельные термоэлектрические преобразователи типа КТМС в металлической оболочке из нержавеющей стали. Эти термоэлектрические преобразователи обладают рядом достоинств — они выполнены из тонкого термоэлектродного материала и при соответствующем оформлении горячего спая характеризуются малой инерционностью, сохраняя при этом высокую прочность и гибкость, и поэтому их следует рекомендовать при изготовлении целого ряда температурных вставок, в том числе и изображенных на рисунке 6 и 7.

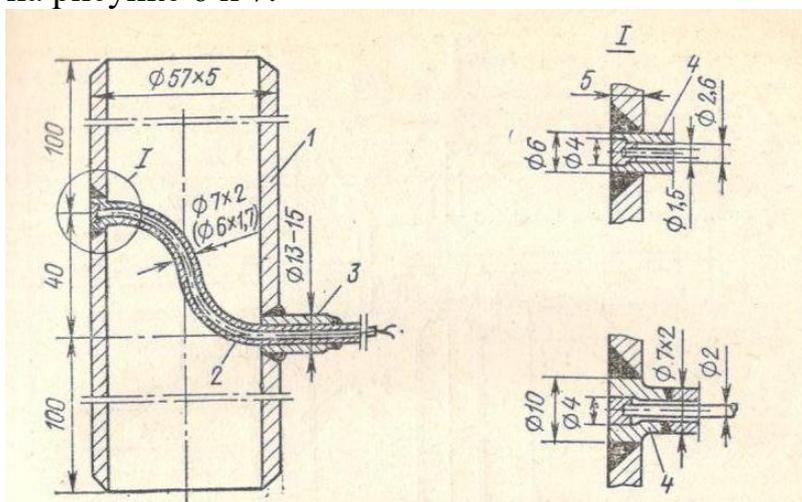


Рисунок 7 – Температурная вставка для измерения температуры экранных труб в зоне высоких тепловых нагрузок

1 – экранная труба; 2 – выводная трубка; 3 – штуцер; 4 – пробка.

Для измерения температуры металла плавниковых обогреваемых труб при длительной эксплуатации высокую надежность показали температурные вставки (рисунок 8) и универсальные температурные вставки (рисунок 9). Но

из-за сложности изготовления и монтажа таких вставок их следует применять при общей длительности испытаний более 2 мес.

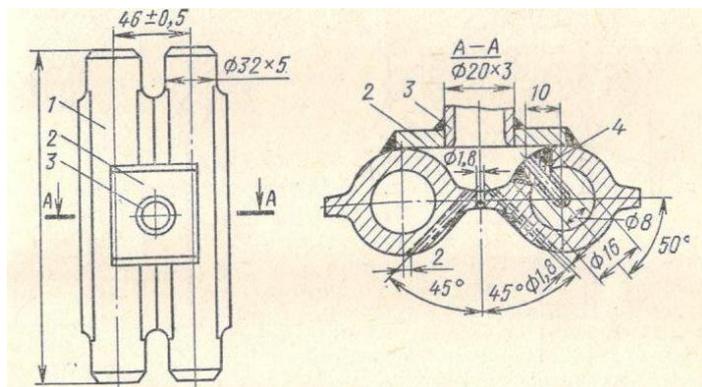


Рисунок 8 – Температурная вставка для плавниковых труб

1 – плавниковая труба; 2 – пластина; 3 – труба для вывода термоэлектродов; 4 – гильза.

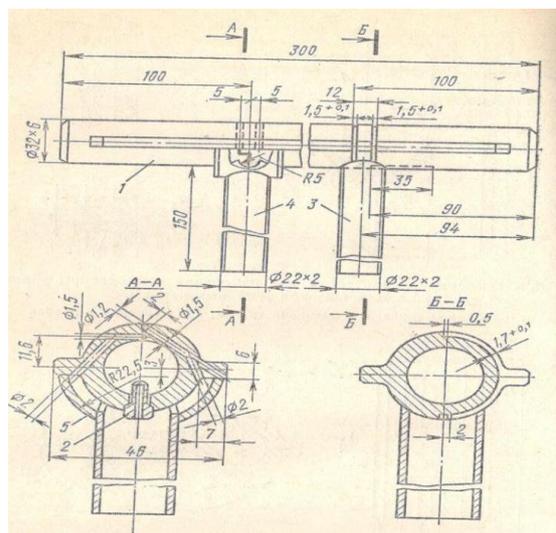


Рисунок 9 – Универсальная температурная вставка для плавниковых труб

1 – плавниковая труба; 2 – гильза; 3,4 - патрубки для вывода термоэлектродов; 5 – защитный козырек.

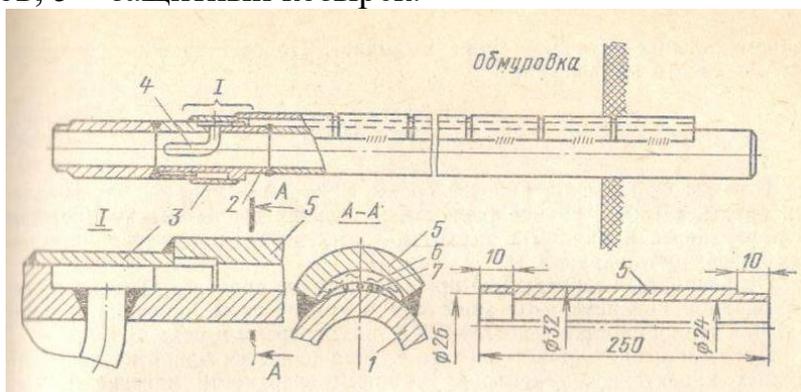


Рисунок 10 – Температурная вставка для измерения температуры металла в пароперегревательных поверхностях нагрева

1 – трубка пароперегревателя; 2 – измерительный участок; 3 – защитное кольцо; 4 – гильза; 5 – накладка; 6 – асбестовый лист; 7 – термоэлектроды.

При организации измерений температуры металла труб ширмовых и конвективных поверхностей нагрева в обогреваемой зоне длина отводящих термоэлектродов намного больше, чем во вставках, устанавливаемых на настенных поверхностях нагрева (НРЧ, СРЧ, ВРЧ и потолочные экраны). Это и вызывает необходимость специального охлаждения этих термоэлектродов при прокладке их через газовую среду с температурой 700 °С и выше.

В этих условиях успешно применялась конструкция вставки (рисунок 10). В ней отводящие термоэлектроды прокладывают вдоль наружной поверхности трубы непосредственно от «горячего» спая термоэлектрического преобразователя вплоть до вывода термоэлектродов за обмуровку котла. Термоэлектроды защищают от непосредственного их контакта с топочными газами накладками, состоящих из необходимого количества фигурных звеньев, каждое из которых имеет длину 250 мм. При температуре газов свыше 700 °С накладки следует изготавливать из жаропрочной стали. Накладки приваривают только в средней части на длине 20 – 30 мм с некоторым зазором для компенсации термического удлинения.

Термоэлектроды изготовлены из хромель-алюмелевой проволоки диаметром 0,5 – 0,8 мм и изолированы тонким слоем кремнезема, плотно прижаты к стенке трубы и покрыты асбестовым листом, заполняющим пространство между ними и накладками. Не рекомендуется сворачивать термоэлектрические преобразователи при укладке в один общий жгут, что ухудшает условия их охлаждения. По этой же причине рекомендуется применять толстый слой изоляции или изоляцию из фарфоровых бус.

При горизонтальном положении трубки накладки устанавливают сверху, а при вертикальном – на тыльной образующей этой трубки.

На трубе со вставкой желательнее принять меры для предотвращения вибрации, которая может привести к преждевременному выходу из строя температурную вставку. Данную конструкцию температурной вставки следует применять при температуре газов выше 800 °С. При более высокой температуре газов следует применять вывод термоэлектрических преобразователей через защитную трубку, размещенную внутри трубы (см. рисунок 6).

### **1.2.2 Измерение тепловых нагрузок, воспринимаемых экранными поверхностями нагрева**

Экранные поверхности нагрева топочной камеры воспринимают лучистую энергию горящего топлива, падающую на них от факела.

Зависимость между количеством лучистой теплоты, излучаемой факелом, и количеством теплоты, воспринимаемой поверхностями нагрева, весьма сложна.

Методика расчета теплообмена в топке основана на совместном использовании аналитического и эмпирического исследований, а также на

применении теории подобия для анализа топочных процессов. Эта методика позволяет достаточно уверенно проектировать котлы на все виды топлива. Однако из-за сложности данного процесса, а также в связи с появлением во вновь создаваемых котлах ряда новых решений (увеличение единичной мощности, рост тепловых напряжений топочной камеры, применение рециркуляции газов и т. д.) перед конструктором, исследователем и наладчиком всегда встает вопрос о точном определении количества теплоты, воспринимаемой тем или иным участком котельной поверхности нагрева. При этом интерес представляют как среднее тепловосприятие экранов, так и локальная плотность теплового потока.

Среднее (или удельное) тепловосприятие экранов характеризует среднюю эффективность тепловой работы данной поверхности нагрева. Как правило, экспериментальное определение среднего тепловосприятия принципиальных трудностей не вызывает.

Локальная плотность теплового потока является одной из наиболее важных характеристик тепловой работы поверхности нагрева. От значений и распределения в значительной степени зависят процессы тело- и массообмена и гидродинамики, протекающие в экранных трубах; их температурный режим, иными словами — факторы, влияющие главным образом на надежность работы этих труб.

Определение локальной тепловой нагрузки в топках котлов сопряжено со значительными трудностями. Поэтому долгое время при интерпретации результатов промышленных исследований распределение тепловой нагрузки характеризовалось лишь качественно по таким косвенным показателям, как температура факела, определяемая также косвенным путем с помощью оптических пирометров.

В настоящее время накоплен большой опыт по экспериментальному определению локальной плотности теплового потока в топках котлов. Измерительные устройства, применяющиеся для этой цели, можно разделить на стационарные и переносные.

К стационарным относятся калориметрические трубы и температурные вставки, к переносным — так называемые термозонды и переносные калориметры.

В качестве стационарного калориметра могут быть использованы экранные трубы, а также трубы уменьшенного диаметра, установленные вместо экранных труб или в рассечку между ними.

На рисунке 11 изображена схема установки калориметрических труб на котле ТМ-200-1 для исследования тепловосприятия экранов.

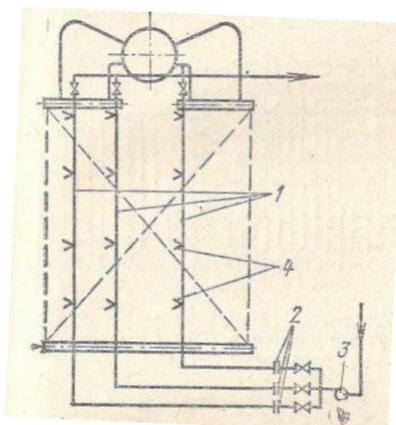


Рисунок 11 – Схема установки калориметрических труб на котле ТМ-200-1

1 – калориметрические трубы; 2 – измерительные диафрагмы; 3 – насос; 4 – термоэлектрические преобразователи

В соответствии с этой схемой несколько циркуляционных труб заменены калориметрическими с тем же диаметром и толщиной стенки. Среда из трубопровода химически очищенной воды центробежным насосом перекачивалась по калориметрическим трубам. Для измерения расхода воды на входе в каждую такую трубу установлены протарированные диафрагмы. Регулирование расхода воды осуществлялось клапанами. Калориметрические трубы разбиты на участки, на границах которых установлены гильзовые хромель-алюмелевые термоэлектрические преобразователи. Способ установки таких преобразователей показан на рисунке 12.

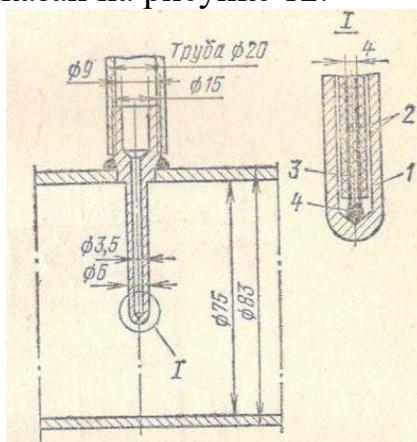


Рисунок 12 – Схема установки малоинерционного термоэлектрического преобразователя в гильзе

1 – гильза; 2 – термоэлектроды; 3 – соломка; 4 – спай

Кроме того, на каждой трубе установлено по одному термоэлектрическому преобразователю на входе трубы в топку и по два на входе из топки. По термоэлектрическим преобразователям, расположенным на трубах на выходе из топки, контролировалось отсутствие закипания в верхней части калориметрических труб. Для определения приращения температуры

воды по участкам измерялась разность между температурой воды на входе в трубу и температурой после каждого участка.

Изучение велось в топке барабанного котла при сжигании мазута, однако такая методика может быть применена также в котлах любого типа, в том числе и прямоточных. Максимальные тепловые потоки обнаружены в зоне форсунок, где достигают  $580 - 600 \text{ кВт/м}^2$ . Установлено, что тепловая нагрузка участков труб в зоне ядра факела в 8 раз больше тепловой нагрузки верхних участков экрана.

Пример выполнения калориметра из труб малого диаметра приведен на рисунке 13. Такой калориметр применен при изучении тепловосприятости камеры догорания циклонного котла сверхкритических параметров.

Калориметр выполнен из 11 индивидуальных петлевидных трубок диаметром  $12 \times 2 \text{ мм}$  (сталь 1Х18Н10Т), установленных на середине боковой стены по всей высоте экрана НРЧ и охлаждаемых турбинным конденсатом. Десять нижних петель имеют длину облучаемого рабочего участка по 500 мм, а верхняя петля, установленная в зоне пережима топочного пространства, имеет длину этого участка 2800 мм.

Калориметр смонтирован так, что лобовая образующая облучаемых участков находится в ранжире с лобовой образующей экранных труб. Каждая из петель на входе снабжена игольчатыми клапанами, предназначенными для регулирования расхода воды через петлю. Температура воды на входе в петли калориметра и на выходе из них измеряется 12 термоэлектрическими преобразователями выведенными на потенциометр, и 12 контрольными дублирующими ртутными термометрами. Измерение расхода воды в калориметрических петлях осуществляется объемным методом с помощью двух комплектов мерных баков вместимостью 1, 3 и 5 л, в которые поочередно сливается конденсат каждой из 11 петель.

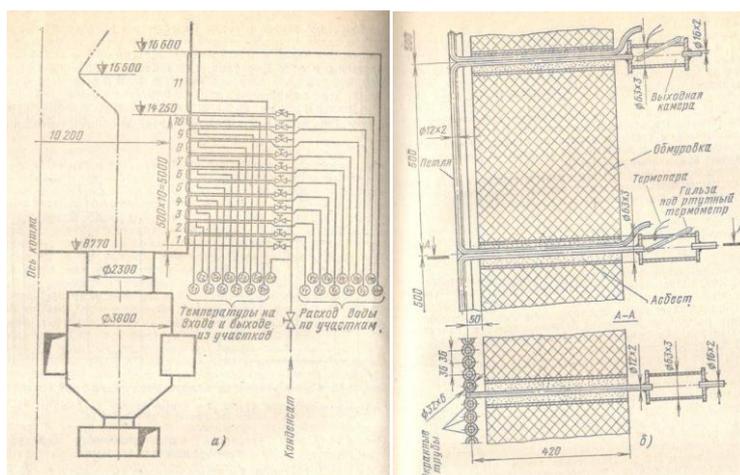


Рисунок 13 – Калориметрические измерения в НРЧ котла сверхкритических параметров

а – принципиальная схема размещения калориметра из труб малого диаметра; б – узел установки петель калориметра

В эксплуатационном режиме игольчатые клапаны должны быть полностью открыты. После выхода на заданный опытом режим работы котла с помощью указанных клапанов устанавливается температура конденсата за петлями  $60 - 70^{\circ}\text{C}$ . Для каждой петли подбирают соответствующий бачок из условия его заполнения в течение  $30 - 60$  с. Температура воды на входе и выходе из калориметров регулируется во время всего опыта.

При проведении исследований на калориметрических трубах следует иметь в виду, что на них могут возникать загрязнения, отличные от загрязнений экранных труб. Известно, что температура среды, охлаждающей трубу, оказывает влияние на развитие слоя загрязнений. Поэтому с методической точки зрения изучение тепловых нагрузок экранов с помощью водяных калориметров не может дать точности в котлах, где на экранных трубах могут образовываться те или иные отложения.

Наиболее желательная область их применения – газомазутные котлы с обычными топками (горелками и форсунками). В топках, работающих на угольной пыли, а также в циклонных топках, характеризующихся образованием шлака и выносом его из циклона, такие калориметры могут давать искаженные результаты.

Более точные результаты по тепловосприятию экранных труб можно получить на выделенных автономных витках, применение которых охватывает гораздо более широкую область исследований.

### 1.2.2.1 Применение переносных термозондов для исследования локального теплообмена

Для исследования теплообмена в топочной камере применяется переносной термозонд, разработанный ВНИИМТ. Конструкция такого термозонда усовершенствована ВТИ и изображена на рисунке 14.

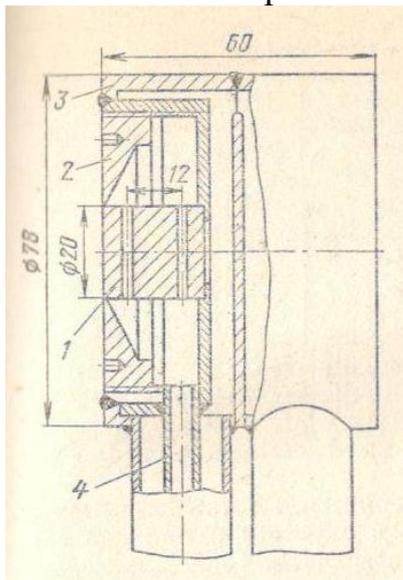


Рисунок 14 – Двусторонний термозонд

1 – теплоприемник; 2 – крышка; 3 – корпус; 4 – трубка для вывода термоэлектродов

Термозонд представляет собой двусторонний радиометр, позволяющий производить отдельные измерения тепловых потоков, падающих на него с двух сторон. Основными элементами термозонда являются чувствительный элемент теплоприемник, крышка, корпус и трубка для вывода термоэлектрического преобразователя. В сверления теплоприемника, изготовленного из стали 1Х18Н9Т, закладывается изолированный дифференциальный термоэлектрический преобразователь ХА так, что горячие спаи находятся на середине отверстий один над другим.

До установки термоэлектродов термозонд отжигается при 900 °С, после чего степень черноты поверхности чувствительного элемента может быть принята равной 0,85.

Если поверхность чувствительного элемента чернить сажей, смешанной с клеем БФ-2, то полученная таким образом тонкая и прочная черная пленка не боится многократных чисток налетов сажи и золы. Установлено, что степень черноты подобного покрытия 0,96—0,98 выше степени черноты сажи. При проведении исследований в топках пылевых котлов чувствительный элемент термозонда покрывается налетом золы, что снижает степень черноты этого элемента до 0,92—0,94.

Тарировка термозонда до тепловых нагрузок 200—230 кВт/м<sup>2</sup> может производиться в лабораторных условиях (например, в шахтной электропечи). При более высоких тепловых нагрузках тарировку проводят непосредственно в топках котлов при сжигании газового топлива с помощью специального калориметра ВТИ (рисунок 15). Охлаждающая вода подается в канавки, расположенные с внутренней стороны тепловоспринимающей поверхности.

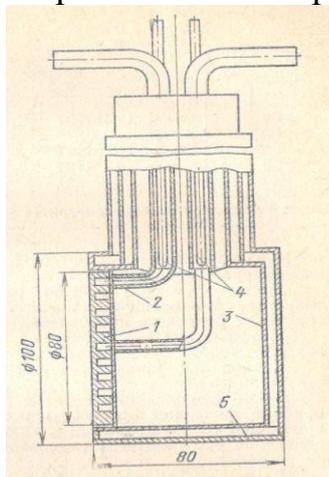


Рисунок 15 – Калориметр для тарировки термозондов

1 – тепловоспринимающая поверхность; 2 – подвод и отвод воды; 3 – разделительная перегородка; 4 – гильзы для установки дифференциальной термопары; 5 – корпус

Отсутствие влияния температуры воды в наружном охлаждающем контуре на температуру во внутреннем измерительном контуре проверялось специально.

Измерение перепада температуры нагретой в калориметре воды проводится установленным в подводящем и отводящем патрубках дифференциальным термоэлектрическим преобразователем из меди и константана, градуированным через малые интервалы.

При тарировке зонда в котле оба прибора вводят через лючки в топку и устанавливают рядом так, чтобы их тепловоспринимающие поверхности находились в одной плоскости. При тарировке прибора в шахтной печи также используется калориметр, подобный изображенному, но двусторонним расположением тепловоспринимающих поверхностей не отличающийся по наружным размерам от термозонда.

### **1.2.2.2 Определение тепловых нагрузок экранных труб с помощью температурных вставок**

Измерение тепловых нагрузок экранных труб с помощью температурных вставок дает наиболее достоверные данные о тепловой работе трубы в условиях радиационного теплообмена. Тепловая нагрузка определяется при этом по измеренной разности температуры металла и среды, термическому сопротивлению стенки трубы и внутреннему коэффициенту теплоотдачи  $\alpha_2$ . Для уменьшения ошибки, связанной с определением  $\alpha_2$ , температурные вставки желательно устанавливать на трубах, имеющих низкую энтальпию (экономайзерный участок) и достаточно высокую массовую скорость. В этих условиях коэффициент теплоотдачи  $\alpha_2$  может быть с достаточно высокой точностью рассчитан по известным формулам конвективного теплообмена или по номограммам.

Если использовать, например, вставки, изображенные на рисунке 1 и 2, то основная доля погрешности в определении тепловых нагрузок с помощью таких температурных вставок ложится на неточную установку термопар (неопределенность в расстоянии от центра отверстия для термоэлектрического преобразователя до наружной образующей) и на расчетное значение коэффициента теплоотдачи. При этом ошибка в определении тепловой нагрузки даже при тщательной отбраковке вставок достигает 10—15 %.

Несколько большей точности можно добиться, если применить так называемые утолщенные вставки, т. е. вставки, имеющие толщину стенки (на лобовой образующей), большую, чем толщина стенки экранной трубы.

В этом случае толщина стенки выбирается такой, чтобы в радиальном направлении можно было, расположить два термоэлектрических преобразователя на разном расстоянии от наружной образующей. При этом для большей точности измерений термоэлектрические преобразователи можно подсоединить по дифференциальной схеме для замера не абсолютных температур, а их разности.

На рисунке 16 изображено поперечное сечение такой утолщенной вставки. Вставка выполняется из металла той же марки, что и экранная труба, и с равнопроходным внутренним диаметром. Утолщение стенки во вставке выполнено только в секторе, обращенном в сторону топки. Ошибки в определении тепловой нагрузки по перепаду температуры в стенке такой

вставки связаны с точностью определения базы между сверлениями, с растечками теплоты в стенке и с некоторым отличием освещенности такой вставки по сравнению с экранной трубой.

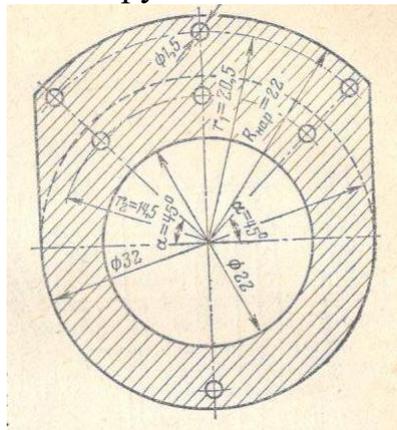


Рисунок 16 – Поперечное сечение утолщенной температурной вставки

При тщательном изготовлении вставок максимальную ошибку в определении базы можно оценить  $\pm 0,2$  мм, что при базе 5,5 мм составляет примерно 3,5 %.

Что касается погрешностей, связанных с растечкой теплоты, то они могут быть учтены установкой дополнительных боковых термопар в тело вставки, как это показано на рисунке 16. Кроме того, коэффициент растечки теплоты в такой вставке можно определить с помощью электро моделирования.

На рисунке 17 изображена вставка НПО ЦКТИ с утолщенной стенкой, в которой растечки теплоты значительно снижены наличием двух радиальных канавок, заполненных огнеупорной массой. Размеры вставки указаны на рисунке. Термоэлектрические преобразователи ХА из проволоки  $\phi 0,3$  мм в изоляции из кварцевой нити установлены в двух отверстиях диаметром 1,5 и 1,3 мм, выполненных на расстоянии соответственно 0,8 мм от наружной и 1,5 мм от внутренней поверхности вставки. Сверление отверстий для термоэлектрических преобразователей производят с помощью специального кондуктора.

Глубину отверстий контролируют при помощи штифта и индикатора. Наружный термоэлектрический преобразователь, проходящий через одну из радиальных канавок, снабжен чехлом из капилляра  $\phi 1,5 \times 0,2$  мм. Горячие спаи приваривают к металлу вставки электроразрядом от батареи конденсаторов. Далее из отверстий концы термоэлектрических преобразователей отводят по фрезерованным радиальным канавкам и выводят за обмуровку котла через выводную трубку диаметром  $12 \times 3$  мм из нержавеющей стали. Термоэлектрические преобразователи в канавках закрывают стальной проволокой диаметром 1,2 мм, которую после укладки расклепывают. Температуру потока измеряют гильзовым термоэлектрическим преобразователем.

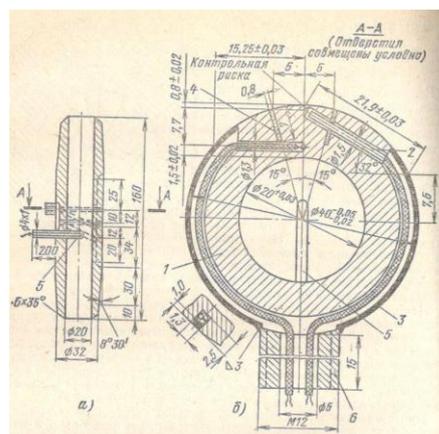


Рисунок 17 – Радиометрическая вставка

а – общий вид; б – сечение А-А; 1 – точечный цилиндр; 2 – капилляр; 3 – стальная проволока диаметром 12 мм; 4 – паз; 5 – гильза; 6 – выводной штуцер.

При анализе экспериментальных данных, полученных с помощью утолщенных вставок любой конструкции, следует иметь в виду, что условия работы таких вставок несколько отличны от условий работы экранной трубы. Эти отличия в первую очередь касаются других по сравнению с экранной трубой условий освещенности выступающей (вследствие большей своей толщины) в топку такой вставки, а также другой (большей) температуры наружной стенки. Последнее может повлиять на измеряемую тепловую нагрузку как из-за изменения толщины, так и из-за характера наружных золовых и шлаковых отложений. Кроме того, из-за трудоемкости и сложности изготовления утолщенных вставок их следует устанавливать лишь в наиболее ответственных местах, после того как другими, менее трудоемкими методами, например с помощью обычных температурных вставок или термозондов, выявлен характер распределения в топке тепловых потоков.

ВНИИАМ разработан метод измерения тепловой нагрузки с помощью температурной вставки обычного типа со сверлеными отверстиями, т.е. вставки, имеющей ту же толщину стенки и диаметр, что и экранная труба. Метод основан на использовании эффекта концентрации локального поля температуры в окрестностях сверленного отверстия, параллельного оси трубы.

Под коэффициентом концентрации температуры подразумевается отношение разности температуры в указанных выше точках отверстия к разности температуры в тех же точках сплошной стенки трубы (не имеющей отверстия) при прочих равных условиях (тепловом потоке внутреннем коэффициенте теплоотдачи, диаметре и толщине стенки и пр.).

Измеряя перепад температуры на стенках отверстия и зная коэффициент концентрации можно рассчитать тепловую нагрузку (плотность теплового потока) экранной трубы. Трудность реализации этого метода заключается в сложности установки двух термоэлектродов в определенных точках отверстия небольшого диаметра (1,5—2,5 мм). Наиболее удобным способом измерения температуры металла в двух противоположных точках отверстия небольшого диаметра представляется дифференциальный способ с использованием в

качестве одного из электродов металла температурной вставки. Другим электродом может служить платина или алюмель.

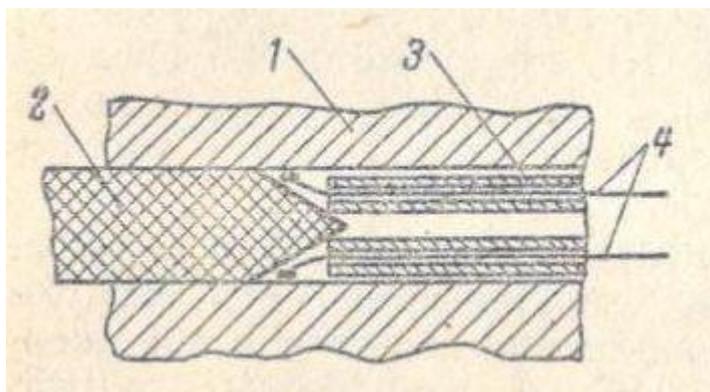


Рисунок 18 – Иллюстрация метода приварки однополюсных термоэлектрических преобразователей для измерения теплового потока в температурной вставке, изображенной на рисунке 2

Металл трубы не является стандартным электродом, поэтому при разработке данной методики исследована стабильность термоэлектрической характеристики такого электрода для разных плавок и разных температурных режимов металла.

Опытные данные по тарировке такого термоэлектрического преобразователя стабильны для разных образцов стали и мало изменяются в процессе работы этой стали на котле.

Рисунок 18 иллюстрирует метод приварки однополюсных термоэлектрических преобразователей в диаметрально противоположных точках отверстия вставки, изображенной на рисунке 2. Установка электродов для приварки горячих концов термоэлектрического преобразователя осуществляется с помощью клиновидного ограничителя, фиксирующего электроды в необходимых точках в момент приварки. Таким образом, можно обеспечить точность приварки горячих концов в осевом направлении  $\pm 0,5$  мм и угловое смещение  $\pm 15^\circ$ . Диаметр электродов в такой конструкции должен быть 0,12—0,15 мм. Приварка термоэлектродов производится также с помощью электроразряда.

### 1.2.3 Измерение температуры металла труб в необогреваемой зоне

Температура металла труб поверхностей нагрева в необогреваемой зоне мало отличается от температуры протекающей по ней среды. Поэтому при необходимости определения температурной разверки среды по виткам пакета поверхности нагрева и в некоторых других случаях о температуре среды судят по показаниям термоэлектрических преобразователей, установленных на трубах вне зоны обогрева. Организация таких измерений сравнительно проста, а сами измерения достаточно представительны и долговечны, что позволяет отказаться от установки гильзовых термоэлектрических преобразователей. Это особенно важно в поверхностях нагрева, выполненных из труб малого

диаметра, в которых установка гильз приводит к заметному сужению проходного сечения трубы. Однако для получения достоверных показаний таких термоэлектрических преобразователей необходимо правильно выбрать способ их крепления и установки, соразмерив трудоемкость и сложность того или иного способа крепления с требуемой для каждого конкретного испытания точностью измерений.

В настоящее время известны конструктивные оформления размещения горячих спаев термоэлектрических преобразователей в необогреваемой зоне, применяемых ведущими организациями при наладке и исследованиях котлов.

На рисунках 19 и 20 изображены распространенные и неоднократно описанные способы креплений поверхностных термоэлектрических преобразователей. Наиболее простым из них является способ, изображенный на рисунке 19, а.

Установка термоэлектродов по этому способу производится отдельно в канавки, которые вырубаются с помощью крейцмейселя непосредственно в теле трубы. После закладки термоэлектродов канавки зачеканивают. Такая установка поверхностных термоэлектрических преобразователей рекомендуется для измерения температуры необогреваемых снаружи толстостенных труб, коллекторов и т. д. Наряду с этим способом можно рекомендовать аналогичную отдельную закладку термоэлектродов в металл, наплавленный или приваренный на поверхности трубы (рисунок 19, б).

На рисунке 19, в показана последовательность операций при отдельной зачеканке термоэлектродов в прорези. Указанные на этом рисунке геометрические размеры выбирают следующим образом, ширина канавки  $a = d - (0,1 \div 0,2)$ , мм; глубина канавки  $b = (0,8 \div 1,0)$ , мм; расстояние между прорезями  $c = 7 - 10$  мм; длина прорези  $l = 10$  мм.

Термоэлектрод закладывают в прорезь при легком постукивании. Благодаря тому, что размеры прорези, несколько меньше термоэлектрода, последний хорошо удерживается в ней, что важно для удобства монтажа. Убедившись в правильности закладки термоэлектродов, легкими ударами производят окончательную их зачеканку.

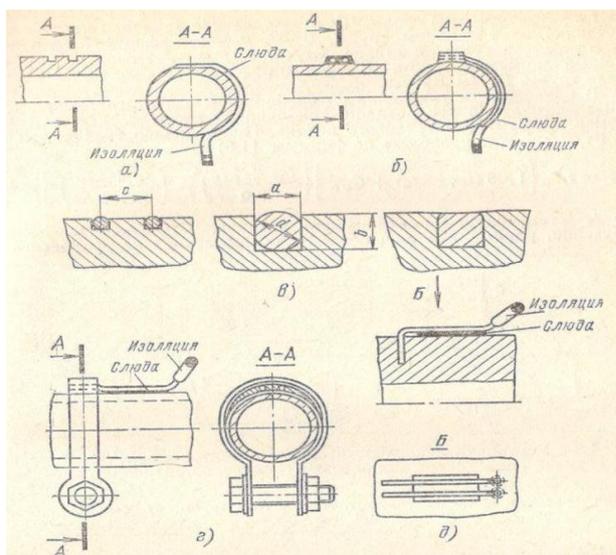


Рисунок 19 – Установка поверхностных термоэлектрических преобразователей с раздельной зачеканкой электродов

а – раздельная зачеканка в прорезях; б – раздельная зачеканка в наплавку или приваренную бобышку; в – последовательность операций при раздельной зачеканке термоэлектродов в прорези; г – раздельная зачеканка в съемную накладку; д – раздельная зачеканка в сверление.

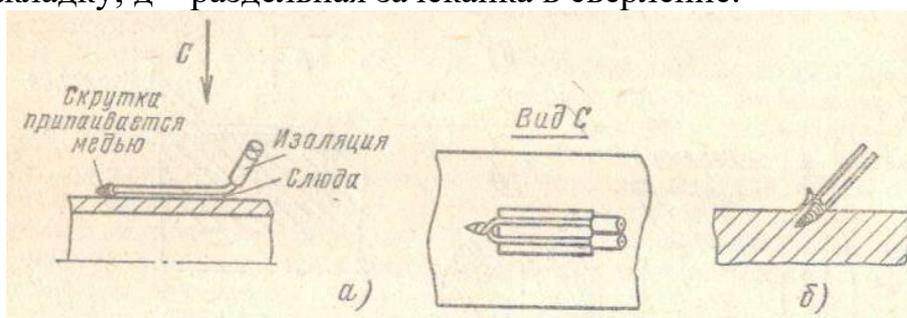


Рисунок 20 – Установка поверхностных термоэлектрических преобразователей, горячий спай которых образован совместной сваркой термоэлектродов

а – приварка или припайка горячего спая к телу трубы; б – зачеканка горячего спая под стружку

Следует иметь в виду, что излишнее зажатие термоэлектродов может привести к их механическому повреждению. Во избежание этого степень раздачи металла следует уменьшать по направлению к выходу термоэлектродов. При установке термоэлектродов прорези выполняют по хорде окружности трубы, развод зубьев ножовки стачивают на наждачном круге до необходимого размера. В других случаях прорези вырубают крейцмейселем. Наплавки выполняют сварочным электродом, применяемым для данной марки стали, с соблюдением основных требований для сварки.

В некоторых случаях, когда производство наплавки или прорезей в стенке трубы затруднено, можно рекомендовать способ раздельной зачеканки

термоэлектродов в прижатую хомутом накладку (рисунок 19, г). Термоэлектроды зачеканивают в такую накладку до установки ее на трубу. Пластина выполняется из того же металла, что и труба, и имеет серповидное сечение, внутренняя поверхность которого плотно прилегает к поверхности трубы. Такой способ позволяет производить установку поверхностных термоэлектрических преобразователей на действующем оборудовании.

На рисунке 19, д показан способ отдельной установки термоэлектродов термоэлектрических преобразователей в толстостенных элементах. Такой способ рекомендуется в тех случаях, когда существуют опасения, что прорези или накладки могут стать источником трещин термической усталости.

В приведенных на рисунке 19 способах отдельной установки термоэлектродов в электрическую цепь термоэлектрического преобразователя вводится металл изделия, наплавки или накладки. При условии, что температура в местах крепления обоих термоэлектродов одинакова, на термо-ЭДС цепи термоэлектрического преобразователя это не влияет: обычно в необогреваемых элементах при расстоянии в несколько миллиметров между канавками это условие выполняется. Преимуществом отдельной установки термоэлектродов является сравнительно более точная фиксация местоположения горячего спая термоэлектрического преобразователя.

При другом варианте изготовления горячих спаев концы термоэлектродов скручивают и сваривают электрической или газовой сваркой. При этом термоэлектроды находятся в электрическом контакте на протяжении всей скрутки, что может привести к существенным ошибкам, если часть скрутки и сваренная головка горячего спая находятся в разных температурных условиях. Наиболее распространенные способы установки термоэлектрических преобразователей, горячий спай которых скручен и сварен, приведены на рисунке 20. Возможна установка такого термоэлектрического преобразователя с помощью накладки, например выполненной в виде металлической пластины.

В некоторых работах в качестве накладки применены тонкостенные трубки малого диаметра из материала, однородного с трубой, к которой производилось измерение. Такая трубка приваривалась к телу основной трубы, затем после установки в нее скрученного и сваренного термоэлектрического преобразователя эта трубка сплющивалась ударами молотка, тем самым обеспечивая контакт и фиксацию термопары.

Измеренная поверхностными термоэлектрическими преобразователями температура может несколько отличаться от температуры среды. Если измерительный участок расположен вне газотока и охлаждается за счет теплоотдачи в окружающую атмосферу, то измеренная температура стенки имеет меньшее значение, чем истинная температура среды. Однако это снижение градусов не велико и при необходимости может быть подсчитано.

Известно, что на температуру стенки трубы оказывает влияние отток или приток теплоты от коллектора, если точка измерения находится сравнительно близко от него. Поэтому важно правильно выбрать место установки термоэлектрического преобразователя.

Для практического пользования можно рекомендовать установку термоэлектрического преобразователя на расстоянии 40 – 50 мм от коллектора.

### 1.2.3.1 Заглубленные термоэлектрические преобразователи

Для измерения температуры металла толстостенных элементов (трубопроводов, коллекторов и т. п.) применяется установка заглубленных термоэлектрических преобразователей. Как и в случае поверхностных термоэлектрических преобразователей, здесь возможны различные способы их установки. Наиболее типичные из них изображены на рисунке 21.

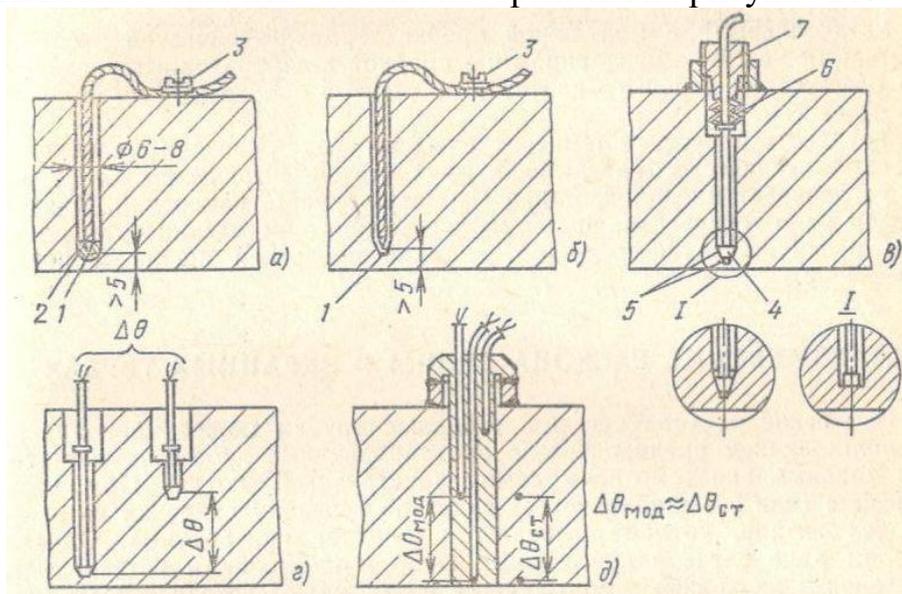


Рисунок 21 – Способы установки глубинных термоэлектрических преобразователей

1 – горячий спай; 2 – пробка (наконечник) из мягкого металла; 3 – фиксирующий винт; 4 – малоинерционный термоэлектрический преобразователь; 5 – контактная поверхность; 6 – прижимная пружина; 7 – контргайка

На рисунке 21, б горячий спай термоэлектрического преобразователя приваривается к металлу стенки толстостенного элемента, при этом способе применяется электросварочный аппарат с временем разряда, регулируемым в зависимости от толщины электрода.

На рисунке 21, в изображен глубинный термоэлектрический преобразователь, контакт горячего спая которого с измеряемой поверхностью элемента обеспечивается прижатием специального термоэлектрического датчика при помощи пружины.

В первом и втором случаях термоэлектрический преобразователь не может быть извлечен из места ее установки. Кроме того, следует иметь в виду, что приварка горячего спая к стенке отверстия неизбежно сопровождается локальными структурными изменениями и, следовательно, изменениями теплофизических свойств металла.

В способе установки термоэлектрических преобразователей, показанном на рисунке 21, в, эти недостатки отсутствуют, однако реализация его связана с

известными трудностями. Контактные поверхности датчика могут иметь коническую или плоскую форму (рисунок 21, в, вид I). Горячий спай и установочное отверстие должны быть тщательно обработаны для обеспечения их плотного контакта, а контактирующие поверхности должны быть защищены от коррозии.

Разность температур в толстостенных элементах определяется путем установки двух термоэлектрических преобразователей с различным заглублением (рисунок 21, з). Можно также использовать специальные монтажные пробки из того же материала, что и исследуемая стенка, с установленными в них термоэлектрическими преобразователями (рисунок 21, д).

Установленный в монтажной пробке термоэлектрический преобразователь может быть протарирован с пробкой в лабораторных условиях. Для обеспечения хорошего контакта со стенкой пробка запрессовывается в отверстие.

Трудность измерения температурных перепадов связана с необходимостью электрического разделения двух термоэлектрических контуров, что увеличивает инерционность и снижает точность измерений. Однако в целом ряде технических задач, например при определении потерь теплоты в окружающую среду и т. д, такие измерения нашли широкое применение.

#### **1.2.4 Измерение расхода среды в экранных трубах**

Измерение расхода среды в экранных трубах может проводиться с использованием предварительно протарированных дроссельных шайб, если таковые предусмотрены самой конструкцией котла. При этом о расходе (или его стабильности) судят по перепаду давления на шайбах тех витков, которые выбраны в качестве контрольных. Однако в целом ряде случаев дроссельных шайб в поверхности нагрева нет, а установка их только в контрольные витки может исказить гидравлическую характеристику последних. В этом случае в качестве измерителя расхода среды в экранных трубах наибольшее распространение при проведении теплогидравлических испытаний получили пневмометрические (напорные) трубки. Эти трубки используются также при измерении расхода в трубах большого диаметра (трубопроводах).

Принцип действия напорных трубок основан на измерении скоростного напора потока в месте расположения трубки. На характеристики напорных трубок влияет совокупность различных факторов. В первую очередь к ним следует отнести конструктивное исполнение трубки, способ ее установки, степень турбулизации потока и т. д.

Пневмометрические трубки удобны для измерения расхода среды в трубах поверхности нагрева котлов, диаметр которых невелик 20 – 30 мм. Такие измерения возможны благодаря малому гидравлическому сопротивлению большинства конструкций трубок. Установка трубки в одной или нескольких трубах пакета поверхности нагрева мало изменяет общее гидравлическое сопротивление исследуемой пробы.



котлоагрегата из линии первого впрыска и среда из трубопровода за переходной зоной.

Изменяя соотношения расходов в линиях, можно получить среду с энтальпией от минимальной, соответствующей параметрам питательной воды, до энтальпии среды за переходной зоной. Располагаемый при этом перепад давлений обеспечивает возможность изменения массовой скорости в исследуемых трубах в весьма широком диапазоне. Распределение расхода по виткам производится при помощи вентиля с байпасами.

Сброс среды после витков осуществляется в общую сбросную линию, в качестве которой используется продолжение линии впрыска питательной воды после разделительной задвижки.

Автономные витки снабжены температурными вставками, предназначенными для измерения температуры металла труб в зоне обогрева. Конструкция температурных вставок, установленных на описываемых автономных витках, изображена на рисунке 2. Схема размещения температурных вставок показана на рисунке 24.

Для регистрации показаний термопар, измеряющих температуру металла труб, в данной работе использовались самопишущие 24-точечные потенциометры типа ЭПП-09. При проведении аналогичных исследований можно рекомендовать появившиеся в настоящее время более совершенные быстрodeйствующие регистраторы, например типа КСП-4.

Температура среды на входе и выходе из витков измерялась протарированными в лабораторных условиях термопарами хромель-алюмель диаметром 0,5 мм. Эти термопары приваривались к доньшкам гильз, установленным в необогреваемых участках трубопроводов непосредственно на входе в витки и на выходе из них. Значение температуры определялось с помощью переносных потенциометров типа ПП-63. Холодные спаи термопар термостатировались. Помимо этого, рядом с гильзами, в которые были приварены термопары хромель-алюмель, были установлены гильзы с термопарами Си-константан диаметр 0,5 мм. По этим термопарам впервые дни после их установки была произведена повторная тарировка термопар хромель-алюмель непосредственно на витке в диапазоне температур 100 – 140°C. В дальнейшем всю настройку режима и обработку опытных данных вели по термопарам хромель-алюмель, а термопары Си-константан ввиду их недолговечности в расчет не принимались.

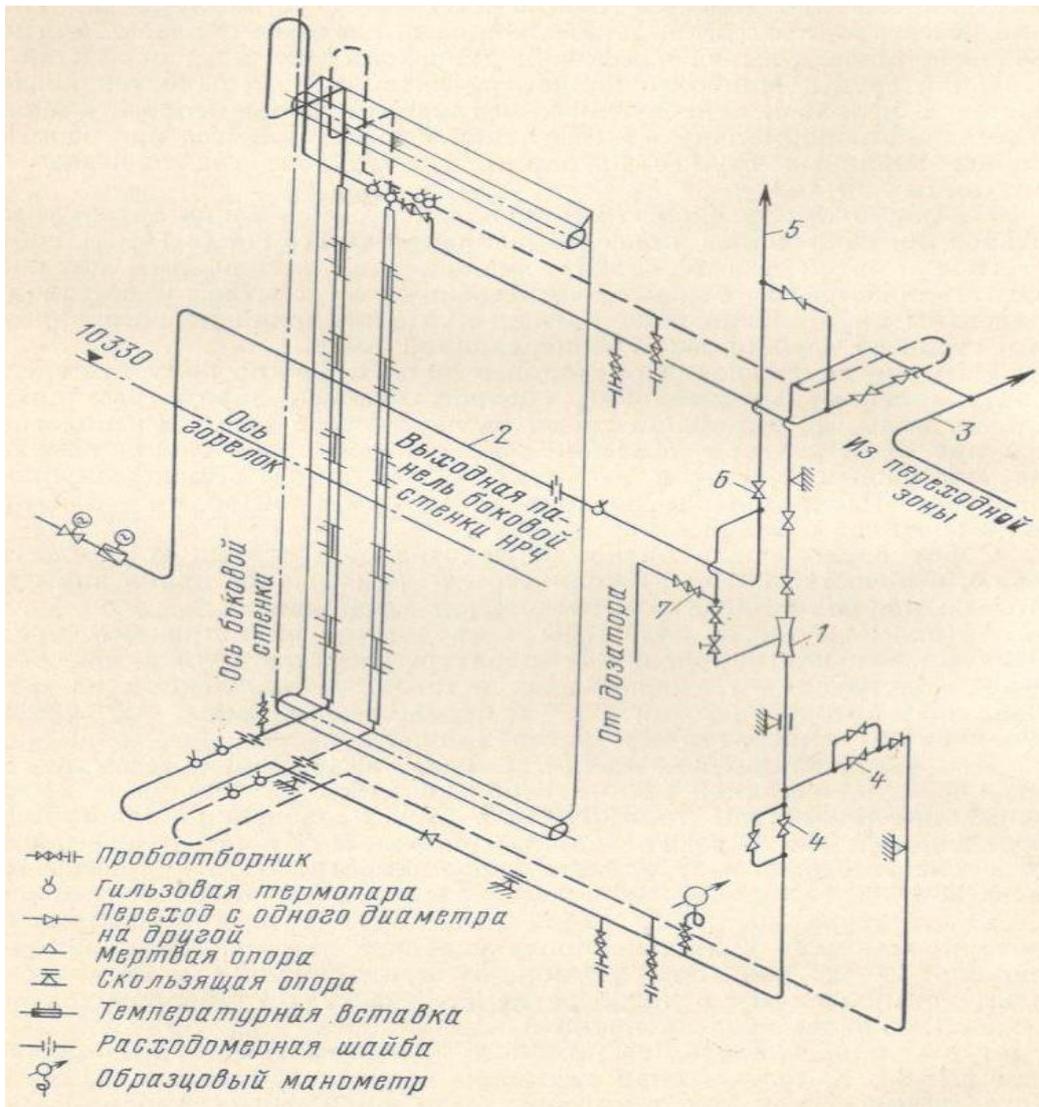


Рисунок 23 – Принципиальная схема экранных труб с автономным питанием

1 – Смесительное устройство; 2 – линия впрыска; 3 – трубопровод после переходной зоны; 4 – регулирующие вентили; 5 – общая сбросная линия; 6 – разделительная задвижка; 7 – линия от насоса-дозатора

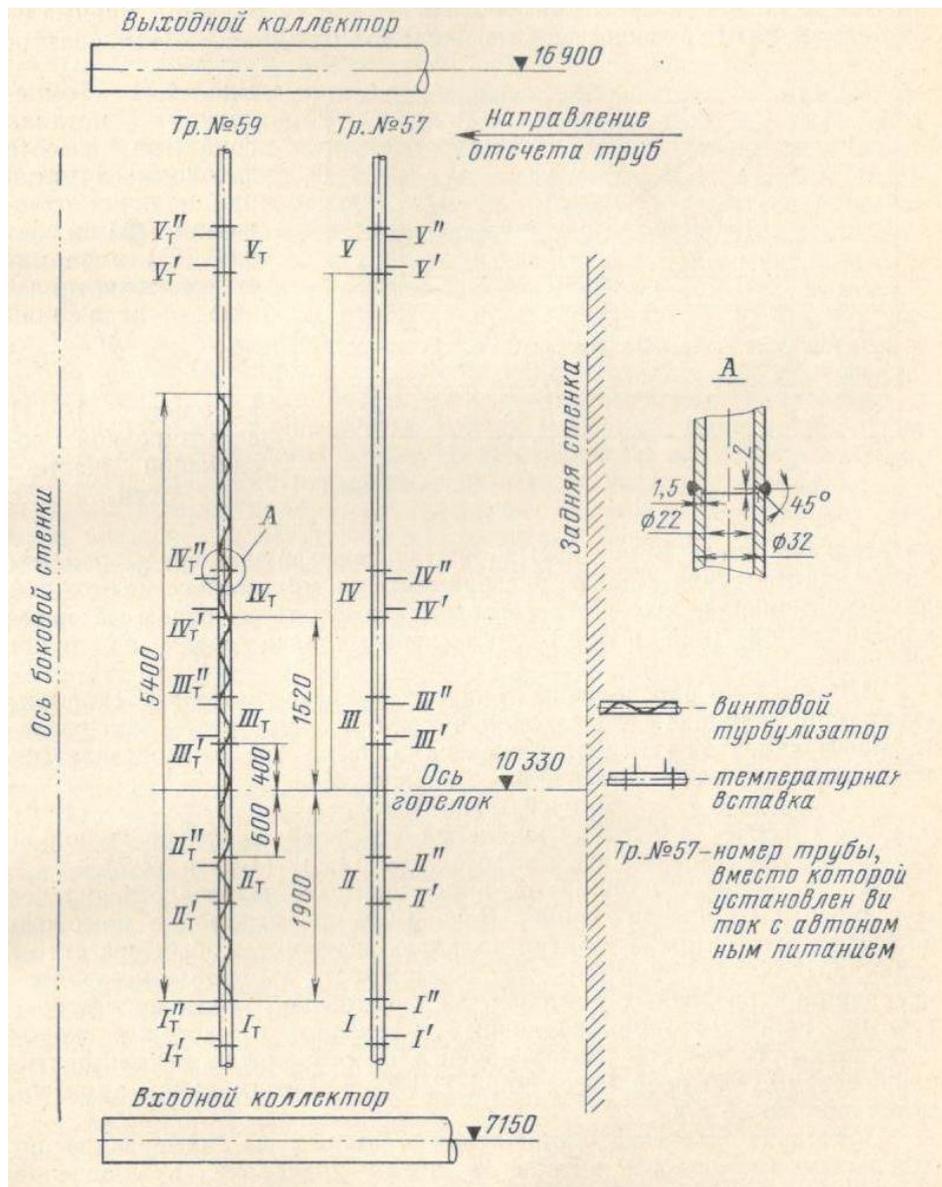


Рисунок 24 – Схема размещения температурных вставок на трубах с автономным питанием

I – V – температурные вставки гладкого витка; I<sub>T</sub> – V<sub>T</sub> – температурные вставки витка с турбулизатором

Измерение расхода среды по виткам осуществлялось с помощью ртутных дифманометров ДТЭ-400 с поисковой магнитно-электронической системой, по которым определялся перепад на протарированных в рабочем диапазоне чисел  $Re$  расходомерных шайбах. Кроме того, параллельно этим были установлены мембранные дифманометры типа ДМ-8 со вторичным прибором ЭПВД, по которым настраивался режим опыта. Давление среды контролировалось образцовым манометром.

Схема присоединения автономных витков и комплекс предусмотренных на них измерений позволил экспериментаторам в сравнительно короткий срок провести детальные исследования тепловосприятия экранных труб и распределения его по высоте топки, а так же влияния на температурный режим таких факторов, как массовой скорости, тепловой нагрузки и энтальпии рабочей среды. Кроме того, по ходу среды витков были проведены одновременно сравнительные измерения температурного режима трубы с внутренней турбулизирующей вставкой и без нее.

Определение эпюры распределения тепловых нагрузок производилось на «экономайзерном режиме», для чего среду в витки подавали только по линии впрыска, обеспечивая, таким образом, минимально возможную ее температуру на входе в витки, равную температуре питательной воды. В остальных опытах температура среды изменялась в соответствии с целью эксперимента от минимально возможной до максимальной, что соответствовало температуре среды за переходной зоной (при полном отключении подачи среды из линии впрыска).

В опытах по определению тепловых нагрузок массовые скорости следует поддерживать достаточно высокими с тем, чтобы при расчете коэффициентов теплоотдачи можно было бы воспользоваться известной формулой конвективного теплообмена

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,4}, \quad (6)$$

В трубопровод, идущий от линии впрыска, непосредственно перед смесителем врезана линия (рисунок 23), по которой с помощью насоса-дозатора можно в витки подавать раствор с любым реагентом заданной концентрации. Это дает возможность проводить исследование влияния различных компонентов питательной воды на температурный режим труб при различных энтальпиях и массовых скоростях среды. В качестве дозирующего насоса можно использовать, например, плунжерный насос типа НД-25 с максимальной производительностью 25 л/ч.

На рисунке 25 в качестве примера приведен график изменения температуры при дозировке в автономный виток соединений жесткости и график распределения по высоте витка термического сопротивления отложений, полученного расчетом.

Описанная выше схема автономных витков при простоте управления достаточно сложна в изготовлении. Последнее может быть оправдано лишь при возникновении необходимости проведения экспериментов, в которых

энтальпия и массовая скорость среды изменяются в широких пределах. Однако в целом ряде случаев возникают более узкие задачи, при решении которых следует использовать автономные витки с меньшими экспериментальными возможностями, но значительно более простой конструкции.

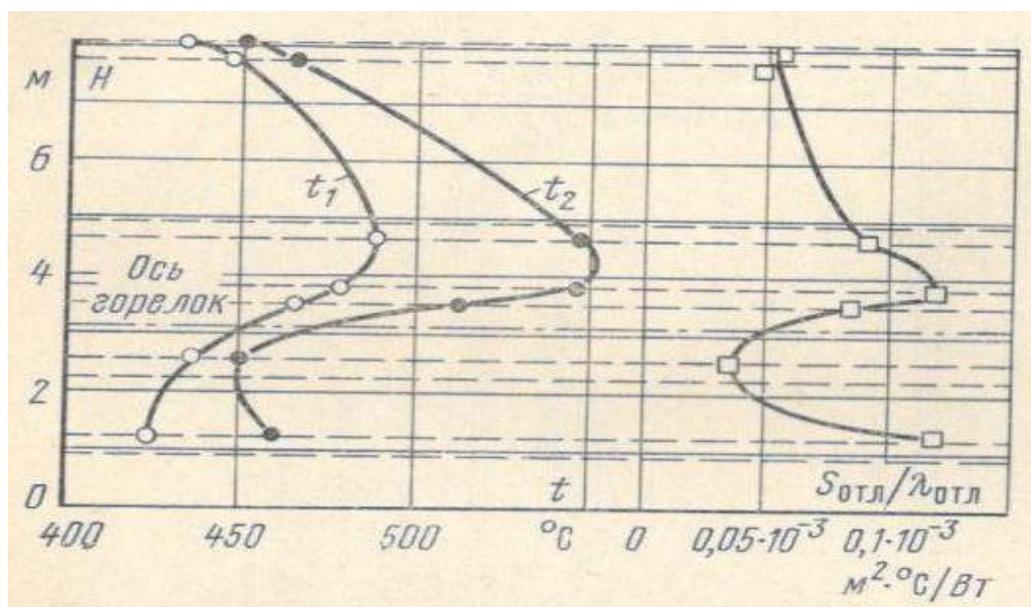


Рисунок 25 – Температура металла труб по высоте автономного витка при наличии внутренних отложений (●) и без них (○) и термическое сопротивление отложений в опытах с дозировкой соединений жесткости

При исследовании запаса устойчивости гидродинамики потока по межвитковой пульсации на котлоагрегате ПК-38 с шахтно-мельничной топкой использовали схему измерений, изображенную на рисунке 26. В качестве исследуемых было выбрано семь из тридцати труб. В этих трубах измерялся перепад давления на дроссельных шайбах. Кроме того, на четырех из семи указанных труб были предусмотрены измерения динамического напора потока малогабаритными напорными трубками. Такая схема позволяет выявить наличие или отсутствие межвитковой пульсации яри различных режимах работы котлоагрегата. Однако с помощью только этой схемы измерений нельзя ответить на вопрос, каков запас устойчивости имеет данная гидродинамическая система, т. е. можно ли и на сколько уменьшить степень дросселирования без опасения получить неустойчивый с точки зрения возникновения межвитковой пульсации режим движения потока. Для этой цели можно использовать выделенный виток, для чего на одной из труб НРЧ устанавливают дополнительную дроссельную шайбу на выходе и два байпаса с вентилями, как это показано на рисунке 26.

Использование выделенного витка позволяет изменять степень дросселирования от опыта к опыту. Это расширяет экспериментальные возможности, так как изменение степени дросселирования на промышленном котлоагрегате потребовало бы его останова для замены всех дроссельных шайб. К тому же, при определенном положении дроссельных вентилях на выделенном витке появляется возможность вывести на перегрев среду на выходе из него и

по приращению ее температуры и расходу определить суммарное тепловосприятие данного витка или в случае навивки типа Рамзина общее тепловосприятие топки в пределах экранирования между входным и выходным коллекторами. Входная дроссельная шайба на выделенном витке устанавливается с таким же проходным диаметром, как и на остальных трубах.

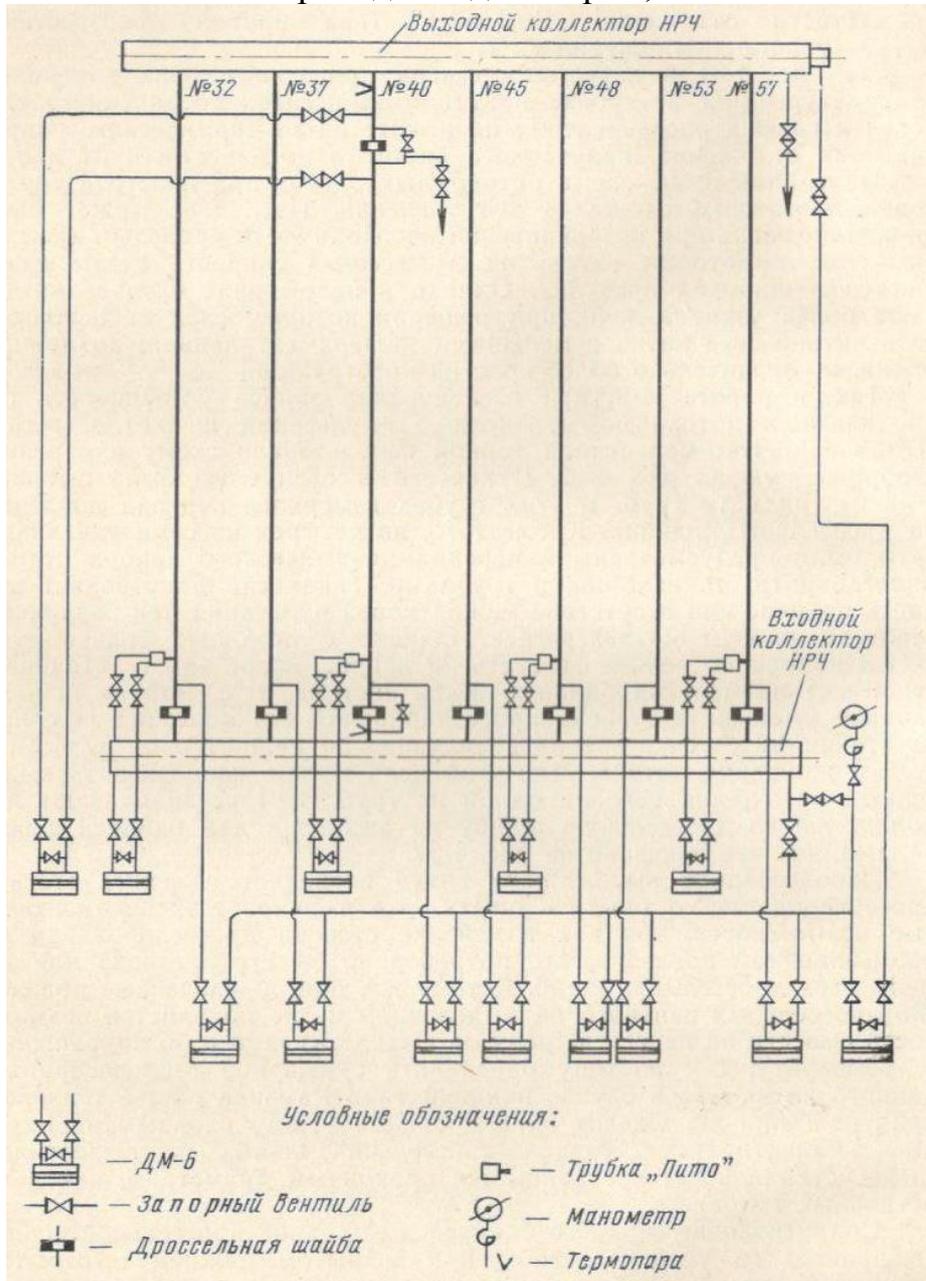


Рисунок 26 – Схема измерений при исследовании запаса устойчивости гидродинамики потока в трубах НРЧ прямоточного котла докритического давления

Сопrotивление верхнего байпаса и выходной дроссельной шайбы выбирается из условия, чтобы при закрытом нижнем и открытом верхнем байпасах сопротивление витка и расход в нем был примерно таким же, как и в других трубах данной полуленты. Это обеспечивает длительную работу выделенного витка без специального контроля за ним. Включение байпасирующих линий определенным образом (нижняя открыта, а верхняя закрыта) дает возможность существенно уменьшить степень дросселирования и провести испытания на устойчивость при прочих примерно равных условиях. При проведении аналогичных работ можно рекомендовать применение двух или трех выделенных витков, объединенных на выходе общим коллектором, что позволит более четко фиксировать фазовые характеристики и определить вид гидродинамической неустойчивости.

### **1.2.6 Измерительная аппаратура и экспериментальный щит измерений**

При выполнении плановых экспериментальных работ заранее проектируется оснастка котлоагрегата измерительной аппаратурой. При этом предусматриваются оптимальное количество этой аппаратуры, а также некоторый ее резерв. Все измерения выводят на экспериментальный щит, представляющий собой типовые металлические панели, на которых устанавливают соответствующие тщательно подобранные приборы. Разметка панелей производится в соответствии с количеством и размерами этих приборов. Экспериментальный щит рекомендуется размещать в непосредственной близости от котлоагрегата на уровне блочного щита или на следующей отметке с тем, чтобы общая длина импульсных линий, а также кабеля и компенсационного провода была бы как можно меньшей. Тем не менее, разнесение щита на нескольких (двух или более) отметках вряд ли может считаться целесообразным, ибо это затрудняет оперативное руководство при проведении испытаний.

Проект экспериментального щита выполняют в соответствии со схемой измерений пароводяного и газоздушного трактов котлоагрегата, на которой также указывают местные конструктивные изменения такие, как, например, разводка труб под лючки для измерения тепловых потоков тепломерами и т. п. На рисунке 27 в качестве примера приведена примененная в исследованиях ВТИ схема размещения температурных вставок и лючков в топке котлоагрегата ПК-37, а на рисунке 28 — принципиальная схема МО ЦКТИ для измерения температурного и гидравлического режимов котлоагрегата ПК-41. Такие схемы должны быть составлены с учетом максимального использования приборов эксплуатационного контроля.

После разработки принципиальной схемы измерений и выбора соответствующей аппаратуры составляют перечень приборов теплотехнического контроля, указывая при этом полное наименование прибора, его тип (марку), наименование измерения и надпись в рамке, которую необходимо сделать к этому прибору, номер позиции.

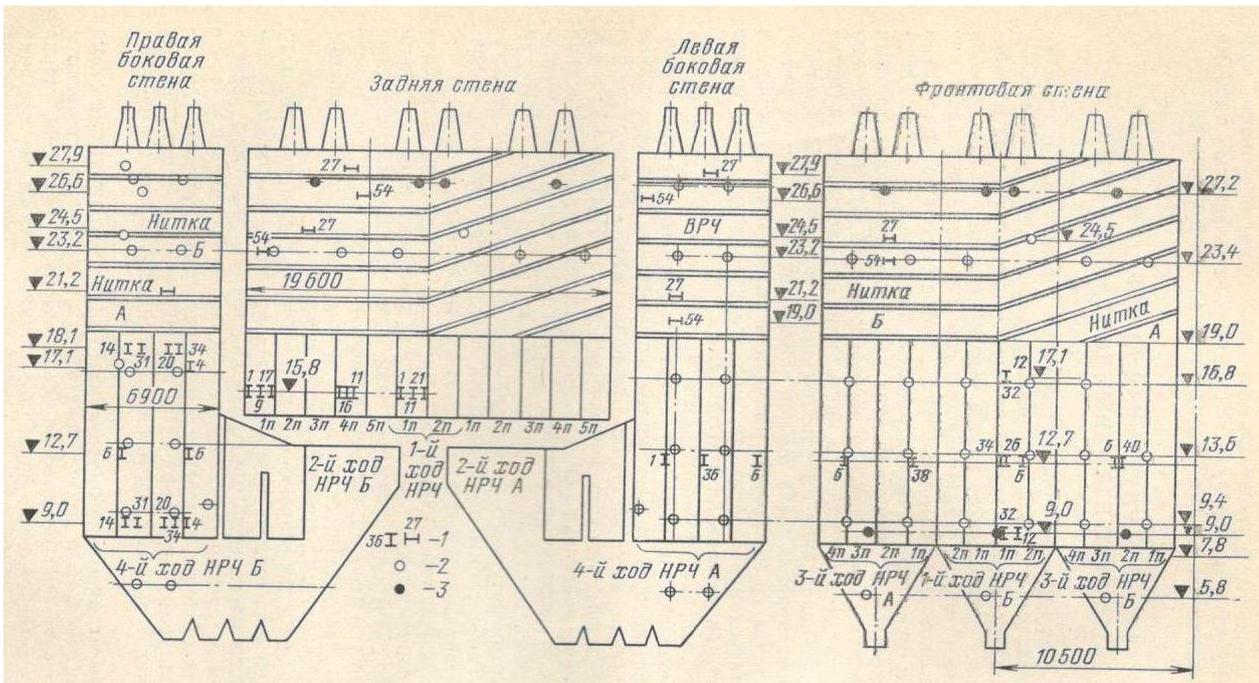


Рисунок 27 – Схема размещения температурных вставок и лючков в топке котлоагрегата ПК-37 (вид на стены топочной камеры снаружи котла)

1 – номер трубы в панели, где установлена температурная вставка; 2 – лючки (разводом труд диаметром 100 мм); 3 – лючки (разводом труд диаметром 22 мм)

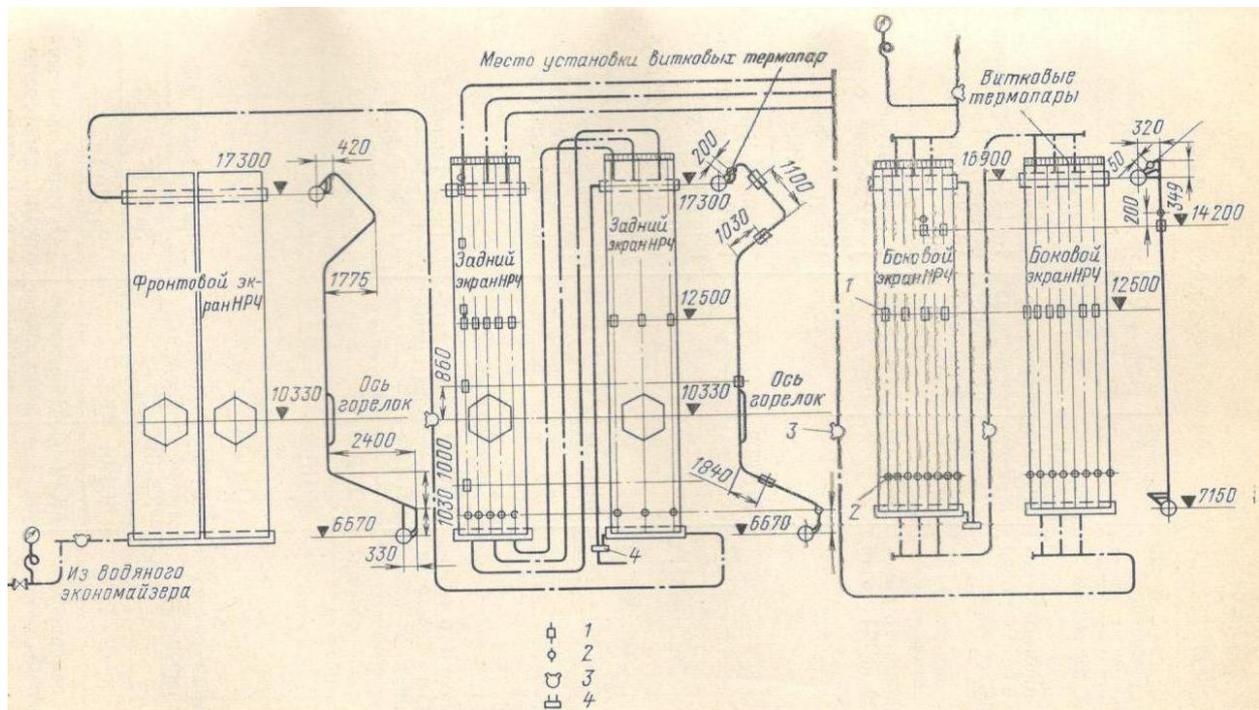


Рисунок 28 – Принципиальная схема измерений температурного и гидравлического режимов котлоагрегата ПК-41

1 – температурная вставка; 2 – напорная трубка; 3 – эксплуатационная гильзовая термопара; 4 – перепад давления между коллекторами

На рисунке 29 показан общий вид экспериментального щита из трех панелей с разметкой отверстий под приборы, указанные в перечне. Экспериментальный щит выполняется из листового железа толщиной 2 – 3 мм и надежно заземляется. Количество панелей в щите определяется объемом измерений и возможностями, а также габаритами используемых приборов. При использовании многоточечных приборов желательно оставлять резервными две-три точки в каждом приборе.

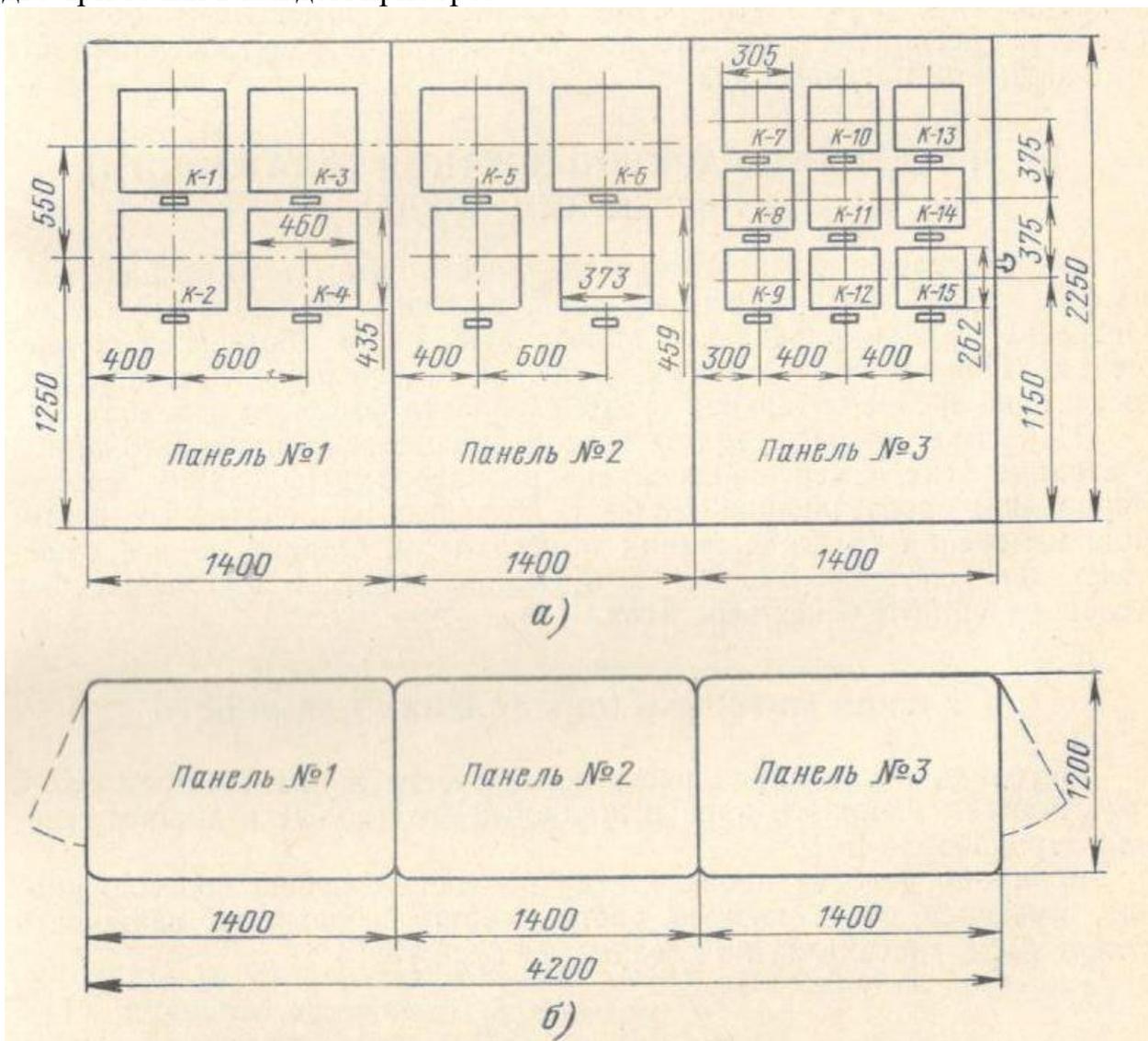


Рисунок 29 – общий вид экспериментального щита

а – вид с лицевой стороны; б – план

В документацию экспериментального щита входит также схема направления кабелей и импульсных труб, на которой указываются точки измерения, их маркировка, соединительные коробки, марка кабеля и компенсационных проводов, а также монтажные указания о способе прокладки (открытым способом или в защитных трубах) и т. д.

### **1.3 Нестандартные способы измерения параметров и характеристик теплоносителя**

При наладке парогенераторов, а также проведении исследовательских работ, часто возникает необходимость в измерении различных величин, характеризующих условия работы объекта. При этом не все величины могут быть определены стандартными приборами, выпускаемыми серийно промышленностью. Поэтому при решении конкретной задачи часто исследователи применяют специально разработанные методы измерений и приборы.

Применение таких приборов при наладке и исследованиях допускается с обязательным условием их периодической тарировки и поверки.

К настоящему времени накоплен большой опыт по созданию новых методов измерения. В данном разделе приводятся только те из них, которые прошли проверку в промышленных и стендовых условиях и могут быть осуществлены с применением обычных средств, имеющихся в достаточном количестве на электростанции или в наладочной организации.

#### **1.3.1 Измерение паросодержания (влажности) и энтальпии среды**

Определение величины паросодержания среды в различных элементах парогенератора, как правило, вызывает большие трудности. Особенно трудно определить паросодержание в обогреваемых элементах. При сверхкритическом давлении наибольшую сложность вызывает измерение энтальпии среды в области фазового перехода.

Известно довольно много способов измерения паросодержания. Методика этих измерений основана на калориметрировании, дросселировании, просвечивании трубы с помощью радиоактивных изотопов, измерении солесодержания потока и др. Однако не все существующие способы могут быть использованы в промышленных условиях на котельных агрегатах.

##### **1.3.1.1 Солевая методика определения влажности**

Методика основана на расчете влажности по измеренным солесодержаниям влажного пара и жидкой фазы (воды) в данном сечении паропровода.

Если определение производится по составляющей солесодержания, имеющей очень низкую растворимость в паре, то влажность может быть рассчитана.

При высоком давлении, когда становится заметной величина растворимости соли в сухом насыщенном паре, необходимо внести поправку на коэффициент распределения.

Ввиду того что в современных парогенераторах уровень солесодержания очень низок, определение влажности целесообразно вести по содержанию натриевых соединений в воде и паре. Это позволяет применять высокочувствительный метод определения содержания  $\text{Na}^+$  с помощью пламенного фотометра.

На прямоточных котлоагрегатах влажность пара в месте установки встроенного сепаратора может быть определена по солесодержанию пара за сепаратором и солесодержанию воды, сбрасываемой из сепаратора.

### 1.3.1.2 Измерение паросодержания с использованием скоростных (напорных) трубок

Этот способ основан на измерении динамических напоров скоростными трубками, установленными на паропроводах пароводяной смеси и сухого насыщенного пара. Принципиально это измерение возможно, если приведенная скорость пара в паропроводе влажного пара более чем в 5 – 7 раз превышает величину критической по срыву пленки скорость.

Для осуществления этого измерения необходимо установить сепаратор на паропроводе влажного пара. При этом перепад на дифманометре, установлена трубках, измеряющих расход пароводяной смеси, определяется скоростной трубкой, установленной до сепаратора, а скоростная трубка для измерения перепада на дифманометре, установленный на трубках, измеряющих расход пара, устанавливается после сепаратора, как это показано на рисунке 30.

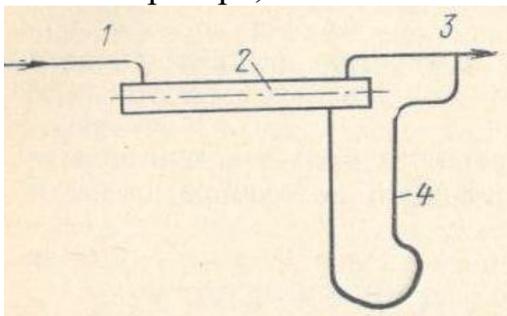


Рисунок 30 – Схема размещения скоростных трубок для измерения влажности

1 – скоростная трубка для определения перепада давления на дифманометре, измеряющая расход пароводяной смеси; 2 – сепаратор; 3 – скоростная трубка для определения перепада давления на дифманометре, измеряющая расход пара; 4 - гидрозатвор

Недостатком этого способа измерения паросодержания является необходимость установки сепаратора для разделения воды и пара высокой эффективности с к. п. д. не менее 98 – 99%. Такой же недостаток имеет влагомер, основанный на измерении расходов осушенного пара и отсепарированной воды. В то же время использование напорной трубки, установленной на паропроводе влажного пара, позволяет избавиться от довольно сложного измерения расхода отсепарированной в сепараторе воды.

Для измерения паросодержания может быть использована бессепараторная схема измерения. Сущность этой схемы заключается в том, что в паропроводе влажного пара устанавливаются скоростную трубку и мерную шайбу, а влажность определяют по отношению перепадов на шайбе и на скоростной трубке.

Этот способ значительно проще схемы с установкой сепараторов, однако может быть рекомендован для измерения паросодержания в диапазоне 50 –

85%. При меньших значениях  $x$  зависимость паросодержания от отношения перепадов на шайбе к перепаду на скоротсной трубке и  $p$  не является однозначной. В связи с этим бессепараторный способ измерения влажности возможно применить только в случае, если известен порядок величины паросодержания.

### 1.3.1.3 Объемный метод определения влажности

Этот метод разработан применительно к низкому и среднему давлению и основан на определении секундных расходов сухого насыщенного пара  $G_{c-n}$  и влажного пара  $O_{в п}$  при одном и том же давлении через калиброванное отверстие малого диаметра.

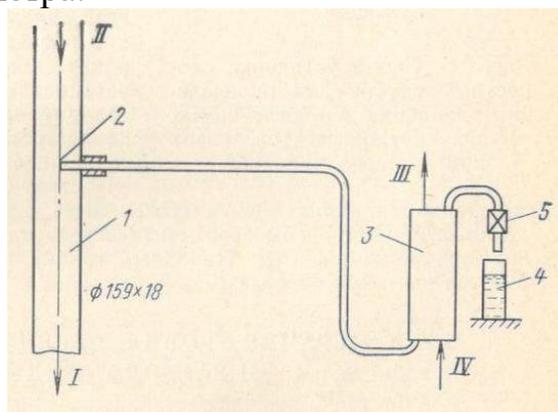


Рисунок 31 – Установка для измерения влажности пара

1 – паропровод; 2 – пароотборное устройство; 3 – холодильник; 4 – мерная емкость; 5 – запорный вентиль; I – пар в пароперегревателе; II – пар из сепаратора; III – выход охлаждающей воды; IV – вход охлаждающей воды

Схема установки для замера влажности показана на рисунке 31. Пар из паропровода через пароотборное устройство направляется в холодильник, в котором пар конденсируется. Охлажденный конденсат через запорный вентиль направляется в мерную емкость. Калиброванная емкость позволяет определить секундный расход пара. Конструкция пароотборного устройства аналогична конструкции однососкового пароотборника.

Основным условием надежной работы устройства, изображенного на рисунке 31, является обеспечение критического перепада давления среды в калиброванном отверстии. Для этого сопротивление пробоотборной линии от калиброванного отверстия и до выхода в мерную емкость 4 должно быть минимальным.

### 1.3.1.4 Определение энтальпии среды сверхкритического давления с помощью напорных трубок

При наладке и исследовании парогенераторов сверхкритического давления можно применять способ определения энтальпии среды с помощью скоростных трубок. Способ заключается в сравнении двух значений динамических напоров, измеряемых в двух различных сечениях трубы. Одна

напорная трубка устанавливается в сечении с известным (или легко определяемым) значением энтальпии, например по известным температуре и давлению среды; вторая напорная трубка устанавливается в сечении, в котором необходимо определить значение энтальпии потока.

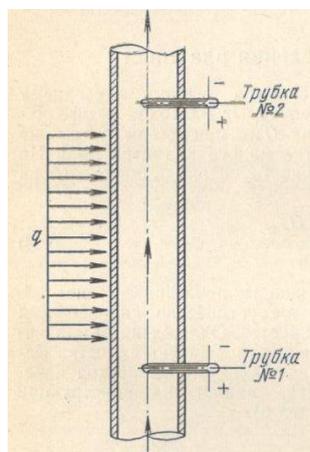


Рисунок 32 – Схема установки скоростных трубок для определения энтальпии в обогреваемых трубах котлоагрегатов, сверх критического давления

На рисунке 32 изображена схема установки напорных трубок. Описанный способ прост, обеспечивает достаточную точность измерения (порядка 5%) и может быть рекомендован для определения энтальпии среды сверхкритического давления, особенно в зоне больших теплоемкостей. Напорные трубки необходимо располагать в трубе вне зоны обогрева.

### 1.3.2 Измерение уровня, перепада давления и расхода среды

#### 1.3.2.1 Измерение уровня воды в сосуде компенсационным способом

Для измерения уровня в сосудах широко применяются жидкостные дифференциальные манометры ДТ-50 и ДТ-150, а также жидкостные дифференциальные манометры индивидуального изготовления. Чувствительность гидростатического измерителя уровня определяется разностью плотностей рабочей жидкости и жидкости, заполняющей дифманометр (рисунок 33).

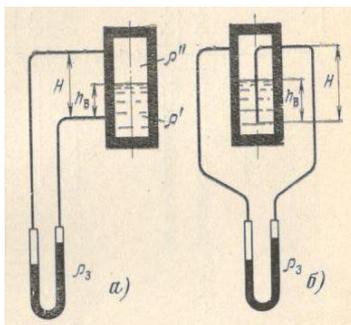


Рисунок 33 – Измерение уровня с помощью дифференциального манометра сверхкритического давления

а – обычная схема; б – компенсационная схема

Если присоединить импульсные трубки дифманометра по схеме (рисунок 33, а), его показания будут определяться не только положением уровня в сосуде, но также и температурой жидкости в импульсной трубке.

При использовании компенсационного способа измерения уровня необходимо перед испытаниями тщательно удалить воздух из импульсных трубок. Необходимо также следить за тем, чтобы уровень в сосуде не снижался ниже торца внутренней части импульсной трубки.

### 1.3.2.2 Измерение перепада давления путем последовательного соединения двух или нескольких дифманометров

В ряде случаев возникает необходимость точного измерения перепада давления, величина которого превышает располагаемый перепад по шкале дифманометра. Для этой цели можно воспользоваться схемой последовательного включения дифманометров (схема Менделеева). Общий перепад давления будет равен сумме перепадов на каждом дифманометре (рисунок 34)

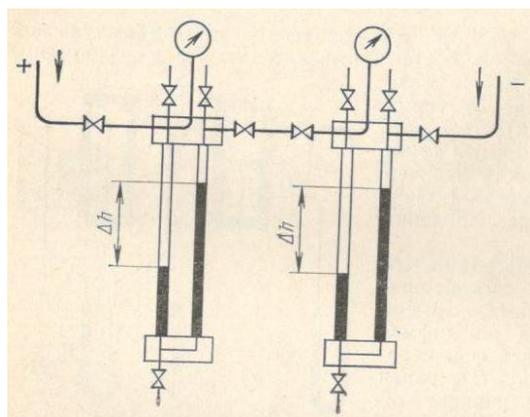


Рисунок 34 – Схема последовательного включения жидкостных дифманометров

Недостатком этой схемы является трудность удаления воздуха из всех соединительных линий дифманометров.

Можно также выполнить специальный дифманометр с двумя визуальными участками, соединенными между собой гибкой стальной трубкой малого диаметра (рисунок 35). Для высокого давления визуальные участки изготавливаются из стекла повышенной вязкости. Взаимное расположение визуальных участков выбирается в зависимости от перепада давления и при необходимости может быть изменено во время эксперимента.

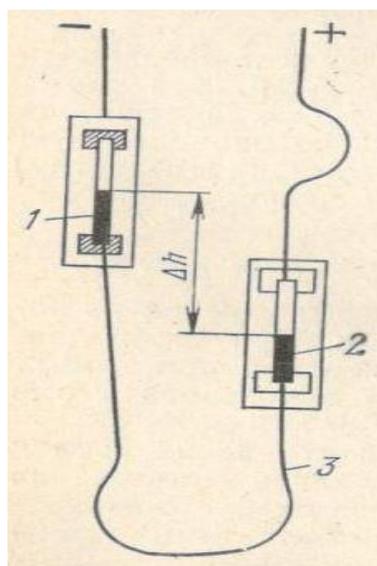


Рисунок 35 – Схема жидкостного дифманометра с подвижными визуальными участками

1, 2 – визуальные участки; 3 – соединительная эластичная трубка.

### 1.3.2.3 Измерение малых перепадов давления индукционным дифманометром

Для исследования гидродинамики прямоточных котлоагрегатов, работающих при давлении до 40,0 МПа, возникает задача измерения малых перепадов давления порядка 1000 – 3000 Па. Для этой цели с достаточно высокой точностью можно применять дифманометр, разработанный в МО ЦКТИ.

Принцип действия этого дифманометра основан на измерении коэффициента связи между обмотками трансформатора при перемещении жидкого металла (ртути) внутри трубок, на которых расположены обмотки трансформатора. Индукционный преобразователь (датчик) выполнен в виде одинаковых трансформаторов, расположенных симметрично на трубках диаметром 16×2 дифманометра, изготовленных из нержавеющей стали.

Первичные обмотки трансформаторов питаются от генератора с частотой 2000 Гц. Наводимые на вторичных обмотках э. д. с. сравниваются между собой, и разностный сигнал подается на фазовый детектор, на входе которого появляется сигнал постоянного тока, пропорциональный измеряемому перепаду. Ртуть при этом играет роль подвижного экрана, который (при возникновении перепада) в одном колене дифманометра уменьшает влияние ферромагнитного стержня на коэффициент трансформации, а в другом увеличивает его.

Конструктивная схема дифманометра представлена на рисунке 36. В конструкции дифманометра предусмотрена возможность продувки импульсных линий, для чего установлены два отсекающих и один перепускной вентили. Заливка и слив ртути осуществляются через специальный штуцер,

установленный в нижней части дифманометра. Катушки датчиков расположены на трубках. Конструкция прибора предусматривает возможность смены стержней в импульсных трубках. Начальная заливка ртутью производится через нижний штуцер примерно до середины трубок. Продувка дифманометра производится так же, как и в любом жидкостном дифманометре.

Описанный прибор довольно прост в обслуживании и может найти применение при необходимости измерения перепадов давления при сверхкритическом давлении.

Недостатками прибора являются нелинейность шкалы и некоторый дрейф нуля. Последнее объясняется влиянием скопления на границе раздела вода – ртуть различных отложений, вызывающих перемещение положения мениска ртути в кольцевом зазоре импульсной трубки.

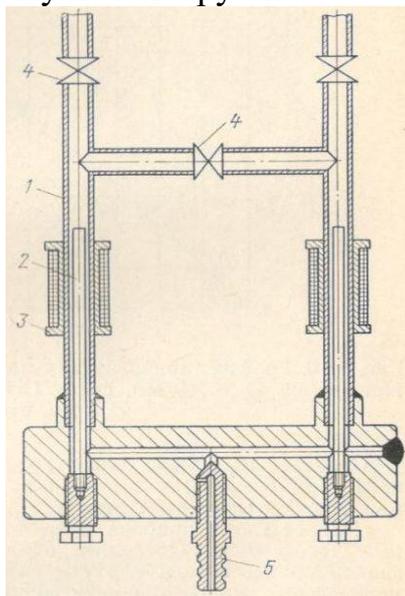


Рисунок 36 – Конструктивная схема индукционного дифманометра

1 – импульсная трубка; 2 – ферромагнитный стержень; 3 – индукционная катушка; 4 – клапан; 5 – штуцер для заливки ртути.

#### 1.3.2.4 Измерение больших перепадов давления дифференциальным трубчатым манометром

Для точного измерения сравнительно больших перепадов давлений (до 1,0 МПа) при высоком абсолютном давлении среды удобно использовать дифференциальный трубчатый манометр, разработанный В.А. Кириллиным. Схема такого дифманометра приведена на рисунке 37,а.

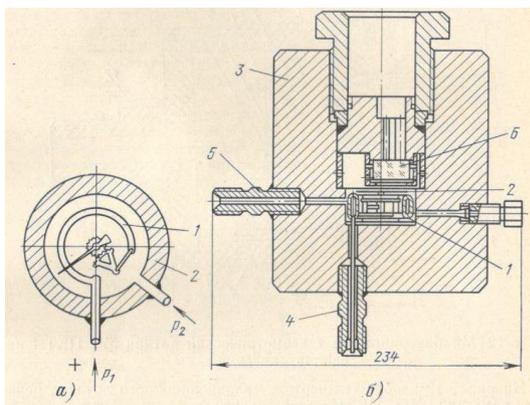


Рисунок 37 – Дифференциальный трубчатый манометр высокого давления

а – схема манометра; б – конструктивное выполнение

Трубчатый манометр *1* небольшого размера (диаметром 40 – 50 мм) со шкалой на 1,0 МПа помещается в сосуд *2*, рассчитанный на высокое давление. В трубку манометра *1* подводится плюсовой отбор давления  $p_1$ , а во внутреннюю полость сосуда *2* – минусовой отбор давления  $p_2$ . При такой конструкции трубчатый манометр измеряет разность давлений  $p_1 - p_2$ . Стрелка манометра и шкала находятся в сосуде *2*, а для отсчета разности давлений в сосуде сделаны окна из оргстекла.

Трубчатый манометр *1*, на оси которого вместо стрелки закреплен легкий лимб *2* с делениями, помещен в сосуд *3*, изготовленный из нержавеющей стали (рисунок 37,б). Сосуд *3* закрыт уплотнением с алюминиевой прокладкой. Подвод отборов давления производится через штуцера *4* и *5*. Наблюдение за лимбом *2* ведется через окно *б*, выполненное из органического стекла. При работе с таким дифманометром надо следить за тем, чтобы разность давлений  $p_1 - p_2$  не превышала предельного давления по шкале манометра, в противном случае манометр может выйти из строя.

### 1.3.2.5 Измерение перепада давления малоинерционным тензометрическим датчиком

В некоторых случаях, например при измерении пульсирующего перепада давления, к динамическим характеристикам дифманометров предъявляют повышенные требования, так как от вида этих характеристик зависит правильность фиксации колебательного процесса. Обычно для исследования межвитковых пульсаций в прямооточных котлах применяются сильфонные или мембранные дифманометры.

Сильфонные дифманометры, особенно с сильфонным чувствительным элементом, рассчитанным на малые перепады, имеют большое время запаздывания – недостаток, которого в известной мере лишены мембранные дифманометры. В конструкции обоих типов дифманометров имеется перемещающийся в канале круглого сечения плунжер, который из-за трения со стенками этого канала может исказить амплитудно-частотную характеристику пульсационного процесса, особенно если наряду с низкочастотными коле-

баниями важно выявить наличие и характер изменения высокочастотной составляющей перепада давления.

На рисунке 38 изображен чертеж малоинерционного датчика перепада давлений МО ЦКТИ, применявшегося также при исследованиях нестационарных процессов в других организациях. В этом приборе в качестве чувствительного элемента используются тензодатчики 1, наклеенные с двух сторон на пластину 2, выполненную в виде балки равного сопротивления. Один конец пластины 2 закреплен на распорке 3 гайкой 4 с шайбой 5, а другой ее конец крепится на основании 6 металлического сильфона 7 гайкой 8. Электрические выводы тензодатчика 1 проходят через четыре уплотнительных патрона 9 в крышке 10 датчика. Последняя крепится к корпусу 11 с помощью резьбового соединения. Датчик подсоединяется к импульсным линиям давления с помощью штуцеров 12 и 13. При появлении разности давлений пластина 2 изгибается, что приводит к разбалансу мостовой схемы, в плечи которой подключены тензодатчики 1. Полученный таким образом, импульс после преобразования фиксируется на ленте регистратора.

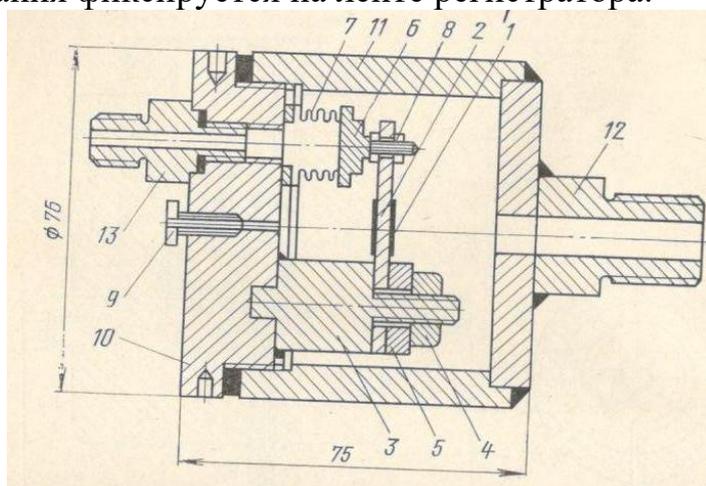


Рисунок 38 – Малоинерционный тензометрический датчик МО ЦКТИ перепада давлений

### 1.3.2.6 Измерение перепада давления дифференциальным манометром ДТЭ-400

Конструкция дифманометра ОРГРЭС высокого давления ДТЭ-400 изображена на рисунке 39. Дифманометр работает по принципу однотрубных приборов. Plusовая часть выполнена в виде сосуда большого диаметра ( $D = 180$  мм), а измерительная трубка изготовлена из немагнитной стали Х18Н10Т. Прибор заливается ртутью, на поверхности которой плавает стальной шарик.

Измерение перепада давления производится путем фиксации уровня (рисунок 40) в правом колене трубки по положению стального шарика с помощью искателя 1 и индикатора 2 уровня. Основным элементом искателя уровня являются две катушки, подсоединяемые к индикатору с помощью гибкого кабеля.

Для нахождения уровня искатель перемещают вручную вдоль измерительной трубки, добиваясь, чтобы стрелка микроманометра индикатора

находилась у нулевой отметки шкалы, что соответствует положению шарика между катушками.

МО ЦКТИ для повышения чувствительности и точности при измерении сравнительно малых перепадов давления (до 490 Па) прибор ДТЭ-400 заливался дихлорэтаном (плотность 2,8 г/см<sup>3</sup>). В изготовленный из круглого полипропиленового стержня поплавков вспрессован металлический стержень.

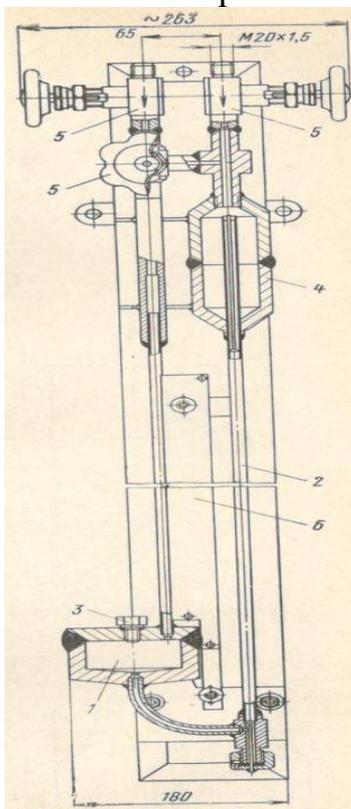


Рисунок 39 – Дифференциальный манометр ОРГРЭС высокого давления ДТЭ-400

1 – сосуд диаметром 80 мм; 2 – измерительная трубка; 3 – штуцер для заливки дифманометра; 4 - ловушка; 5 – вентили; 6 – шкала.

Размер последнего выбирается с таким расчетом, чтобы поплавок плавал на поверхности дихлорэтана в вертикальном положении (приведенная плотность поплавка 2 г/см<sup>3</sup>). Положение уровня определялось так же, как и при работе прибора со стальным шариком.

Достоинством дифманометров, в которых уровень рабочей жидкости определяется по положению стального шарика (стержня), является возможность дистанционной передачи показаний.

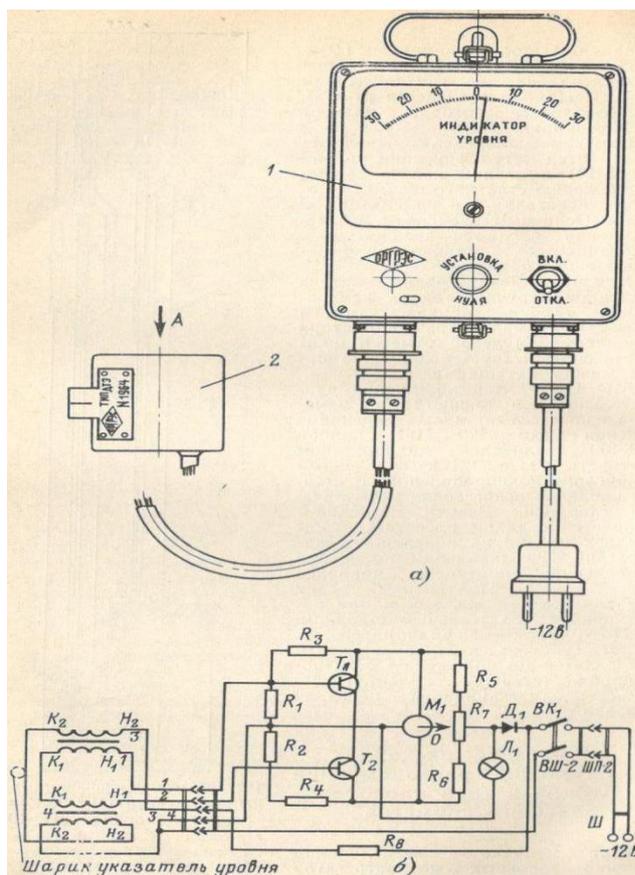


Рисунок 40 – Искатель уровня

а – общий вид; б – электрическая схема.

### 1.3.2.7 Измерение расхода измерительной расходомерной трубкой в трубопроводе большого диаметра

При наладке и исследовании особенно головных котлоагрегатов часто возникает необходимость в измерении расхода среды в трубопроводе большого диаметра, в котором не предусмотрена установка расходомерной шайбы или сопла для эксплуатационных целей. Иногда установка этих устройств не может быть произведена во время наладки не только из-за сложности монтажа и недостатка времени, но и из-за ограничения по располагаемому давлению или других технологических причин. В этом случае для измерения расхода можно использовать напорные расходомерные трубки.

Ниже приводится описание трубки ВТИ простейшей конструкции, изготовление которой можно организовать в производственных условиях непосредственно на электростанции. Чертеж расходомерной трубки и схема ее установки в трубопроводе большого диаметра приведены на рисунке 41.

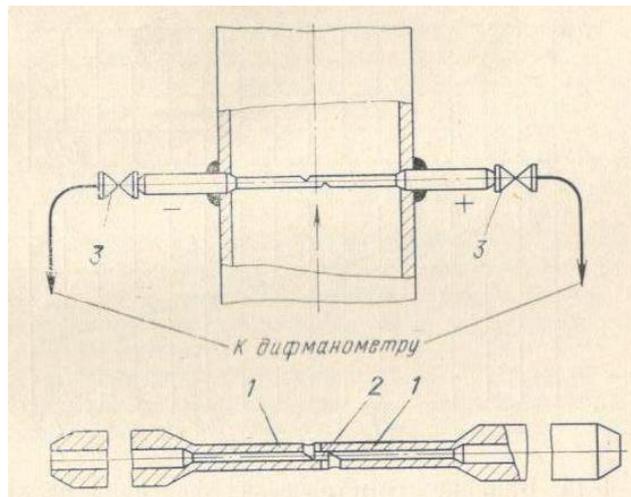


Рисунок 41 – Измерительная расходомерная трубка для трубопровода большого диаметра

1 – труба диаметром 32×5; 2 – раздельная перегородка; 3 – запорный вентиль.

Это устройство выполнено из двух участков труб малого по сравнению с трубопроводом диаметра. Эти участки сварены между собой и с разделительной перегородкой, разделяющей их внутренние полости. Расходомерная трубка установлена по диаметру трубопровода, а заборные отверстия в ней диаметром 3 мм выполнены одно по направлению, а другое против направления потока, по обе стороны от продольной оси трубопровода.

#### 1.4 Наладка и контроль водного режима котлоагрегата

В прямоточном котлоагрегате все вещества, поступающие в него с питательной водой, либо задерживаются на поверхностях, либо уносятся с паром. Если в питательной воде преобладают легко растворимые соединения, то они преимущественно откладываются в проточной части турбины, что приводит к снижению ее к. п. д. и ограничению мощности. Если же с питательной водой поступают трудно растворимые соединения, в том числе и продукты коррозии, то это приводит к образованию отложений преимущественно на поверхностях нагрева и тем самым снижает надежность их работы. Поэтому на всех тепловых электростанциях организуется вывод примесей из питательной воды, что обеспечивает поддержание концентрации этих примесей на допустимом уровне, определяемом соответствующими нормами.

Контроль за фактическим состоянием водного режима котлоагрегатов осуществляется анализом отбираемых по тракту этих установок проб воды и пара.

Опыт эксплуатации показывает, что даже при тщательном соблюдении всех требований по концентрации примесей в питательной воде определенная их часть откладывается на поверхностях нагрева, образуя вместе с окислами

железа прочный слой отложений. Поэтому одним из основных требований, вытекающих из условия обеспечения надежной работы современных котлоагрегатов сверхкритических параметров, является проведение периодических химических промывок поверхностей нагрева по специальной технологии.

Одним из возможных источников попадания примесей в пароводяной тракт котлоагрегатов является добавочная вода, вводимая в цикл для покрытия потерь, вызванных утечкой воды и пара. На ряде электростанций эта добавочная вода получается при помощи испарительных установок.

Правила технической эксплуатации оборудования электростанций предусматривают мероприятия по предупреждению коррозии пароводяного тракта установок во время их простоя.

#### **1.4.1 Отбор проб среды из пароводяного тракта котлоагрегата**

При наладке водного режима котельных агрегатов, определении мест отложений труднорастворимых соединений по его пароводяному тракту, контроле интенсивности отмывки поверхностей нагрева, определении величины влажности пара и др. производятся химические и физико-химические анализы проб среды. Для правильного суждения о величине концентрации примесей отобранная проба должна быть представительной (контрольной), т. е. содержание примесей в ней должно быть таким же, как в основном потоке.

Наиболее существенными факторами, влияющими на представительность пробы, являются:

- а) состояние потока – однофазный или двухфазный;
- б) физико-химические свойства примесей и их агрегатное состояние в потоке (в растворенном состоянии или в виде взвеси);
- в) условия гидродинамики потока (скорость, структура потока, влажность);
- г) геометрические условия (положение трубы, наличие местных сопротивлений и др.);
- д) конструкция устройства для отбора пробы.

Если вещества находятся в однофазной среде (воде или паре) в растворенном состоянии, отбор представительной (контрольной) пробы этой среды не представляет затруднений, ибо независимо от скорости среды, положения трубопровода, конструкции пробоотборного устройства и расхода пробы концентрация растворенных веществ в пробе и питательной воде будет одна и та же. При нормируемом качестве питательной воды прямооточных парогенераторов вещества, растворенные в воде (аммиак, кремниевая кислота, соединения натрия, кальция и магния), обычно почти полностью переходят в пар, что позволяет ограничиться определением концентрации ряда примесей только в питательной воде.

В ряде случаев при наладке котлоагрегата возникает необходимость отбора пробы двухфазного потока, в частности влажность пара. В данных условиях проба может считаться представительной (контрольной), если влажность отобранной пробы равна средней влажности потока в месте отбора.

Добиться полного равенства влажностей очень трудно, т.к. на условия отбора в полной мере оказывают влияние все факторы, перечисленные в пп. «б», «в», «г» и «д».

При движении влажного пара закон распределения влажности по сечению паропровода может быть самым разнообразным. Например, при вращении потока (в сепараторе, циклоне, на поворотах паропровода) жидкая фаза отжимается к стенкам трубы.

Сущность способа организации отбора представительной пробы влажного пара из паропровода заключается в следующем. В паропроводе в месте отбора пробы создается скорость влажного пара, при которой устанавливается равномерное распределение влажности по всему сечению. Эта скорость примерно в 5—7 раз превышает критическую по срыву пленки. Создав, таким образом, необходимый режим течения пара в паропроводе, отбирают пробу из центра потока при помощи пробоотборного зонда. Зонд может быть одно- или многососковым. Диаметр отверстия в зоне выбирается в зависимости от потребной величины расхода пробы, но выполнять отверстия с диаметром, меньшим 2 – 3 мм, не рекомендуется. При заданных геометрических размерах зонда и паропровода расход пробы не может быть произвольным. Величина расхода пробы должна устанавливаться таким образом, чтобы скорость пара в устье зонда была равна приведенной скорости пара в сечении трубы, в котором установлен пробоотборный зонд.

Проба может отбираться как на горизонтальных, так и на вертикальных участках паропровода. При установке пробоотборника на вертикальном участке паропровода следует отдать предпочтение участкам с опускным движением влажного пара. Наличие местных сопротивлений перед пробоотборниками может существенно исказить пробу. Особенно сильно искажается проба, если пробоотборник установлен за поворотом паропровода в  $90^\circ$ .

Недопустимо также устанавливать пробоотборник непосредственно за арматурой, гильзой для измерения температуры и другими местными сопротивлениями. Расстояние от местного сопротивления, поворота паропровода до пробоотборного зонда при отборе пробы влажного пара должно быть не меньше 30 – 40 калибров паропровода.

Если в паропроводе скорость пара меньше величины, необходимой для установления равномерного поля влажности при данном давлении, применяется пробоотборное устройство БПК, показанное на рисунке 42.

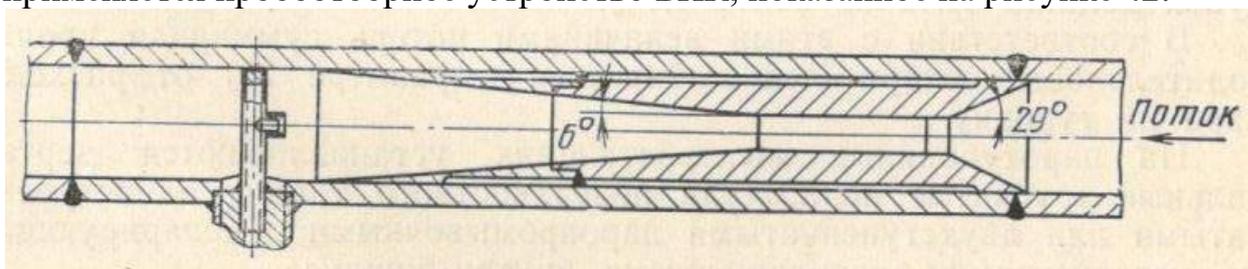


Рисунок 42 – Пробоотборное устройство БПК

Это устройство состоит из смесительной камеры и однососкового зонда. В смесительной камере благодаря высокой скорости пара происходит интенсивное дробление и перемешивание потока.

Применение пробоотборного устройства БКП существенно снижает влияние местного сопротивления, что позволяет резко сократить допустимое расстояние от местного сопротивления до пробоотборного зонда.

#### **1.4.2 Термическая обработка добавочной воды. Проведение химических очисток оборудования блоков сверхкритического давления**

Значительное место в обеспечении надежной и экономичной работы электростанций занимает подготовка добавочной воды, служащей для восполнения потерь питательной воды парогенераторов. Имеется ряд способов получения добавочной воды. Одним из них является термический способ с использованием испарительных установок. Выбор того или иного способа получения добавочной воды определяется на основании технико-экономического расчета. При солесодержании исходной воды больше 400 мг/кг экономически целесообразно применять испарители. Установка на испарителях паропромывочного устройства МО ЦКТИ существенно расширяет диапазон их применения, в частности позволяет использовать испарители для получения добавочной воды высокого качества, пригодной для прямоточных парогенераторов сверхкритических параметров.

Испарители, устанавливаемые на тепловых электростанциях, предназначены для получения дистиллята, восполняющего потери пара и конденсата в цикле, а также для выработки пара на общестанционные нужды и внешним потребителям.

По правилам технической эксплуатации (ПТЭ) внутростанционные потери конденсата и пара (без учета продувок) не должны превышать на КЭС и отопительных ТЭЦ 1 % для котлоагрегатов с давлением 10,0 МПа и выше и 1,5 % для котлоагрегатов с давлением ниже 10,0 МПа. Для ТЭЦ с промышленными отборами допускается увеличение внутренних потерь в 1,3 раза. Величина продувок должна быть не более 0,5%.

В соответствии с этими величинами потерь суммарная производительность испарителей выбирается в размере 2% от расхода пара на турбину.

На паротурбинных электростанциях устанавливаются вертикальные трубчатые испарители поверхностного типа с одноступенчатыми или двухступенчатыми паропромывочными и сепарирующими устройствами, расположенными внутри корпуса.

Для восполнения потерь пара и конденсата в установках с прямоточными котлоагрегатами любого давления и с котлоагрегатами с естественной циркуляцией давлением больше 14,0 МПа применяются испарители с двухступенчатой промывкой. При меньшем давлении применяется одноступенчатая промывка. Качество дистиллята испарителей обеспечивается при изменении их производительности в пределах от 40 до 100%.

Не происходит вытеснения пара из отбора более низкого давления вторичным паром испарителя. Ввиду увеличения капитальных затрат на изготовление дополнительного подогревателя целесообразность осуществления схемы определяется на основании технико-экономического расчета. Расчеты, проведенные МО ЦКТИ, показали, что для блоков 300 и 500 МВт включение испарителей по схеме «без потери потенциала» экономически выгодно.

#### **1.4.2.1 Проведение химических очисток оборудования блоков сверхкритического давления**

Основной задачей химической очистки является обеспечение надежной и экономичной эксплуатации оборудования и в первую очередь предотвращение повреждения труб вследствие их перегрева, вызванного наличием внутренних отложений. Предпусковая очистка, кроме того, позволяет достаточно быстро обеспечить необходимую чистоту пара, выдаваемого котлоагрегатом, и создает благоприятные условия работы установки для очистки конденсата за счет снижения концентрации окислов железа в цикле блока в первый период эксплуатации.

Все котлоагрегаты давлением 10,0 МПа и выше должны подвергаться предпусковой химической очистке. Периодичность проведения эксплуатационных химических очисток определяется условиями их эксплуатации. Так, для газомазутных прямоточных котлоагрегатов СКД блоков 300 МВт при современном состоянии водного режима она составляет 4 – 5 тыс. ч, для аналогичных пылеугольных котлоагрегатов – 8 – 10 тыс. ч, для котлоагрегатов с циклонными предтопками – 8 – 10 тыс. ч.

При проведении предпусковых химических очисток первоначально производят интенсивную водную промывку со скоростями 1 – 2 м/с. Следующей операцией является щелочение раствором аммиака, часто с добавлением поверхностно-активных соединений ОП-7 или ОП-Ю. В последнее время эти присадки вводят непосредственно в промывочный раствор, а стадию щелочения опускают.

Основной стадией химической очистки является обработка реагентами, удаляющими окислы железа. Такими реагентами могут быть минеральные и органические кислоты, комплексообразующие реагенты. Из минеральных кислот практически применяют только соляную, причем для исключения воздействия хлор-иона на аустенитные стали в контур циркуляции включают только поверхности нагрева котлоагрегата, расположенные до встроенной задвижки. Существенным недостатком соляной кислоты является также образование большого количества взвеси, которая может осаждаться в коллекторах и на других участках промываемого контура с вялой циркуляцией промывочного раствора и приводить к забиванию отдельных змеевиков.

Из органических кислот для предпусковых химических очисток применяют лимонную, адипиновую, фталевую, малеиновую и некоторые другие. Наиболее распространенной и удобной в применении является лимонная кислота, точнее ее однозамещенная аммонийная соль, получающаяся в процессе приготовления реагентов. Однако широкое использование лимонной

кислоты ограничивается ее дефицитностью.

Все большее распространение для целей предпусковых химических очисток приобретают композиции органических кислот с комплексонами, в основном этилендиаминтетрауксусной кислотой (ЭДТК) и ее двухзамещенной натриевой солью (трилон Б). Такие композиции удобны для использования и весьма эффективны. К тому же многие из них обладают повышенной, по сравнению со стехиометрической, железоемкостью. Это в первую очередь относится к композиции, содержащей трилон Б, лимонную кислоту и гидразингидрат. Композиции на основе комплексонов наиболее применимы и для эксплуатационных химических очисток в тех случаях, когда промывка производится по замкнутому контуру, в который включено большинство поверхностей нагрева котлоагрегата.

В связи с относительно небольшим межпромывочным периодом работы прямоточных котлоагрегатов СКД проведение эксплуатационных химических очисток с использованием традиционных схем промывки стало неприемлемым из-за их относительной сложности и большой затраты времени и реагентов. Практически такие промывки можно осуществлять лишь в период капитальных или расширенных текущих ремонтов блока. В то же время специфические особенности, определяющие необходимость частого проведения эксплуатационных химических очисток, позволили существенно упростить их технологию. Это, прежде всего, стало возможным благодаря тому, что интенсивное накопление отложений (причем в основном железистых) происходит на ограниченных участках водопарового тракта, в основном в НРЧ.

Способ проведения эксплуатационной химической очистки прямоточных котлоагрегатов СКД по упрощенной технологии был разработан в МО ЦКТИ. Сущность способа заключается в том, что при проведении обычной горячей водной промывки по разомкнутому контуру производят дозировку реагента перед поверхностью нагрева, из которой необходимо удалить железистые отложения. В качестве реагента предпочтительно использовать двухзамещенную аммонийную соль ЭДТК. Эта соль вводится в тракт котлоагрегата с помощью дозирочных насосов в виде 30 – 40% раствора с таким расчетом, чтобы ее концентрация в промывочном растворе составила 0,03 – 0,05 %. Скорость движения промывочного раствора должны быть не менее 1,5 – 2 м/с, а температура 150 – 170 °С. При таких условиях за 4 – 6 ч удается достигнуть эффективного удаления отложений при их количестве 150 – 250 г/м<sup>2</sup>. По окончании дозировки реагента водную промывку продолжают еще 1 – 2 ч, после чего либо переходят к промывке следующей нитки котлоагрегата (в этом случае в отмытой нитке должен быть сохранен небольшой проток воды, 5 – 10 т/ч), либо начинают операции по растопке котлоагрегата. Ввод котлоагрегата в эксплуатацию сразу же после завершения промывки позволяет исключить стадию пассивации.

Опыт показал, что образование на поверхности металла защитной пленки магнетита в этом случае происходит очень быстро, уже в процессе вывода котла на рабочие параметры. Железосодержание пара на выходе из котлоагрегата снижается до обычного уровня в течение нескольких часов.

Непрерывным условием эффективности химической очистки по описанной технологии является обеспечение равномерной раздачи реагента по всем параллельно включенным трубам промываемой поверхности нагрева. Это следует иметь в виду при выборе места ввода концентрированного раствора реагента.

Так, например, когда среда подается в промываемую поверхность нагрева не по одному, а по нескольким трубопроводам, необходимо вводить реагент равномерно во все подводящие трубопроводы, причем в таком месте, чтобы обеспечить перемешивание раствора с водой до его попадания в трубы поверхности нагрева.

В тех случаях, когда химическая очистка проводится без применения ингибиторов, протекание коррозии очищенной поверхности металла приводит к значительному перерасходу ЭДТК и не позволяет подвергать промывке достаточно большие поверхности нагрева котлов. Так, при скорости коррозии основного металла  $30 - 40 \text{ г}/(\text{м}^2\text{-ч})$  (это значение соответствует выбранным параметрам эксплуатационной химической очистки) может быть очищена поверхность, не превышающая  $400 \text{ м}^2$ . В пределах этой поверхности весь реагент будет израсходован даже в том случае, если она полностью очищена от отложений.

Поэтому при использовании для химической очистки аммонийной соли ЭДТК необходимо применение ингибиторов коррозии.

Эти ингибиторы в композиции с поверхностно-активными соединениями ОП-7 или ОП-Ю позволяют снизить коррозионную активность раствора аммонийной соли ЭДТК по отношению к углеродистой стали в  $20 - 50$  раз (до значений, меньших  $1 \text{ г}/(\text{м}^2\text{-ч})$ ). Необходимая концентрация ингибитора составляет около  $0,05 \text{ г}/\text{л}$  (в смеси с таким же количеством ОП-7 или ОП-Ю).

При практическом осуществлении эксплуатационной химической очистки поверхностей нагрева котлоагрегата ингибированным раствором аммонийной соли ЭДТК в отдельном баке готовят водный раствор, содержащий  $20 \%$  ингибитора и  $20 \%$  ОП-7 или ОП-Ю. Раствор должен быть подогрет до  $40 - 50^\circ\text{C}$ . Этот раствор дозировочным насосом подают в ту же линию, что и концентрированный раствор аммонийной соли ЭДТК. Производительность насоса должна быть такой, чтобы концентрация ингибитора в промывочном контуре составляла около  $0,05 \text{ г}/\text{л}$ .

Ингибиторный эффект при использовании известных ингибиторов в значительной степени снижается в присутствии активирующих ионов (хлориды, сульфаты) и кислорода. Поэтому химическую очистку необходимо проводить на деаэрированной обессоленной воде.

В последнее время эксплуатационные химические очистки поверхностей нагрева стали проводиться на всех котлоагрегатах сверхкритического давления. Их регулярное проведение позволило избежать опасных отложений в наиболее теплонапряженных поверхностях нагрева. Осуществляются они эксплуатационным персоналом во время любого останова блока, поскольку при этом не требуется создание специальной схемы, а продолжительность про-

мывки одной нитки котлоагрегата не превышает 8 ч. Промывки отдельных ниток котлоагрегата можно производить при различных остановах блока.

Одним из важных критериев определения необходимости проведения химических очисток, а также их эффективности является количество отложений на внутренней поверхности труб. В настоящее время разработано несколько методов определения количества отложений на образцах труб как химических, так и механических. В тех случаях, когда отложения рыхлые, обычно применяют механические методы, а при плотных отложениях, прочно связанных с поверхностью металла, прибегают к их химическому растворению (обычно катодное травление).

При проведении предпусковых очисток загрязнение внутренней поверхности труб связано в основном с образованием окисной пленки за счет атмосферной коррозии. Поскольку количество отложений при этом, как правило, одинаково по всей окружности трубы, для анализа можно использовать трубчатые образцы. Проще всего в этом случае использовать метод катодного травления. При травлении в качестве рабочего раствора обычно применяют ингибированную серную кислоту, двухзамещенный цитрат аммония и некоторые другие соединения. Плотность тока может изменяться в достаточно широких пределах – 5 – 50 мА/см<sup>2</sup>.

Отложения, образующиеся на внутренней поверхности труб высокотемпературных труб поверхностей нагрева прямоточных котлоагрегатов сверхкритического давления в процессе их эксплуатации, обычно имеют двухслойную структуру. При этом влияние каждого из слоев на температурный режим работы труб неодинаково. В связи с этим обычно необходимо производить раздельное определение количества отложений в каждом слое. Кроме того, важно знать не среднее по окружности трубы количество отложений, а максимальное их количество на стороне образца, обращенной внутрь топки. Поэтому перед проведением анализа образец разрезают на две половины – «лобовую» и «тыльную». Наружный, относительно рыхлый слой отложений можно снять при помощи жесткой короткообрезанной волосистой кисточки, а нижний, прочно сцепленный с металлом плотный слой методом катодного травления.

Для определения общего количества отложений, кроме метода катодного травления, часто применяют метод ЦКТИ, который заключается в обработке образцов расплавленным металлическим натрием, через который пропускают газообразный аммиак. При такой обработке отложения разрыхляются и затем легко удаляются механически.

### **1.4.3 Консервация и защита теплосилового оборудования от стояночной коррозии**

Одним из существенных источников попадания окислов железа в пароводяной тракт энергетических установок является коррозия поверхности металла во время простоя оборудования под воздействием влаги и кислорода воздуха, так называемая «стояночная» коррозия. Согласно данным ВТИ скорость стояночной коррозии котельной стали можно оценить значением 0,05

г/(м<sup>2</sup>·ч). В тех случаях, когда на поверхности металла могут оставаться растворы со сравнительно высокой концентрацией хлоридов, сульфатов и других активирующих ионов, скорость коррозии металла может быть еще выше. Протекание стояночной коррозии вызывает необходимость более частого проведения эксплуатационных химических очисток, а также увеличивает продолжительность водных промывок перед пуском блока. Все это значительно ухудшает экономические показатели работы электрических станций. Следует также учесть, что стояночная коррозия вызывает усиление процесса разъедания металла, происходящего во время работы оборудования.

Для предотвращения стояночной коррозии обычно прибегают к консервации оборудования. Чаще всего консервации подвергаются котлоагрегаты. Известно несколько способов консервации котлоагрегатов: способ, предусматривающий создание избыточного давления паром или деаэрированной водой; заполнение консервирующими растворами; высушивание поверхности, металла горячим воздухом и предотвращение окисления металла путем применения инертных газов. Для приготовления консервирующих растворов используют вещества, обладающие щелочными (фосфаты, аммиак), окислительными (нитриты) или восстановительными свойствами (гидразин, сульфит натрия). Для прямоточных котлоагрегатов предпочтительнее попользовать растворы веществ, от которых не требуется тщательная отмывка перед пуском, в частности гидразина и аммиака. При кратковременных стоянках концентрацию гидразина устанавливают на уровне 15 – 20 мг/кг, а при продолжительных – до 200 мг/кг. При заполнении системы аммиаком концентрация последнего должна обеспечить значение рН в контуре 10,5 – 11,0. Часто совмещают эти два реагента. Однако при их использовании подогреватели низкого давления и конденсатор во избежание коррозии сплавов, содержащих медь, должны быть отключены. Консервация с использованием консервирующих растворов требует создания замкнутого циркуляционного контура, включающего деаэратор и питательные насосы.

Одним из основных недостатков метода «мокрой» консервации является необходимость соблюдения герметичности оборудования, что делает его практически неприемлемым в условиях ремонта при наличии неплотностей в системе.

Некоторое распространение получил метод так называемой «гидразинной выварки», в соответствии с которым систему заполняют деаэрированным конденсатом при рН= 10,5 – 11,0 и концентрации гидразина 300 – 500 мг/кг. Затем осуществляют подогрев раствора до температуры не ниже 200°С, поддерживая ее в течение 1 – 2 суток.

Известен также метод консервации котлоагрегатов путем обработки внутренних поверхностей комплексонами.

Этот метод заключается в том, что котлоагрегат заполняют раствором трилона Б (300 – 800 мг/л), постепенно нагревают, выдерживают 4 – 6 ч при 150°С и доводят далее температуру (также в течение 4 – 6 ч) до 250 – 300°С. Технологически этот способ консервации весьма сложен, требует большой затраты времени и эффективен лишь при "условии отсутствия на консервируемой

поверхности железистоокисных отложений. Последнее обстоятельство позволяет попользовать комплексную обработку практически только после химических очисток.

Консервацию котлоагрегата «сухим» способом можно осуществить, заполняя его каким-либо инертным газом, например азотом. При этом воздух должен быть полностью вытеснен из контура, а при длительной консервации перед заполнением азотом необходимо удаление из котла остатков влаги. Содержание в азоте кислорода не должно превышать 0,3 – 0,5%.

В последнее время МО ЦКТИ предложен и опробован метод консервации энергооборудования с помощью ингибиторов коррозии – летучих и контактных. Основное преимущество этого метода заключается в том, что консервирующий эффект сохраняется в течение достаточно продолжительного времени после дренирования раствора и разгерметизации оборудования. Кроме того, не требуются длительная прокачка и нагревание раствора. Технология консервации ингибиторами заключается в следующем.

Котлоагрегат после останова дренируют, расхолаживают до температуры, не превышающей 100°С, и заполняют раствором ингибитора. Циркуляцию раствора можно и не производить, важно лишь обеспечить его контакт со всей поверхностью металла, подлежащей консервации. После этого раствор дренируют в специальный бак хранения.

Последнее условие является обязательным как из-за нежелательности потерь достаточно дорогого реагента, так и из-за трудностей в организации его сброса без нарушения санитарных норм (не более 0,05 мг/л в сбросных водах). Приготовленный раствор можно использовать для консервации практически сколько угодно раз.

При пуске котлоагрегата тщательная его отмывка от консервирующего раствора не обязательна, так как при термическом разложении ингибиторов не образуется опасных (с точки зрения последующей коррозии или возникновения отложений) продуктов. В качестве ингибиторов коррозии рекомендуется использовать смесь нитрита дициклогексиламина (НДА) с карбонатом циклогексиламина (КДА), контактный ингибитор М-1 и некоторые другие. Все они обеспечивают достаточно надежную защиту котельных сталей от коррозии как в водяной фазе, так и при достаточно длительном пребывании на воздухе после омытия поверхности металла их растворами. Эти ингибиторы практически полностью могут быть задержаны на катионитовых фильтрах (например, сульфугольных), что позволяет создать схему, исключаящую их попадание в сбросные воды при отмывке котлоагрегата после консервации.

#### **1.4.4 Схемы и приборы автоматизированного химического контроля качества воды и пара**

Повышенные требования к водному режиму проточных котлоагрегатов сверхкритического давления вызывают необходимость осуществления жесткого и постоянного контроля за качеством питательной воды. При одновременном сокращении персонала химических цехов электростанций на единицу установленной мощности эта задача может быть решена только за счет

автоматизации химического контроля. Основные требования к автоматическим приборам химического контроля – это малая инерционность, высокая точность измерения и непрерывность регистрации показаний. В настоящее время все большее число показателей качества питательной воды переводится на автоматический контроль, для реализации которого используются кислородомеры, водородомеры, кондуктометры (с предварительным Н-катионированием либо с обогащением и дегазацией), кремнемеры, рNa и рН-метры. Большинство из этих приборов освоено в длительной эксплуатации энергоблоков.

ВТИ разработана инструкция по ведению водного режима энергоблоков 300 МВт с помощью автоматических приборов химического контроля.

Кислородомер «Марк-5» имеет шкалу 0 – 200 мкг/кг  $O_2$ , причем диапазон 0 – 30 мкг/кг составляет половину ее длины, что обеспечивает измерение концентрации кислорода в начале шкалы с точностью  $\pm 0,5$  мкг/кг. Постоянная времени прибора – около 2 мин. Для устранения влияния примесей на результаты измерения растворенный кислород десорбируется из анализируемой воды чистым водородом и в газообразном виде подается в электрохимическую ячейку датчика, где вновь растворяется в заполняющем ее буферном растворе. В этом растворе устанавливается концентрация кислорода, находящаяся в равновесии с его концентрацией в газовой смеси и пропорциональная концентрации кислорода в анализируемой жидкости. Чувствительный элемент датчика состоит из золотого катода и платинового анода, опущенных в насыщенный водородом буферный раствор и соединенных через внешнее сопротивление. При отсутствии кислорода золотой электрод поляризован и тока в цепи нет. При появлении в растворе кислорода происходит восстановление его на катоде. Освободившиеся при деполаризации заряды создают во внешней цепи ток, величина которого пропорциональна концентрации растворенного кислорода.

Принцип действия кислородомера «Марк-3» аналогичен, но в схеме прибора отсутствует насос, а газопередача осуществляется за счет эжекции водорода анализируемой водой. Чувствительный элемент состоит из той же пары электродов, но расположенных в камере, заполненной специальным материалом, смоченным раствором электролита.

Принцип действия водородомера фирмы «Кембридж» основан на явлении изменения удельного сопротивления нагретой платиновой проволоки при изменении состава охлаждающей ее смеси газов.

Растворенный водород десорбируется из анализируемой воды кислородом, получаемым во встроенном в прибор электролизере. Смесь водорода и кислорода подается в чувствительный элемент прибора – камеру с нагретой платиновой проволокой. Эта проволока включена в качестве измерительного плеча в схему неравновесного моста. Сравнительное плечо этого моста – аналогичная камера, но заполненная чистым кислородом. Поскольку теплопроводность водорода в 7 раз выше теплопроводности кислорода, при появлении в измерительной камере водорода происходит

разбаланс моста. Ток разбаланса измеряется регистрирующим прибором. Постоянная времени прибора 4 – 5 мин.

Действие кремнемера модели 58F основано на фотоэлектрическом измерении интенсивности окраски синего кремнемолибденового комплекса, получаемой при введении в пробу соответствующих реактивов и зависящей от концентрации определяемого вещества. Чувствительная часть датчика прибора состоит из пары фотоэлементов (измерительного и сравнительного), включенных навстречу друг другу и освещаемых общим источником света. Перед измерительным фотоэлементом расположена измерительная кювета, в которую подается окрашенная проба. В зависимости от интенсивности ее окраски изменяются оптическая плотность слоя жидкости в кювете и, следовательно, освещенность измерительного фотоэлемента и величина возникающего при этом фототока. Выходной сигнал, являющийся разностью фототоков измерительного и сравнительного фотоэлементов, усиливается и подается на указатель и вторичный регистрирующий прибор. Прибор действует циклически с минимальной продолжительностью цикла 12 минут.

Кондуктометр типа ТХ2/р предназначен для определения величины удельной электрической проводимости проб конденсата, питательной воды и ее составляющих, обусловленной присутствием в этих средах растворенных солей. Для удаления из пробы аммиака, искажающего результаты измерений, перед кондуктометром устанавливается Н-катионитовый фильтр, который в зависимости от качества проходящей через него пробы может работать непрерывно без регенерации от 3 до 6 месяцев при расходе пробы  $400 \pm 20$  мл/мин. При истощении фильтра, признаком чего является плавное увеличение показаний кондуктометра, катионит регенерирует 5%-ным раствором соляной кислоты. Действие прибора рNa-метра основано на потенциометрическом методе определения активной концентрации ионов натрия. В качестве измерительного электрода при этом используется специальный стеклянный электрод, селективно реагирующий на растворенный в воде натрий, а в качестве сравнительного – каломельный электрод.

Измерение производится в щелочной среде, для чего в анализируемую воду вводится газообразный аммиак. Прибор дает достоверные показания при постоянной температуре анализируемой пробы. Один раз в сутки показания прибора автоматически контролируются по стандартному раствору хлористого натрия, который хранится в специальной емкости, наполняемой один раз в месяц. Проверка калибровки прибора производится вручную один раз в неделю. Постоянная времени прибора составляет 3 – 4 минуты.

ЦКТИ предложена схема комбинированного автоматического и аналитического контроля водного режима энергоблоков сверхкритического давления на базе приборов отечественного производства.

Эта схема предусматривает использование в качестве основного прибора солемера ЦКТИ с малогабаритным концентратором по ОСТ 24.821.01 и автоматическим уравновешенным мостом типа МСРС-113 (или КСМ2). Концентратор солемера обеспечивает 15-кратное упаривание пробы, которая затем поступает в датчик для измерения общего солесодержания. Аммиак на

показания солемера при его содержании в исходной пробе до 1 мг/л практически не влияет.

Присутствие в анализируемой воде гидразина несколько увеличивает показания солемера. Для введения поправки на гидразин пользуются специальным графиком. После датчика солемера предусмотрена возможность отбора концентрированной пробы для выполнения уточненных химических анализов.

В схеме ЦКТИ предусматривается также регистрирующий индикатор гидравлической плотности конденсатора, состоящий из двух датчиков-индикаторов, устанавливаемых на байпасах к конденсаторопроводам. Датчик-индикатор гидравлической плотности конденсатора состоит из двух коаксиально расположенных электродов. Ухудшение качества конденсата при появлении гидравлической неплотности воспринимается солемером ЦКТИ с малогабаритным концентратором, установленным на общем потоке конденсата до БОУ. Сведения о дефектной части конденсатора получают путем сравнения показаний датчиков-индикаторов.

Для определения концентрации аммиака в схеме предусмотрена комбинация солемера ЦКТИ по ОСТ 24.821.01 и дополнительного датчика, устанавливаемого между первой и второй ступенями испарения солемера. В качестве датчика используется стандартный датчик солемера ЦКТИ.

Для определения концентрации кислорода используют кислородомер АКП или кислородомер ИКАР. Эти кислородомеры менее чувствительны, чем описанные выше приборы типа «Марк-5» и «Марк-3». Значения рН в соответствующих точках водопарового тракта определяются с помощью рН-метра типа рН-261.

#### 1.4.5 Применение пленочных и центробежных сепараторов

На прямоточных котлоагрегатах докритического и закритического давлений нашли применение линейные сепараторы пленочного и центробежного типов.

Пленочные сепараторы применяются на котлах малой мощности (утилизаторы в химической промышленности). Центробежные сепараторы применяются в качестве встроенных сепараторов на энергетических котлоагрегатах.

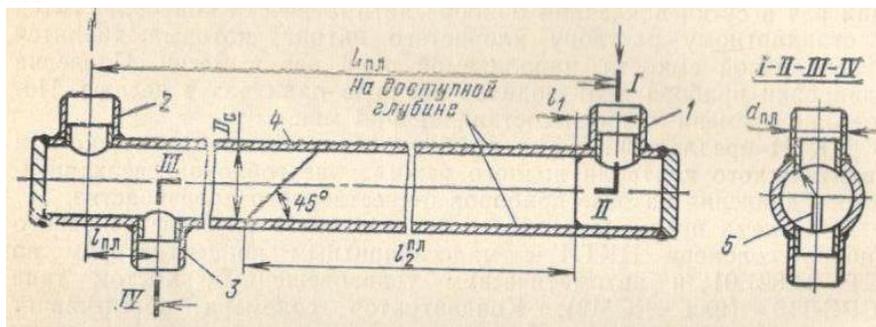


Рисунок 43 – Горизонтальный пленочный сепаратор БПК

1 – штуцер подвода пароводяной смеси; 2 – штуцер отвода осушенного пара; 3 – штуцер отвода отсепарированной влаги; 4 – корпус сепаратора; 5 – вертикальная перегородка

На рисунке 43 изображен эскиз горизонтального пленочного сепаратора, представляющего собой горизонтальную трубу с вваренными в нее штуцером 1 подвода пароводяной смеси, штуцерами 2 и 3 отвода осушенного пара и отсепарированной влаги соответственно. Участок между штуцерами 1 и 2 принято называть активной частью сепаратора. Сепарация влаги происходит под действием инерционных сил и сил тяжести.

Наблюдения, полученные при испытаниях стеклянных моделей подобных сепараторов, показали, что выделившаяся из парового потока влага, образует пленку,двигающуюся по направлению к штуцеру 3 отвода отсепарированной влаги.

Многочисленные испытания подобных сепараторов различных диаметров (от 20 до 150 мм) показали, что при соблюдении необходимых конструктивных и режимных рекомендаций можно получить к. п. д. не ниже 99%.

Коэффициент полезного действия сепаратора представляет собой отношение количества отсепарированной влаги ко всему количеству влаги во влажном паре, поступающей в сепаратор.

Коэффициент полезного действия сепаратора и устойчивость его работы, помимо физических параметров, зависят от скорости пара, величины начальной влажности, диаметра сепаратора и его длины.

Определяемая экспериментальным путем зависимость к. п. д. сепаратора от скорости пара позволяет установить скорость, при которой начинается резкое ухудшение эффективности сепарации. По установившейся терминологии эту скорость принято называть критической.

Основным недостатком горизонтальных пленочных сепараторов, ограничивающим их применение в промышленности, является малое значение расчетной скорости, что приводит к необходимости установки большого числа сепараторов.

Из-за значительных габаритов сепаратора и из-за того, что каждый из них должен иметь самостоятельный подвод и отвод пара и сепарата, компоновка сепарационного узла получается довольно громоздкой.

Дальнейшее повышение производительности отдельного элемента сепаратора, не связанное с увеличением габаритов, осуществляется в центробежных сепараторах. На отечественных прямоточных котлоагрегатах получили большое распространение малогабаритные центробежные сепараторы МО ЦКТИ с тангенциально-винтовым вводом пароводяной смеси. Сепараторы такого типа применяются в тех случаях, когда, исходя из технологических соображений, можно допустить величину коэффициента полезного действия порядка 80 – 90% при производительности, превышающей в десятки раз допустимую нагрузку горизонтальных пленочных сепараторов.

На рисунке 44 представлен эскиз центробежного сепаратора МО ЦКТИ, представляющего собой вертикальную трубу с верхним тангенциальным вводом пароводяной смеси.

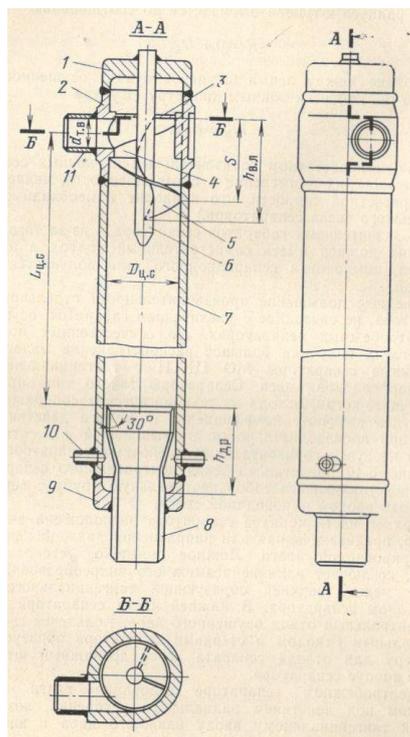


Рисунок 44 – Центробежный сепаратор МО ЦКТИ

1 – доньшко; 2 – головка сепаратора; 3 – ложное доньшко; 4 – лопасть, верхняя часть; лопасть, нижняя часть; 6 – сердечник; 7 – корпус; 8 – патрубок; 9 – доньшко; 10 – ниппель; 11 – патрубок тангенциального ввода.

В верхней части корпуса сепаратора расположена винтовая лопасть 4, 5, предназначенная для направления движения потока пара и отсепарированной влаги. Ложное доньшко, установленное над лопастью, исключает влияние возможного вихреобразования в пространстве между верхней образующей тангенциального ввода и верхним дном сепаратора. В нижней части сепаратора устанавливается центральный отвод осушенного пара. Кольцевое сечение между центральным отводом и стенками сепаратора образует дренажную камеру для отвода сепарата через дренажный штуцер, вваренный в корпус сепаратора.

В центробежном сепараторе сепарация влаги происходит в основном под действием радиального ускорения, возникающего благодаря тангенциальному вводу влажного пара и винтовой лопасти.

Находящиеся в потоке влажного пара капли воды устремляются к стенкам сепаратора, образуя пленку влаги, которая, как показали опыты со стеклянной моделью, в виде спиральной ленты направляется в дренажную камеру. Количество отсепарированной влаги вместе с растворенными в ней примесями определяет эффективность сепаратора.

Эффективность центробежных сепараторов МО ЦКТИ по данным стендовых и промышленных испытаний зависит от скорости и влажности пара, а также от диаметра сепаратора.

С ростом скорости пара в тангенциальном вводе увеличивается центробежная сила, что должно привести к увеличению эффективности сепаратора. Однако при повышении скорости пара происходит усиленное дробление капель как в паропроводе перед сепаратором, так и в самом сепараторе. В связи с этим существует оптимальное значение скорости пара, при котором работа сепаратора отличается наибольшей эффективностью.

На рисунке 45 изображен график для определения оптимальной скорости ввода пара в сепараторах МО ЦКТИ, который получен на основании данных стендовых и промышленных испытаний.

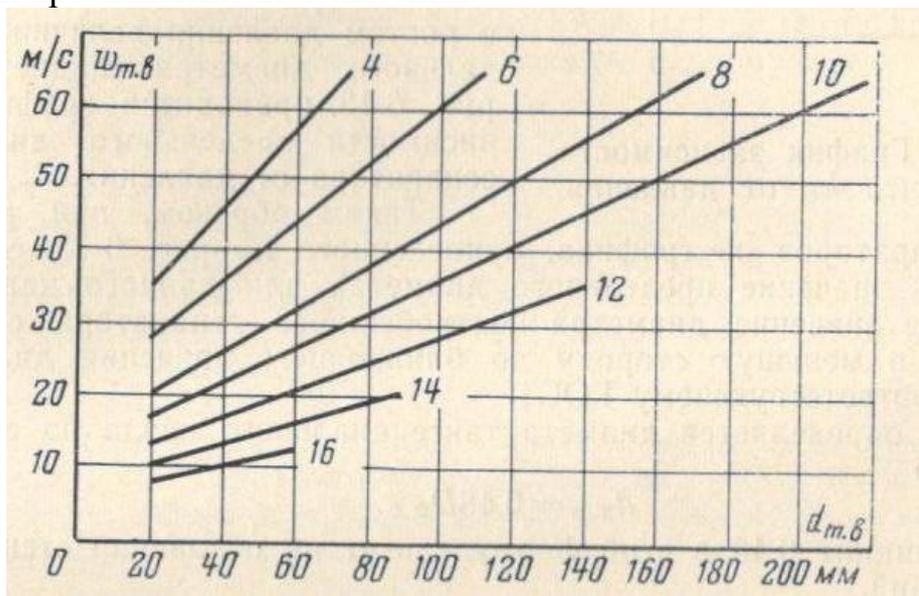


Рисунок 45 – График для определения оптимальной скорости в тангенциальном вводе (цифры на прямых обозначают давление в МПа)

Пользуясь указанным графиком, можно для данного давления, исходя из заданного диаметра тангенциального ввода, определить значение оптимальной скорости пара во входном штуцере (тангенциальном вводе) сепаратора.

Опытным путем установлено, что, помимо скорости, на к. п. д. центробежного сепаратора влияет также величина влажности пара. Исследования, проведенные в области влажности от 0,5 до 25%, показали, что с ростом влажности до 5% эффективность сепаратора возрастает, а, начиная с влажности порядка 5 – 6%, к. п. д. сепаратора остается примерно постоянным.

## 1.5 Свойства и условия работы металла котлоагрегатов

### 1.5.1 Основные характеристики котельных сталей

Условия работы металла в котлоагрегатах весьма разнообразны. Наиболее тяжелые они при сочетании высоких температур и механических нагрузок. В таких условиях работают трубы и камеры пароперегревателей, паропроводы и неохлаждаемые детали: подвески, опоры, крепления.

При выборе марки стали для изготовления того или иного элемента котлоагрегата необходимо учитывать условия его эксплуатации: температуру

стенки, вид и предельную величину механической нагрузки, наличие коррозионной среды, а также технологические свойства материала: прочность, пластичность и свариваемость.

Прочность и пластичность сталей характеризуются механическими свойствами.

Такие механические свойства, как временное сопротивление и предел текучести являются количественными характеристиками. Они определяют, какие напряжения можно допускать в элементах паровых котлов (до определенного уровня температуры).

Относительное удлинение, относительное сужение и ударная вязкость – качественные характеристики, которые определяют технологические свойства металла и его способность воспринимать перегрузки под влиянием местной пластической деформации, а также в известной степени характеризуют качество изготовления стали.

Металл элементов котельных агрегатов, работающих при температурах выше 450°C, подвержен ползучести, т. е. медленному, но постепенно нарастающему во времени пластическому деформированию при повышенных температурах под действием приложенного напряжения.

О поведении сталей в процессе ползучести можно судить по тому, как изменяется величина их пластической деформации с увеличением продолжительности испытания (при заданных температуре и напряжении).

Быстрая первоначальная деформация или так называемая мгновенная деформация не является следствием ползучести и зависит от температуры и напряжения так же, как и деформация при кратковременных испытаниях на растяжение.

Жаропрочность сталей характеризуется пределами ползучести и длительной прочности, которые определяют стандартными методами испытаний на растяжение.

Под пределом ползучести понимают наибольшее напряжение, вызывающее в испытуемом материале при заданных температуре и длительности испытания заданную пластическую деформацию или скорость ползучести. Для котельных сталей пластическая деформация при испытаниях на ползучесть при повышенных температурах допускается не более 1% за 400 тыс. ч.

В процессе ползучести жаропрочные стали могут терять пластичность и хрупко разрушаться. Поэтому ограничиваться только определением пределов ползучести и длительной прочности сталей нельзя, так как испытания на ползучесть не дают исчерпывающих сведений о запасе пластичности жаропрочных сплавов, что важно для предупреждения хрупких разрушений ответственных изделий и конструкций при повышенных температурах. Опасно также путем экстраполяции результаты испытаний на ползучесть небольшой длительности переносить на более длительные сроки. Поэтому в условиях длительного действия температуры и напряжений необходимо параллельно определять изменение прочности и пластичности жаропрочных сталей, доводя образцы до разрушения.

Под пределом длительной прочности понимают максимальное напряжение, которое выдерживает сталь до разрушения при заданных температуре и времени испытания.

Пределы ползучести и длительной прочности и запас пластичности являются основными, но не единственными характеристиками жаропрочных сталей. Кроме повышенных значений пределов ползучести и длительной прочности жаропрочные котельные стали должны иметь высокое сопротивление усталости (в том числе термической), эрозии, малую чувствительность к надрезам.

Для изготовления котельных агрегатов и вспомогательного оборудования широко применяют малоуглеродистые, содержащие до 0,25% углерода, и легированные стали.

Углеродистые стали разделяются на обыкновенного качества, качественные и высококачественные. Принятые стандарты на углеродистую сталь устанавливают химический состав, способ производства и раскисления и механические свойства сталей.

В обозначении марок кипящей стали имеются буквы «кп», полуспокойная – «пс» и спокойная – «сп».

Легирование стали в котлоагрегатах используют для работы при температурах более 450°C. Их классифицируют по нескольким признакам: по содержанию легирующих элементов, по числу компонентов, по микроструктуре и назначению.

В зависимости от содержания легирующих элементов легированные стали делятся на три группы: низколегированные, содержащие менее 3,6 – 4% легирующих добавок; среднелегированные, содержащие добавки от 4 до 10%, и высоколегированные, содержащие более 10% легирующих добавок.

Для маркировки легированных сталей принята буквенно-цифровая система. Каждый легирующий элемент обозначается прописной буквой:

Марганец	Г	Алюминий	Ю
Кремний	С	Медь	Д
Хром	Х	Ниобий	Б
Никель	Н	Кобальт	К
Молибден	М	Бор	Р
Вольфрам	В	Фосфор	П
Ванадий	Ф	Цирконий	Ц
Титан	Т		

Цифры, следующие за буквой, указывают примерное содержание легирующих элементов в процентах. Если в стали содержится не более 1% легирующего элемента, то цифра не ставится. При содержании легирующего элемента более 1% после буквы ставится цифра, соответствующая концентрации этого элемента.

Двузначное число в начале марки обозначает содержание углерода в сотых долях процента, однозначное число в начале марки, принятое в обозначениях марок некоторых высоколегированных сталей, содержание углерода в десятых долях процента.

При содержании в высоколегированных сталях менее 0,08% углерода в начале обозначения марки ставится цифра 0.

Цифры перед обозначением марки не ставят в марках высоколегированных сталей, если нижний предел содержания углерода не ограничен при верхнем пределе 0,09% и более.

### **1.5.2 Стали для труб поверхностей нагрева и паропроводов, для крепления деталей и узлов**

В таблице 1 приводятся механические и физические свойства наиболее распространенных сталей, применяемых для изготовления труб поверхностей нагрева котлоагрегатов и паропроводов, а также предельно допустимые температуры их эксплуатации.

Наибольшее распространение в котлостроении получила сталь 20. Из этой стали в котлоагрегатах среднего и низкого давления в настоящее время изготавливают все поверхности нагрева, коллекторы и паропроводы, а также ряд поверхностей нагрева в котлоагрегатах высокого и сверхкритического давления.

Наибольшей жаропрочностью (высоким сопротивлением ползучести и длительной прочностью) из группы низколегированных сталей обладают хромомолибденованадиевые, меньшей – хромомолибденовые и наименьшей – молибденовые стали.

В котлоагрегатах высокого давления при температуре перегрева выше 460 °С в поверхностях нагрева и трубопроводах используются стали 15ХМ и 12МХ, содержащие около 0,5% молибдена. При температуре перегретого пара более 600 °С применяются хромомолибденованадиевые стали 12Х1МФ, 15Х1М1Ф.

Из сложнолегированных 10 – 12%-ных хромистых нержавеющей теплоустойчивых сталей изготавливают узлы и детали котлоагрегатов, работающие при температуре 560 – 620 °С.

К этим сталям относятся хромомолибденовольфрамовая марки ЭИ756 и хромомолибденовая с бором марки ЭИ998.

Наряду с низколегированными и хромистыми сталями в котлах высокого давления для перегревателей труб используют высоколегированные хромоникелевые стали аустенитного класса.

Введение небольших количеств Ti, Nb, Mo, W и В в хромоникелевые стали типов 14 – 14 и 14 – 18 и другие при малом содержании углерода благоприятно сказывается на их прочностных свойствах при высоких температурах. Это влияние более эффективно, когда одновременно вводят несколько элементов. В таком случае повышается жаропрочность материала при достаточном сохранении пластичности.

При одинаковых напряжениях применение высоколегированных аустенитных сталей позволяет поднять рабочую температуру пара примерно на 100 – 200 °С по сравнению с низколегированными сталями.

### 1.5.2.1 Стали для крепления деталей и узлов

В таблице 2 приводятся механические и физические свойства сталей, применяемых для изготовления крепежных деталей (болтов, шпилек и др.), а также значения максимально допустимой температуры их эксплуатации.

Для изготовления шпилек и болтов, работающих при температуре до 425 °С и давлении 1,6 МПа, применяют стали 20 и 25, при давлении до 110 МПа – стали 30, 35 и 40.

При более высоких температурах и давлениях применяются легированные стали. При температуре до 450 °С без ограничения давления используются шпильки и болты из сталей 30ХМ, 30ХМА и 35ХМ; эти же стали применяются для изготовления гаек, работающих при температуре до 510 °С.

Прутки, поковки, болты, шпильки и другие крепежные детали с рабочей температурой 500 – 510 °С изготавливаются из стали 25Х1М1Ф (ЭИ10). Для изготовления крепежных деталей, работающих при температурах до 520 – 540 °С, применяют сталь 25Х2М1Ф (ЭИ723), при температурах до 580 °С – стали 20Х1М1ФТР (ЭП182) и 20Х1М1ФБР (ЭП44).

При температуре рабочей среды до 600 °С для шпилек применяют сталь 4Х14Н14В2М, а при температуре до 680 °С – сплав ЭИ612 (ХН35ВТ) и сталь ЭИ726 (1Х14Н18В2БР).

В таблице 3 приведены механические и физические свойства ряда сталей, применяемых для изготовления неохлажденных опор и креплений труб поверхностей нагрева, а также для обдувочных устройств.

Стали С высоким содержанием хрома, например Х17, Х28, а также содержащие хром и кремний, так называемые сильхромы СХ6 и СХ6М, могут применяться до 1100 °С, но они обладают низким сопротивлением ползучести.

Поэтому детали, несущие значительную нагрузку, должны выполняться из специальных марок стали типов Х20Н14С2, Х23Н18, Х23Н13. Однако в среде продуктов сгорания топлив повышенной агрессивности, например, многосернистого мазута, эти стали подвержены интенсивной коррозии; причем скорость коррозии возрастает с увеличением содержания серы и ванадия в топливе. В этом случае более работоспособными являются хромоникелевые сплавы типов Х40Н60 и Х40Н50.

Таблица 1 – Механические и физические свойства сталей для поверхностей нагрева котлоагрегатов и паропроводов

Марка стали	Рекомендуемая предельная рабочая температура, °С	Механические свойства при температуре 20 °С						Физические свойства												
		σ <sub>B</sub> , МПа	σ <sub>0,2</sub> , МПа	δ <sub>5</sub> , %	φ, %	α <sub>H</sub> , кН/м	H <sub>B</sub> , МПа	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Коэффициент линейного расширения α · 10 <sup>6</sup> в интервале температур, °С						Теплопроводность λ, Вт/(м·К), при температуре, °С					
									0 – 100	0 – 200	0 – 400	0 – 600	0 – 800	0 – 1000	100	200	400	600	800	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
20	500	400	≥0,5 σ <sub>B</sub>	24	40	390	-	7,85	11,6	12,6	13,6	14,6	14,9	-	50,6	38,6	36,0	30,5	-	
12МХ	530	410	≥0,5 σ <sub>B</sub>	22	45	490	-	7,85	11,2	12,5	12,9	13,5	-	-	50,2	33,0	31,0	28,5	-	
15МХ	550	440	230	21	50	490	-	7,85	11,9	12,6	13,7	14,0	-	-	44,4	42,7	38,4	33,6	-	
15ГС	450	490	290	18	45	590	-	7,85	13,0	14,0	16,2	16,2	-	-	-	-	-	-	-	
12Х1МФ	585	440	270	21	55	590	-	7,80	11,8	12,4	13,2	-	-	-	38,5	36,8	35,0	30,0	-	
15Х1МФ	585	490	310	18	50	490	-	7,80	11,2	11,7	13,0	13,7	-	-	41,4	40,0	36,7	33,9	-	
12Х2МФСР	595	470	270	21	-	-	-	7,80	11,0	12,0	13,2	14,0	-	-	-	-	-	-	-	
12Х2МФБ (ЭИ531)	600	410	200	24	-	-	-	7,80	10,2	11,3	12,6	13,4	-	-	-	-	-	-	-	
Х18Н12Т	640	530	210	35	55	-	1960	7,90	16,6	17,0	17,5	18,2	18,9	-	16,2	17,5	12,5	21,0	23,9	
1Х11В2МФ (ЭИ756)	620	590	390	18	-	-	2160	7,86	10,7	-	-	14,0	-	-	25,0	24,2	23,0	20,9	-	
2Х12ВМБФР (ЭИ993)	620	735	490	12	45	390	-	7,90	11,1	11,3	11,8	12,2	12,6	-	25,9	25,4	25,9	27,2	-	
Х14Н14В2М (ЭИ257)	650	540	210	35	-	-	-	8,10	15,6	15,7	17,3	18,2	-	-	6,3	11,7	20,9	27,2	-	
Х14Н18В2БР (ЭИ695Р)	700	470 - 625	190 - 280	42 - 51	61 - 73	1370 - 3200	1470	8,12	15,9	16,5	17,6	18,3	18,7	-	-	-	-	-	-	

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
X14H18B2БР (ЭИ726)	700	490	210	25	30	490	-	8,12	15,2	16,3	17,5	18,1	18,6	-	15,9	16,2	19,2	23,0	27,5
X16H14B2БР (ЭП17)	700	510	210	38	50	1370	-	7,90	15,7	18,3	19,3	20,1	20,9	-	16,2	22,1	23,4	29,6	-
X16H16MB2БР (ЭП184)	700	520	230	38	50	1370	-	8,12	17,1	17,1	17,9	18,5	19,1	-	15,0	16,2	18,7	22,4	-

Таблица 2 – Механические и физические свойства сталей для крепежных деталей (болтов и шпилек)

Марка стали	Рекомендуемая предельная рабочая температура, °С	Механические свойства при температуре 20 °С						Физические свойства											
		σ <sub>B</sub> , МПа	σ <sub>0,2</sub> , МПа	δ <sub>5</sub> , %	φ, %	α <sub>H</sub> , кН/м	H <sub>B</sub> , МПа	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Коэффициент линейного расширения α · 10 <sup>6</sup> в интервале температур, °С						Теплопроводность λ, Вт/(м·К), при температуре, °С				
									20 – 100	20 – 200	20 – 400	20 – 600	20 – 800	20 – 1000	100	200	400	600	800
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
25	400	450	245	23	50	685	1190	7,85	11,1	12,3	13,3	14,3	-	-	50,6	48,6	42,7	35,5	-
30	400	490	295	21	50	685	1340	7,85	11,1	11,9	13,4	14,4	-	-	50,6	48,6	42,7	35,5	-
35	400	530	315	20	45	590	1430	7,85	11,1	11,9	13,4	14,4	-	-	50,6	48,6	42,7	35,5	-
40	425	570	330	19	45	590	2130	7,85	11,3	12,4	13,3	14,4	-	-	50,6	48,6	42,7	35,5	-
30ХМ	450	785	670	13	45	590	2500	7,82	12,3	12,6	13,9	14,6	-	-	40,5	39,6	37,1	-	-
30ХМА	450	785	670	13	50	590	2500	7,82	12,3	12,6	13,9	14,6	-	-	40,5	39,6	37,1	-	-
35ХМ	450	785	670	13	45	590	2500	7,82	12,3	12,6	13,9	14,6	-	-	41,7	39,6	37,1	-	-
25Х1М1Ф (ЭИ10)	510	785	670	16	50	590	2500	7,84	11,3	12,7	13,9	14,4	-	-	41,7	41,1	39,2	-	-
25Х2М1Ф (ЭИ723)	540	785	670	12	50	590	2500	7,80	12,5	12,9	13,7	14,7	-	-	32,6	31,6	28,2	28,3	-

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
20Х1М1ФТР (ЭП182)	565	785	670	15	50	590	2500	7,85	-	12,0	12,8	13,6	-	-	41,7	40,5	38,8	38,8	-
20Х1М1ФБР (ЭП44)	580	785	670	14	50	590	2500	7,90	-	-	-	14,5	-	-	40,7	45,8	50,0	46,0	-

Таблица 3 – Механические и физические свойства сталей для неохлаждаемых креплений поверхностей нагрева котлоагрегатов

Марка стали	Рекомендуемая предельная рабочая температура, °С	Механические свойства при температуре 20 °С						Физические свойства												
		σ <sub>B</sub> , МПа	σ <sub>0,2</sub> , МПа	δ <sub>5</sub> , %	φ, %	α <sub>H</sub> , кН/м	H <sub>B</sub> , МПа	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Коэффициент линейного расширения α·10 <sup>6</sup> в интервале температур, °С						Теплопроводность λ, Вт/(м·К), при температуре, °С					
									20 – 100	20 – 200	20 – 400	20 – 600	20 – 800	20 – 1000	100	200	400	600	800	1000
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
X17	1000	510	310	28	70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
X20H14C2	1200	630	360	53	73	-	-	7,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
X23H13	1100	660	350	38	60	206	-	7,9	-	-	15,5	18,6	-	-	-	17,1	20,4	24,3	28,4	-
X23H18	1100	640	310	32	50	157	-	7,9	14,9	15,7	17,3	17,8	-	-	15,9	16,7	19,6	21,7	-	-
4X9C2	1100	880	640	20	58	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4X18H25C2	1200	835	540	17	18	29	-	7,8	13,0	13,4	14,9	16,1	-	-	15,1	-	-	25,1	-	37,2
X18H12T	800	530	210	35	35	-	-	7,9	16,6	17,0	17,5	18,2	18,9	-	16,2	17,5	19,5	21,0	23,9	-

### **1.5.3 Наблюдение за металлом в процессе наладки и эксплуатации котлоагрегатов**

Для обеспечения эксплуатационной надежности котлоагрегатов в процессе монтажа, наладки и эксплуатации проводятся систематический контроль и наблюдение за состоянием металла различных элементов: трубопроводов пара и горячей воды, труб поверхностей нагрева, барабанов и камер, запорной и регулирующей арматуры, литых деталей, крепежа и т. д. в соответствии с «Инструкцией по наблюдению и контролю за металлом трубопроводов и котлов».

Контроль необходим для предотвращения повреждений, которые могут быть вызваны:

а) технологическими дефектами в металле деталей: пленами, закатами, трещинами, подрезами, волосовинами, раковинами, рыхлотами и др., недопустимой разностенностью труб, а также подобными дефектами, являющимися концентраторами напряжений;

б) недопустимой ползучестью металла труб и других деталей вследствие возможного превышения рабочей температуры металла, несоответствием марки стали проектной, неудовлетворительной микроструктурой и механическими свойствами металла в состоянии поставки, а также нестабильностью структуры и фазового состава металла в процессе эксплуатации;

в) золовым износом и коррозией деталей;

г) воздействием больших компенсационных напряжений и напряжений от весовых нагрузок вследствие неправильного расчета, неправильной регулировки системы крепления или ее нарушения в процессе эксплуатации (образования защемлений, повреждения опор и т. п.);

д) воздействием повышенных и переменных температурных напряжений, возникающих главным образом вследствие нарушения нормального режима пуска и останова энергооборудования и вызывающих тепловую усталость металла, изменение размеров и формы деталей;

е) недостаточной пластичностью металла и сварных соединений в исходном состоянии и их охрупчиванием в процессе эксплуатации;

ж) нарушением режимов эксплуатации, в частности, температурного и водного режимов работы котлоагрегата;

з) хрупкими разрушениями (коррозионным растрескиванием) металла из-за воздействия высококонцентрированных кислотных и щелочных растворов на напряженный металл.

В связи с указанными явлениями на тепловых электростанциях проводится контроль за:

а) соответствием металла техническим условиям поставки (ГОСТ, ТУ, МВН);

б) правильностью выполнения монтажно-сборочных работ в соответствии с проектом, за качеством сварных соединений;

в) ростом остаточных деформаций;

г) изменениями структуры и механических свойств металла;

- д) утонением стенок труб поверхностей нагрева, вызванным процессами коррозии, эрозии и др.;
- е) состоянием сварных соединений в процессе эксплуатации;
- ж) термическими перемещениями трубопроводов, коллекторов, барабанов, труб поверхностей нагрева и системой их крепления;
- з) температурным режимом работы металла во время пусков остановов и эксплуатации оборудования.

Возможность проведения контроля и наблюдения за металлом в процессе эксплуатации предусматривается при проектировании и монтаже оборудования электростанций.

Контролю и наблюдению подлежат все трубопроводы, коллекторы, трубы поверхностей нагрева, арматура, фасонные детали, фланцевые соединения и крепеж фактически работающие при температуре пара 450 °С и выше.

Для учета температурного режима работы металла организуется систематическая обработка суточных графиков температуры пара за котлом.

Трубопроводы с внутренним диаметром 160 мм и более, работающие при температуре среды 300 °С и выше, оборудуются во время монтажа реперами для контроля и регистрации термических перемещений.

Элементы котлоагрегата, перемещающиеся от термических расширений, подвергаются проверке для определения величины зазоров, обеспечивающих свободу перемещения и состояния опор.

Контроль за остаточной деформацией труб вследствие ползучести осуществляется путем периодического измерения их диаметров.

Для измерения ползучести паропроводов, паросборников, коллекторов к ним привариваются бобышки в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

В целях наблюдения за изменениями механических свойств структуры металла трубопроводов в результате длительного воздействия высоких температур и напряжений выделяются контрольные участки на главных паропроводах и горячих магистралях промперегрева, работающих с температурой перегретого пара 450 °С и выше.

Контрольные участки предусматриваются при проектировании паропроводов и выполняются при монтаже, как правило, вблизи котла по одному на каждой магистрали.

Если главный паропровод и паропровод горячего промперегрева изготовлены из сталей различных марок, то контрольные участки устанавливаются на трубах из каждой марки стали. Трубы для контрольного участка выбираются и поставляются заводами-изготовителями по возможности из числа труб, изготовленных из плавок с механическими свойствами, соответствующими нижним пределам требований ГОСТ или ТУ, с наименее выгодным соотношением химического состава и с наиболее неблагоприятной структурой.

Контрольные участки обычно выбирают таким образом, чтобы толщина стенки труб не превышала номинальной или даже имела минусовой допуск.

При каждом ремонте и гидравлическом испытании производят тщательный осмотр труб поверхностей нагрева котлоагрегатов и их сварных

соединений с целью выявления труб, имеющих большую остаточную деформацию, коррозию, золовой износ, трещины в сварных соединениях, недопустимую овальность и другие дефекты. Остаточные деформации труб контролируют специальными шаблонами (скобами).

Диаметр труб поверхностей нагрева измеряется в зоне максимальных температур. Измерения производят в одних и тех же местах.

Для определения величины глубины коррозии с внутренней поверхности труб вырезают образцы труб на участках, где наблюдались коррозионные повреждения.

На пароперегревателях котлоагрегатов, работающих с температурой свежего пара 540 °С и выше, выделяют контрольные участки для периодического наблюдения за изменением структуры, свойств металла и коррозионными процессами.

Эти участки располагаются в обогреваемой зоне пароперегревателя в двух-трех местах по ширине газохода на трубах с наиболее высокой температурой стенки. Для каждой из этих труб обычно устанавливается постоянный контроль за температурой стенки во время работы котлоагрегата с помощью термопар, подключенных к регистрирующим потенциометрам.

При известном температурном режиме эксплуатации металла труб поверхностей нагрева можно оценить расчетным путем величину коррозионных потерь сталей – уменьшения толщины стенки с наружной и внутренней поверхностей трубы.

В тех случаях, когда отклонения температуры металла труб пароперегревателей от средней в процессе эксплуатации не превышают 20°С, за расчетные значения принимают среднеарифметические за рассматриваемый период эксплуатации температуры на наружной и внутренней поверхностях трубы. Затем по величинам этих усредненных температур и продолжительности эксплуатации пароперегревателя с использованием формул находят значения глубины коррозии металла труб с наружной и внутренней сторон. Эти значения определяют для тех сред, воздействию которых испытывают соответственно наружная и внутренняя поверхности труб.

## 1.6 Наладка топочного режима

### 1.6.1 Определение присосов воздуха и оптимального положения факела в топке

#### 1.6.1.1 Определение присосов воздуха

Плотность топки, газоходов и пылеприготовительных установок оказывает большое влияние на рациональную организацию топочных процессов, экономичность парового котла и эффективность его автоматизации.

Присосы воздуха по газовому тракту котла определяются по результатам анализа газов – определением  $RO_2$  в газоходах между отдельными поверхностями нагрева (пароперегревателей, экономайзера, воздухоподогревателя), золоуловителя и дымососа. Одновременно проводятся измерения нагрузки и параметров пара котла.

Присосы воздуха в газоходы конвективных поверхностей подсчитываются как разница коэффициентов избытка воздуха на отдельных участках. Например, присос воздуха на участке экономайзера составит

$$\Delta\alpha_{ЭК} = \alpha_{ЭК}'' - \alpha_{ЭК}' \quad (6)$$

Присосы воздуха в регенеративных вращающихся воздушных подогревателях (РВП) складываются из присосов в уплотнениях (периферийных и радиальных) и из переноса части воздуха в газы при вращении подогревателя. Присосы воздуха через периферийные и радиальные уплотнения определяются по формуле

$$\Delta\alpha_{РВП} = \alpha''_{РВП} - \alpha'_{РВП} - \Delta\alpha_{ПЕР} \quad (7)$$

В (6) и (7) обозначения  $a'$  и  $a''$  соответствуют коэффициенту избытка воздуха в газоходе перед и за поверхностью;  $\Delta\alpha_{ПЕР}$  – доля воздуха, переносимого из РВП в газы, определяется в зависимости от конструктивных характеристик по рекомендациям.

Присосы воздуха в топку определяются совместно с присосами в газоход пароперегревателя, размещенного до поворотной камеры, из которой отбирают пробы газов на анализ. Место отбора проб газов выбрано по соображениям предотвращения быстрого зашлаковывания газозаборной трубки.

Для современных паровых котлов общепринятым является метод, по которому присосы воздуха в топку и газоход пароперегревателя определяют в зависимости от поддерживаемого в топке разрежения. Места установки необходимых для измерения приборов показаны на рисунке 46. Первый режим соответствует нагрузке котла около 80 % номинальной, избытку воздуха 1,3 – 1,4 и нормально принятому в эксплуатации разрежению в топке. Последующие режимы снимают при неизменной нагрузке котла и расходе воздуха через воздухоподогреватель ( $\Delta p_v - \text{const}$ ), но при повышении разрежения в верху топки до 50, 100, 150, 200 Па, что достигается увеличением нагрузки дымососа

и уменьшением – дутьевого вентилятора при воздействии на их направляющие аппараты. Длительность каждого режима определяется временем одной-двух записей показаний приборов.

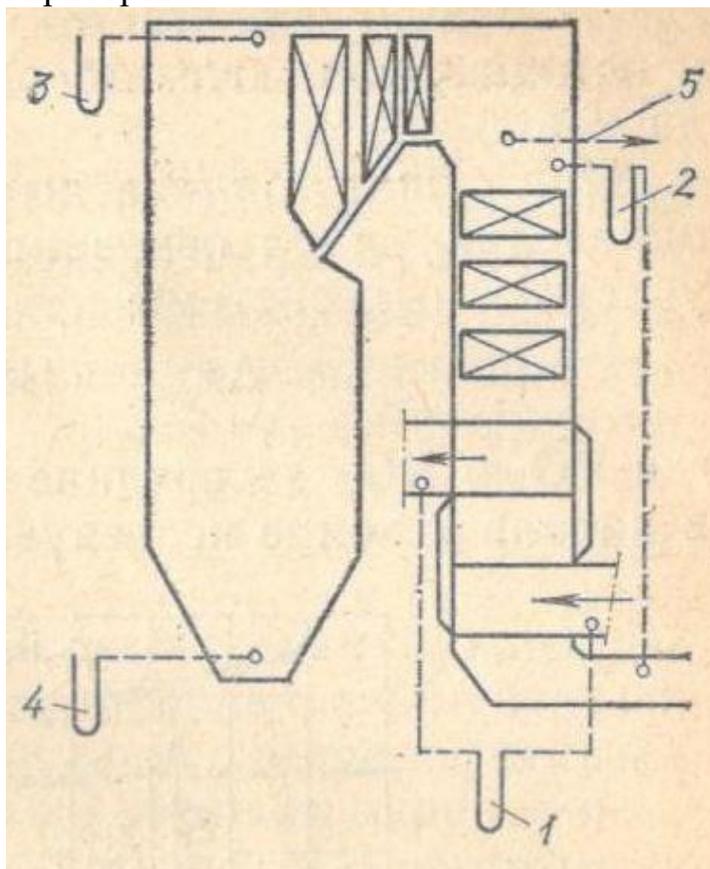


Рисунок 46 – Схема измерений при определении присосов воздуха в топку газоход пароперегревателя котла

1 – сопротивление воздухоподогревателя по воздушной стороне; 2 – то же газового тракта конвективной шахты (измеряются U-образным тягомерами); 3 и 4 – разрежение веху и внизу топки, измеряемое микроманометрами; 5 – измерение содержания  $\text{CO}_2$ .

Значение присосов воздуха в топку и газоход пароперегревателя подсчитывается по эмпирической формуле

$$\Delta\alpha = 0,5 \alpha''_{\text{ПП}} \left(1 - \sqrt{\frac{\Delta\rho_{\text{Д}}}{\Delta\rho_0}}\right), \quad (8)$$

где  $\Delta\rho_0$  – сопротивление газового тракта при эксплуатационном (первом) режиме, Па, когда разрежение на выходе из топки близко к нулю.

Учитывая, что относительное значение присосов воздуха обратно пропорционально нагрузке, полученные значения Па приводят к номинальной нагрузке по соотношению

$$\Delta\alpha_{\text{НОМ}} = \Delta\alpha \left(\frac{D}{D_{\text{НОМ}}}\right), \quad (9)$$

где  $D$  и  $D_{\text{НОМ}}$  – соответственно нагрузка во время опыта и номинальная, кг/с. Абсолютная погрешность этого метода  $\pm (3,5 - 5) \%$ .

При сушке топлива дымовыми газами присосы воздуха определяются на основании анализа газов на различных участках пылесистемы

$$\Delta\alpha_{\text{прс}} = \frac{(RO_2' - RO_2'')}{RO_2''} \quad (10)$$

где  $RO_2'$  и  $RO_2''$  – средние содержания  $RO_2$  соответственно в начале и конце исследуемого участка, %.

При сушке горячим воздухом присосы определяются непосредственным измерением расходов воздуха на входе в мельницу и перед мельничным вентилятором или на выходе из него

$$\Delta Q_{\text{прс}} = Q - Q_0 - Q_{\text{в.п}} \quad (11)$$

где  $Q$ ,  $Q_0$  и  $Q_{\text{в.п}}$  – соответственно количество воздуха в конце исследуемого участка (например, перед мельничным вентилятором), в начале исследуемого участка (например, горячего воздуха перед мельницей), количество водяных паров из системы пылеприготовления,  $\text{м}^3/\text{с}$ ,

$$Q_{\text{в.п}} = \frac{B(W^P - W_{\text{п}})}{[0,805(100 - W_{\text{п}})]} \quad (12)$$

где  $B$  – расход топлива, кг/с;

$W^P$  и  $W_{\text{п}}$  – соответственно влажность на рабочую массу топлива и пыли, %.

Присосы холодного воздуха в долях сушильного агента

$$\Delta\alpha_{\text{прс}} = \frac{(Q - Q_0 - Q_{\text{в.п}})}{Q_0} = \frac{\Delta Q_{\text{прс}}}{Q_0} \quad (13)$$

Присосы воздуха должны быть определены перед любыми испытаниями и в случае их повышенного значения (по сравнению с нормативными) элементы тракта должны быть уплотнены. На каждые 5 % увеличения присосов воздуха КПД котла снижается на 0,5 – 1 %.

### 1.6.1.2 Определение оптимального положения факела в топке

В задачи опытов входят выявление режимов топочного процесса с минимальными потерями теплоты топлива, условий работы радиационных поверхностей нагрева без прогрессирующих наружных отложений при обеспечении надежных температурных, циркуляционных, гидродинамических параметров поверхностей нагрева по водопаровому тракту и расчетной температуры перегрева пара.

В топках пылеугольных котлов с твердым шлакоудалением ядро факела должно быть равноудаленным от всех стен и располагаться на уровне горелок, сам факел должен максимально заполнять топку, но не касаться экранов и не опускаться ниже середины холодной воронки. В однокамерных топках с жидким шлакоудалением ядро факела должно располагаться вблизи пода без сепарации на него несгоревшей пыли.

На пылеугольных котлах обычно проводят четыре опыта при нагрузке, близкой к номинальной, расчетных значениях коэффициента избытка воздуха и тонкости помола пыли. Сравнение результатов опытов проводится путем построения и анализа графиков изотерм факела, наносимых на эскизах развертки топки. На эскизах записывают основные сведения, характеризующие данный опыт (дата, нагрузка котла, коэффициент избытка воздуха, число и номера работающих горелок и мельниц, положение регулирующих органов горелок, давление первичного и вторичного воздуха, расходы воды на впрыски). Одновременно контролируют все эксплуатационные параметры, в дополнение к которым отбирают очаговые остатки для определения содержания в них горючих, получения температурных характеристик золы и химического состава.

На современных котлах возможности регулирования положения факела ограничены, и его приходится определять с учетом местных условий. Если на котле установлены вихревые горелки это осуществляют, как правило, воздействием на поток вторичного воздуха, если прямоточные щелевые горелки, то перераспределением подачи вторичного воздуха и аэросмеси на отдельные ряды щелей. При наличии пылеконцентраторов – оперераспределением пыли и сушильного агента между основной и сбросной горелками. При расположении горелок в два и более ярусов в программе опытов следует предусматривать проверку влияния распределения топлива по ярусам на положение факела.

Режим, при котором обеспечиваются наибольшая экономичность горения, минимальное шлакование, номинальная температура перегрева пара (при умеренных расходах воды на пароохладитель) и надежные температурные и гидродинамические условия работы поверхностей нагрева по водопаровому тракту, считается оптимальным.

При сжигании в качестве основного топлива мазута, подаваемого форсунками механического распыливания, оптимальное положение факела определяется следующими признаками: пламя должно начинаться вблизи устья горелок и быть ослепительно ярким без летящих мушек, ядро факела должно концентрироваться в средней части топки, конец факела должен быть в верхней части топки. Эксплуатация должна протекать без появления твердых частиц

(кокса) в уходящих газах, так как их наличие резко снижает надежность работы котла по условиям пожаробезопасности. В основном задача достижения оптимального положения факела при сжигании жидкого топлива связана с равномерным распределением топлива и воздуха по всем горелкам на номинальной или близкой к ней нагрузке.

Признаки нормального горения природного газа: факел должен заполнять всю топочную камеру с окончанием горения в верхней части топки, должен быть ослепительно ярким или почти прозрачным с фиолетовым оттенком. Оптимальное положение факела при этом достигается теми же средствами, как и при сжигании жидкого топлива. По условиям обеспечения необходимой температуры перегрева пара, а также надежности поверхностей нагрева котла регулирование положения факела в топке может достигаться перераспределением по ярусам горелок топлива и воздуха с обеспечением их необходимого перемешивания либо изменением угла наклона поворотных горелок.

При сжигании жидкого и газового топлива для нахождения оптимального положения факела достаточно трех опытов. Объем измерений и регистрируемых показателей зависит от конструкции котла, горелочных устройств, масштабов температурного контроля и контроля циркуляции или гидродинамики по тракту рабочей среды.

В общем случае контролируются нагрузка, параметры пара, расход и температура впрыскиваемой воды, температура питательной воды, избыток воздуха и температуры в топке, разрежение, давление и температуры по газовому и воздушному трактам, температура топлива, потери с химической неполнотой сгорания. Контроль надежности поверхностей нагрева ведется в выбранных точках тракта рабочей среды.

Оптимальные режимы при указанных условиях находятся по минимуму суммы потерь теплоты с уходящими газами и химической неполноты сгорания при надежных условиях работы поверхностей нагрева.

При наличии на пылеугольных и газомазутных котлах рециркуляции газов в опытах по определению оптимального положения факела выявляется ее влияние на температурный режим экранов и пароперегревателей, а также на процесс шлакования в пылеугольных топках. Опыты проводятся при проектном значении коэффициента рециркуляции и снижении его на 50 %. Если во втором опыте обеспечивается заданный уровень перегрева пара, надежный температурный режим названных поверхностей нагрева и процесс шлакования не лимитирует поддержание номинальной нагрузки, то третий опыт проводится при отключенной рециркуляции. Продолжительность каждого опыта не менее 4 ч при постоянных эксплуатационных избытках воздуха, номинальных параметрах свежего пара и расчетной температуре питательной воды.

### 1.6.2 Определение оптимальных значений коэффициента избытка воздуха и тонкости помола пыли

Определение оптимального коэффициента избытка воздуха в топке (за первой ближайшей к топке поверхностью нагрева) проводится в продолжение опытов по выявлению оптимального положения факела в топке. При испытаниях по II и III категориям сложности оптимальный избыток воздуха определяется по газовому анализу при трех-четырёх нагрузках котла (номинальной, минимальной на нижней границе регулировочного диапазона и промежуточной).

Изменение избытка воздуха в пылеугольных топках осуществляется воздействием на подачу вторичного воздуха при неизменном расходе первичного воздуха в пределах от минимального значения 1,10 – 1,15 до максимального 1,45, зависящих от способа шлакоудаления из топки и выхода летучих топлива. При этом должны быть обеспечены устойчивый топочный процесс, заданная температура перегрева пара, выход жидкого шлака и надежная работа поверхностей нагрева по тракту рабочей среды. Опыты проводятся при четырех значениях избытков воздуха: минимальном, максимальном и двух промежуточных. Если в процессе опыта достигается предельно допустимое значение температуры контролируемой поверхности нагрева по тракту рабочей среды, то дальнейшее изменение избытка воздуха должно быть прекращено.

При сжигании жидкого и газового топлива опыты проводятся в два этапа. На первом снимается зависимость  $q_3 = f(\alpha''n)$  и определяется критический избыток воздуха  $\alpha_{кр}$ , ниже значения которого в уходящих газах обнаруживаются продукты неполного сгорания (СО, Н<sub>2</sub> и др.), тем самым определяется диапазон рабочих избытков воздуха. Рабочими считаются избытки, на 1 – 2 % превышающие  $\alpha_{кр}$ .

Опыты проводятся в диапазоне коэффициента избытка воздуха 1,15 – 1,02 при сжигании мазута и 1,10 – 1,02 при сжигании газа.

На втором этапе данной серии опытов в рабочем диапазоне избытков воздуха проводятся четыре – пять опытов для установления зависимостей потерь теплоты с уходящими газами и с химической неполнотой горения, КПД брутто котла, расходов энергии на тягу, дутье, температуры промежуточного перегрева и тепловосприятости пароперегревателя и других поверхностей нагрева от избытка воздуха, которые и позволяют определить оптимальное его значение на заданных нагрузках.

При сжигании жидкого и газового топлива оптимальный избыток воздуха обычно совпадает с критическим его значением. В этом случае, если условия надежности пароперегревателя и экранов не накладывают особых требований, учитывают чувствительность схем авторегулирования процесса горения, и оптимальный коэффициент избытка определяют по формуле

$$\alpha_{опт} = \alpha_{кр} + (0,02 \div 0,04) \quad (14)$$

При проведении этих опытов выполняются те же измерения и записи, что и при балансовых опытах, за исключением учета расходов топлива, питательной воды и очаговых остатков. Кроме того, ведется контроль надежности поверхностей нагрева по тракту рабочей среды.

Опытами определяют тонкость помола, при которой сумма затрат, связанных с потерями теплоты от механической неполноты горения, расходом энергии на размол и транспорт пыли и расходом металла на размол топлива, будет минимальной. Определение оптимальной тонкости пыли при испытаниях по II и III категориям сложности обычно проводится при номинальной нагрузке и нагрузке 0,7 – 0,8 номинальной. В таблице 4 указан рекомендуемый диапазон изменений тонкости помола в рассматриваемых опытах.

Таблица 4 – Рекомендуемый диапазон изменений тонкости помола

Топливо	R <sub>90</sub> , %
АШ	3, 6, 9 и 12
Тощие угли	6, 9, 12 и 15
Бурые и каменные угли	20, 30, 40 и 50

В эксплуатации нередко при номинальной нагрузке котла одна из мельниц останавливается для ремонта или находится в резерве. При проведении испытаний необходимо проводить опыты со всеми работающими и при одной остановленной мельнице. В опытах по выявлению оптимальной тонкости пыли необходимо проводить все измерения, обязательные для балансовых опытов, за исключением измерения количества очаговых остатков, учета расхода топлива и питательной воды.

### 1.6.3 Определение минимальной длительной и максимальной кратковременной нагрузки котла

Определение минимальной длительной нагрузки для пылеугольных котлов сводится к выявлению нижней границы регулировочного диапазона без подсветки растопочным топливом с сохранением выхода жидкого шлака (при жидком шлакоудалении) и определению соответствующего этой нагрузке воздушного режима топki. При твердом шлакоудалении на котле ступенями  $(0,15 \div 0,25)D_n$  с выдержкой по 10 – 20 минут на каждой ступени снижают нагрузку путем уменьшения подачи топлива на все горелки, доводя нагрузку до минимума, ниже которого горение становится неустойчивым. После каждой ступени нагрузки необходима проверка соотношения топливо – воздух, чтобы исключить чрезмерно большие избытки воздуха. Температура питательной воды должна соответствовать расчетным значением. Проверка последнего режима проводится в течение 3 – 4 часов.

При жидком шлакоудалении экспериментатору должна быть известна вязкостная характеристика шлака и допустимый нижний уровень температуры факела над леткой по условиям надежного выхода жидкого шлака. Температура над леткой контролируется в течение всех опытов оптическим пирометром. При наличии рециркуляции дымовых газов ее следует увеличивать при нагрузке котла, для которой имеет место снижение температуры

промперегрева. Опыты продолжают при новой подаче газов рециркуляции. В этих опытах проводят контрольные измерения температурного режима поверхностей нагрева по тракту рабочей среды.

При сжигании мазута с использованием механических форсунок одной из задач опыта является определение минимального давления топлива с сохранением устойчивого топочного процесса и хорошего распыла топлива форсунками. В опытах давление мазута от его номинального значения снижают степенями. При появлении признаков ухудшения топочного процесса следует увеличить подачу воздуха в горелки, а при необходимости и давление топлива (поднять нагрузку котла). При минимальном давлении мазута режим поддерживается для проверки не менее 4 – 6 часов при условии обеспечения надежности циркуляции или гидродинамики и температурного режима поверхностей нагрева по тракту рабочей среды.

При применении паромеханических форсунок и сжигании природного газа задача опыта сводится к определению минимальной нагрузки по условиям допустимого снижения температуры промперегрева, надежности циркуляции, гидродинамики и температурного режима поверхностей нагрева по тракту рабочей среды. Для этого котел разгружается степенями по  $(0,15 \div 0,25) D_n$  с выдержкой времени, необходимой для проведения всего объема измерений (но не менее 30 мин), при этом проверяется правильность соотношения топливо – воздух. При достижении минимальной нагрузки (по названным выше условиям) нагрузка несколько повышается для перехода в зону надежного режима, и на этой нагрузке режим проверяется в течение 4 – 6 ч.

Надежность работы котла на найденном нижнем пределе регулировочного диапазона проверяется нанесением кратковременных возмущений (примерно на 3 мин) набросами топлива и снижением расхода питательной воды на 15 – 20 % исходного уровня. Если при этом выявится необеспеченность надежности, проверяется предыдущая ступень нагрузки. Основные измерения и наблюдения в опыте (в основном по эксплуатационным приборам): нагрузка котла, параметры пара, температура питательной воды, анализ газов (вручную) за ближайшей к топке поверхностью нагрева (обычно за поворотной камерой), температура в топке, расход и давление вторичного воздуха, число и сочетание работающих горелок, питателей пыли, мельниц в схемах с прямым вдуванием, отбор и анализ проб топлива, шлака, золы уноса, проб пыли, нагрузка электродвигателей тягодутьевых устройств. Объем контроля температурного режима, гидродинамики или циркуляции по тракту рабочей среды определяется конструкцией котла.

Определение максимальной кратковременной нагрузки котла связано с необходимостью проверки возможного предела нагрузки применительно к условиям аварийной ситуации на электростанции или в энергосистеме. При сжигании твердого топлива опыт заключается в постепенном, степенями по 5 – 10 % номинальной, подъеме нагрузки котла сверх номинальной с выдерживанием ее на каждой ступени 20 – 30 мин и на заключительном этапе в течение 2 ч. Объем измерений, кроме указанного выше, включает контроль расхода воды на впрыски парохладителей, отбор проб котловой воды и пара

для определения их чистоты, контроль нагрузок электродвигателей мельниц и мельничных вентиляторов, измерения показателей надежности работы высокотемпературных поверхностей нагрева. Проведение опыта требует особых мер предосторожности в связи с возможным резким увеличением выхода шлака вследствие его сплавления со стен и пода топки при росте температуры факела. Ограничивающими условиями опыта могут быть недостаток воздуха или тяги, повышение температуры металла труб перегревателя, рост шлакования, ухудшение качества пара при забросе воды в пароперегреватель и недопустимый рост температуры перегрева пара или резкие колебания температуры металла входного участка перегревателя. Предельное значение нагрузки котла блочных установок должно быть увязано с разрешенной заводом-изготовителем мощностью турбогенератора.

Максимальная нагрузка газомазутного котла может дополнительно ограничиваться повышенной температурой экранных труб, снижением надежности циркуляции (по ее условиям предельная нагрузка согласовывается с заводом-изготовителем), недостаточностью напора питательных насосов, недопустимым ростом давления в барабане котла, повышенным нагревом обмуровки и особенно амбразур горелок.

Опыт по определению максимальной нагрузки газомазутного котла проводится следующим образом. При работе котла на номинальной нагрузке полностью открываются направляющие аппараты тягодутьевых машин. В случае недостатка дутья – дымососами, а при недостатке тяги – дутьевыми вентиляторами устанавливается разрежение вверху топки 20 Па и затем постепенно увеличивается подача топлива до достижения оптимального избытка воздуха, найденного при номинальной нагрузке. При появлении ограничений нагрузки по одной или нескольким указанным причинам прирост подачи топлива прекращается и в течение 2 – 3 ч проводится опыт на достигнутой (без ограничения) нагрузке с записью указанных выше показателей.

## **1.7 Пусковая наладка теплотехнического оборудования**

### **1.7.1 Организация пусконаладочных работ**

Пусконаладочные работы выполняются после монтажа оборудования. Основная задача пусконаладочных работ – комплексное опробование всей установки с целью проверки надежности и безопасности ее работы, а также достижения ее проектных параметров. В результате пусконаладочных работ должны быть выявлены и устранены все недостатки проекта и монтажа, препятствующие надежной и безопасной эксплуатации оборудования. Прием оборудования во временную эксплуатацию производится только после окончания пусконаладочных работ.

Наладочные работы выполняются специализированными организациями в соответствии с хозяйственными договорами, заключаемыми с предприятиями. Наладочные работы могут также выполняться силами предприятия при

наличии подготовленного инженерно-технического персонала и необходимого парка контрольно-измерительных приборов.

Инженерно-технический персонал, непосредственно выполняющий пусконаладочные работы, относится к оперативному персоналу и должен пройти обучение и сдать экзамен квалификационной комиссии в объеме выполняемой работы. Сдача экзамена выполняется протоколом с выдачей удостоверения, дающего право на выполнение наладочных работ. Повторной проверке знаний инженерно-технические работники подвергаются один раз в три года, а рабочие – ежегодно.

В результате наладочных работ составляется технический отчет, в котором рассматриваются все выполненные этапы и приводятся выводы и рекомендации для дальнейшего улучшения работы установки. Технический отчет является основным документом, характеризующим объем выполненных работ и их эффективность.

Опыт работ различных наладочных организаций показал, что затраты, связанные с наладочными работами, окупаются в течение нескольких месяцев. Сравнительные испытания и расчеты показывают, что в результате наладочных работ достигается экономия топлива в размере 3 – 5 %.

Пусконаладочные работы выполняются бригадой под руководством инженерно-технического работника. Состав бригады определяется объемом выполняемых работ, но обычно не превышает 5 человек. В бригаду входят инженерно-технические работники, т.к. все вспомогательные работы выполняет обслуживающий и ремонтный персонал предприятия.

На каждую работу по пусковой и режимной наладке составляется программа, которая согласовывается с предприятием. При разработке этой программы основное внимание должно быть обращено на опыты, связанные с опробованием отдельных узлов, выявлением недостатков конструкции элементов установки и качества монтажа оборудования.

Пусконаладочные работы состоят из следующих этапов:

- а) знакомство с проектом установки;
- б) наружного и внутреннего осмотра установки с целью выявления дефектов монтажа;
- в) подготовки оборудования к комплексному опробованию;
- г) подготовки эксплуатационного персонала;
- д) комплексное опробование установки;
- е) испытание оборудования при различных нагрузках по показаниям эксплуатационных контрольно-измерительных приборов;
- ж) составление технического отчета и ориентировочной режимной карты для обслуживающего персонала.

Руководитель наладочной бригады при пусконаладочных работах обязан: лично выполнять правила эксплуатации основного и вспомогательного оборудования, действующие на предприятии эксплуатационные инструкции, правила ТБ и ПБ; обеспечивать безопасные условия пусковых работ для персонала, который участвует в этих работах; обеспечивать правильное и четкое управление персоналом всех пусковых операций, лично руководя

наиболее ответственными этапами работы; принимать меры для предотвращения аварий и несчастных случаев при пуске оборудования; проверять наличие и правильность оформления предпусковой документации.

Руководителю наладочной бригады при пусконаладочных работах предоставляется право:

а) прекращать пуск основного и вспомогательного оборудования при возникновении опасности или нарушении пусковой схемы, а также при несоблюдении персоналом действующих инструкций;

б) не допускать участия в пусковых работах персонал, имеющий право на эксплуатацию оборудования, но не достаточно хорошо знаний на пускаемую установку;

в) отстранять от участия в пусковых работах лиц, нарушающих эксплуатационные инструкции, правила ТБ и ПБ;

г) давать инструктивные указания по вопросам ТБ и ОТ при пуске оборудования.

Члены наладочной бригады и эксплуатационный персонал, участвующие в наладочных работах, обязаны:

а) выполнять все указания руководителя наладочной бригады, действующие инструкции по пуску и эксплуатации, правила ТБ и ПБ;

б) производить по указанию руководителя необходимые переключения, пуск и остановку вспомогательного оборудования, регулирование режима работы основного и вспомогательного оборудования;

в) следить за работой оборудования, не покидая рабочего места без разрешения руководителя наладочной бригады;

г) немедленно сообщать руководителю НБ обо всех замеченных дефектах и неполадках в работе оборудования.

Ликвидация аварий на пускаемом оборудовании осуществляется эксплуатационным персоналом под непосредственным руководством наладочной бригады. Если авария не связана с пускаемым оборудованием, руководство ее ликвидацией осуществляет начальник смены или инженерно-технический персонал цеха.

### **1.7.2 Пусковая наладка котельных установок**

Пусковая наладка котельных установок должна начинаться до производства монтажных работ с рассмотрения проекта. При критическом рассмотрении проекта Складочная бригада должна обратить внимание на конструктивное решение отдельных узлов, удобство обслуживания установки, расположение лестниц и площадок, доступность арматуры для производства переключений, расположение дистанционного привода задвижек и шиберов, регулирующих режим работы агрегата, и т. д.

В ходе монтажных работ наладочная бригада должна осуществлять контроль над качеством выполнения отдельных узлов и их соответствием проекту. По мере окончания монтажа отдельных узлов оборудования производят его поузловую проверку и приемку с составлением акта.

По окончании монтажа оборудования, выявления и устранения дефектов производят опробование и обкатку вспомогательных механизмов (мельниц, дымососа, вентилятора, питателей топлива и т. д.). В процессе опробования необходимо убедиться в надежной работе механизмов (отсутствие стука и заеданий, утечек жидкости, недопустимого нагрева подшипников и вибрации).

Мельницы опробуют на холостом ходу в течение 10 – 20 мин, а затем их останавливают и производят внутренний и наружный осмотр. После устранения выявленных дефектов производят повторный пуск для обкатки в течение 8 ч. При обкатке основное внимание должно быть обращено на нагрев подшипников, амплитуду вибрации, загрузку электродвигателя по амперметру, поступление воды для охлаждения и на ее температуру на сливе в дренажные воронки.

Пробный пуск дымососа и вентилятора производится при закрытом направляющем аппарате. При отсутствии явно выраженных дефектов приоткрывают направляющий аппарат и проверяют в течение 10 – 15 мин работу машины. При нормальной работе машины ее останавливают и внимательно осматривают. Если при осмотре не обнаружены серьезные дефекты, машину запускают повторно и в течение 1 ч обкатывают на холостом ходу. Затем постепенно открывают направляющий аппарат, следят за нагрузкой электродвигателя по амперметру, и обкатывают машину под нагрузкой в течение 4 – 5 ч. При обкатке особенно внимательно следят за температурой подшипников, которая не должна превышать 65 °С.

Питатели топлива и пыли опробуются и обкатываются на холодом ходу в течение 4 – 5 ч. Особенно тщательно должна производиться обкатка скребковых питателей, у которых во время обкатки притираются трущиеся поверхности.

Механические решетки опробуются и обкатываются также на холостом ходу. При пробном пуске особенно внимательно следят за отсутствием заеданий и ударов в движущихся частях. Повторный пуск решетки может производиться только после ее тщательного внутреннего осмотра. Обкатка решетки производится в течении 24 ч. При обкатке решетки должен быть установлен тщательный контроль над температурой подшипников, электродвигателя. Работа редуктора должна быть бесшумной. Вибрация подшипников редуктора не должна превышать 0,05 мм.

Скреперные системы топливоподачи, шлакозолоудаления, транспортеры и подъемники опробуют на холостом ходу в течение ч. При опробовании следят за работой лебедок, направляющих потоков, конечных выключателей и тросов. Скреперный ковш должен свободно проходить в скреперном канале, без отклонения от направляющих устройств и заедания за стенки канала. Дефекты, выявленные при пробном пуске, должны быть полностью ликвидированы. Результаты обкатки и опробования оформляются актом.

После опробования вспомогательных механизмов должна быть произведена тщательная проверка плотности газовоздушного тракта котельного агрегата. Места присоса холодного воздуха в газовый тракт можно определить по отклонению горящего факела или «на дым». Для определения мест присоса

по отклонению горящего факела создают повышенное разрежение в газоходах котла, для чего пускают дымосос. Затем подносят горящий факел к различным частям обмуровки и наблюдают за его положением. При наличии неплотности пламя факела будет вытягиваться в сторону мест присоса. Для определения мест присоса «на дым» зажигают в топке дымовые шашки или другие смолистые материалы и создают в газоходах котла небольшое избыточное давление. Дым, проходя через неплотности обмуровки, оставляет на ней следы, по которым и определяют места присоса холодного воздуха.

Обнаруженные неплотности следует уплотнять асбестовым шнуром с последующей промазкой хорошо перемешанной смесью, состоящей из 40 % речного высушенного песка, 20 % сухого молотого асбеста, не более 20 % тонкомолотого кварцевого песка, 15 % каменноугольного песка, 15 % кремнефторида натрия. В качестве растворителя применяется жидкое стекло с плотностью 1,35 г/см<sup>2</sup> в соотношении 35 см<sup>2</sup> на 100 г сухой смеси. Обмазка наносится на поверхность слоем толщиной 8 – 10 мм вручную и выравнивается мастерком. Работа с обмазкой должна выполняться в резиновых перчатках во избежание раздражения кожи рук. Обмазка заготавливается малыми порциями, так как быстро сохнет и в засыхающем состоянии плохо наносится на поверхность обмуровки.

Для выявления мест утечки воздуха производят опрессовку воздушного тракта, который ставят под давление включением дутьевого вентилятора. При этом шиберы перед горелками или топкой должны быть закрыты. Затем во всасывающий патрубок вентилятора при открытом направляющем аппарате забрасывают одно-два ведра сухого порошкообразного мела, который, выходя через имеющиеся неплотности, выявляет все места утечек воздуха. Особенно тщательно следует производить осмотр с газовой стороны трубных досок воздухоподогревателя.

Подготовка котла к комплексному опробованию заключается в сушке обмуровки, щелочении и испытании котлоагрегата на паровую плотность.

При обмуровочных работах вместе с огнеупорными материалами вносится значительное количество воды. Опыты показывают, что количество воды, удаляемой в процессе сушки, ориентировочно составляет: для тяжелой обмуровки 50 – 100 кг/м<sup>2</sup>, для легких навесных обмуровок 10 – 12 кг/м<sup>2</sup>. Кроме того, следует учитывать, что толщина тяжелой обмуровки бывает более 500 мм, что усложняет процесс сушки. Быстрая сушка толстых тяжелых обмуровок может привести к растрескиванию и деформациям как футеровочного, так и облицовочного слоя. Тяжелые обмуровки испытывают значительные вертикальные, а иногда и горизонтальные нагрузки, поэтому они должны обладать необходимой механической прочностью. Появление в процессе сушки в кирпичной кладке трещин, сдвигов или других деформаций недопустимо.

Сушить обмуровку можно горячими газами, получаемыми при сжигании дров в топочной камере; горячим воздухом, подаваемым в топочную камеру с температурой 200 – 250 °С от работающих котлов; горячей водой, пропускаемой по поверхности нагрева котла и подогреваемой паром от действующих котлов; горячими газами, получаемыми при сжигании

природного газа или мазута в основных горелках или в горелках, специально устанавливаемых для сушки, а также твердого топлива, сжигаемого на решетке. Сушка горячими газами, получаемыми при сжигании дров, может применяться для котлов малой производительности, при этом расход дров на сушку для некоторых типов котлов доходит до  $100 \text{ м}^3$ .

Наиболее распространенным из перечисленных способов является сушка обмуровки горячими газами, получаемыми при сжигании в топке различных видов топлива. Продолжительность искусственной сушки при постепенном повышении температуры в топочной камере к концу сушки до  $200 - 250 \text{ }^\circ\text{C}$  должна составлять:  $90 - 100 \text{ ч}$  для неэкранированных котлов с тяжелой обмуровкой толщиной  $500 - 900 \text{ мм}$ ,  $70 - 80 \text{ ч}$  для экранированных котлов с обмуровкой толщиной  $200 - 500 \text{ мм}$ .

Наблюдение за режимом сушки следует вести по показаниям термометров, закладываемых в обмуровку боковых стен в районе пароперегревателя, а при его отсутствии – в районе первого газохода. Термометры закладываются на глубину около  $50 \text{ мм}$ . Процесс искусственной сушки считается протекающим нормально, если происходит постепенное повышение температуры обмуровки до  $40 - 55 \text{ }^\circ\text{C}$ . Процесс сушки считается законченным, когда температура облицовочного слоя достигнет  $50 - 55 \text{ }^\circ\text{C}$  и после выдерживания в течение  $15 - 30 \text{ ч}$  при этой температуре влажность обмуровки не будет превышать  $0,5 \%$ .

При искусственной сушке на газе или мазуте горелки следует использовать с возможно меньшей производительностью. При этом число горелок, находящихся в работе, должно быть минимальным, но таким, которое обеспечивает равномерный нагрев топочной камеры. По мере повышения температуры обмуровки производительность горелок следует постепенно увеличивать.

По окончании монтажа производят химическую очистку внутренних поверхностей нагрева котлоагрегата от загрязнений (ржавчины, сварочного грата, окалины, масла и др.). Химическая очистка основана на использовании растворов химических реагентов: щелочей, кислот и комплексообразователей. Предпусковая химическая очистка поверхностей нагрева мощных котлоагрегатов состоит из следующих операций: интенсивной промывки холодной и затем горячей водой, щелочения, обработки кислотой или комплексонами, удаляющими оксиды железа (ржавчину, окалину). Из различных кислот наиболее часто применяют соляную, а из комплексонов этилендиаминтетрауксусную кислоту (ЭДТА) и трилон-Б.

Кислотная промывка и обработка комплексонами является ответственной операцией и должна выполняться специально подготовленным квалифицированным персоналом. Кислотную промывку или обработку комплексонами применяют на промышленных и водогрейных котлах только при сильном поражении их поверхности нагрева коррозией. Чаще всего при предпусковой очистке ограничиваются щелочением. При щелочении под действием химических реагентов ослабляется сцепление между частицами отложений и они, частично растворяясь, смываются котловой водой. Для

интенсивной отмывки и очистки поверхности нагрева необходима такая циркуляция котловой воды, которая может быть достигнута только при огневом обогреве поверхности нагрева.

Продолжительность щелочения и количества вводимых реагентов зависят от степени и характера загрязнений. По этому признаку котлы делят на три группы. К первой группе относятся котлы, которые после их изготовления находились в хороших условиях хранения и не имеют на внутренних поверхностях видимого слоя ржавчины или же имеют только отдельные ее вкрапления. Вторая группа – это новые котлы, но хранившиеся до начала монтажа на открытых складах, со слоем ржавчины на внутренней поверхности. К третьей группе относятся котлы, бывшие в работе и повторно смонтированные, со следами накипи, маслянистыми отложениями и ржавчиной.

Концентрация реагентов в котловой воде, необходимая для щелочения котлов различной группы, указана в таблице 5.

Таблица 5 – Концентрация реагентов, необходимая для щелочения котлов (в кг/м<sup>3</sup>)

Реагенты	Котлы		
	первой группы	второй группы	третьей группы
Едкий натр	2,5	4,5 – 7,0	6 – 8
Тринатрийфосфат	2,5	4 – 5	5 – 6

Растворы едкого натра и тринатрийфосфата крепостью до 20 % должны вводиться отдельно. Раствор готовится на горячей воде. Вводить реагенты в сухом виде запрещается. При приготовлении растворов и вводе их в котел необходимо соблюдать меры безопасности и выполнять инструкции для персонала химических цехов, которые работают со щелочами.

Перед вводом реагентов котел должен быть заполнен питательной водой до низшего уровня по водомерному стеклу. Этот уровень поддерживается в течение всего процесса щелочения.

На котлах первой группы щелочение производят при установленных сепарационных устройствах, а на котлах остальных групп – без них. Ввод реагентов в котел производят через какой-либо штуцер на верхнем барабане или фосфатными насосами.

После ввода реагентов растапливают котел и постепенно поднимают давление, до 0,3 МПа. При этом давлении производят затяжку фланцевых и других болтовых соединений. Затем продолжают подъем давления до 75 – 100 % номинального, но не более чем до 2 МПа. Разрешается производить щелочение котла при давлении 0,6 – 0,7 МПа с увеличением длительности щелочения в два раза. В процессе щелочения необходимо следить за тем, чтобы температура газов перед пароперегревателем не превышала 550 °С, а расход на продувку пароперегревателя составлял не менее 5 % паропроизводительности котла.

В ходе щелочения необходимо производить продувку котла через нижние точки. Первые продувки начинают производить через 12 – 20 ч с момента начала щелочения. К концу щелочения интенсивность продувки увеличивают для максимального удаления загрязнений из котла. С момента начала щелочения необходимо осуществлять контроль над качеством котловой воды. Пробы котловой воды из верхнего и нижнего барабанов, а также из камер отбирают через каждые 3 – 4 ч с целью определения концентрации реагентов. Результаты анализов записывают в специальный журнал. В период щелочения не допускается снижения щелочного числа котловой воды ниже 2000 мг/л. Щелочение котла продолжается от 48 до 86 ч. Вместо щелочения может применяться реагентная отмывка.

По окончании щелочения у котлов второй и третьей групп вскрывают барабаны и камеры для осмотра и удаления отложений. Спуск воды из котла после щелочения производится при атмосферном давлении и при температуре воды не выше 50 – 60 °С. Трубы поверхности нагрева котлов второй и третьей групп промывают из верхнего барабана, подавая воду через шланг.

Испытание котла на паровую плотность производится для выявления утечек пара и воды, которые могли появиться вследствие тепловых расширений и деформаций, а также для определения тепловых перемещений элементов котла и трубопроводов. Испытание на паровую плотность котлов первой группы может выполняться в конце щелочения без предварительной остановки котла для промывки поверхности нагрева.

В процессе парового опробования особое внимание должно быть уделено состоянию Катковых и скользящих опор барабанов и камер. Положение реперов фиксируется для следующих состояний котла: после заполнения котла водой, при избыточном давлении 0,1 и 0,3 МПа, при давлении 30, 60 и 100% рабочего, при охлаждении котла после испытания.

При рабочем давлении следует отрегулировать предохранительные клапаны и проверить плотность фланцевых соединений и арматуры. О проведенном испытании и о регулировке предохранительных клапанов составляется акт.

Подготовка персонала к комплексному опробованию должна начинаться заблаговременно. Администрация предприятия выделяет наладочной бригаде персонал, имеющий право эксплуатации котельных установок и сдавший экзамен специальной комиссии. Руководитель наладочной бригады знакомит выделенный для комплексного опробования эксплуатационный персонал с конструкцией и особенностями работы оборудования, программой комплексного опробования, приводит несколько противоаварийных тренировок и комплектуется смены. Комплексное опробование оформляется приказом.

Комплексному опробованию котлоагрегата должно предшествовать комплексное опробование водоподогревательного оборудования химводоочистки и деаэратора. Если в котельном цехе пускается первый котлоагрегат, то комплексное опробование водоподготовительного оборудования и котлоагрегата производятся одновременно.

Одним из наиболее ответственных этапов работы является комплексное опробование котельного агрегата. Комплексное опробование производится в течение 72 ч непрерывной работы с номинальной производительностью. Началом комплексного опробования котлоагрегата и его вспомогательного оборудования считается время включения котельного агрегата в паровую магистраль. В этот период устанавливается непрерывное дежурство инженерно-технических работников наладочной бригады совместно с выделенным эксплуатационным персоналом.

После комплексного опробования котлоагрегат останавливают и производят его осмотр, а также ликвидацию дефектов, выявленных в результате комплексного опробования. Об окончании комплексного опробования составляется акт, в котором указывается, при каких условиях оно проводилось и с какими параметрами работало основное и вспомогательное оборудование. Кроме того, к акту прилагается перечень дефектов, выявленных в результате комплексного опробования. По окончании комплексного опробования агрегат считается принятым во временную эксплуатацию и дежурство инженерно-технических работников наладочной бригады прекращается.

В период комплексного опробования должны производиться все необходимые измерения, позволяющие определить надежность работы агрегата, его производительность и параметры пара.

В период временной эксплуатации котлоагрегата наладочная бригада производит измерения, необходимые для составления временной ориентировочной режимной карты. Для этого выполняются балансовые испытания котла при трех-четырёх нагрузках. Для измерений в основном используются эксплуатационные контрольно-измерительные приборы.

Результаты пусковой наладки оформляются техническим отчетом, в котором указываются все этапы проделанной работы, а также даются конкретные рекомендации для улучшения работы агрегата и повышения его экономичности.

### **1.7.3 Пусковая наладка теплоиспользующих установок, тепловых сетей предприятия**

#### **1.7.3.1 Пусковая наладка теплоиспользующих установок**

ПН ТИС производится в соответствии с индивидуальной программой, учитывающей конструкцию и сложность установки. Любой ТИ аппарат (ТИА) по окончании монтажа должен быть испытан на прочность и плотность. Чаще всего для проверки прочности и плотности производят гидравлические испытания установки. При этом испытанию подвергаются все полости (паровая, водяная, масляная и др.) аппарата в отдельности. Объем гидравлических испытаний и пробные давления указываются в рабочих чертежах аппарата. При гидравлических испытаниях (ГИ) путем осмотра проверяется отсутствие выпучин, нарушение плотности фланцевых и сварных соединений.

Плотность аппарата может также проверяться по падению абсолютного давления нагнетаемой среды. Допускается проверять плотность керосином, водяным паром или воздухом. При проверке керосином им заполняют сосуд на 30 – 40 минут и по масляным пятнам обнаруживают имеющиеся неплотности. При испытании водяным паром проверяют отсутствие влажных пятен в местах соединений. При испытании воздухом все соединения обмазывают мыльной эмульсией и по выявлению мыльных пузырей судят о неплотности соединений.

ТИУ по окончании монтажных работ и испытаний на прочность и плотность принимаются ведомственными или государственными комиссиями с обязательным участием представителя местной инспекции Госэнергонадзора. Приемочная комиссия проверяет соответствие выполненных работ по проекту и требованиям «ПТЭ ТИУ и ТС» Госэнергонадзора. Установки, выполненные без проекта и с нарушением действующих правил, к эксплуатации не допускаются.

До сдачи ТИУ в промышленную эксплуатацию должны быть устранены все дефекты и недоделки монтажа, а также проведены испытания для определения надежности и соответствия параметров проектным и гарантийным данным.

После принятия ТИУ государственной или ведомственной комиссией производится комплексное испытание всей установки. Комплексное испытание аппаратов непрерывного действия продолжается 72 часа, а периодического действия – не менее чем в трёх технологических циклах, а при длительности цикла 72 часа – не менее чем в одном цикле.

В течении комплексного испытания не реже чем через каждые 30 минут измеряются: параметры теплоносителя (давление и температура), расход теплоносителя, параметры нагреваемой жидкости и ее расход или количество продукции, прошедшее через аппарат за 1 цикл. Об окончании комплексного испытания составляется акт, к которому прилагается ведомость дефектов, выявленных при опробовании.

Для крупных (с большим расходом теплоносителя) установок результаты наладки оформляются техническим отчетом, в котором фиксируются выполненные работы, приводится ориентировочный тепловой баланс установки и рекомендуется временная норма расхода теплоты на единицу выпускаемой продукции. В заключение отчета даются рекомендации для уточнения эксплуатационных инструкций, повышения экономичности и производительности установки.

### **1.7.3.2 Пусковая наладка тепловых сетей предприятия**

ПН водяных сетей заключается в заполнении сети водой, промывке, испытании на плотность, установлении циркуляции, испытании на расчетную (максимальную) температуру, включении потребителей и пусковой регулировке сети.

ПН паровых сетей заключается в подогреве и продувке паропроводов, заполнении и промывке конденсатопроводов, включении потребителей и пусковой регулировке сети.

Испытание ТС на плотность производится для проверки механической прочности и герметичности трубопроводов и арматуры. Для испытания должна применяться вода с температурой не ниже +5 °С. Измерение давления производится по двум проверенным манометрам, один из которых должен быть контрольным. Испытания производятся пробным давлением, равным 1,25 рабочего давления. Давление поднимается и снижается постепенно. Время выдержки трубопроводов и его элементов под пробным давлением должно быть не менее 5 минут. Затем давление снижается до рабочего и производится осмотр трубопровода. Трубопровод и его элементы считаются выдержавшими испытания, если не обнаружено признаков разрыва, течи, слезок и потения в сварных соединениях и в основном металле, а так же видимых остаточных деформаций.

О герметичности трубопровода и установленной арматуры можно ориентировочно судить также по скорости падения давления. Однако такая проверка не всегда дает правильное представление о герметичности трубопровода, т.к. на скорость падения давления влияет не только герметичность трубопровода, но и количество воздуха, находящегося в трубопроводе. Наиболее надежным показателем герметичности является утечка воды.

Испытания водяной тепловой сети на расчетную (максимальную) температуру производятся для проверки прочности и компенсирующей способности сети в условиях температурных деформаций при подъеме температуры теплоносителя до расчетной. Продолжительность испытания определяется условием поддержания максимальной (расчетной) температуры воды в концевых участках в течении не менее 30 минут. Скорость повышения и снижения температуры воды не должна превышать 30 °С в час. При проведении испытаний задвижка на перемычке у тепловых потребителей открывается, а потребители отключаются.

В ходе испытаний ведется непрерывное наблюдение за температурой воды и конечных точках сети. Герметичность трубопроводов, подогревателей и арматуры контролируется по количеству подпиточной воды и наружным осмотрам. Проверка работы компенсаторов осуществляется по их перемещению при различных температурах. Для наиболее опасных участков трубопроводов снимается график перемещения компенсатора в зависимости от температуры воды, которая измеряется в ближайшем к компенсатору сечении трубопровода.

Для включения абонентских вводов, присоединенных к водяным сетям, необходимо произвести их наполнение. Наполнение производится химически очищенной деаэрированной водой, циркулирующей в ТС. Наполнение осуществляют через обратную линию ввода при закрытой задвижке на падающей линии и постепенным прикрытием задвижки на обратной линии. После заполнения системы водой включается циркуляция и производится наладка оборудования абонентской установки.

Для включения абонентских установок, присоединенных к паровым сетям, сначала открывают продувочные вентили абонентской установки, а

затем постепенно открывают задвижку на вводе. После обогрева абонентских установок вентили на их продувочных линиях закрываются.

После включения тепловых потребителей производится пусковая регулировка сети в соответствии с проектными данными. Для ввода тепловой сети в постоянную эксплуатацию должны быть проведены гидравлические и тепловые испытания. Гидравлические испытания проводятся для проверки гидравлического режима сети и определения действительных сопротивлений отдельных участков сети, а тепловые испытания – с целью определения тепловых потерь.

Наиболее просто и точно сопротивления отдельных участков определяются по перепаду давления на дифференциальном манометре, присоединенном к начальной и конечной точкам испытываемого участка. Но, использование диф.манометра возможно только при расположении обеих точек рядом. В остальных случаях сопротивления отдельных участков водяной тепловой сети определяются по показаниям пружинных манометров.

## **1.8 Режимная наладка теплоиспользующих установок**

### **1.8.1 Схемы установки средств измерений при испытании**

Основной целью наладки теплоиспользующих установок является выбор оптимальных режимов работы, при которых обеспечивается высокое качество продукции, максимальная производительность установки и минимальный расход теплоты и других видов энергии.

Режимно-наладочные испытания теплоиспользующих установок состоят из серии балансовых и упрощенных опытов. В результате режимной наладки удается выявить соответствие эксплуатационных показателей установки проектным, проанализировать экономические показатели и разработать рациональные энерготехнологические режимы. Перед наладкой должна быть составлена программа испытаний и разработана схема установки средств измерений.

При балансовых испытаниях теплоиспользующих установок составляют тепловой и материальный балансы, а при упрощенных ограничиваются определением удельного расхода теплоты на единицу выпускаемой продукции.

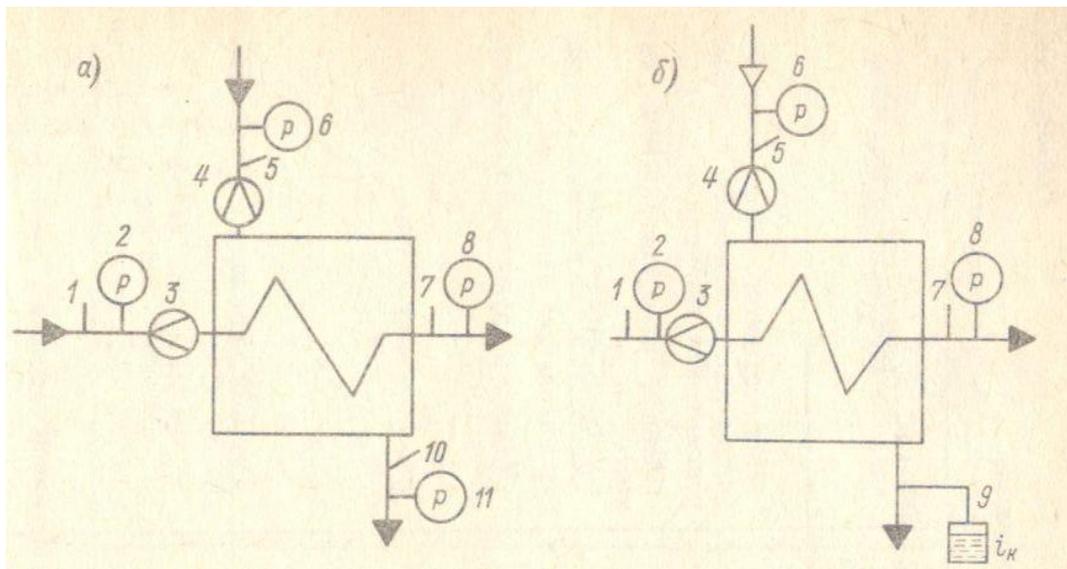


Рисунок 47 – Схема измерений при балансовых испытаниях рекуперативного теплообменного аппарата

а – без изменения агрегатного состояния теплоносителя; б – при изменении агрегатного состояния теплоносителя (перечень средств измерений и их характеристику см. в табл. 6)

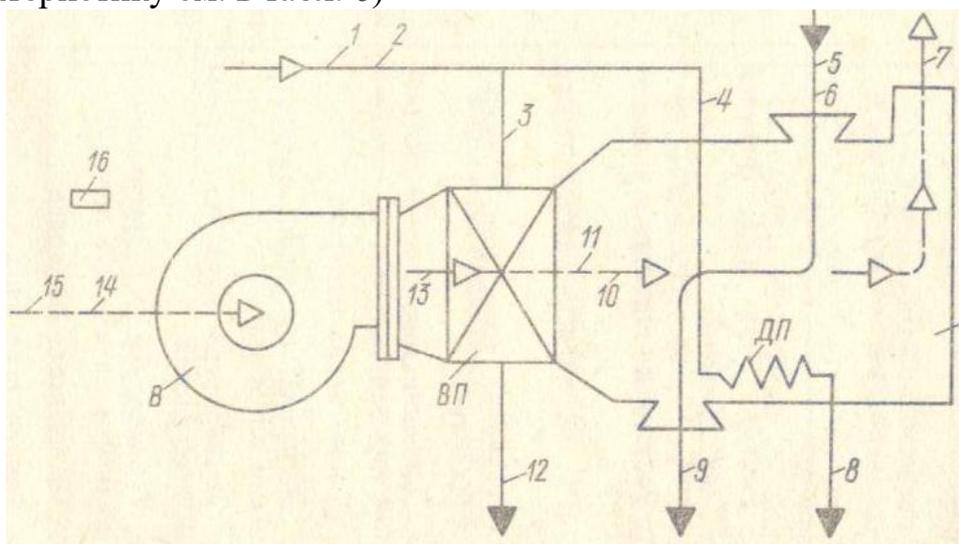


Рисунок 48 – Схема расстановки средств измерений при испытании конвективной сушилки (перечень средств измерений и их характеристику см. в табл. 7)

При испытании теплоиспользующих установок производятся измерения количества и оценка качества материала (продукта) в начальной и конечной стадиях процесса, измерения количества и параметров теплоносителя, температуры поверхности элементов оборудования и других параметров, характеризующих технологический процесс в промежуточных стадиях.

На рисунке 47 показана схема измерений при балансовых испытаниях рекуперативного теплообменного аппарата поверхностного типа непрерывного действия при протекании процессов без изменения и с изменением агрегатного состояния одного из теплоносителей, а в таблице 6 дана краткая характеристика применяемых средств измерений.

На рисунке 48 показана схема измерений при испытании конвективной сушилки с однократным использованием сушильного агента, а в таблице 7 приведены характеристики применяемых при этом средств измерений.

Таблица 6 – Средства измерения, необходимые при балансовых испытаниях рекуперативного аппарата поверхностного типа

Позиция на рисунке 47	Измеряемая величина	Место установки	Число точек замера	Средство измерения и его характеристика
1	2	3	4	5
4	Расход пара или греющей жидкости	Трубопровод пара или греющей жидкости к аппаратам	1	Для перегретого пара и жидкости диафрагма, соединенная с дифференциальным манометром
9	Расход и энтальпия конденсата	Конденсатопровод	1	Мерная калориметрическая емкость
3	Расход нагреваемой жидкости	Трубопровод нагреваемой жидкости к аппарату	1	Диафрагма, соединенная с дифференциальным манометром
6	Давление пара или греющей жидкости	Трубопровод к аппарату (перед диафрагмой)	1	Манометр пружинный класса точности 1,0
2	Давление нагреваемой жидкости перед аппаратом	Трубопровод нагреваемой жидкости к аппарату	1	Манометр пружинный класса точности 1,0

Продолжение таблицы 6

1	2	3	4	5
8	Давление нагреваемой жидкости после аппарата	Трубопровод нагреваемой жидкости после аппарата	1	Манометр пружинный класса точности 1,0
11	Давление греющей жидкости после аппарата	Трубопровод греющей жидкости после аппарата	1	Манометр пружинный класса точности 1,0
5	Температура пара или греющей жидкости	Трубопровод пара или греющей жидкости к аппарату	1	Ртутный термометр с ценой деления 0,1 °С
1	Температура нагреваемой жидкости на входе в аппарат	Трубопровод нагреваемой жидкости к аппарату	1	Ртутный термометр с ценой деления 0,1 °С
7	Температура нагреваемой жидкости после аппарата	Трубопровод нагреваемой жидкости после аппарата	1	Ртутный термометр с ценой деления 0,1 °С
10	Температура греющей жидкости после аппарата	Трубопровод пара или греющей жидкости после аппарата	1	Ртутный термометр с ценой деления 0,1 °С

Таблица 7 – Средства измерения, необходимые при балансовых испытаниях конвективной сушилки с однократным использованием сушильного агента

Позиция на рисунке 48	Измеряемая величина	Место установки	Число точек замера	Средство измерения и его характеристика
1	2	3	4	5
5	Количество материала, поступающего в сушилку	Вход в сушилку	1	Весы любого типа
6	Влажность материала, поступающего в сушилку	Отбор пробы перед сушилкой	1	Лабораторный анализ

Продолжение таблицы 7

1	2	3	4	5
9	Влажность материала, выходящего из сушилки	Отбор пробы после сушилки	1	Лабораторный анализ
16	Атмосферное давление	Помещение цеха	1	Барометр любого типа
14	Температура воздуха по мокрому и сухому термометру перед вентилятором	Место забора воздуха	1	Психрометр
7	Температура воздуха по мокрому и сухому термометру перед вентилятором на выходе воздуха из сушилки	Воздухопровод после сушилки	1	Психрометр
10	Температура воздуха после выносного подогревателя	Воздухопровод после выносного подогревателя	1	Ртутный термометр с ценой деления 1 °С
13	Давление воздуха перед выносным подогревателем	Воздухопровод после вентилятора	1	U-образный манометр, залитый водой
11	Давление воздуха после выносного подогревателя	Воздухопровод после выносного подогревателя	1	U-образный манометр, залитый водой
15	Расход воздуха	Прямой участок всасывающего или нагнетательного воздухопровода	1	Анемометр чашечный или пневмометрическая трубка, соединенная с микроманометром

Продолжение таблицы 7

1	2	3	4	5
1	Давление пара перед подогревателем	Паропровод к подогревателям	1	Манометр образцовый
2	Температура пара перед подогревателями	Паропровод к подогревателям	1	Ртутный термометр с ценой деления 1 °С
3,4	Расход пара	Паропровод на подогреватели или конденсатопровод подогревателей	1	При перегретом паре диафрагма с дифференциальным манометром ДТ-50; при насыщенном паре мерный бак, измеряющий расход конденсата
12	Энтальпия конденсата после выносного подогревателя	Конденсатопровод	1	Калориметрическая мерная емкость
8	Энтальпия конденсата после внутрикамерного подогревателя	Конденсатопровод	1	Калориметрическая мерная емкость

### 1.8.2 Методика испытаний и обработки результатов измерений

Испытания теплоиспользующих установок производятся при номинальной производительности. Перед испытанием необходимо произвести тщательный осмотр установки и ликвидировать все выявленные дефекты. Особенно следует обращать внимание на исправность конденсатоотводчиков (пропуск пара, скопление конденсата, гидравлические удары и т. д.).

Аппараты непрерывного действия испытываются при установившемся тепловом режиме. Продолжительность испытания теплоиспользующих установок обычно составляет одну рабочую смену, но не менее одного технологического цикла. Отсчет показаний измерительных приборов производят через каждые 10 мин, за исключением показаний дифференциальных манометров, измеряющих расход пара или жидкости. Показания дифференциальных манометров снимаются через каждые 2 мин. В течение опыта следует производить хронометраж всех операций: пуска, остановки, поступления в аппарат материала и выхода готовой продукции. При использовании насыщенного пара расход его следует определять по количеству конденсата, измеряемого мерной емкостью.

На рисунке 49 показана мерная калориметрическая емкость, которая позволяет определить расход конденсата и его энтальпию. Мерная калориметрическая емкость устанавливается после конденсатоотводчика. В нее наливается определенное количество холодной воды. Затем в течение определенного времени, отсчитываемого по секундомеру, подается конденсат. Количество воды и температура увеличиваются.

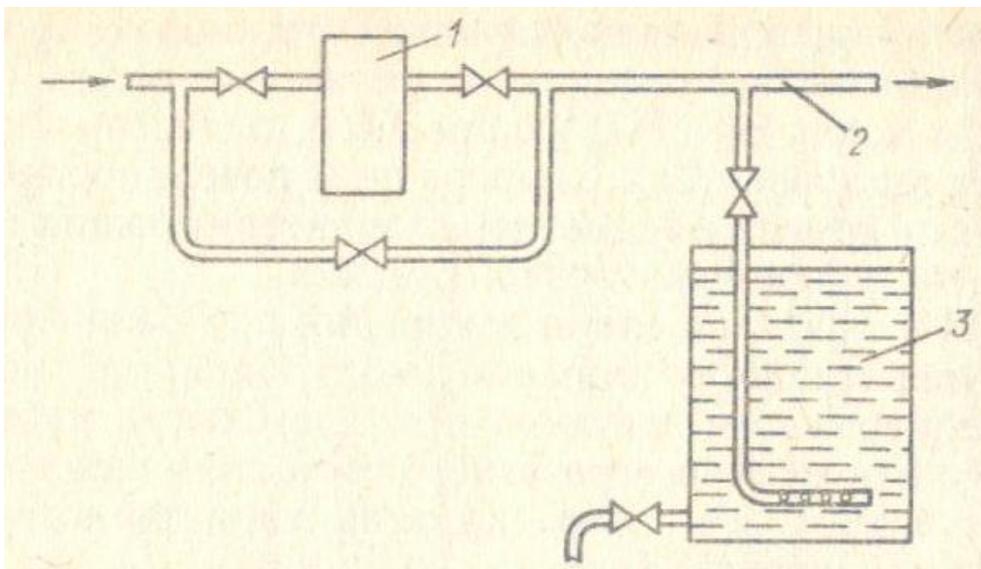


Рисунок 49 – Мерная калориметрическая емкость

1 – конденсатоотводчик; 2 – тройник; 3 – калориметрическая емкость

В результате испытания теплоиспользующих установок после усреднения измеренных величин составляют материальный и тепловой баланс аппарата, а также определяют средний коэффициент теплопередачи.

Обработка результатов испытаний конвективной сушилки с однократным использованием сушильного агента производится в такой последовательности.

## 2 Испытания паровых котлов

### 2.1 Методика испытаний паровых котлов

#### 2.1.1 Классификация и организация испытаний паровых котлов

В зависимости от поставленных задач испытания паровых котлов могут быть разделены на две группы – *промышленно-эксплуатационные*, проводимые с целью определения энергетических характеристик, выявления эксплуатационных особенностей и недостатков котлов, и *исследовательские*, имеющие целью отработку или проверку новых конструкций, элементов, закономерностей.

Промышленные испытания проводятся по трем категориям сложности и в зависимости от целей отличаются в основном объемом и точностью измерений.

К I категории относятся *приемосдаточные* (гарантийно-сдаточные) испытания, имеющие целью проверку гарантий завода-изготовителя котла по основным показателям: паропроизводительность, КПД, параметры и качество пара, характеристики вспомогательного оборудования. При этом определяются все потери теплоты, воздушный баланс топки, тепловосприятие поверхностей и др. Эти испытания проводятся в начальный период работы котла после монтажа.

Ко II категории относятся *эксплуатационные* (балансовые) испытания с целью установления нормативных характеристик и режимных карт после освоения новых котлов, реконструкции, перевода на другое топливо; при этом определяются оптимальные условия работы топки, максимальная и минимальная нагрузки котла, фактическая экономичность и отдельные тепловые потери, аэродинамические характеристики и характеристики вспомогательного оборудования.

К III категории относятся *режимно-наладочные* и *доводочные испытания* с целью наладки режима работы котла, определения оптимальных значений его отдельных показателей: коэффициента избытка воздуха, тонкости пыли, распределения воздуха по горелкам, нахождения максимальной нагрузки при разном составе работающего вспомогательного оборудования и др. Кроме того, определяются допустимые по условиям надежности пределы изменений режима работы элементов котла, их влияние на показатели и, наконец, устраняются обнаруженные дефекты и отклонения.

По III категории проводятся и эксплуатационные *экспресс-испытания* после типовых капитальных ремонтов котла с целью определения качества ремонта и уточнения характеристик котла и его элементов.

Если испытания I и II категорий требуют достаточно точного определения абсолютных значений искомых величин, то при испытаниях III категории применяются упрощенные методы, дающие возможность определить отдельные изменения параметров, необходимые для оптимизации режима.

Испытания по I и II категориям проводятся при установившемся тепловом состоянии котла с обязательным сведением теплового баланса. При

этом используется аппаратура повышенной точности (классов 0,5 и 1,0), позволяющая определить КПД котла по обратному балансу с относительной погрешностью  $\pm 1,5\%$ .

Разница между I и II категориями испытаний состоит в объеме измерений, длительности опытов, допустимых отклонениях основных показателей работы котла, условиях работы до и между отдельными режимами испытания и т. п.

Например, максимально допустимые отклонения избытка воздуха соответственно для I, II, III категорий составляют  $\pm 4\div 5\%$ ,  $\pm 4\div 5\%$ ,  $\pm 7\%$ ; продолжительность работы котла от растопки до начала испытаний не менее 60, 36, 36 ч; допустимые отклонения нагрузки в период ее выдерживания в течение 3 ч перед опытом  $\pm 3\%$ ,  $\pm 5\%$ ,  $\pm 10\%$ , длительность опыта при определении расхода топлива обратным балансом 4, 4, 3 ч и т. д.

При испытании по всем категориям КПД котла определяется по обратному балансу. Марка, технический состав топлива (влажность, зольность, выход летучих, теплота сгорания) должны соответствовать расчетным или среднеэксплуатационным. При сжигании жидких и газовых топлив допустимо применять для определения тепловых потерь методику, не требующую отбора средних проб топлива. При сжигании твердого топлива эта методика не дает преимуществ, так как необходимость определения потерь теплоты с механической неполнотой сгорания требует отбора проб топлива и очаговых остатков и их анализа.

Объем испытаний по категориям сложности определяется в каждом конкретном случае в зависимости от стоящих задач, примерные программы испытаний изложены ниже.

#### *Режимно-наладочные испытания (III категория)*

1. Предварительные измерения (12 – 15 опытов): в них проводится определение частоты вращения питателей топлива (пыли), тарировка мазутных форсунок; тарировка сечений газоходов, пылевоздуховодов, воздухопроводов; измерение скоростей воздуха в горелках и воздуховодах; определение присосов воздуха по котлу (включая золоулавливающую установку) и пылесистеме.

2. Наладочные опыты: определение оптимального положения факела (4 опыта); определение оптимального коэффициента избытка воздуха (при трех – четырех нагрузках котла) (12 – 16 опытов), определение оптимальной тонкости пыли (6 – 8 опытов); определение оптимального сочетания работающих горелок при минимальной нагрузке 4 – 6 опытов).

3. Основные опыты: определение КПД и тепловых потерь на номинальной и трех пониженных нагрузках (4 опыта); определение максимальной нагрузки (3 – 4 опыта); определение минимальной нагрузки (2 – 3 опыта).

### *Эксплуатационные балансовые испытания (II категория)*

Предварительные измерения и наладочные опыты (по программе режимно-наладочных испытаний).

Определение наибольшей бесшлаковочной нагрузки (в течение суточного испытания (2 – 3 опыта)).

Определение минимальной длительной нагрузки пылеугольного котла без изменений состава вспомогательного оборудования и без подсветки факела мазутом (нижнего регулировочного диапазона) (2 – 3 опыта); для котлов с жидким шлакоудалением, кроме того, из условия обеспечения надежного выхода жидкого шлака.

То же с изменением состава оборудования и подсветкой факела (технического минимума) и допустимой длительности поддержания этой нагрузки (2 – 3 опыта).

Выявление экономичности при номинальной, минимальной и двух-трех промежуточных нагрузках (5 – 6 опытов).

Объем испытаний для нахождения нормативных характеристик котлов определяется необходимостью получения следующих основных зависимостей от паропроизводительности брутто: потерь теплоты, КПД брутто и КПД нетто котла, расходов электроэнергии и теплоты на собственные нужды.

Объем эксплуатационных экспресс-испытаний после типовых капитальных ремонтов ограничивается необходимостью проверки возможности длительной работы котла на номинальной (или близкой к ней) нагрузке с определением присосов воздуха, аэродинамического сопротивления воздушного и газового трактов, температуры газов и воздуха в контролируемых сечениях трактов, температуры среды и температурных разверок по водопаровому тракту, достаточности пределов регулирования температуры перегретого пара, удельных расходов электроэнергии на тягу, дутье, пылеприготовление.

Помимо режимно-наладочных и балансовых испытаний паровых котлов проводятся испытания на режимах скользящего давления и испытания при нестационарных режимах отдельно.

Режим скользящего давления энергоблоков сверхкритического давления позволяет на частичных нагрузках уменьшить снижение экономичности и снизить затраты энергии на привод питательного насоса. Этот режим обычно осуществляется при нагрузках ниже 70 % номинальной и характеризуется полным открытием части регулирующих клапанов турбины и закрытием остальных клапанов. Необходимость испытаний прямоточных котлов энергоблоков сверхкритического давления в режиме скользящего давления (для тех блоков, где он целесообразен) вызывается тем, что надежность котла при возмущениях, характерных для этих условий, является определяющим фактором для применения режима скользящего давления.

Основной особенностью работы котла СКД в режиме скользящего давления является появление в ряде поверхностей нагрева двухфазной среды (пароводяной смеси). В связи с этим внедрение на котле режима скользящего давления требует вначале расчетной, а затем экспериментальной проверки.

Расчетная оценка режима работы котла проводится для определения потенциально опасных поверхностей нагрева и уточнения объема дополнительного экспериментального контроля. Расчет выявляются поверхности, работающие на двухфазной среде, выполняется оценка температур стенки труб с учетом имеющихся данных по температурным разверткам на сверхкритическом давлении и при условии поступления на вход в отдельные змеевики пароводяной смеси с паросодержанием, вдвое превышающим среднее на входе.

На барабанных котлах энергоблоков на давление 14 МПа испытания при скользящем давлении проводятся только для выяснения возможного расширения регулировочного диапазона нагрузок по условиям надежности циркуляции, температурного режима экранных труб и пароперегревателей.

В дополнение к перечисленным выше общим положениям по организации испытаний Союзтехэнерго разработана типовая программа испытаний для проверки работы котла при скользящих параметрах.

По данной программе предусматривается проведение 10 – 12 опытов для определения надежности работы котла в стационарных режимах и 10 – 12 опытов для выявления влияния режимных возмущений. Основная цель испытаний – расширение регулировочного диапазона блока по нагрузке с максимально возможным повышением экономичности и по условиям поддержания температуры промперегрева, близкой к номинальной при минимальных нагрузках. В соответствии с указанной целью и вытекающими из нее конкретными задачами для испытаний в стационарных режимах предусматривается ряд дополнительных измерений по одному потоку пароводяного тракта. Для снятия динамических характеристик участков регулирования котла и оценки приемистости блока выполняется специальная схема измерений.

Испытания паровых котлов при нестационарных (переходных) режимах связаны с необходимостью определения и выбора их оптимальных маневренных характеристик: продолжительности растопок и остановов, подъема и сброса нагрузки, степени устойчивости котла, соотношения топливо-воздух и др. В зависимости от поставленных задач в каждом конкретном случае с учетом конструкции котла, пусковых схем, проверяемой или отрабатываемой технологии выявляются программа испытаний и объем измерений. При этом почти всегда испытания связаны как с определением экономических показателей проверяемых режимов, так и с надежностью работы котла при тех или иных режимах.

### **2.1.2 Подготовка испытаний паровых котлов**

Проведению испытаний предшествует комплекс подготовительных работ, в который входят следующие мероприятия:

- ознакомление с технической документацией парового котла (проектной, заводской, ремонтной и отчетной);
- осмотр котла и его вспомогательного оборудования с целью оценки состояния, оснащенности средствами измерений, регулирования, автоматики;
- составление и передача перечня работ по устранению недостатков в оборудовании;
- составление и согласование с руководством цеха и электростанции технической программы испытаний, объема и методов измерений и вида отчетности по результатам испытаний;
- составление и передача задания на изготовление и установку приспособлений, устройств, аппаратуры;
- комплектование экспериментальной бригады из числа специалистов и наблюдателей.

После выполнения на котле подготовительных работ и устранения недостатков в оборудовании руководитель испытаний организует проверку готовности котла и всех его элементов к испытаниям. В объем проверки входят:

- проверка плотности топки и газоходов котлов малой и средней мощности с уравновешенной тягой, проверяется по подсосу пламени переносного факела. Для котла, работающего под наддувом, проверка производится постановкой топки под давление воздухоподогревателя. В трубчатых воздухоподогревателях проверяют места креплений труб в трубных досках и компенсаторы, в регенеративных — состояние уплотнений;
- проверка состояния установок для очистки поверхностей нагрева;
- проверка состояния углеразмольного оборудования – степень износа брони, бил, шаров, валков, уплотнений, взрывных клапанов, мигалок;
- проверка состояния трубопроводов аэросмеси.

После проверки готовности котла руководитель испытаний устанавливает оптимальное количество и расположение временных измерительных щитов (экспериментального контроля), столов для размещения аппаратуры и приборов, мест установки отборных устройств (уноса пыли и др.), мест разделки проб.

Аппаратуру, шланги, провода проверяют, маркируют, после чего распределяют наблюдателей по рабочим местам и назначают ответственных за отдельные участки.

Проводят обучение наблюдателей, которое заканчивается общей проверкой их работы во время учебного опыта с последующим разбором и коррекцией действий наблюдателей и уточнением последовательности записей в журналах наблюдений.

## 2.2 Арматура котлов

### 2.2.1 Классификация арматуры котельного агрегата

*Арматурой* называют приборы и предохранительные устройства, обеспечивающие безопасную и безаварийную работу котла, а также устройства, служащие для управления и регулирования котельного агрегата.

Для выполнения этих задач котлы должны быть оснащены следующим оборудованием:

1. устройствами, предохраняющими от повышения давления (предохранительными устройствами);
2. указателями уровня воды;
3. манометрами;
4. запорной и регулирующей арматурой.

Арматура, применяемая для трубопроводов воды и водяного пара, в зависимости от назначения подразделяется на четыре класса: запорная, регулирующая, предохранительная и контрольная.

*Запорная* арматура служит только для герметичного отключения котельного агрегата или его элементов, а также отдельных участков или всего трубопровода от сети. К запорной арматуре относятся задвижки, вентили и краны.

*Регулирующая* арматура предназначена для изменения или поддержания заданного давления или расхода среды. К такой арматуре относятся регулировочные вентили, дроссельные клапаны, питательные клапаны, приборы для автоматического регулирования. Следует отметить, что использовать для регулирования запорную арматуру нежелательно, так как вследствие большой скорости рабочей среды, образующейся при дросселировании детали запорных органов быстро изнашиваются.

*Предохранительная* арматура служит для ограничения давления, расхода и направления движения среды. К ней относятся предохранительные клапаны на питательных линиях, паропроводах, барабанах, обратные клапаны на питательных линиях.

К *контрольной* арматуре относятся указатели уровня воды и пробкоспускные краны.

Материалы для изготовления арматуры выбирают в зависимости от давления и температуры рабочей среды. Для низкого давления (до 2,4 МПа) и температуры среды до 300 °С корпуса и крышки можно изготавливать из чугуна. Арматуру, предназначенную для воды под более высоким давлением, исполняют из стали.

### 2.2.2 Запорная арматура

Запорная арматура должна обеспечивать плотность отключения в закрытом состоянии и оказывать минимальное сопротивление протекающей среде в открытом состоянии. В качестве запорной арматуры применяют задвижки и вентили. Задвижки имеют относительно небольшое гидравлическое сопротивление, требуют меньшего, чем вентили, усилия на открывание и

закрывание, допускают протекание среды в обоих направлениях, имеют меньшую длину корпуса, могут быть изготовлены большого проходного сечения. К недостаткам задвижек относятся: более сложная, чем у тилей, конструкция, быстрый износ уплотнительных поверхностей затвора и большой подъем затвора при полном открывании, что увеличивает их габариты. Соответственно с этим вентили запорные органы применяют преимущественно при небольшом проходном сечении (диаметр трубопровода до 100 мм), когда требуется большая плотность отключения (например, для дренажных и спускных трубопроводов), и в основном они используются в качестве регулирующих органов.

На рисунке 50, а показан наиболее распространенный тип вентиля низкого и среднего давления. Он состоит из корпуса 4, в который запрессовано стальное или бронзовое кольцо (седло 5), и клапана (тарелки) 6, соединенного со шпинделем 7. На конце шпинделя имеется резьба, с помощью которой он при вращении маховика 1 во время закрывания или открывания вентиля ввинчивается в траверсу 9. Присоединение запорного вентиля к осуществляется с помощью фланцев 3.

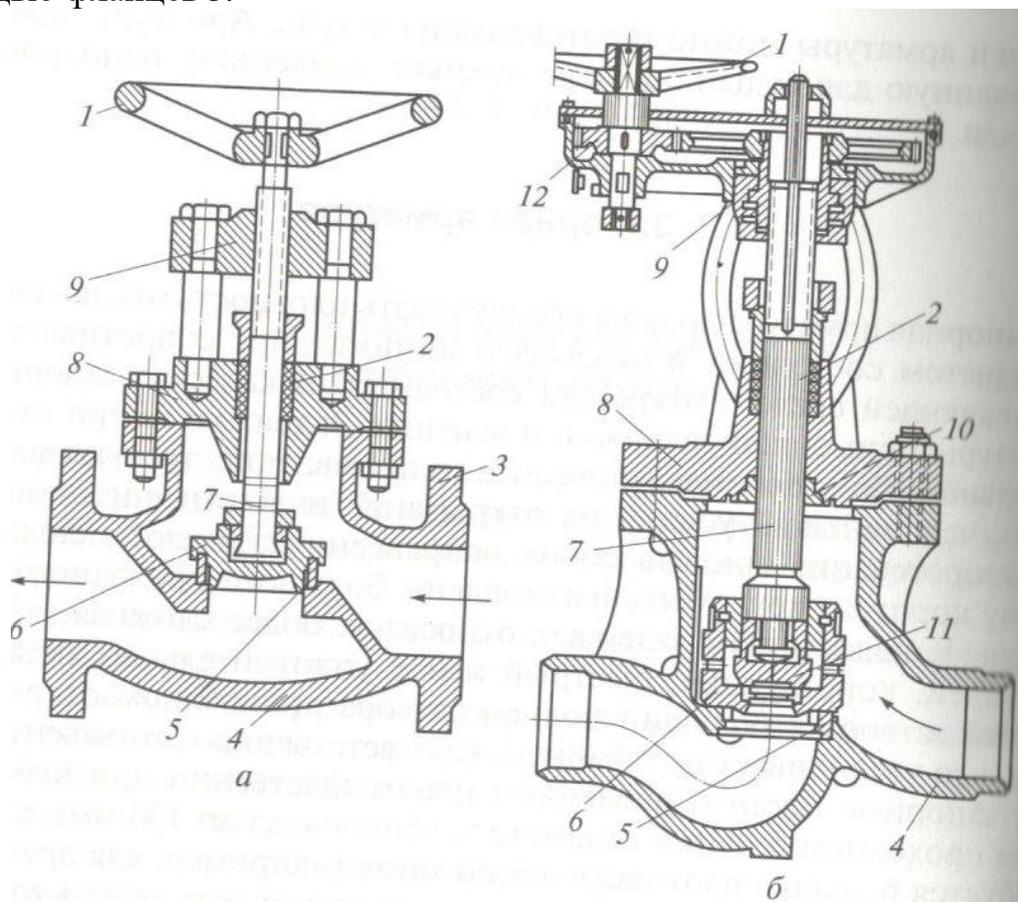


Рисунок 50 – Вентили запорные

а – фланцевый низкого и среднего давлений; б – высокого давления, бесфланцевый; 1 – маховик; 2 – сальниковое уплотнение; 3 – фланец; 4 – корпус; 5 – седло; 6 – клапан (тарелка); 7 – шпиндель; 8 – крышка; 9 – траверса; 10 – втулка; 11 – разгрузочный клапан; 12 – шестерня

На рисунке 50, б показан запорный вентиль высокого давления без фланцев; он крепится к трубопроводам посредством сварки. Расход пара (или воды), проходящего через вентиль, регулируется подъемом или опусканием клапана. Движение среды через вентиль может осуществляться в любом направлении и зависит лишь от удобства его открывания или закрывания. Если жидкость или пар подводится под клапан, то это значительно облегчает открывание вентиля и, кроме того, разгружает сальниковое уплотнение от давления при полном его закрывании. Однако, при таком способе подвода среды требуется большое усилие для полного закрывания вентиля.

Если жидкость или пар подается на клапан вентиля, то плотность его закрывания увеличивается и несколько затрудняется начальное открывание из-за давления среды на клапан. Это является главным недостатком такого способа подвода жидкости или пара.

В арматуре малого диаметра вода и пар обычно подводятся под клапан. У большинства вентилях, наоборот, подача осуществляется на клапан. Для облегчения открывания крупных вентилях применяют разгрузочные обводные (байпасные) линии малого диаметра, служащие для выравнивания давления среды до и после вентиля. Прежде чем открыть основной вентиль, открывают байпас и после того, как в трубопроводе до и после вентиля установится одинаковое давление, приступают к открыванию основного вентиля.

Для этой же цели некоторые вентили выполняются с расположенными на одном шпинделе двумя клапанами (тарелками), один из которых имеет меньший размер и устанавливается в средней части большого клапана (рис. 50, б). При подъеме шпинделя сначала поднимается малый разгрузочный клапан 11 на определенную высоту, а затем после выравнивания давления при дальнейшем открывании вентиля поднимается большой клапан б.

Для облегчения открывания вентиля привод шпинделя осуществлен через две цилиндрические шестерни 12 от маховика диаметром до 500 мм.

При эксплуатации каждый вентиль должен обеспечивать полное перекрытие трубопроводов. Для этого необходимо, чтобы клапан опускался на седло равномерно, без перекосов. Если вентиль «пропускает» вследствие неполного перекрытия сечения трубы, необходимо выяснить причину и устранить ее. Причинами неполного перекрытия могут быть попадание постороннего тела между клапаном и седлом, износ седла или клапана, образование раковин и поперечных рисок и т.д. При обнаружении неплотностей прежде всего следует немного приоткрыть вентиль и снова закрыть его. Если причиной неплотного закрывания был посторонний предмет, то поток может его смыть.

Вентиль является надежным запорным и регулирующим органом. Однако он создает большое сопротивление потоку среды вследствие резкого двукратного изменения направления ее движения.

На электростанциях и в котельных нашли широкое применение задвижки, которые создают значительно меньшее сопротивление потоку среды, чем вентили. Жидкость или пар к задвижкам подводятся с любой стороны.

Задвижки могут иметь различные затворы (параллельные и клиновые), выдвигаемые и невыдвигаемые шпиндели.

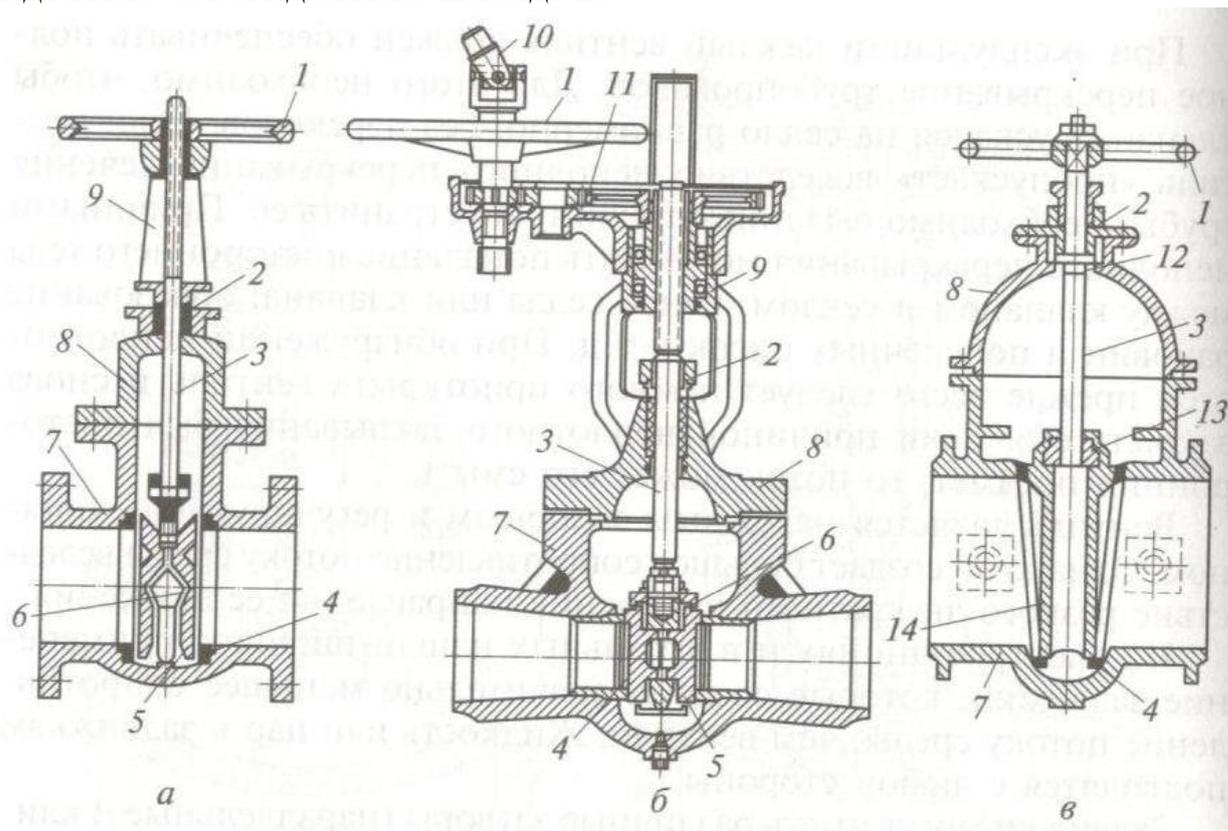


Рисунок 51 – Задвижки

а – нормальная с параллельными уплотнительными дисками и выдвигаемым шпинделем; б – бесфланцевая высокого давления с дистанционным приводом; в – клиновая с невыдвигаемым шпинделем; 1 – маховик; 2 – сальниковая набивка; 3 – шпиндель; 4 – уплотнительные кольца; 5 – уплотнительные диски; 6 – распорное устройство; 7 – корпус; 8 – крышка; 9 – траверса; 10 – шарнир; 11 – зубчатая передача; 12 – буртик; 13 – нарезная втулка; 14 – клиновый затвор.

На рисунке 51, а приведена нормальная задвижка с параллельными уплотнительными дисками. Задвижка состоит из чугунного корпуса 7, крышки 8, нарезной втулки, маховика 7, выдвижного шпинделя 3, уплотнительных колец 4 и дисков 5. Между дисками устанавливается распорное устройство 6. При вращении маховика по часовой стрелке шпиндель вместе с дисками опускается, распорное устройство упирается в нижнюю часть корпуса и раздвигает диски, плотно прижимая их к уплотнительным кольцам и закрывая проход воде или пару. В задвижках с выдвижным шпинделем шпиндель и маховик имеют квадратную резьбу, и при вращении маховика шпиндель вывинчивается или ввинчивается в него, увлекая за собой диски.

Согласно Правилам Госгортехнадзора России у всех вновь устанавливаемых стационарных котлов паропроизводительностью более 4 т/ч управление парозапорными органами должно осуществляться дистанционно с рабочего места машиниста котла. На электростанциях или в больших

отопительных котельных часто применяются задвижки или вентили с электрическим приводом, позволяющим открывать или закрывать их дистанционно. На рисунке 51, б приведена бесфланцевая задвижка высокого давления с дистанционным приводом. Бесфланцевая арматура непосредственно приваривается к трубопроводу.

В клиновых задвижках с невыдвижным шпинделем 3 (рисунок 51, в) последний вращается вместе с маховиком 7. На конце шпинделя 3 имеется резьба, которая входит в нарезную втулку 13, расположенную в верхней части клинового затвора 14. При вращении маховика шпиндель 3 из-за имеющегося на нем буртика 12 не может подняться и будет вращаться вместе с маховиком. При этом нарезная втулка 13 будет вращаться по его резьбе, поднимая или опуская затвор 14 задвижки.

Для надежной работы арматуры очень важно, чтобы место прохода шпинделя было тщательно обработано (отшлифовано) и уплотнено. Уплотнение достигается при помощи сальниковой набивки 2 и грундбуксы (сальникового уплотнения). Грундбукса с внешней стороны имеет резьбу, при помощи которой она ввинчивается в крышку и, таким образом, уплотняет набивку.

В качестве запорного устройства для низкого давления среды (0,3...0,5 МПа) применяются пробковые краны. Краны предназначены для быстрого открывания и закрывания прохода в трубопроводе, а также для регулирования расхода. Пробковые краны по способу уплотнения бывают натяжные (рисунок 52, а) и сальниковые (рисунок 52, б); по способу соединения — муфтовые, фланцевые и цапковые; по материалу корпуса и пробки — чугунные, бронзовые и комбинированные (чугунный корпус с бронзовой пробкой).

Основными элементами кранов являются корпус 1 и коническая пробка 2 с отверстием для прохода газа. На четырехгранной головке 3 под ключ наносится риска, совпадающая с направлением отверстия в пробке. Если риска на головке совпадает с направлением трубопровода, на котором установлен кран, то проход для среды открыт, а если риска направлена поперек трубопровода, то проход закрыт.

В натяжных кранах в нижней части пробки есть шпилька б с резьбой (см. рисунок 52, а), на которую надевается шайба 4 и накручивается гайка 5. Плотность в этих кранах обеспечивается натяжением гайки. Краны, устанавливаемые на газопроводах, должны иметь упоры, ограничивающие поворот пробки в границах 90°.

Плотность в сальниковых кранах обеспечивается сальниковой набивкой 8. Уплотнение ее осуществляется затягиванием сальника с помощью крышки 9 сальника. Для облегчения разборки сальникового крана в нижней части корпуса устанавливается отжимной болт 10.

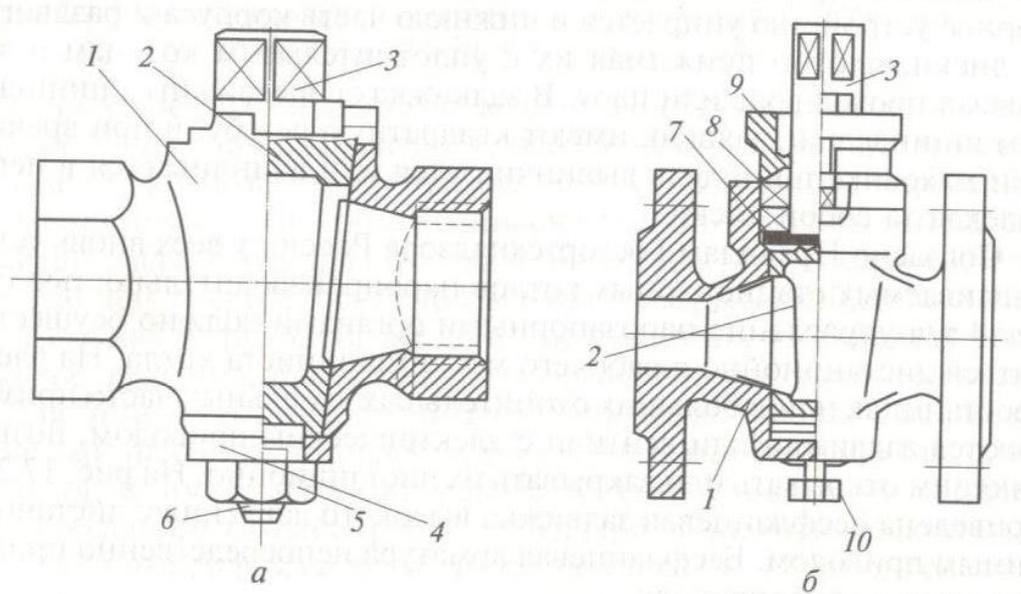


Рисунок 52 – Краны

а – натяжной газовый муфтовый; б – сальниковый; 1 – корпус; 2 – пробка; 3 – четырехгранная головка; 4 – шайба; 5 – гайка; 6 – шпилька с резьбой; 7 – опорное кольцо; 8 – сальниковая набивка; 9 – крышка сальника; 10 – болт.

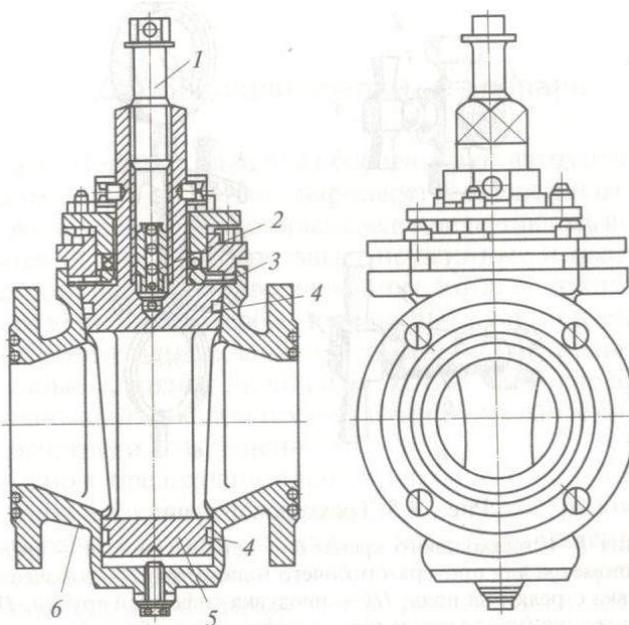


Рисунок 53 – Чугунный самосмазывающий кран

1 – болт; 2 – шариковый клапан; 3 – прокладка; 4 – канавки; 5 – пробка; 6 – корпус

В самосмазывающихся кранах (рисунок 53) на конусных или цилиндрических уплотнительных поверхностях корпусов и пробок имеются канавки 4. При заполнении канавок смазкой снижаются давление, необходимое для герметичного закрытия прохода, и усилие, необходимое для поворота пробки. Периодическая подача смазки в канавки корпуса 6 и пробки 5

осуществляется нажимным болтом 1.

Трехходовой кран (рисунок 54) устанавливается между манометром и сифонной трубкой, которая защищает трубчатую пружину манометра от чрезмерного нагрева при измерении давления пара или горячей воды. На ручке трехходового крана в виде буквы Т нанесены риски, совпадающие с направлениями каналов в пробке. Поворотом ручки, можно поставить кран в следующие положения:

Рабочее положение — манометр соединен с источником давления (барaban котла, трубопровод и т.д.);

Проверка рабочего манометра постановкой стрелки на нуль (манометр при этом соединен с атмосферой);

Проверка рабочего манометра контрольным (все отверстия в пробке при этом совпадают с отверстиями в корпусе крана);

Продувка сифонной трубки (источник давления соединен с атмосферой);

Нейтральное положение для охлаждения воды или конденсации пара в сифонной трубке (отверстия в пробке и корпусе не совпадают). В этом положении можно заменить неисправный манометр.

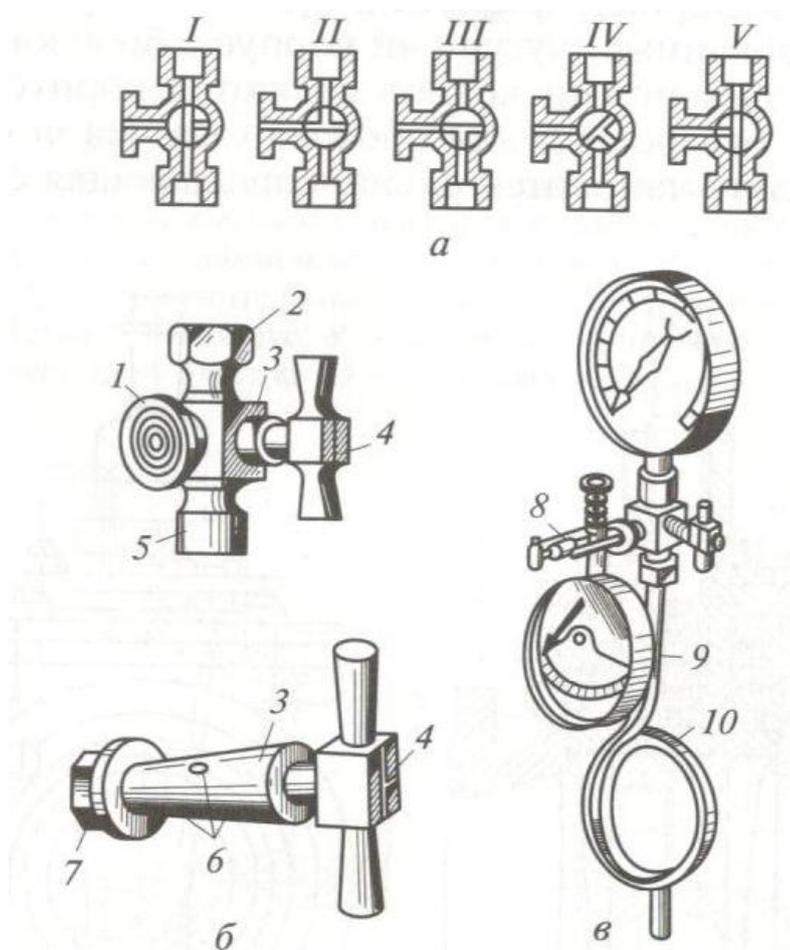


Рисунок 54 – Трехходовой кран

а – положения I— V трехходового крана; б – детали крана; в – крепление контрольного манометра для проверки рабочего манометра; I – рабочее положение; II – постановка стрелки на ноль; III – продувка сифонной трубки;

IV – промежуточное положение (набор конденсата в сифонной трубке); V – проверка рабочего манометра контрольным; 1 – фланец для контрольного манометра; 2 – штуцер для манометра; 3 – пробка крана; 4 – риски; 5 – ниппель для сифонной трубки; 6 – отверстия в пробке; 7 – гайка для затяжки пробки; 8 – скоба; 9 – контрольный манометр; 10 – сифонная трубка

### **2.2.3 Предохранительные, обратные и регулирующие клапаны**

#### **2.2.3.1 Предохранительные клапаны**

Предохранительные клапаны обеспечивают автоматический выпуск пара или воды из котлов, пароперегревателей и отключаемых (по воде) экономайзеров, в которых давление поднялось выше нормы. Они делятся на рычажно-грузовые, пружинные и импульсные.

На каждом паровом и водогрейном котлах, отключаемых в рабочей среде экономайзеров, должно быть установлено не менее двух предохранительных клапанов (рабочий и контрольный). Предохранительные клапаны защищают котлы, пароперегреватели и водяные экономайзеры при превышении в них давления более чем на 10 % расчетного (разрешенного).

В рычажном предохранительном клапане (рисунок 55, а) выход пара из клапана закрывается тарелкой 8, которая грузом 3, закрепленном на рычаге 9, прижимается к седлу 7, вставленному в корпус 6. Направляющие ребра тарелки не дают ей перекашиваться относительно седла.

Рычажный контрольный клапан после настройки заключают в кожух 1 и закрывают замок 4. Для проверки работы клапана к рычагу прикрепляют цепочку 2, которую пропускают через крышку футляра. Для выхода пара в корпусе имеется отверстие.

Предохранительные клапаны настраивают на рабочее давление при гидравлическом испытании и проверяют при растопке котла. После того, как давление пара в котле поднимается до рабочего, окончательно закрепляют грузы на рычагах или нажимные винты пружинных клапанов.

В пружинных предохранительных клапанах (рисунок 55, б) давление на тарелку 8 создает пружина 11. Для настройки предохранительных клапанов на срабатывание при необходимом давлении используются нажимные винты 10.

Импульсные предохранительные клапаны устанавливаются на паровых котлах с рабочим давлением более 3,9 МПа.

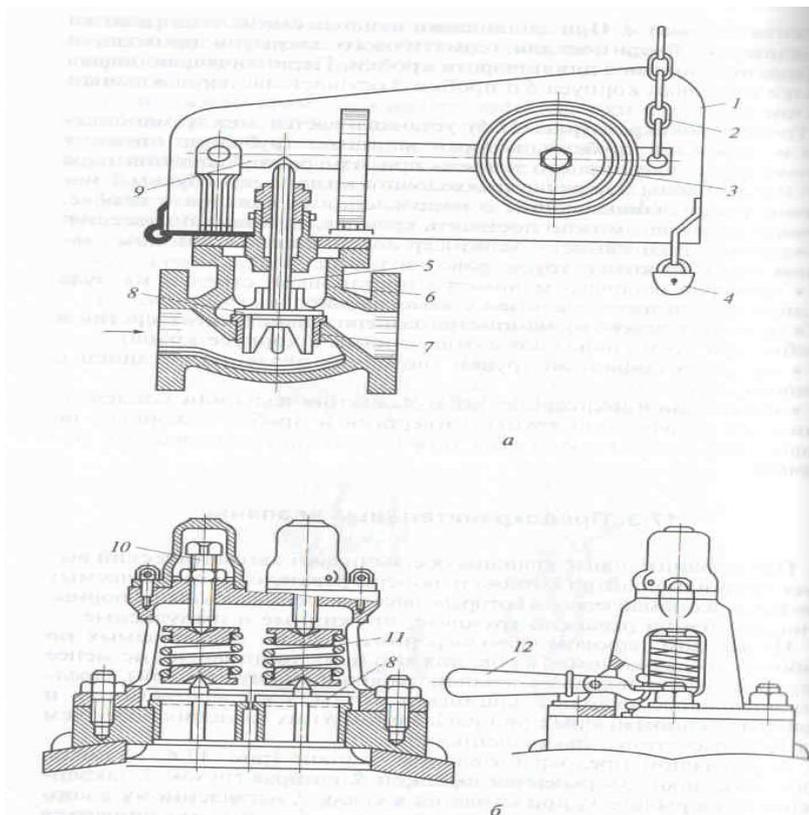


Рисунок 55 – Предохранительные клапаны

а – рычажный грузовой; б – пружинный; 1 – кожух предохранительного клапана; 2 – цепочка для подрыва клапана; 3 – груз; 4 – замок; 5 – шток; 6 – корпус; 7 – седло; 8 – тарелка; 9 – рычаг; 10 – нажимной винт; 11 – пружина; 12 – ручка для открывания клапана.

### 2.2.3.2 Обратные и регулирующие клапаны

Обратные клапаны пропускают среду только в одном направлении и предназначены для предотвращения движения среды в противоположном направлении. По устройству они делятся на поворотные и подъемные, по способу соединения с трубопроводами – на муфтовые и фланцевые.

Обратный подъемный клапан (рисунок 56, а) состоит из корпуса 2, в круглое проходное отверстие которого впрессовано бронзовое седло 4, закрываемое клапанной тарелкой 3.

Для плотного закрывания клапана тарелка притирается к седлу. Сверху обратного клапана расположена крышка, куда входит направляющий шток тарелки. При движении воды тарелка поднимается, проходное отверстие открывается, и вода проходит через клапан. При движении воды в обратном направлении тарелка опускается, и обратное движение воды прекращается.

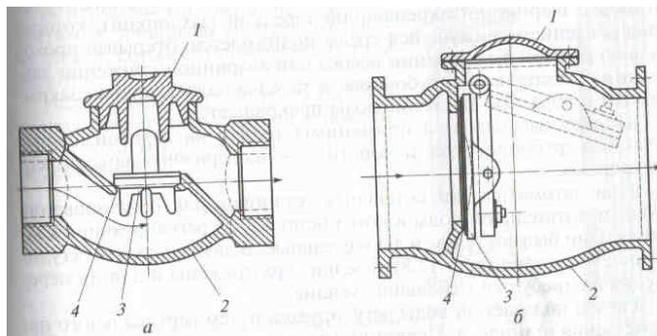


Рисунок 56 – Обратные клапаны

а – подъемный; б – поворотный; 1 – крышка корпуса; 2 – корпус; 3 – тарелка; 4 – седло; стрелками показано направление движения потока.

Обратный *поворотный* клапан (рисунок 56, б) состоит из корпуса 2 с шарнирно закрепленной тарелкой, которая под давлением движущейся среды поднимается, открывая проход для воды. При отключении насоса или аварийном снижении давления в питательном трубопроводе тарелка падает, клапан закрывается, и обратное движение воды прекращается.

Подъемные клапаны применимы только на горизонтальных участках трубопроводов, поворотные – на горизонтальных и вертикальных.

При автоматизации КУ для регулирования подачи питательной воды в котел используют регулирующие клапаны. Они бывают одно- и двухседельные. В двухседельном регулирующем клапане (рисунок 57) тарелки 1 разгружены и для их перемещения требуется небольшое усилие.

Расход подаваемой воды регулируется путем вертикального перемещения шпинделя 2, связанного с внутренним 3 и наружным 4 рычагами. На конце наружного рычага установлен противовес – груз 6. Исполнительный механизм регулятора с помощью тяги 5 связан с наружным рычагом питательного клапана.

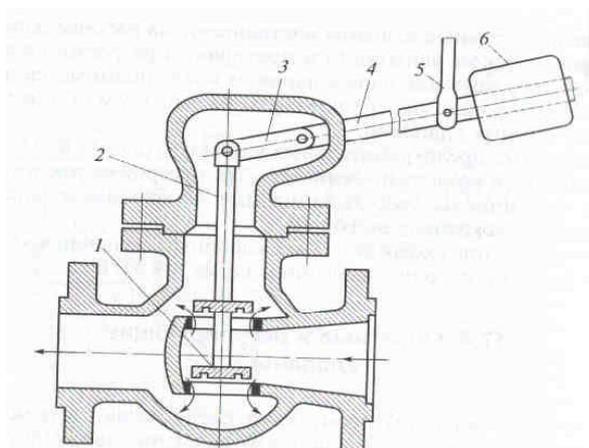


Рисунок 57 – Двухседельный регулирующий клапан

1 – тарелка; 2 – шпиндель; 3,4 – внутренний и наружный рычаги; 5 – тяга к ручному или автоматическому дистанционному управлению; 6 – груз; стрелками показано направление движения потока.

## 2.2.4 Водоуказательные приборы

Для определения уровня воды в барабане котла применяются водоуказательные стекла. На рисунке 58 показан водоуказательный прибор, имеющий плоское стекло 3 с гладкой смотровой поверхностью и призматическими рисками на противоположной поверхности. Стекло, вставленное в специальную металлическую рамку 2, соединено стальными трубками с паровыми и водяными пространствами барабана. На трубках установлено три крана 1,4,5, позволяющие при продувке водоуказательного прибора соединить стекло с паровым и водяным пространствами барабана, а также с атмосферой.

На всех водоуказательных приборах против допустимых нижнего и верхнего уровней воды в барабане котла устанавливаются неподвижные указатели.

Высота прозрачного элемента каждого указателя уровня воды должна превышать допустимые пределы уровня воды, но не менее, чем на 25 мм с каждой стороны.

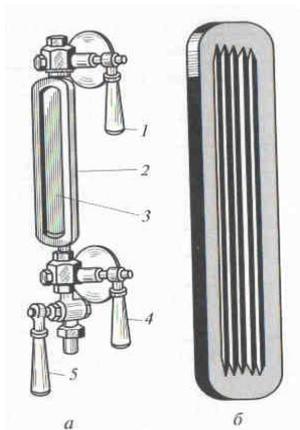


Рисунок 58 – Водоуказательный прибор с одним плоским стеклом:

а – общий вид прибора; б – стекло; 1 – паровой кран; 2 – рамка; 3 – плоское стекло; 4 – водяной кран; 5 – продувочный кран.

Указатели уровня воды прямого действия должны устанавливаться вертикально или с наклоном вперед под углом не более  $30^{\circ}$  и должны быть расположены и оснащены так, чтобы уровень воды был хорошо виден с рабочего места оператора.

На паровых котлах с высоко расположенными водоуказательными приборами (более 6 м от пола котельной), когда затруднено или даже невозможно наблюдение за уровнем воды в водоуказательном стекле, применяют сниженные указатели уровня. На них должны быть нанесены низший и высший допустимые уровни по водоуказательному стеклу, которое установлено на этом же котле.

Исправность сниженных указателей уровня проверяется сверкой с показаниями водоуказательных стекол прямого действия.

## **2.3 Испытания и наладка систем пылеприготовления и их оборудования**

### **2.3.1 Общие вопросы испытаний и наладки пылесистем**

Экономичность и надежность работы парового котла, работающего на твердом топливе, определяется работой пылесистемы. Продолжительность межремонтной кампании пылеприготовительного оборудования, период между остановами мельниц на замену изношенных мелющих органов часто определяют возможность несения котлом номинальной нагрузки.

После наладки и реконструкции их производительность может быть увеличена на 20 – 30 % при значительном снижении удельных расходов электроэнергии на пылеприготовление.

На электростанциях наибольшее распространение получили четыре типа мельниц: шаровые барабанные (ШБМ) для размола антрацитов и каменных углей; молотковые (ММ) для размола каменных и бурых углей; среднеходные (СМ) для размола в основном каменных углей; мельницы-вентиляторы (М-В) для влажных бурых углей, торфа и лигнина.

Основными причинами снижения межремонтной кампании мельниц являются: трещины усталостного характера в торцевых стенках барабанов ШБМ; низкий срок службы бил до износа в ММ, в первую очередь на каменных углях типа экибастузского и бурых типа подмосковного, попадание посторонних неразмельчаемых включений, в основном металла, в СМ; быстрый износ мелющих колес в М-В.

Основные причины неэкономичной работы пылесистем с ШБМ:

- неоптимальные параметры – скорость вращения барабана, шаровая нагрузка, расход вентилирующего воздуха, тонкость пыли;
- нехватка сушильной производительности;
- неправильный выбор элементов пылесистемы;
- конструктивные недостатки оборудования;
- недогруз топливом мельницы, высокие присосы воздуха в пылесистему и отсутствие контроля за ними;
- низкое качество предварительного дробления;
- неравномерная подача топлива в мельницу, особенно в зимнее время из-за неудовлетворительной конструкции бункеров (БСУ) и питателей (ПСУ) сырого угля;
- отсутствие автоматизации или ее ненадежная работа.

В пылесистемах с другими мельницами дополнительными причинами снижения экономичности могут быть: при ММ – работа с изношенными билами; при СМ – неудовлетворительная конструкция подвода воздуха и топлива к мельнице и высокая кратность циркуляции топлива внутри размольной камеры, при М-В – недостаточная температура сушильного агента и неудовлетворительная сушка топлива в нисходящем потоке перед мельницей.

Повышение производительности и экономичности размола в них может быть достигнуто за счет снижения переизмельчения топлива путем вывода мелких частиц из зоны размола, уменьшения количества готовой пыли в

возврате сепараторов путем совершенствования рабочих процессов сепарации пыли, создания оптимальных условий воздействия мелющих органов на размалываемые частицы топлива.

При организации испытаний мельниц различают контрольные, приемосдаточные, типовые и научно-исследовательские испытания.

Контрольные испытания проводятся на предприятии-изготовителе. Головные образцы и новые типоразмеры, а также модернизированные мельницы испытываются на заводском стенде при рабочей частоте вращения; определяются пусковой момент, мощность холостого хода, работа системы смазки, измеряются напряжения в деформации наиболее ответственных деталей. Серийные мельницы проходят контрольные испытания в соответствии с технической документацией завода.

Приемосдаточным испытаниям подвергается заказчиком каждая серийная мельница на месте эксплуатации в течение 72 часов. Цель испытания – проверка соответствия оборудования государственным и отраслевым стандартам и техническим условиям. Предварительно проводится обкатка на холостом ходу при рабочей частоте вращения: ШБМ с футеровкой (но без шаров) – в течение 4 часов; ММ и М-В – не менее 8 часов в соответствии с инструкциями завода. Затем проводится испытание мельницы на топливе по программе типовых испытаний.

Типовым испытаниям подвергаются головные мельницы (типоразмеры) или модернизированные мельницы. Цель испытания – проверка соответствия рабочих параметров стандартам и техническим условиям, а также определение оптимальных расходов электроэнергии. Типовые испытания проводятся заводом вместе с заказчиком на электростанции при размоле расчетного топлива.

До начала испытаний составляются их программа и схема замеров, проводятся необходимые подготовительные работы: проверка соблюдения правил взрывобезопасности при проектировании и монтаже; проверка соответствия выполнения пылесистемы проекту; проверка установки штатных и монтаж специальных приборов и приспособлений для испытаний; проверка плотности всех элементов пылесистемы, в том числе взрывных клапанов и отключающих шиберов; контроль правильности направления вращения механизмом; проверка систем охлаждения и смазки; взвешивание и маркировка мелющих органов; снятие аэродинамических характеристик на воздухе, тарировка сечений трубопроводов и вспомогательных устройств.

Производительность мельницы определяется: при испытании малых мельниц – непосредственным взвешиванием всего поступающего топлива. При испытании больших мельниц – по расходу топлива через ПСУ после его предварительной тарировки при различных положениях регулирующих органов.

*Тарировка - Тарировать* - проверить (проверять) показания каких-нибудь приборов путем сличения с показаниями контрольных приборов, калибровать, градуировать, градуировка измерительных приборов и регулирующих устройств".

Место и способ отбора пыли выбирается в зависимости от типа мельниц и схемы пылесистемы. (совком из-под циклона, пылеотборными трубками из пылепроводов за сепаратором). Анализ пыли проводится на влажность и тонкость помола – на ситах 90, 200, 400 и 1000 мкм (1мм = 1000 мкм), определяется также показатель равномерности пыли.

Плотность мельницы определяется во время работы под нагрузкой при транспортных параметрах: контролируется отсутствие пыления и соответствие присосов нормам расчета и проектирования. Уровень шума измеряется на расстоянии 1 м от мельницы в вертикальной и горизонтальной плоскостях и нескольких точках – с помощью шумомера и спектрального анализатора.

Контролируется и сравнивается с допустимой вибрация подшипников мельницы. Надежность мельницы связана с работой отдельных узлов – шестерен, валков, брони, уплотнений, и в целом определяется числом часов наработки на отказ.

Научно-исследовательские испытания могут иметь разные цели – изучения влияния на показатели мельницы и пылесистемы в целом разных режимных и конструктивных факторов; скорости вращения, качества топлива, типов сепараторов.

### **2.3.2 Наладка питателей сырого угля и угольной пыли**

Стабильность подачи топлива влияет на экономичность процесса размола и сжигания топлива, поэтому наладка ПСУ является первым этапом наладки пылесистемы. На стенде завода-изготовителя ПСУ подвергают контрольному испытанию путем обкатки на холостом ходу при максимальных оборотах в течение 3 часов. Каждый серийный ПСУ должен пройти приемосдаточные испытания на ТЭС в течение 72 часов и перед этим обкатываться при максимальной скорости на холостом ходу в течение 8 часов. В результате приемосдаточных испытаний проверяются основные показатели ПСУ и устанавливается их соответствие требованиям стандартов или технических условий.

Типовым испытаниям должны подвергаться все головные образцы ПСУ, новые типоразмеры, а также серийные ПСУ в случае внесения в них существенных конструктивных изменений, замены материалов, перехода на новое топливо с заметно отличающимися сыпучими свойствами.

При типовых испытаниях измеряются и определяются следующие величины: производительность ПСУ при разных скоростях движения дозатора (тарировкой массовым методом); мощность, потребляемая электродвигателем ПСУ (ваттметром классом 0,5); частота вращения вала привода дозатора (тахометром); техническая характеристика угля и его гранулометрический состав, отбор проб производится из приемного бункера ПСУ; уровень топлива в бункере.

В процессе наладки пылесистем котла должна быть устранена разбежка частоты вращения двигателей всех ПСУ и получена при возможности жесткая характеристика производительности ПСУ от частоты вращения двигателя и положения устройств, регулирующих слой топлива на ПСУ.

Стабильность дозирования пыли во времени и равенство производительности питателей угольной пыли котла, оборудованного пылесистемами с пылевым бункером, одно из условий экономичного сжигания топлива. Питатели пыли подвергаются контрольным, приемосдаточным и типовым испытаниям, задачи и содержание которых те же, что и для ПСУ. Типовые испытания проводятся при уровне пыли в бункере не менее 1/3 его высоты. Измерения такие же, что и для ПСУ. Производительность питателя пыли определяется при разных частотах вращения дозатора с помощью установки для взвешивания пыли (рисунок 5).

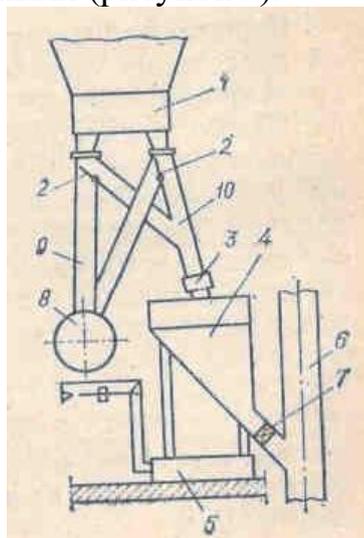


Рисунок 59 – Схема установки для испытания питателя пыли

1 – питатель пыли; 2 – перекидные шиберы; 3 – гибкое соединение; 4 – мерительный бункер; 5 – весы; 6 – течка возврата к мельнице; 7 – шибер для спуска пыли; 8 – пылепровод к топке; 9 – течка пыли; 10 – течи к бункеру.

Дозирующий орган питателя реостатом двигателя устанавливают на заданную частоту вращения и перекидным клапаном подачу пыли переводят на мерительный бункер 4. Когда весы сбалансируются при какой-то первоначальной массе  $g_1$ , кг, включается секундомер на время  $\tau$ , с, в течение которого весы сбалансируются при второй массе  $g_2$ , кг. Производительность питателя рассчитывается по формуле  $V_{\text{п}} = (g_2 - g_1) / \tau$

Перед накладкой и испытанием питателей пыли необходимо измерить переносным тахометром частоту вращения их электродвигателей и наладить электрическую часть так, чтобы при всех положениях траверс реостатов двигателей разбежка частоты вращения всех питателей не превышала 2 %. Перед началом испытаний питатель должен находиться в работе не менее 3 – 4 часов, чтобы сработать слежавшаяся в бункере пыль. Испытания ведутся при скачкообразном изменении от опыта к опыту частоты вращения двигателя с тем, чтобы получить зависимость  $V_{\text{п}} = f(n)$ . На каждой частоте проводят три – четыре измерения. Испытания ведут без остановки питателя, на время освобождения мерительного бункера от пыли питатель переводится для работы на горелку. При проведении каждой серии опытов в начале и конце из приемной коробки дозатора отбирается пыль для определения ее влажности и

дисперсного состава; измеряются также температуры и уровни пыли в пылевом бункере.

По окончании типовых испытаний ведутся наблюдения за испытанием питателем при разной его производительности в эксплуатационных условиях. Для этого через 3 – 4 часа его работы отбираются пробы пыли для определения влажности и дисперсного состава, измеряются температуры горячего воздуха и аэросмеси, расход воздуха в пылепроводах до смешения. При этом необходимо добиться равномерного распределения воздуха по пылепроводам. Равномерность подачи пыли питателем оценивают по стабильности давления пыли в бункере (измеряется U-образным манометром в коробке питателя). При истечении 2000 часов работы определяют износ, и зазоры дозатора питателя пыли.

### 2.3.3 Испытания пылесистемы с шаровой барабанной мельницей

Испытания, шаровых барабанных мельниц производятся на предельных производительностях, которые одновременно являются и оптимальными по минимуму удельного расхода электроэнергии для данного режима. Под *предельной производительностью* понимается максимально устойчивая производительность мельницы по исходному топливу. Дальнейшее увеличение подачи топлива ведет к завалу мельницы. Значение предельной производительности определяется методом постепенного повышения производительности мельницы вплоть до ее перегрузки (завала).

Типовая схема расстановки приборов для испытаний пылесистемы с ШБМ при транспорте пыли отработавшим сушильным агентом приведена на рисунке 60.

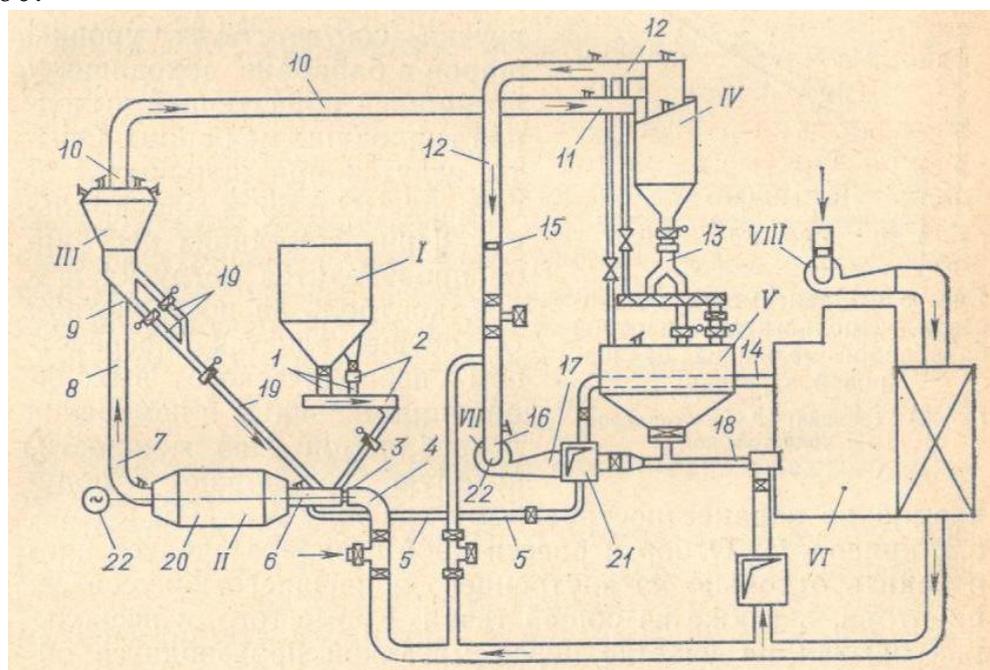


Рисунок 60 – Типовая схема расстановки приборов для испытаний пылесистемы с шаровой барабанной мельницей при транспортировке пыли отработавшим сушильным агентом

I – бункер сырого топлива; II – шаровая барабанная мельница; III – сепаратор мельницы; IV – циклон; V – бункер пыли; VI – топка; VII – мельничный вентилятор; VIII – дутьевой вентилятор; 1 – отбор проб топлива на анализ; 2 – производительность мельницы; 3 – расход горячего воздуха на мельницу; 4 – температура и давление горячего воздуха перед мельницей; 5 – расход запыленного воздуха на рециркуляцию мельницы; 6 – разрежение сушильного агента во входной горловине мельницы; 7 – разрежение аэросмеси после мельницы (до и после колена); 8 – температура аэросмеси и отбор проб пыли из потока после мельницы; 9 – разрежение перед сепаратором; 10 – разрежение и отбор проб пыли после сепаратора; 11 – разрежение перед циклоном; 12 – разрежение, влажность сушильного агента и отбор проб пыли после циклона; 13 – отбор проб готовой пыли на анализ; 14 – давление запыленного воздуха перед сбросными горелками; 15 – температура и расход вентилирующего агента; 16 – разрежение перед мельничным вентилятором; 17 – давление за мельничным вентилятором; 18 – температура и давление аэропыли перед горелками; 19 – количество и отбор проб возврата; 20 – скорость вращения мельницы; 21 – давление воздуха в коробе мельничного вентилятора; 22 – расход электроэнергии на привод мельницы и мельничного вентилятора.

Показателем, указывающим на перегрузку (завал) мельницы, служит в первую очередь резкое увеличение сопротивления мельницы, а также пыление из входной горловины. Однако сопротивление мельницы зависит не только от загрузки, но и от вентиляции мельницы. Завал наступает тогда, когда при увеличении нагрузки, уменьшении вентиляции или по другим причинам в мельнице нарушается равновесие между подачей топлива и выработкой готовой пыли. В некоторый момент времени увеличивающееся количество топлива в барабане ухудшает работу шаров настолько, что выработка готовой пыли падает и наступает завал.

При испытаниях регулярно производится догрузка шаров, контроль за постоянством шаровой загрузки осуществляется посредством периодического выхолащивания мельницы и измерения потребляемой ею мощности.

Оптимальное значение вентиляции мельницы тем ниже, чем выше частота вращения барабана. Увеличение частоты вращения барабана при некотором росте производительности мельницы ведет к значительному росту расхода электроэнергии на размол и может быть оправдано только при малой шаровой загрузке. При прочих равных условиях с увеличением степени заполнения барабана шарами, оптимальное значение вентиляции повышается.

Определение сушильной производительности включает снятие зависимости расхода сушильного агента (теплоты на сушку) от различных режимных факторов – давления воздуха за пароперегревателем, числа работающих мельниц, а также определение сопротивления тракта сушильного агента.

Шаровую загрузку барабана следует выбирать с таким расчетом, чтобы при минимальных затратах электроэнергии на пылеприготовление размольная

производительность была не ниже потребной по условиям работы данного котла, но не выше сушильной производительности. Если предельная производительность выше сушильной, то будет недосушка топлива, налипание и слеживание пыли по тракту пылесистемы.

Увеличение частоты вращения барабана ведет к росту его аэродинамического сопротивления за счет большого загромождения сечения шаротопливной смесью. С ростом частоты вращения барабана увеличение степени заполнения барабана шарами становится менее целесообразным из-за повышения расхода электроэнергии на пылеприготовление. Поэтому каждой шаровой загрузке соответствует не только оптимальное значение вентиляции, но и оптимальная частота вращения барабана, которую, вообще говоря, следовало бы определять экспериментально.

Одним из важных показателей работы пылесистемы, прежде всего сепаратора пыли, является кратность циркуляции топлива в контуре мельница – сепаратор – мельница.

### 2.3.4 Испытания среднеходовых, молотковых мельниц и мельниц-вентиляторов

В подавляющем большинстве случаев среднеходовые, молотковые мельницы и мельницы-вентиляторы устанавливаются в схемах пылеприготовления с прямым вдуванием. Типовые схемы измерений при испытании среднеходовых и молотковых мельниц практически аналогичны.

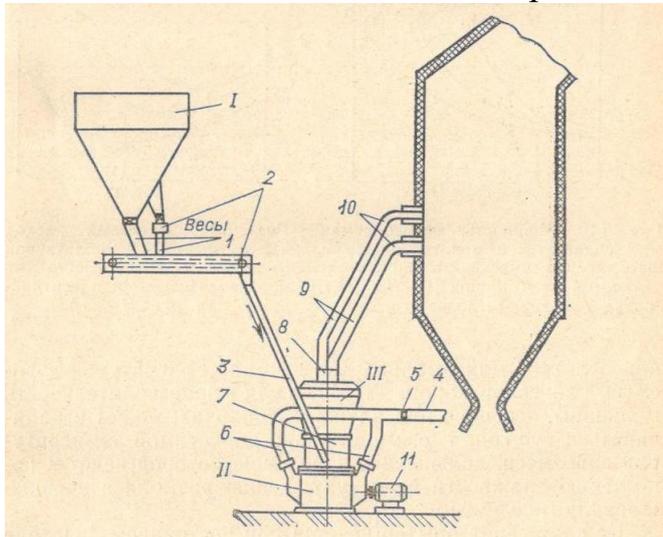


Рисунок 61 – Типовая схема расстановки приборов при проведении испытаний пылесистемы с аксиальной молотковой мельницей и центробежным сепаратором

I – бункер сырого топлива; II – молотковая мельница; III – центробежный сепаратор; 1 – отбор проб топлива на анализ; 2 – производительность мельницы; 3 – давление в точке топлива; 4 – температура и давление горячего воздуха; 5 – расход горячего воздуха на мельницу; 6 – разрежение воздуха перед мельницей; 7 – давление аэросмеси перед сепаратором; 8 – давление и

влажность аэросмеси после сепаратора; 9 – отбор проб пыли на анализ; 10 – температура и давление аэросмеси перед горелками; 11 – расход электроэнергии на привод мельницы.

Молотковые мельницы устанавливаются как под наддувом, так и под разряжением с центробежным сепаратором на каменных и инерционных на бурых углях. При испытании молотковой мельницы определяются ее предельная и номинальная производительности при нескольких расходах сушильного агента, и разных положениях регулирующего органа сепаратора, определяющего тонкость помола пыли ( в центробежном сепараторе это угол поворота закручивающих лопаток, в инерционном – угол поворота регулирующего шибера).

Предельная производительность мельницы, особенно при влажных топливах, может ограничиваться сушкой, т.е. минимально допустимой температурой аэросмеси, дальнейшее понижение которой ведет к повышению влажности пыли, ухудшению размола и нередко к завалу мельницы.

Каждая серия опытов ведется при постоянном расходе сушильно-вентилирующего агента и постоянном положении регулирующего органа сепаратора со скачкообразным изменением от опыта к опыту производительности мельницы вплоть до предельной.

Среднеходовые мельницы малой производительности устанавливаются, как правило, под разряжением, а большой производительности – под давлением мельничного вентилятора. Испытания проводятся при предельной производительности мельницы с неизношенными мелющими органами (бандажи, валки, шары, плиты размольного стола).

Предельной производительностью является та, при которой топливо при заданных параметрах работы мельницы не просыпается в отходоуловитель вместе с кусками чистой породы или посторонними включениями.

Работа сепараторов молотковых и среднеходовых мельниц характеризуется в принципе теми же показателями, что и ШБМ.

При испытании М-В определяют две предельные производительности: по сушке, превышение которой ведет к увеличению влажности готовой пыли сверх установленной нормами для данного вида топлива; по размолу, превышение которой ведет к перегрузке электродвигателя и завалу М-В.

## **2.4 Исследования аэродинамических характеристик топочных устройств. Наладка горелок.**

### **2.4.1 Изучение аэродинамических характеристик воздушного и топливного трактов**

Степень равномерности распределения топлива и воздуха по отдельным горелкам влияет на равномерное заполнение топочного объема, воспламенение и выгорание топлива, формирование температурных и газовых полей. Эти факторы в свою очередь влияют на температурный режим работы радиационных и конвективных поверхностей нагрева, их шлакование и коррозию, образование в топочной камере токсичных окислов типа  $\text{NO}_x$  и уровень потерь теплоты в топке.

Снятие аэродинамических характеристик воздушного и топливного трактов сводится к проверке расходов и статистических напоров по тракту и всем горелкам; выяснению причин перекосов и осуществлению мероприятий по выравниванию статических и скоростных напоров перед горелками.

Для отбора импульса полного давления потока применяется изогнутая под прямым углом напорная трубка с коническим наконечником. Открытым концом трубка устанавливается навстречу потоку, а противоположным присоединяется к тягонапоромеру или микроманометру. При измерении статического давления потока воздуха (газа) необходимо правильно отобрать импульс давления, исключив влияние динамического напора потока. Достаточно точен и прост способ отбора импульса в одной точке трубопровода через небольшое отверстие в его стенке.

При значительных возмущениях потока (например, при вращательном движении на выходе из сепараторов) импульсы статического давления необходимо отбирать из нескольких точек сечения канала. Для этой цели наиболее удобны приемники статического давления в виде изогнутой напорной трубки с закрытым наконечником, имеющим на боковой поверхности небольшие отверстия для отбора давления. Трубки изогнутым концом устанавливаются навстречу потоку.

Наиболее распространенными приборами для измерения расхода среды служат расходомеры с сужающими устройствами. В качестве датчиков наиболее часто используются диафрагмы и трубы Вентури. В области малых чисел Рейнольдса применяются специальные сужающие устройства: сдвоенные диафрагмы, сопла с профилем в четверть круга и диафрагмы с двойным скосом, используемые в основном для измерения расхода мазута; сегментные диафрагмы для измерения существенно запыленного потока (предохраняют трубопровод от отложений пыли и обеспечивают тем самым постоянство коэффициента расхода сужающего устройства).

Прямоугольные диафрагмы и прямоугольные трубы Вентури устанавливаются в прямоугольных каналах в случаях, когда по конструктивным соображениям невозможен переход от прямоугольного канала к круглому. Напорные трубки Прандтля, ВТИ используются, как правило,

только для тарировки сечений трубопроводов и нестандартных сужающих устройств.

Предпочтительной является двойная трубка ВТИ, имеющая постоянный коэффициент расхода в практически встречающемся интервале скоростей, она нечувствительна к установке с отклонением от направления движения потока до  $20^{\circ}$ . Одинарной напорной трубкой ВТИ измеряют расход аэросмеси. Для измерения расхода после тарировки сечения канала с линейным размером более 200 мм могут быть использованы упрощенные напорные трубки – одинарные и двойные микровентури (мультипликаторы), позволяющие получить видимое динамическое давление примерно в 5 – 15 раз больше, чем у обычных напорных трубок. Микровентури малочувствительны к углу скоса потока до  $30^{\circ}$  и не вызывают потерь энергии потока, но оказывают повышенное влияние на точность измерения местных сопротивлений трубопроводов, в них образуются значительные пульсации среды.

При обработке экспериментальных данных для выяснения причин перекосов расходов среды определяют коэффициенты местного гидравлического сопротивления участков тракта при незапыленном и запыленном потоке.

Анализ и сопоставление коэффициентов сопротивления параллельно работающих участков тракта позволят выявить их неидентичность, конструктивно неудачные решения и наметить мероприятия по их усовершенствованию.

В мощных котлах производительностью 455 – 1000 кг/с при размещении горелок в несколько ярусов для подвода воздуха к газомазутным горелкам и вторичного воздуха к пылеугольным горелкам применяются общие воздухопроводы на все горелки в ярусе с тщательно изготовленными горелками и подогнанными по гидравлическому сопротивлению на специальном стенде вместе с объединяющими их воздухопроводами. При проектировании для равномерного распределения топлива и воздуха по горелкам моделируют узлы, а при наладке – устраняют выявленные недостатки.

Исследования показали, что количество ярусов горелок не влияет на равномерность распределения воздуха по ним при одинаковом давлении в выходном сечении горелки. При числе ярусов более двух при наладке необходимо учитывать изменение разрежения в топочной камере между нижним и верхним ярусами. Для наладки распределения воздуха нередко в горелки вставляются измерительные вставки типа Вентури.

При сжигании твердого топлива и схемах пылеприготовления с прямым вдуванием равномерное распределение аэросмеси по горелкам зависит в основном от конструкции и компоновки пылераспределителей, равномерности скоростных и концентрационных полей на входе в пылераспределитель. В схемах с пылевым бункером равномерность подачи топлива во времени определяется условиями работы питателей пыли и пылевого бункера. Для характеристики и сравнительной оценки равномерности распределения аэросмеси по пылепроводам и горелкам принимаются следующие параметры:

относительный расход воздуха, относительный расход пыли и относительная концентрация.

Для выравнивания расходов первичного воздуха по горелкам при наладке каждая горелка должна быть снабжена устройствами контроля расхода (например, термометрами ВТИ) и подрегулировки. Необходимо иметь в виду, что большое снижение скоростей в пылепроводах недопустимо из-за опасности отложений пыли и забивания их.

#### **2.4.2 Исследование аэродинамики топочных камер и горелочных устройств**

Влияние аэродинамики на все стадии процесса горения общеизвестно. Поэтому важно детально изучить аэродинамическую картину течения потока на выходе из горелки в топку и оценить ее влияние на структуру потока в топочном пространстве. Неравномерное и неустойчивое движение газов в топочной камере может вызвать сильные колебания температуры пара по потокам прямоточного котла, а также повышенные локальные тепловые нагрузки, что приведет к снижению надежности работы парового котла в целом. Неустойчивость аэродинамики топочного пространства может возникать как из-за неравномерного и неустойчивого распределения топлива и воздуха по горелкам, так и из-за неустойчивого движения потока топочных газов в сравнительно неглубокой и сильно развитой по ширине топочной камере, при которой поток газов под влиянием небольших возмущений может отклоняться то к одной, то к другой стенке.

Для экономии средств из-за больших трудностей изучения на натуральных образцах на первом этапе аэродинамика горелочных устройств и топочных камер исследуется в лабораторных условиях на изотермических и огневых моделях. Модели выполняются в удобном для производства работ масштабе по отношению к натуре с соблюдением геометрического подобия. На изотермических воздушных и гидравлических моделях все опыты проводятся в автомодельной области течения. В качестве характерных принимаются средняя эквивалентная скорость, определяемая по суммарному количеству движения в струях на выходе из горелки и эквивалентная плотность на выходе из устья горелки.

На огневых моделях стенки топочной камеры выполняются охлаждаемыми водой, в качестве топлива используется природный газ. Трудозатраты по созданию и производству работ на изотермических воздушных моделях выше, чем на гидравлических. На последних воспроизведение движения осуществляют с помощью трассеров – шариков, диаметром 2,0 – 2,2 мм из полистирола, динамическое подобие достигается при меньшем уровне скоростей, чем в воздушных.

Следует отметить, что данные изотермических исследований могут быть использованы для определения коэффициентов сопротивления горелок, улучшения конструкции их отдельных элементов, выбора компоновки горелок с топкой, а также для выявления качественного характера течения в топочном пространстве. Так как исследования аэродинамики горящего факела вызывают

большие трудности, необходимо накопление опытных данных, полученных на натуральных образцах и изотермических моделях, для установления связи между аэродинамическими характеристиками изотермических струй и горящего факела.

При изотермических продувках камеры с тангенциальными горелками поток быстрее достигает стен и движется вдоль них, а в горящем факеле более интенсивно заполняет центральную зону топки, примыкающую к рециркуляционной области. В горящем факеле фактические скорости значительно выше, чем в изотермических струях, а значения массовых скоростей сближаются.

При исследовании аэродинамики топочной камеры и горелочных устройств на моделях осуществляют: изучение скоростных полей в различных сечениях топочной камеры, на выходе из горелки и внутри амбразуры; определение угла раскрытия факела, скоростной неравномерности потока, выдаваемого горелкой; дальности факела, определяемой расстоянием от устья горелки до сечения.

При отработке конструкции горелки указанным исследованиям подвергают горелки с различными конструктивными параметрами – диаметром и формой выходного патрубка (цилиндрической, конической), числом и углом расположения закручивающих лопаток; при различной схеме ввода первичного и вторичного потоков (прямоточные, закрученные); при различном соотношении между расходами первичного и вторичного воздуха. При изучении взаимодействия струй, вытекающих из горелок в топочную камеру, исследуют влияние на аэродинамику потока в топке конструкции горелок и схемы их расположения на стенах топки; перекосов расходов среды по горелкам; схемы ввода газов рециркуляции в верх топки с целью выравнивания поля температур; угла наклона прямоточных горелок к горизонтальной плоскости и т. д.

Изучение аэродинамической структуры потоков в трехмерном поле, и особенно закрученных потоков, возможно лишь с помощью напорных трубок с шаровыми и цилиндрическими насадками Союзтехэнерго, которые позволяют определить скорости и направление потока в различных его точках. Эти зонды могут быть выполнены в неохлаждаемом и охлаждаемом водой вариантах. Основной частью зонда с шаровой насадкой является шар с пятью отверстиями для отбора импульсов давлений. Отверстия расположены в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Вектор скорости, измеренный этим зондом, может быть разложен на компоненты в декартовой системе координат.

Сложность ориентировки шарового насадка относительно меридиональной и экваториальной плоскостей, повышенная вероятность ошибок и погрешностей, а также необходимость обработки громоздкого опытного материала из-за увеличения числа измерений в каждой точке потока обычно ограничивают широкое использование этого зонда; его применяют для измерений на моделях и при изотермических продувках горелок.

Поскольку аксиальные и тангенциальные составляющие являются главными компонентами скорости в каждой точке закрученного потока, а

радиальные составляющие проявляются гораздо слабее и главным образом вблизи от устья горелки, представляется возможным использовать для изучения таких потоков трехканальный цилиндрический приемник, позволяющий с достаточной степенью точности производить измерения в двухмерном поле.

Наиболее подходящие для этой цели трехканальные зонды (см. рисунок 61), имеющие на боковой поверхности три отверстия, лежащих в одной плоскости поперечного сечения. Среднее отверстие отбирает импульс полного давления, боковые отверстия служат для ориентации зонда путем поворота вокруг продольной оси таким образом, чтобы ось среднего отверстия совпадала с вектором полной скорости, дифференциальный манометр, соединенный с центральным и с одним из боковых отверстий, измеряет напор, пропорциональный динамическому.

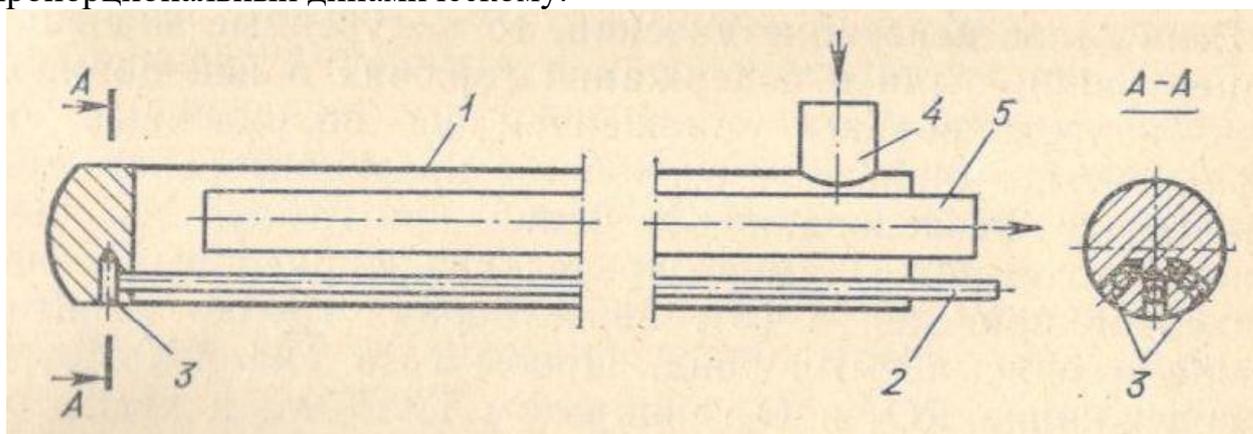


Рисунок 61 – Схема цилиндрического трехканального зонда

1 – корпус прибора; 2 – трубки отбора импульсов; 3 – три канала; 4,5 – штуцера подвода и отвода охлаждающей воды.

При закрученном потоке факел представляет собой гиперболоид вращения. С некоторым приближением можно считать начальный участок факела коническим и вершину этого конуса принимать за угол раскрытия факела, который определяют пневмометрической трубкой по границам потока, флюгерками, подкрашиванием воздушного потока, фотографированием. Каждый из этих способов имеет недостатки из-за эжектирования к корню факела воздуха и размывания им очертаний потока, пульсаций потока, поэтому наиболее объективные результаты можно получить при сочетании указанных способов измерений.

Увеличение интенсивности крутки увеличивает угол раскрытия потока и уменьшает его дальность. Параметр крутки определяется по полям скоростей и давлений, замеренных в струях, развивающихся в топочном пространстве.

При выборе оптимальной конструкции завихрителя следует учитывать затраты на дутье. Экономичность закручивающего устройства по затратам на дутье принято оценивать коэффициентом гидравлического сопротивления.

Для определения коэффициента сопротивления горелки приваривают три-четыре штуцера по периметру подводящих патрубков первичного и

вторичного воздуха, что позволяет точнее определить среднее статическое давление перед каждым каналом горелки.

Повышающаяся энергонапряженность поперечного сечения топочных камер и требования к высокой точности подачи массы топлива и воздуха горелками, комплектующими топку, особенно в мазутных котлах, выдвигают проблему обеспечения идентичности горелок. В горелках с подвижными элементами их идентичность трудно обеспечить в процессе наладки; эта задача должна решаться в основном при изготовлении. Поэтому вторым этапом исследования аэродинамики горелочных устройств является испытание натуральных горелок на заводском стенде в изотермических условиях.

Испытания натурального узла (или горелки) на заводе должны проводиться для головных образцов с целью отработки конструкции и для серийных (поголовное или выборочное) с целью контроля качества, в частности для предотвращения большого статистического разброса перечисленных выше параметров. Эти испытания в отличие от промышленных позволяют получить характеристики в чистом виде, без влияния многочисленных эксплуатационных факторов.

### **2.4.3 Наладка горелок для газового и жидкого топлив**

Наладка горелок для газового топлива способствует улучшению аэродинамики топочно-горелочных устройств в результате комплектования топки идентичными горелками и подбора целесообразных выходных скоростей для газа и воздуха в пережиме амбразуры, а также подбора интенсивности крутки воздуха. Для оценки надежности и долговечности элементов горелки исследуют температурный режим их работы в промышленных установках. С этой целью в элементы горелки на различном расстоянии от ее устья заделывают термопары и ведут наблюдение за температурой элементов при изменении расходов воздуха и газа от максимальных их значений до нуля. Эти исследования позволяют установить условия надежного температурного режима работы горелки, подобрать марки сталей для конструктивных элементов и выбрать оптимальное место установки горелок по длине амбразуры.

При наладке горелок для жидкого топлива кроме изучения аэродинамики указанными выше методами большое внимание уделяют форсунке. Качество и идентичность форсунок, комплектующих топку, контролируются на заводе-изготовителе и электростанциях. На заводе-изготовителе форсунки подвергаются гидравлическим испытаниям на давление не менее 150 % номинального. Идентичность форсунок проверяется на распыливающем стенде. Водяной стенд для тарировки механических форсунок включает камеру для улавливания распыленной воды, в которой помещают головку форсунки. К форсунке подводят водопровод с регулирующим устройством, расходомером и манометром. При гидравлических испытаниях проверяется плотность соединений элементов форсунки, а проверка на стенде позволяет установить эффективность (тонкость распыла и распределение капель в сечении потока) работы форсунки и ее производительность. После тарировки на водяном стенде

топку комплектуют форсунками, отличающимися по расходам не более чем на  $\pm 5\%$ . При тарировке паромеханических форсунок кроме воды к стенду должен быть подведен воздух необходимых параметров.

Процессы смесеобразования и горения в топочной камере в значительной мере определяются фракционным составом, формой и структурой потока распыленного топлива. При распыливании топлива центробежными и вихревыми форсунками наблюдается большая неоднородность фракционного состава и неравномерное распределение топлива по сечению потока.

Наибольший интерес представляют прямые методы исследования, когда дисперсность распыленного топлива определяют непосредственно измерением размеров капель. К ним относятся методы улавливания капель на пластинку, фотографический иммерсионный (улавливание капель зондами с жидкостью, которая не смешивается с каплями распыливаемой среды, с последующим фотографированием и подсчетом), замораживания капель в ловушке с хладоагентом и последующего ситового анализа и метод, в котором используются моделирующие вещества, твердые на воздухе и имеющие одинаковые физические свойства с топливом в подогретом состоянии. К таким веществам относятся парафин, бензойная кислота и др. После распыла в подогретом состоянии на воздухе их капли затвердевают и могут быть подвергнуты ситовому анализу. Особое распространение получил метод улавливания капель на стеклянную пластинку, покрытую смесью вазелина и трансформаторного масла. Отсчет капель производится мерной линейкой с ценой деления 15 мкм на стереоскопическом микроскопе. За характеристику качества распыливания принимают зависимость текущего диаметра капли от массовой доли капель, размеры которых меньше данного диаметра.

Выбор распылителей (форсунок) для комплектования мазутных горелок должен осуществляться не только расходными и дисперсными характеристиками, но также с учетом стабильности работы и простоты их изготовления. Форсунки, эксплуатируемые на одном котле, загрязняются и заменяют свои характеристики из-за случайных причин не одновременно. Только использование форсунок со стабильными расходными характеристиками позволит сохранять первоначальную настройку горелок по соотношению топливо – воздух достаточно продолжительное время. Выбор оптимальной конструкции распылителя и оценка эффективности его работы должны быть основаны на данных стендовых и промышленных испытаний.

Для надежной работы горелки имеет значение место установки распыливающей головки по длине амбразуры. Выбор места установки головки производится опытным путем и таким образом, чтобы факел сопрягался с амбразурой, но не взаимодействовал с ней непосредственно, т.к. при попадании мазута на футеровку амбразура оплавляется или закоксовывается. Тепловые условия работы горелки (лопаток регистра, головки форсунки и других элементов) оценивают измерением температур металла этих элементов заделанными в них термопарами при различном режиме работы горелки.

#### 2.4.4 Наладка пылеугольных горелок

К основным причинам, нарушающим работу пылеугольных горелок, относятся следующие.

Во-первых, быстрое воспламенение пылевоздушной смеси с образованием высокотемпературной среды вблизи устья горелки; это способствует обгоранию выходных деталей горелочного устройства, короблению корпуса горелки в целом и интенсивному шлакованию ее каналов. Для устранения указанного недостатка конические насадки горелок следует заменять на цилиндрические и выполнять их из жаропрочной стали, устанавливая горелки следует заподлицо со стенкой.

Обгорание насадок или конусов горелок влечет за собой ухудшение устойчивости воспламенения и экономичности сжигания угольной пыли. Для выяснения причин разрушения и условий работы насадок по двум взаимно перпендикулярным диаметрам заделывают термопары. Расходы воздуха по каналам горелки измеряются напорными трубками. Одновременно измеряется температура газов вблизи устья горелки. Исследования ведутся при различном воздушном режиме горелок, при пуске котла, отключении и включении питателя пыли.

Во-вторых, возможен эрозионный износ деталей горелки при неудовлетворительной схеме подвода пылевоздушной смеси и эрозионный износ труб топочных экранов из-за неудачной конструкции горелок или неверной установки на стенах топки. Для устранения явлений эрозионного износа элементов горелки и труб котла необходимо изменение схемы подвода пылевоздушной смеси, схемы установки горелок и их конструктивного оформления.

В-третьих, возможна недостаточная вентиляция горелок при их отключении в работающей топке. Исследования свидетельствуют о слабом влиянии вторичного воздуха на охлаждение насадок, что объясняется аэродинамикой потока в устье горелки. При отключенном первичном воздухе имеет место разомкнутый факел, при котором насадки горелки находятся в контакте с горячими топочными газами и нагреваются до 1100°C и выше. Подача первичного воздуха устраняет этот контакт и снижает температуру насадок до 150 – 350 °C. По этим соображениям не рекомендуется выключать горелки при регулировании нагрузки котла. При выключении горелок через них необходимо пропускать до 50% первичного и вторичного воздуха от номинального расхода.

В-четвертых, возможно забивание пылепроводов пылью, в результате чего может прекратиться вентиляция горелок. Для исключения этого явления пыль не должна быть повышенной влажности, скорость пылевоздушного потока – ниже допустимой, в схемах с промбункером необходим строгий контроль за работой питателей пыли.

В-пятых, к осложнениям в эксплуатации котла ведет неравномерное распределение топлива и воздуха между горелками и по сечению каналов в каждой горелки. Равномерность распределения пыли и воздуха в топке, выдаваемой горелками, можно оценить, организовав локальный отсос проб по сечению потока. Однако следует иметь в виду, что любые устройства,

вводимые в факел, в той или иной степени искажают аэродинамику потока. В изотермических условиях неравномерность распределения пыли на выходе из горелки определяется устанавливанием пыли на стеклянные пластинки (5×7 мм), покрытые касторовым маслом и закрепленные на сетке на расстоянии одного диаметра от устья по восьми радиусам. Степень почернения пластинки определяется электрическим микрофотометром.

Значительная неравномерность концентрации пыли по сечению потоков, выдаваемых различными горелками, изменяется во времени и носит характер случайного процесса с широким частотным и амплитудным спектром. В результате на всем протяжении пылеугольного факела имеют место значительные пульсации во времени температуры и содержания кислорода, ведущие к осложнениям эксплуатации и повышенным потерям теплоты от механической неполноты сгорания при сжигании тощих углей. Источником возникновения этих пульсаций следует считать нестабильную работу элементов пылеприготовительного оборудования, в частности, питателей угольной пыли в системах с промбункером.

## **2.5 Исследование процесса горения в топочной камере**

### **2.5.1 Определение полей скоростей, концентраций, температур**

Для изучения топочного процесса наряду с балансовыми измерениями по топке исследуются: распределение полей скоростей, температур, концентраций и состава газов в различных сечениях топки, а в пылеугольных котлах также изменения концентрации пыли, содержания в ней горючих и серы, фракционного состава пыли. Для полного анализа процессов в топочной камере необходимо знать поля температур топочных газов в слоях, примыкающих к ограждающим топку стенам, характеристики лучистого теплообмена между отдельными участками факела и между объемом топки и ограждающими стенами, а также распределение тепловых потоков вдоль экранов. Перед проведением испытаний должен быть налажен топочный режим; особое внимание обращают на равномерное распределение топлива и воздуха между горелками, контролируемое во время испытаний. Исследование развития и завершения процесса горения основано на зондировании топки в разных ее сечениях водоохлаждаемыми зондами для отбора проб пыли, газа, измерения температур, выяснения аэродинамической структуры факела и определения локальных тепловых потоков на экраны топочной камеры.

Зондирование топки в разных ее сечениях дает возможность определить:

- распределение пыли в топочной камере по структуре и элементарному составу;
- массовые и тепловые нагрузки топки в различных ее точках;
- значение и направление вектора скорости потока топочных газов;
- степень сгорания топлива (отдельно серы) как по ходу факела, так и в отдельных точках топочной камеры;
- работу горелок в части распыливания топлива, распределения его между отдельными горелками и использования топочного объема;

- избытки воздуха и состав газов (включая окислы азота и серы) в любом участке топочной камеры;

- влияние первичного, вторичного и дополнительного воздуха, а также рециркулирующих газов на процесс горения.

Зондирование топки целесообразно проводить при испытаниях топок и горелок, наладке и освоении новых топочных устройств и изучении новых видов топлива с целью получения материала для проектирования.

Плоскости зондирования располагаются обычно в каждом ярусе горелок на уровне горизонтальных их осей, над ошипованным поясом (для полуоткрытых топочных камер), на середине длины факела и выходе из топки. Измерения проводятся через лючки, примерная схема размещения которых приведена на рисунке 62.

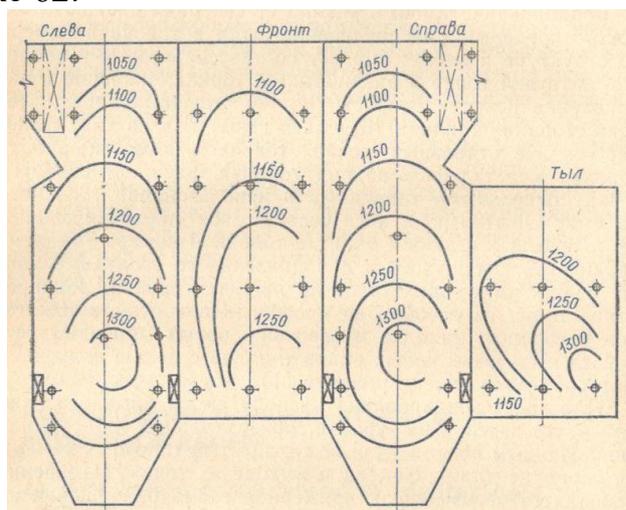


Рисунок 62 – Схема размещения лючков для зондирования топки и изотермы

В мощных паровых котлах изучается часть топочного объема, ограниченная зоной действия исследуемой (обычно крайней) горелки (в плоскостях, расположенных посередине между боковым экраном и осью крайней горелки и посередине промежутка между крайней и близлежащей к ней в ряду горелками), так как зонды выполняются не длиннее 4 – 5 м.

В этом случае в каждой вертикальной плоскости надлежит исследовать от 14 до 22 точек. В соответствии с назначением исследования на чертежах разрезов топки намечают точки для отбора проб и дают эскиз разводки экранных труб. Координаты выполненных лючков тщательно измеряют и наносят на развертке топки.

В практике испытаний применяются различные конструкции водоохлаждаемых зондов (Союзтехэнерго, ВТИ, НПО ЦКЛ'И и др.), различающиеся оформлением отборного окна для проб пыли, числом размещенных в них импульсных трубок и т. п. Использование комбинированных водоохлаждаемых зондов, например одновременно для определения величины и направления вектора скорости газов и отбора проб пыли, существенно усложняет конструкцию зондов. По этой причине часто поля по большинству параметров снимаются специальными зондами.

Для отбора проб пыли и газа из факела используются щелевые пылегазоотборные трубки длиной 4—5 м, например типа ЦКТИ (рисунок 63). Конструкция трубок предусматривает предварительный подогрев воды топочными газами в водоподводящем канале трубки, что предотвращает конденсацию водяных паров в пылеотборном канале. Отбираемая из факела пыль гасится в охлаждаемом внутреннем канале пылеотборной трубки и осажается в циклончике. Расход газов в отсосной системе определяется измерительной шайбой. Следует отметить, что методические трудности вызывает отбор пыли с определением ее концентрации в потоке газов температурой до 1700°С при изменении скорости потока от 2 до 30 – 40 м/с. Для получения представительных проб пыли предварительно снимаются поля скоростей и определяются скорость и направление потока в месте отбора. Для измерения скорости потока используется охлаждаемый водой трехточечный цилиндрический зонд (рисунок 61) длиной 4 – 5 м.

Применение цилиндрического зонда позволяет определить в каждой точке начального участка факела величину и направление вектора скорости, а также найти его составляющие: аксиальную (расходную) скорость и тангенциальную. В тех точках, где скорости потока превышают 10 м/с, в щели пылеотборной трубки поддерживается скорость газов, равная скорости потока. Отбор пробы производится при равенстве скоростей обеспыленного в циклончике газа в щели трубки и газа в потоке в точке замера. В точках, где скорости потока меньше 10 м/с, скорость газов в щели пылеотборной трубки поддерживается равной примерно 10 м/с, чтобы избежать осаждения пыли до циклончика, значительного увеличения продолжительности эксперимента, обусловленной необходимостью накопления пробы пыли в количестве, требуемом для производства дальнейших анализов. При увеличении длительности опыта возрастает вероятность изменения режима горения из-за неуправляемых возмущений в нем (например, из-за изменения зольности угля, угрубления пыли и т. п).

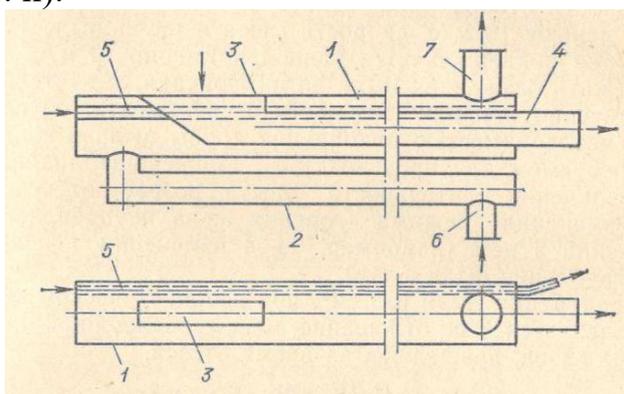


Рисунок 63 – Схема пылегазовой трубки

1 – корпус трубки; 2 – водоподводящий канал; 3 – отсосная щель; 4 – канал отсоса пылегазовой смеси; 5 – трубка для отсоса проб газа; 6,7 – штуцера подвода и отвода охлаждающей воды.

Концентрация пыли, при изокINETическом отсосе определяется как отношение массы осажденной пыли к объему газов, прошедших за время отсоса.

Если отсос неизокинетический, то полученные значения концентрации пыли и содержания горючих в ней должны быть скорректированы умножением на поправочные коэффициенты, выявленные в процессе предварительного методического исследования, особенно при отборе из зоны активного горения. Газоотборная трубка вмонтирована в описываемый зонд. Пробы газа анализируются на содержание  $RO_2$  и  $O_2$  аппаратом ГХП-3М, а хроматографическим методом определяются продукты неполного горения.

Температура газов на начальном участке факела измеряется охлаждаемыми отсасывающими пирометрами. Спай термопары в них выдвинут из охлаждающего чехла, защищен двойными или тройными коаксиально расположенными цилиндрическими экранами из легированной стали (например, 1X18H9T) или керамических материалов. Для обеспечения чисто конвективного теплообмена между газом и спаем термопары через канал последнего газ отсасывается со скоростью 100 – 140 м/с. Измерения отсосными пирометрами затруднены, так как много времени занимает расшлаковка канала после прохождения каждого сечения. Существенно упрощает исследование использование жезловых термопар. У устья факела жезловая термопара показывает более низкую температуру, чем отсасывающий пирометр, так как она экранирована пылью, имеющей более низкую температуру, чем газы. Далее по ходу факела жезловая термопара начинает показывать более высокую температуру, чем отсасывающий пирометр, за счет радиационного нагрева излучением от прилегающих слоев пылевоздушной смеси. Разность в показаниях жезловой и отсасывающей термопар достигает на начальных участках факела 200 °С, а между показаниями оптического и отсасывающего пирометров 400 °С. В сечениях, расположенных за ядром факела, за исключением пристенных областей, обнаружены ровные поля температур и установлено, что разность значений температур, полученных разными методами, практически не превышает погрешности измерений. При введении поправок на результаты измерений жезловыми термопарами, протарированными по отсосным, ими можно пользоваться на всей длине факела, однако на начальном его участке предпочтительнее отсасывающие пирометры.

Основой топочного процесса является аэродинамическая структура газозооушного потока, в котором протекает этот процесс. Устойчивость воспламенения пылевидного топлива определяется в основном количеством высокотемпературных топочных газов, рециркулирующих к устью факела, поэтому важно определять зоны и массу рециркулирующих газов.

В зонах максимальной приосевой и пристенной рециркуляции топочных газов имеет место максимальная степень выгорания угля, а следовательно, больше серы находится в газообразном состоянии. По мере удаления от амбразуры горелки происходит выравнивание полей всех параметров. Таким образом, наиболее опасной зоной сернистой коррозии экранных труб является

начальный участок факела, где достигается максимальная температура факела и глубокое выгорание пыли.

Изменение скорости, температуры и состава газа, концентрации пыли и содержания горючих в топливе на различном расстоянии от устья горелки изображают графически. Пример такой обработки материалов испытаний при вихревых горелках приведен на рисунке 64. Из рисунка видно, что на расстоянии 300 мм от амбразуры (кривые 1) в зоне основного потока поля скоростей (из горелок) имеют резко выраженные максимумы. В приосевой области горелки за рассекателем имеется зона обратных токов с незначительными скоростями. Для центральной зоны потока, зоны рециркуляции топочных газов, характерны высокое содержание  $RO_2$  и высокие значения температуры. Концентрация пыли в зоне обратных токов невелика. Кривая, характеризующая распределение пыли по сечению потока, аналогична кривой скоростей; перемешивание пыли с воздухом незначительное; высокое содержание горючих в пыли и низкие значения температуры в зоне основного потока показывают, что в данном сечении факела идет в основном его прогрев.

Внешняя рециркуляционная зона незначительна по размеру и уровню скорости,  $RO_2$  и температуры в ней малы, и поэтому эта зона не играет существенной роли для повышения устойчивости воспламенения. Дальнейшее развитие процесса ясно из кривых, приведенных по результатам зондирования факела на расстоянии 1150 и 6120 мм от устья горелки (кривые 2 и 3). В сечении на расстоянии 6000 мм выше оси горелок верхнего яруса получены практически выровненные поля всех измеряемых величин, т. е. пыль равномерно перемешана с воздухом и процесс горения идет по всему сечению.

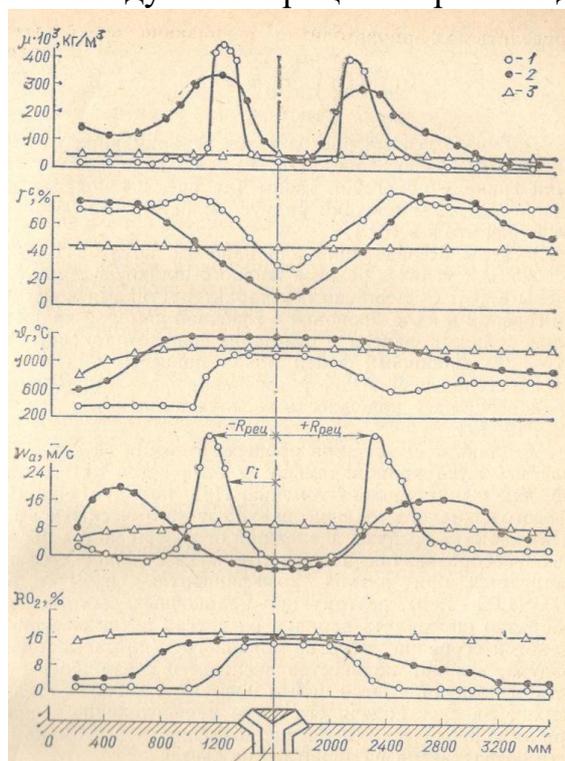


Рисунок 64 – Скорости, температура и состав газа, концентрация пыли и содержание в ней горючих на различном расстоянии от устья горелки

1 – 300 мм; 2 – 1150 мм; 3 – 6120 мм; 4 – пылевоздушная смесь; 5 – вторичный воздух.

Суммируя потоки, проходящие через элементарные площадки факела, можно получить расходы газов, сгоревшего и несгоревшего топлива в каждом сечении факела, а также их значения в зонах рециркуляции, что позволит свести материальные балансы расходов воздуха и топлива в каждом поперечном сечении факела. Это дает возможность также определить местные значения коэффициентов избытка воздуха, характеризующих перемешивание топлива с воздухом. В конечном итоге все это позволяет оценить степень совершенства горелки и ее компоновки с топкой и в случае необходимости наметить пути усовершенствования топочного устройства.

Методика исследования процесса горения газового топлива и мазута принципиально не отличается от изложенной для пыли твердого топлива. При наладке сжигания газового и жидкого топлива оценивают критический коэффициент избытка воздуха, зависящий от совершенства процессов смесеобразования. При работе на газе полное сгорание достигается при низких коэффициентах избытка воздуха (1,02 – 1,05), поэтому при наладочных работах целесообразно определить влияние на потери с химической неполнотой сгорания неорганизованного (присасываемого) воздуха, так как количество последнего соизмеримо с избытком воздуха. С этой целью повышают избыток воздуха в топке за счет подачи его через неработающие горелки. При этом критическое значение коэффициента избытка воздуха возрастает, а КПД котла снижается.

Сжигание газового топлива с малыми коэффициентами избытка воздуха повышает чувствительность процесса к перекоосу по коэффициенту избытка между отдельными горелками. В эксплуатации перекоос может наблюдаться из-за неодинаковых коэффициентов гидравлического сопротивления горелок по воздуху и газу. При наладке перекоос создают искусственно, прикрывая на 30 % заслонками проходное сечение для воздуха на некоторых горелках. Одновременно подгружают дутьевые вентиляторы для сохранения неизменным избытка воздуха на выходе из топки. Таким образом, организуют режим горения с перекоосом значительно большим, чем встречается при нормальной эксплуатации. Перекоос вызывает смещение в большую сторону критического коэффициента избытка воздуха.

Причиной возникновения потерь теплоты с химически неполным горением при сжигании мазута является пространственная неравномерность коэффициента избытка воздуха и незавершенность перемешивания, в результате чего концентрация кислорода меняется во времени.

Отбор газов из топочного объема показывает, что расщепление составляющих мазут углеводородов проходит в непосредственной близости от устья горелок и занимает небольшой объем. При окислительном крекинге образуются CO, H<sub>2</sub>, которые затем догорают в объеме топки. Таким образом, в конце процесса горения мазута участвуют те же компоненты, что и при сжигании газа.

Представление о положении ядра факела в топке дает распределение в ней изотерм. Определение изотермических полей в топке осуществляют с помощью оптического пирометра или жезловой термопары. С помощью оптического пирометра можно определить температуру факела только в пристенной его области, существенно отличающуюся от температуры в основном потоке, так как в пристенном слое газов велик градиент температур.

Для определения характера распределения температур в топочном пространстве на каждой стенке топки равномерно по ее высоте должны быть расположены лючки в количестве 16 – 24 шт. для котлов  $D \leq 180$  кг/с (640 т/ч) или от 30 до 60 шт. для котлов  $D > 180$  кг/с. Изотермические поля факела наносят на эскиз развертки топки (см. рисунок 62). Следует учитывать, что температура факела в отдельных точках измерения может быстро меняться, поэтому условно принимают, что температура факела в отдельных его частях остается постоянной в течение всего времени измерения. При построении изотерм делается допущение, что температуры факела между соседними точками изменяются линейно. Смещение ядра факела к какой-либо из стен топки свидетельствует о неналаженном топочном процессе либо о неудовлетворительной конструкции горелки или ее компоновки с топкой.

Определяющее значение для распределения температур в пристенном слое газов имеет процесс теплообмена с точными экранами. Распределение температур в горизонтальных плоскостях топки в основном зависит от аэродинамики камеры, однако при больших габаритах топки не может быть определено прямыми измерениями.

### **2.5.2 Определение тепловой эффективности топочных экранов**

Для исследований локального теплообмена факела используются термозонды различных конструкций (марки ВНИИТ, ВТИ, НПО ЦКТИ и др.).

Термозонд ВНИИТ (рисунок 65) измеряет лучистые потоки, падающие на экранную поверхность и обратные, от экранов – в топочный объем, т.е. является термозондом двустороннего действия. Измерительные элементы (приемники лучистой энергии) изготовлены из жаропрочной стали в виде цилиндров диаметром 14,5 и высотой 6 мм с заплечиками.

Измерительные элементы устанавливаются с двух противоположных сторон в водоохлаждаемой головке термозонда, к которой по стальным трубам (штангам) подводится и отводится охлаждающая вода. Штанги могут быть выполнены длиной не более 4 – 5 м, поэтому область применения термозондов ВНИИТ в топках мощных паровых котлов ограничена. Головка термозонда должна вводиться в топку через лючки и устанавливаться в различных топках по ширине и высоте экрана с помощью этих штанг.

Принцип действия устройства основан на определении теплового потока в плоской стенке при одномерном температурном поле по разности температур, если известны коэффициенты теплопроводности приемника лучистой энергии и расстояние между точками, в которых измеряется температура.

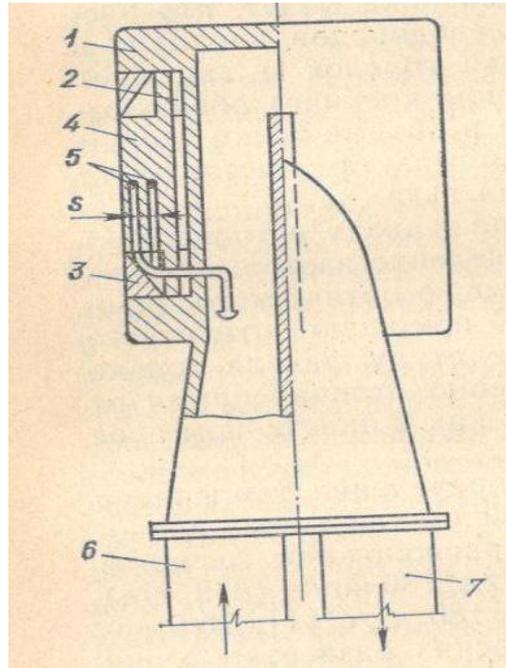


Рисунок 65 – Схема двустороннего термозонда ВНИИТ

1 – водоохлаждаемая головка; 2 – прокладка; 3 – крепежное кольцо; 4 – приемник лучистой энергии; 5 – термопары; 6,7 – штанги, подводящие и отводящие охлаждаемую воду.

Разность температур по оси цилиндра измеряется дифференциальной термопарой с хромель-алюмелевыми электродами диаметром 0,15 мм.

Средние значения тепловых потоков по каждому уровню и по экранам определяются в соответствии с действительным их распределением путем планиметрирования эпюр падающих и обратных лучистых потоков. Среднее значение по топке в целом определяют как средневзвешенную величину с учетом размера площади стен, ограждающих активный объем топки. Средние значения лучистых потоков подсчитывают с учетом поправок к показаниям термозондов: на конвективный подвод теплоты к измерительному элементу, излучение газового объема между топочным экраном и плоскостью измерительного элемента, излучение приемника и поглощение обратных потоков в газовом объеме, падающие лучистые потоки вследствие отличия лучевоспринимаемой поверхности приемника от абсолютно черной.

Для характеристики неравномерности распределения тепловых потоков между экранами разных стен топки по высоте или ширине экрана определяют коэффициенты неравномерности.

Локальный теплообмен может быть исследован с помощью торцевых термозондов ВТИ (рисунок 66).

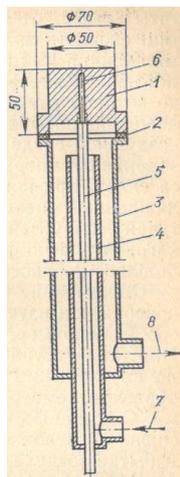


Рисунок 66 – Схема торцевого пробоотборника-зонда

1 – образец; 2 – прокладка; 3 – корпус; 4 – труба для подвода воды; 5 – труба для размещения термодпары; 6 – сверление для термодпары; 7, 8 – соответственно подвод и отвод охлаждающей воды.

Перепад температур по оси цилиндрического приемника лучистой энергии измеряется дифференциальной термодпарой. Падающие лучистые потоки определяются одновременно во всех лючках топки, в которых термозонды устанавливаются так, чтобы торцевая поверхность приемника лучистой энергии находилась на уровне экранных труб.

Для определения воспринятого экраном теплового потока пользуются тепломерами различных конструкций, в которых охлаждающим агентом являются воздух, вода.

Тепломер ВТИ-СибВТИ (рисунок 67) прост по конструкции, надежен в работе, имитирует по форме экранную трубу. Тепломер вводится в топку через лючки, устанавливается в плоскости экрана и охлаждается водой. Температуру стенки тепломера изменяют в пределах от 300 до 600 °С изготовлением его из сталей с различной теплопроводностью, изменением толщины металла между тепловоспринимающей и теплоотдающей поверхностями, высверливанием в сплошном цилиндре вертикальных каналов, заполняемых воздухом и т.п.

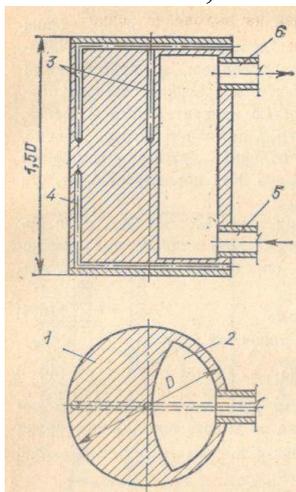


Рисунок 67 – Схема тепломера ВТИ-СибВТИ

1 – цилиндрический корпус диаметром, равным диаметру экранной трубы; 2 – полость, омываемая водой; 3 – сверления для закладки дифференциальной термопары; 4 – то же для термопары, измеряющей температуру стенки; 5, 6 – штуцера для подвода и отвода воды.

Датчиком теплового потока служит дифференциальная термопара, измеряющая разность температур по толщине стенки прибора, образуемая двумя термоэлектродами, привариваемыми к доншкам сверлений возле лобовой образующей и на глубине. Вторым электродом термоспая служит металл тепломера.

Через те же лючки могут быть введены вместо термозондов малогабаритные радиометры упрощенной конструкции. Во входном торце цилиндрического охлаждаемого водой корпуса устанавливается стальная пластинка, по оси которой зачищается термопара. Радиометры и тепломеры перед опытами тарируются по термозонду ВТИ путем совместного их введения в топочную камеру с различными тепловыми потоками.

В процессе опытов радиометр выдвигается в топку периодически, его тепловоспринимающий элемент поддерживается чистым. Измерения с помощью радиометра и тепломера позволяют определить тепловое сопротивление загрязненного слоя отложений на тепломере и его изменение во времени, а также коэффициент тепловой эффективности экрана.

Погрешность измерения падающего теплового потока термозондом ВТИ составляет 10 %, дополнительная погрешность от градуировки тепломеров и радиометров – не менее 10 %. Погрешность определения коэффициентов загрязнения и эффективности невелика, поскольку ошибка измерения тепловых потоков получается систематическая и с одним знаком.

Распределение падающих тепловых потоков на экранах стен топки может быть представлено графически аналогично изображению изотерм. Изменение распределения падающих тепловых потоков в зависимости от нагрузки котла и различных параметров работы топки и горелок позволяет сформулировать мероприятия для повышения экономичности и надежности работы топки (например, путем уменьшения наружных отложений на экранах, исключение газовой коррозии, расстройств гидродинамики).

Определение средней температуры газа на выходе из топки непосредственным измерением с помощью отсосного пирометра в мощных паровых котлах практически невозможно из-за больших площадей выходных окон (сотни квадратных метров), а также температурной и скоростной неравномерностей. Поэтому энтальпия газов в конце топочной камеры вычисляется по энтальпии газов перед конвективным пароперегревателем (КПП) на входе в опускную шахту и тепловому балансу поверхностей нагрева газового тракта на участке от выходного окна топки до сечения, где измерена температура газа.

Температура газа перед КПП измеряется в контрольных точках предварительно протарированного сечения с учетом поправки на излучение жезловых термопар. По энтальпиям газов в конце топки могут быть

определены их температуры, построено распределение температур по ширине топки и определена средняя балансовая температура газов. Например, температуры газов на выходе из топки котла БКЗ-320, определенные описанным методом, совпали с измеренными отсосным пирометром с погрешностью 0 – 30 °С. Этот факт свидетельствует о применимости метода для мощных котлов, в которых измерения по всей ширине топки выполнить невозможно.

По характеру распределения температура газов на выходе из топки в зависимости от различных режимных факторов (нагрузки, коэффициента избытка воздуха, степени рециркуляции охлажденных газов в топку, режима работы горелок и т.п.) можно судить об их влиянии на суммарный теплообмен в топочной камере и разработать мероприятия, обеспечивающие на выходе из топки температуру газов, безопасную по условиям шлакования поверхностей, расположенных в газоходах за топкой.

## **2.6 Исследование наружных загрязнений поверхностей нагрева парового котла**

### **2.6.1 Классификация золовых отложений**

С увеличением единичной мощности и повышением параметров котлов проблема борьбы с золовыми отложениями на поверхностях нагрева становится важнейшей для обеспечения надежной работы энергетического оборудования.

Неравномерность наружных отложений на парогенерирующих трубах барабанов котлов может приводить к расстройству циркуляции, а на топочных экранах прямоточных котлов сверхкритического давления – к значительным тепловым разверкам. Подшламовая коррозия металла труб может быть причиной их разрыва. При обрушении в топке крупных шлаковых образований возможно механическое разрушение экранных труб.

Забивание отложениями конвективных газоходов приводит к увеличению газового сопротивления и снижению паропроизводительности котла до 50 – 70 % проектной, уменьшению времени безостановочной работы до 20 – 30 дней. Золовые слои ухудшают процесс теплопередачи, т.к. представляют собой дополнительное термическое сопротивление, и ведут к снижению КПД котла.

Поддержание поверхностей нагрева в чистом состоянии является важнейшей проблемой современной топочной техники, которая носит комплексный характер. В нее входит изучение химико-минералогического состава топлива, его физических свойств, скорости нагрева, уровня и продолжительности влияния температуры и состава газов в топке, эксплуатационно-конструктивных вопросов и экономичности котла.

Шлакозоловые отложения образуются при сжигании твердых и жидких топлив.

По характеру связи частиц и механической прочности слоя отложения подразделяются на рыхлые (сыпучие) и связанные.

Под рыхлыми понимаются такие отложения, при формировании которых не протекают химические реакции, не проводятся капиллярные силы адгезии и

в слое отсутствуют связующие (липкие) компоненты. Рыхлые отложения образуются на конвективных поверхностях нагрева при сжигании донецкого ГСШ, кузнецкого Т, на экранах – донецкого АШ и др. Образование рыхлых отложений снижает тепловую эффективность поверхности нагрева, а в некоторых случаях может привести к частичному перекрытию живого сечения газохода.

Формирование слоя рыхлых отложений определяется совокупностью двух процессов – процесса оседания золовых частиц и процесса абразивного износа слоя более крупными частицами золы и несгоревшего топлива. Этим объясняется оседание на трубах (в основном в кормовой области) преимущественно мелких фракций золы и стабилизация слоя отложений во времени. На лобовой части труб крупные частицы изнашивают слой отложений более интенсивно, в результате чего при скорости газов выше определенного предела рыхлые отложения не образуются. Влияние концентрации золы в потоке дымовых газов сказывается только на времени образования установившегося слоя рыхлых отложений. Следовательно, очистка поверхностей нагрева одинаково необходима при сжигании мало- и многозольных топлив. Уменьшение диаметра труб способствует уменьшению радиуса кривизны потока, обтекающего трубу, поэтому на частицы в потоке действуют большие инерционные силы, что существенно уменьшает образование рыхлых отложений.

Применение встроенных в газоход золоуловителей уменьшает в газовом потоке содержание крупных частиц и интенсифицирует образование рыхлых отложений. Направление потока (восходящий, исходящий) не оказывает существенного влияния на формирование рыхлых отложений. При скоростях потока 2,5 – 3,0 м/с может происходить сильный золовой износ рыхлыми отложениями с забиванием части живого сечения газохода, поэтому при номинальной нагрузке котла скорость газов должна быть не менее 6 м/с.

Формирование связанных отложений на высокотемпературных поверхностях нагрева при сжигании твердых топлив протекает под действием аэродинамических факторов и химических процессов в слое осевшей золы при наличии химически активных компонентов и компонентов с высокими связывающими свойствами (легкоплавкие эвтектики, жидкая фаза). Химические реакции, как правило, приводят к упрочнению слоя отложений. Основная особенность связанных отложений – способность к неограниченному росту с течением времени (преимущественно на лобовых образующих трубах), благодаря чему они вызывают особенно большие трудности в эксплуатации котлов.

Основными факторами, определяющими образование связанных золовых отложений, являются: минералогический состав топлива, поведение отдельных составляющих минеральной части в процессе горения, уровень температур при сжигании топлива, скорость нагрева и продолжительность действия высоких температур на минеральную часть, состав газов, температура газов, летучей золы и поверхностей нагрева в местах образования золовых отложений, а также ряд физико-химических процессов, протекающих в слое отложений.

Образование этих отложений протекает в основном в две стадии. Сначала на трубах образуется медленно растущий первичный слой отложений. С ростом его толщины температура наружной поверхности первичного слоя повышается и приближается к температуре газов. Если при этом температура газов настолько высока, что основная масса уноса находится в пластическом состоянии, на первичном слое со стороны набегающего потока происходит образование быстрорастущих гребневидных отложений (вторичный слой), т.е. начинается шлакование. В дальнейшем может происходить упрочнение вторичного слоя в результате физико-химических процессов (спекания, кристаллизации и сульфатизации). Характеристиками шлакующих свойств являются: температура начала шлакования, выше которой наблюдается неограниченный рост вторичных отложений, и прочностные свойства первичных отложений.

Механическая прочность первичных отложений оказывает существенное влияние на шлакование поверхностей нагрева и является одним из показателей шлакующих свойств топлива. Первичные отложения в зависимости от состава минеральной части топлива и способа его сжигания могут иметь различную прочность, мерой которой может служить прочность на сжатие.

Наиболее часто встречаются следующие типы прочных первичных отложений:

- отложения с высокой концентрацией окислов железа, в основном виде гематита  $Fe_2O_3$  (до 80 %), например, при содержании в летучей золе продуктов неполного окисления колчедана (образуют легкоплавкие соединения на основе эвтектики  $FeO - FeS$ , плавящиеся при температуре 900 – 950 °С) – подмосковный бурый уголь;

- отложения с высокой концентрацией сульфата кальция (до 70 %), образующиеся в результате оседания и последующей сульфатизации окиси кальция и при выделении на поверхности нагрева сульфидов кальция и при выделении на поверхности нагрева сульфидов кальция, например при сжигании углей Канско-Ачинского бассейна и сланцев;

- отложения с высоким содержанием щелочных сульфатов (до 40 %), образуются в результате испарения в топке и последующей конденсации на поверхностях нагрева легко возгоняемых щелочных соединений.

Упрочнение отложений при сульфатизации объясняется образованием кристаллических сростков сульфата кальция между отдельными частицами. Сульфатизация отложений наблюдается при значительной концентрации в них окиси кальция, наибольшая скорость ее сульфатизации имеет место в пределах температур 800 – 900 °С. Верхний предел сульфатизации составляет 1100 – 1300 °С в зависимости от соотношения кислых ( $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$ ) и основных ( $CaO$ ,  $MgO$ ,  $Fe_2O_3$ ) окислов.

Под кристаллизацией отложений понимается выделение из стекловидной фазы кристаллов, что приводит к увеличению прочности отложений. Кристаллизация наблюдается при достаточно высокой концентрации в стекловидной фазе основных окислов, главным образом окиси кальция, например, при сжигании канско-ачинских углей.

Для протекания процессов кристаллизации необходим такой температурный интервал, в котором, с одной стороны, вязкость была бы достаточно низкой для осуществления диффузии ионов и молекулярных групп, с другой – обеспечивалась бы устойчивость образующихся кристаллических структур. Этот температурный предел зависит от состава расплава, для золы канско-ачинских углей составляет выше 800 °С.

При отсутствии в летучей золе компонентов, способных селективно выделяться на поверхностях нагрева, первичный слой будет образовываться самыми мелкими фракциями летучей золы.

При разном составе внутренней и внешней золы прочность первичных отложений зависит от организации топочного процесса. При высокотемпературном сжигании, когда созданы благоприятные условия плавления и усреднения состава всей массы золы, вероятность образования прочных отложений и скорость их роста уменьшаются (канско-ачинские угли). При низкотемпературном сжигании селективное выделение отдельных компонентов на поверхностях нагрева проявляется особенно резко.

Связанные отложения на высокотемпературных поверхностях нагрева образуются при сжигании мазута. основной особенностью энергетического мазута является низкая (0,07 – 0,15 %) его зольность. Содержание золы в некоторых мазутах достигает 3 – 3,5 %. Специфический состав минеральных примесей в сочетании с серой вызывает золовой занос пароперегревателей и осложняет эксплуатацию паровых котлов.

Минеральная часть мазутной золы содержит в основном натрий, кремний, кальций, магний, ванадий, железо. При горении мазута возможно образование окислов ванадия – VO, V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, V<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, из которых наименее тугоплавки окислы высших валентностей, представляющие опасность для интенсивного загрязнения поверхностей нагрева.

На трубах котлов, температура которых равна или выше 540 °С, прежде всего появляется липкая пленка из ванадия, являющаяся основой для интенсивного налипания летучей золы, поскольку температура поверхности слоя первичных отложений повышается. Затем на ней удерживаются более тугоплавкие фракции летучей золы, отличающиеся повышенной пластичностью, ибо в них отсутствуют абразивные частицы. В результате образуются прочные связанные отложения, тем более тугоплавкие, чем выше содержание в последующих слоях отложений окислов магния, кальция, железа, кремния, никеля.

Отложения на низкотемпературных поверхностях нагрева образуются при сжигании мазута. Под низкотемпературными поверхностями понимаются поверхности нагрева, работающие при температурах стенки ниже точки росы дымовых газов (50 – 180 °С) или несколько выше ее. Формирование отложений золы может происходить с весьма высокими скоростями. Эти отложения имеют связанную структуру и часто, обладая высокой прочностью, трудно поддаются удалению. Отложения оказывают значительное влияние на экономические показатели. На современных энергетических котлах такие отложения имеют место, как правило, в воздухоподогревателях, реже – в экономайзерах.

Отложения на 70 – 80 % состоят из водорастворимых соединений, которые в основном являются сульфатами.

Процесс загрязнения поверхности нагрева начинается с конденсации паров серной кислоты и воды из дымовых газов. Образующиеся на поверхности липкая пленка, представляющая собой раствор соединений минеральной части топлива, углеводов и продуктов коррозии в серной кислоте, приводит к улавливанию и удержанию значительно большего количества летучей золы, чем это происходит только вследствие физических и химических процессов при температуре поверхности выше точки росы.

При сжигании твердого топлива образуются отложения на низкотемпературных поверхностях нагрева. Основной особенностью загрязнения при сжигании твердых топлив по сравнению с жидким является формирование слоя отложений в условиях абразивного воздействия наиболее крупных фракций золы и в десятки раз более высоких, чем на мазутных котлах, концентраций золы в потоке дымовых газов.

Образование сульфатно-связанных плотных золовых отложений на поверхности происходит в области температур стенки ниже точки росы. Толщина их определяется не только температурой поверхности, но и скоростью запыленного потока.

Образование отложений происходит в результате осаждения частиц золы за счет аэродинамических сил и сил термофореза, увлажнения поверхности из-за конденсации паров  $H_2SO_4$  и  $H_2O$  из газов, коррозии и повышения сил адгезии золовых частиц на формирующийся слой.

Коррозия металлической поверхности, соприкасающейся с жидкой фазой, имеющейся в отложениях, способствует увеличению сил сцепления между частицами отложений и корродируемой поверхностью.

### **2.6.2 Меры борьбы с наружными золовыми отложениями**

Средства защиты поверхностей нагрева от наружных отложений по характеру своего действия могут быть классифицированы на *активные* и *профилактические*. Активные средства направлены на предотвращение образования отложений и снижение их механической прочности. Задачи профилактических средств сводятся к удалению формирующихся отложений.

Для предотвращения рыхлых отложений при сжигании твердого топлива с учетом локальных снижений скоростей газов в газоходах расчетная скорость при номинальной нагрузке не должна быть ниже 6 м/с. Следует избегать создания пучков с коридорным расположением труб и отдавать предпочтение шахматным с оптимальным соотношением шагов. Для предотвращения связанных отложений на высокотемпературных поверхностях нагрева при сжигании твердых топлив большое значение имеет организация сжигания топлива в топке.

Рациональная схема расположения горелок в топке и выбор их типа, равномерное распределение топлива и воздуха по горелкам, выбор оптимального коэффициента избытка воздуха в топке и борьба с локальными недостатками окислителя, выбор оптимальной тонкости помола пыли,

ограничение тепловой нагрузки на один ярус горелок в зоне активного горения, уменьшение неизотермичности факела (например, установкой тангенциальных горелок) могут существенно уменьшить явления шлакования топочных экранов.

Большое значение имеет выбор метода сжигания топлива. Топлива, не имеющие в минеральной части веществ, способных селективно выделяться на поверхностях нагрева (либо таковых очень мало), целесообразно сжигать таким образом, чтобы образующаяся летучая зола не давала рыхлого слоя на лобовой стороне труб. Это может быть обеспечено угрублением помола топлив и сжиганием в топках с твердым шлакоудалением. Топлива, имеющие в составе минеральной части легкоплавкие компоненты (например, угли Канско-Ачинского бассейна) или вещества, способные в процессе горения образовать таковые, целесообразно сжигать в топках с жидким шлакоудалением с обеспечением максимального количества мелких фракций в золе, образующих рыхлый первичный слой и препятствующих выделению на поверхностях нагрева легкоплавких компонентов.

При выборе профиля котла в процессе проектирования учитываются две группы свойств топлива: характеристики, определяющие режим воспламенения и горения топлива, и свойства, обуславливающие шлакование поверхностей нагрева. Неправильная оценка шлакующих свойств топлива приводит к неоправданно высоким затратам либо при изготовлении парового котла, либо при его эксплуатации. Температура газов в конце топочной камеры выбирается из условия предотвращения шлакования полурадационных или конвективных поверхностей пароперегревателя.

Исходными параметрами для выбора допустимой температуры газов перед поверхностями нагрева являются: температура начала образования вторичных отложений, зависящая от состава золы топлива, неравномерность поля температур на выходе из топочной камеры; типы поверхностей нагрева – конвективный пароперегреватель с вертикальным или горизонтальным расположением труб, поперечный шаг, гладкотрубные или цельносварные ширмы; характер первичного слоя отложений; очистка поверхности нагрева.

Конвективные пароперегреватели с вертикальным расположением труб шлакуются менее интенсивно, чем с горизонтальным, поэтому перед первыми допустима более высокая температура, чем перед вторыми. Еще большее повышение температуры газов над температурой начала шлакования можно допустить перед ширмовыми поверхностями нагрева. Допустимая температура газов перед цельносварными ширмами может приниматься выше, чем перед гладкотрубными, однако образование прочного первичного слоя уменьшает это преимущество цельносварных ширм.

Свойства первичного слоя отложений оказывают существенное влияние на процесс саморасшлаковки поверхности нагрева. При образовании прочного первичного слоя допустимая температура газов перед однотипными поверхностями нагрева должна быть ниже, чем при образовании рыхлого слоя.

Для снижения температуры газов в конце топочной камеры и выравнивания распределения температуры по ее сечению рекомендуется

рециркуляция газов, отсасываемых обычно за экономайзером с помощью специальных дымососов и подаваемых перед ширмовым пароперегревателем.

Для предотвращения связанных отложений на низкотемпературных поверхностях нагрева при сжигании мазута необходимо стремиться к сжиганию мазута при минимальном коэффициенте избытка воздуха в газоплотных топках. Температура стенки воздухоподогревателя должна быть выше точки росы дымовых газов во всех состояниях котла. При сжигании твердых топлив предъявляется аналогичное требование к температуре стенки воздухоподогревателя.

### **2.6.3 Методика исследования наружных золовых отложений**

Для прогнозирования образования связанных отложений прежде всего необходимо знать технический состав топлива, химико-минералогический состав золы топлива и ее вязкостные характеристики.

При исследованиях процессов шлакования для определения кажущейся вязкости при высоких ее значениях применяются нестандартные методы. Полученные данные изменения вязкости от температуры дают возможность по характеру кривой выявить температуру начала появления жидкой фазы, первые стадии размягчения, процесса кристаллизации и скорость размягчения всей массы золы и позволяют определить температуру начала шлакования, при которой наблюдается прилипание частиц золы к поверхности, что отвечает их вязкости  $10^4$  Па·с (данные ВТИ).

При отсутствии в угле компонентов, склонных к селективному выделению на поверхностях нагрева и к соответственному образованию прочного первичного слоя, на трубах образуется рыхлый слой, что значительно облегчает саморасшлаковку поверхностей. В качестве критерия склонности топлива к образованию прочного первичного слоя можно принять содержание кальция во внутренней золе (являющейся его легкой фракцией) – при образовании сульфатно-связанных отложений, натрия в легкой фракции топлива (как правило, в виде NaCl) и относительное содержание железа (по отношению ко всей золе топлива), отделяемого топлива в процессе размола – при образовании железистых отложений. Поскольку роль отдельных железосодержащих минералов в образовании железистых отложений пока не выявлена, целесообразно в качестве показателя использовать долю тяжелых фракций (с плотностью более  $2900 \text{ кг/м}^3$ ), отнесенную к зольности топлива.

На основании данных ВТИ можно принять, что прочные сульфатно-связанные отложения будут образовываться при содержании CaO в золе легкой фракции более 15% (канско-ачинского угли), железистые – при доле тяжелых фракций топлива в золе не менее 4 % (подмосковный, экибастузский угли); для «соленых» углей (например, тли из некоторых месторождений в Донбассе и Средней Азии) прочные отложения будут образовываться при содержании Na<sub>2</sub>O на сухое топливо не менее 0,4 %.

Разделение частиц на тяжелые и легкие можно выполнить, используя метод флотации.

Наибольшую ценность представляют исследования образования и характера отложений в промышленных условиях. Результаты таких исследований наиболее объективны, хотя проведение работ отличается трудоемкостью.

Для изучения механизма образования отложений, как правило, следует отобрать пробу летучей золы при условии изокINETИЧНОСТИ, измерить температуру газов (оптическим пирометром, отсосной или жезловой термопарой в зависимости от температуры газов в изучаемом газоходе), определить состав газов, так как наличие полувосстановительной среды снижает плавкостные характеристики золы. Зола подвергают ситовому и химико-минералогическому анализу, оценивая ее шлакующие свойства. Определяют содержание горючих в летучей золе, склонность золы к спеканию.

Температура начала шлакования по методике ВТИ определяется с помощью неохлаждаемых зондов, имитирующих трубы поверхности нагрева с имеющимися первичными отложениями. Неохлаждаемый зонд представляет собой трубку из нержавеющей стали диаметром 18 – 25 мм, заваренную с одного конца, с установленной в ней хромель-алюмелевой термопарой. Горячий спай термопары помещается вблизи закрытого конца. Длина зонда выбирается из расчета получения на его горячем конце участка отложений стабильной толщины и не должна быть менее 2 м (рисунок 68).

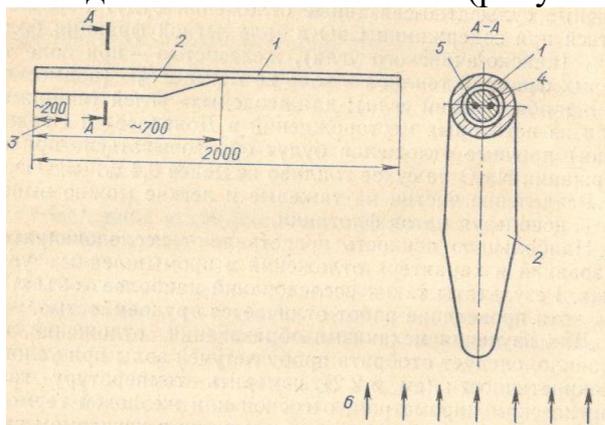


Рисунок 68 – Схема неохлаждаемого зонда и образующихся на нем отложений

1 – зонд; 2 – гребень отложений; 3 – участок отложений, отбираемых на анализ; 4 – фарфоровая соломка; 5 – термопара; 6 – направление движения дымовых газов.

Для определения истинной температуры газов в месте установки зонда следует пользоваться отсосной термопарой. Для определения температуры начала образования вторичных отложений зонды устанавливают в лючки в зону температур газов 900 – 1200 °С (в области ширм). Зонды следует устанавливать в зоне интенсивного движения дымовых газов. Например, в котлах с П-образной компоновкой не рекомендуется устанавливать зонды с фронтальной стены напротив поворотной камеры, недалеко от потолка топки. Длительность выдержки зонда в газоходе котла 15 – 60 минут в зависимости от скорости образования отложений, уточняется по визуальным наблюдениям. По

истечении времени выдержки зонд извлекается из газохода и фиксируется наличие или отсутствие на нем отложений при соответствующей температуре газов.

Для определения зависимости интенсивности шлакования от температуры газов с зонда после его извлечения из газохода с участка длиной 200 – 250 мм снимаются отложения, которые взвешиваются, и подсчитывается скорость образования отложений в  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ . Результаты расчетов изображают в виде графика, по которому за температуру начала шлакования принимают граничную температуру между областями с отложениями и без них. Заметное содержание горючих веществ в летучей золе может вести к повышению температуры начала образования вторичных отложений. При определении температуры начала образования вторичных отложений в конце топки в случае высокореакционных топлив (бурые, длиннопламенные, газовые угли) этим можно пренебречь. Для малореакционных топлив при содержании горючих в уносе выше 5 % следует указывать, при каком значении механического недожога получены данные.

Основным методом изучения первичных отложений с летом их медленного роста является отбор отложений с поверхностей нагрева котла после работы его на испытуемом топливе не менее 30 суток и последующий их анализ. Пробы первичных отложений отбираются на остановленном котле в следующих зонах топки и перегревателей: экранные трубы в зоне активного горения; экранные трубы на выходе из топки, в районе ширмового пароперегревателя; ширмовые поверхности нагрева; трубы конвективного пароперегревателя.

Образцы отложений отбираются со стороны трубы, обращенной навстречу потоку газов, из слоя, прилегающего к трубе. Рыхлые и плотные отложения отбираются ножом, прочные – зубилом, при этом окалину следует удалить. Характеристика пробы отложений включает в себя: место отбора; условия образования отложений (температура стенки, газов); внешний вид пробы (форма, цвет, пористость, ориентировочная крупность частиц); прочность; химический состав.

При изучении влияния отдельных факторов на интенсивность образования и свойства первичных отложений с высоким содержанием окислов железа допустимо использовать охлаждаемые зонды. При медленном росте первичных отложений, например сульфатно-связанных при сжигании канско-ачинских углей, применение охлаждаемых зондов ВТИ не рекомендуется.

Охлаждаемый зонд представляет собой устройство, включающее омываемый дымовыми газами элемент, температура поверхности которого при установке зонда в топку или газоход может поддерживаться в пределах 400 – 600 °С. В качестве охлаждающего агента можно использовать воду или сжатый воздух. Пример рекомендуемой конструкции охлаждаемого зонда, разработанной ВТИ, приведен на рисунке 69.

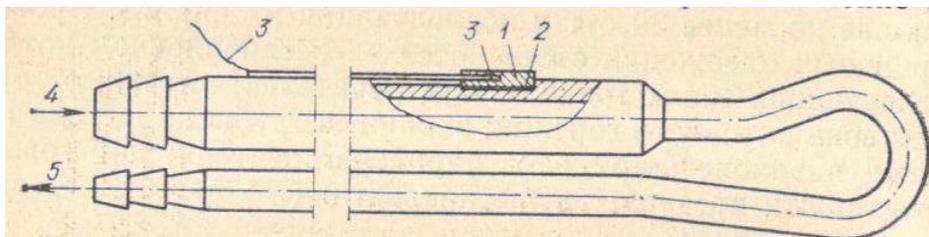


Рисунок 69 – Схема водоохлаждаемого зонда с пластинками

1 – пластинка; 2 – слюдяная прокладка; 3 – термопара; 4,5 – соответственно подача и слив охлаждающей воды.

Охлаждаемые зонды следует устанавливать в зоне активного горения и на выходе из топки. Длительность выдержки охлаждаемых зондов от нескольких часов до нескольких суток.

В месте установки охлаждаемого зонда отсосной термопарой или оптическим пирометром измеряется температура газов. Первичные отложения, отобранные с помощью охлаждаемых зондов, качественно характеризуются теми же свойствами, что и отобранные с поверхностей нагрева котла. Обязательно указываются: данные технического и элементарного состава топлива, марка, бассейн, месторождение; тип котла, завод-изготовитель; характеристика топки (твердое, жидкое шлакоудаление, тип и расположение горелок, температура горячего воздуха и газов в зоне активного горения).

Для исследования процесса образования первичных отложений на конвективных поверхностях нагрева используется зонд диаметром 38 – 32 мм, охлаждаемый сжатым воздухом, со съёмными измерительными участками. Температура поверхности измерительных участков контролируется хромель-алюмелевыми термопарами и поддерживается равной от 450 до 650 °С расходом охлаждающего воздуха. Зонд устанавливается в газоходы с температурой газов от 950 до 700 °С.

Исследование свойств и условий образования рыхлых отложений может осуществляться методом, разработанным ВТИ, с использованием водоохлаждаемых переносных торцевых пробоотборников со съёмной бобышкой (рисунок 70) из стали 20. Пробоотборники вставляют в топочную камеру через смотровые лючки таким образом, чтобы торцевая поверхность бобышки находилась на уровне экранных труб; температура металла на поверхности бобышки близка к температуре экранных труб.

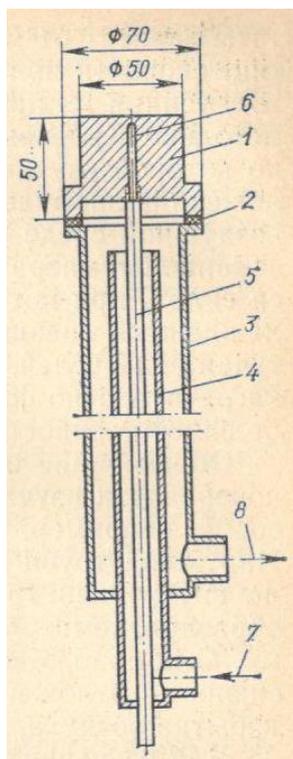


Рисунок 70 – Схема торцевого пробоотборника-зонда

1 – образец; 2 – прокладка; 3 – корпус; 4 – труба для подвода воды; 5 – труба для размещения термопары; 6 – сверление для термопары; 7,8 – соответственно подвод и отвод охлаждающей воды.

Возможность изменения продолжительности выдержки пробоотборников в газоходе позволяет проследить процесс образования отложений, что является важным с точки зрения, механизма их образования.

При использовании торцевого пробоотборника кроме указанных выше характеристик определяются толщина слоя методом прокалывания с индикатором положения иглы на четырех диаметрах, по 10 – 15 точек на каждом из них. По массе пробы и объему определяются плотность и интенсивность (на  $1 \text{ м}^2$ ).

Для ряда образцов кроме химического: фракционного составов определяются теплопроводность и локальные значения коэффициента загрязнения. Фракционный состав отложений определяют методом ситового, воздушно-сепарационного и микроскопического анализов.

Процессы, протекающие в золовых отложениях, очень сложны и многообразны. На упрочнение слоя отложений большое влияние оказывает процесс спекания, который заключается в увеличении контактов между отдельными частицами отложений с одновременным уменьшением объема пор. Поскольку свободная энергия в местах контакта и на поверхности частиц неодинакова, имеет место деформация частиц с постепенным увеличением площади их контакта. В результате прочность отложений увеличивается, причем это упрочнение сильно зависит от температуры. Так, прочность на

сжатие образцов золы АШ зависит от превышения температуры над температурой плавления шлаков в степени 3,6.

Спекание влияет не только на образование вторичных, но и на упрочнение первичных отложений. Сильное влияние на процесс спекания оказывает кроме температуры газов их состав. Повышение температуры, понижение содержания кислорода, наличие в газах  $SO_2$  либо ускоряют спекание, либо повышают прочность спекшихся отложений.

Существует несколько методов определения склонности спеканию (ВТИ, Союзтехэнерго и др.).

Спекаемость материала оценивается по упрочнению после выдержки в лабораторной печи таблеток, приготовленных прессованием из измельченного материала. Результаты зависят от многих факторов, таких, как размеры частиц, скорость подъема температуры в печи, размер таблеток, усилия их прессования и др. Прочность спекания характеризуется силой, при которой разрушается предварительно охлажденный спекшийся образец. Следует отметить, что летучая зола углей, склонных к загрязнению поверхностей нагрева прочно связанными отложениями, характеризуется большей прочностью спекания.

Образование отложений золы на низкотемпературной поверхности изучается с помощью зонда, представляющего собой, например, трубу в трубе, помещаемого в газопровод. Наружная труба диаметром 32 мм охлаждается водой, подаваемой по внутренней трубе. Отложения собираются со съемных образцов, температура которых контролируется термопарами. С помощью зондов можно изучить влияние на интенсивность отложений различных факторов (коэффициента избытка воздуха, температуры стенки и др.).

Для изучения механизма образования отложений путем анализа фазовых превращений, происходящих в летучей золе, используются специальные методы лабораторных исследований минеральной части топлива, летучей золы и отложений.

Вещественный (минералогический) состав, или форма соединений в минеральной части, в значительной степени определяет способность золы к спеканию, образованию легкоплавких эвтектических смесей и др. Для определения минерального состава используют несколько методов оптической и электронной микроскопии, дифференциально-термографический анализ, анализ содержания и состава водорастворимых соединений, кристаллооптические исследования и др. Характер отложений на поверхностях нового типа целесообразно изучать с помощью байпасных газопроводов.

#### **2.6.4 Определение коэффициентов загрязнения и тепловой эффективности поверхностей нагрева**

На основании результатов испытаний промышленных котлов устанавливают зависимость коэффициентов загрязнения или тепловой эффективности от диаметра труб. Влияние расположения труб, их шагов, скорости и направления потока газов, крупности частиц и концентрации золы и других факторов на коэффициент загрязнения в промышленных установках трудно установить с достаточной степенью точности.

Поэтому изучение влияния различных факторов на снижение эффективности теплопередачи ведется на стендах. Схема экспериментальной установки представляет собой разомкнутую аэродинамическую трубу, в которой движется запыленный поток воздуха.

В аэродинамической трубе установлены три пакета поперечно обтекаемых труб, имитирующие экономайзер и парообразующие поверхности в опускном и подъемном газоходах, а также пароперегреватель в горизонтальном газоходе.

Количественная оценка степени загрязненности труб производится по дополнительному термическому сопротивлению, вызванному наличием на поверхности трубы слоя осевшей золы.

Коэффициент теплоотдачи для чистой трубы в незапыленном потоке и загрязненной трубы в запыленном потоке не одинаковы, т.к. форма и степень шероховатости чистой и загрязненной труб разные и, кроме того, некоторое влияние на процесс теплообмена оказывают летящие частицы золы.

Каждый пучок труб в лабораторной установке исследуется на чистом потоке, а затем на запыленном, после чего определяют коэффициент загрязнения. В качестве измерительного элемента для определения коэффициента теплоотдачи для чистой трубы в незапыленном потоке и коэффициента теплопередачи от газа к металлу загрязненной трубы используются электрически обогреваемые калориметры. Для проверки, достаточно ли полно воспроизводится в аэродинамической трубе с запыленным потоком воздуха реальный процесс загрязнения конвективных поверхностей, омываемых дымовыми газами, сравнивают коэффициент загрязнения по формулам, полученным на основании данных испытаний на экспериментальном стенде с коэффициентом, определенным по данным промышленных испытаний.

Неполнота омывания газами поверхности нагрева учитывается лишь в тех случаях, когда часть газа проходит мимо поверхности нагрева. При обычной неравномерности скоростного поля ухудшение теплоотдачи в зоне пониженных скоростей в значительной степени компенсируется улучшением теплоотдачи в зоне более высоких скоростей.

## **2.7 Исследование эрозионного и коррозионного износа поверхностей нагрева паровых котлов**

### **2.7.1 Абразивный износ и меры по его ослаблению**

Конвективные поверхности нагрева паровых котлов, сжигающих твердое топливо, подвержены износу под действием золы и несгоревших частиц топлива, содержащихся в дымовых газах. В отдельных случаях из-за эрозионного износа приходится полностью заменять поверхность нагрева через 2 – 3 года эксплуатации, т.к. толщина стенки труб становится меньше, чем толщина способная сопротивляться внутреннему давлению. Золовой износ является результатом механического воздействия золовых частиц, находящихся в потоке дымовых газов, и металла труб.

Скорость эрозионного износа, под которой понимается отношение убыли массы металла ко времени, в течение которого он возник, зависит главным образом от скорости соударения золowych частиц с поверхностью трубы.

Износ поверхности нагрева имеет общий и местный характер. Наиболее опасен местный износ, т.к. он, охватывая лишь отдельные участки поверхности нагрева, происходит в несколько раз интенсивнее, чем общий, и поэтому этот вид износа чаще всего приводит к неплановым остановам оборудования.

Местный износ является результатом искажения неравномерности скоростного и концентрационного полей лучистой золы в сечении газохода котла. Это имеет место при изменении направления движения газового потока в поворотной камере котла, а также при наличии газовых коридоров (зазора между поверхностью нагрева и обмуровкой), имеющих меньшие коэффициенты гидравлического сопротивления, при уменьшении сечения для движения газов (вход в трубчатый воздухоподогреватель) и т.д.

Для предотвращения повреждений поверхностей из-за золowego износа необходим периодический контроль состояния труб.

Наиболее частые повреждения наблюдаются в следующих поверхностях нагрева:

- в конвективных пароперегревателях, размещенных перед поворотной камерой;
- в поверхностях нагрева, расположенных в опускном газоходе (после поворотной камеры), особенно в плотных шахматных пучках;
- змеевики у задней стенки газохода на всю глубину пакета;
- все изгибы труб;
- трубы, подводящие и отводящие рабочее тело от поверхности нагрева.

Наибольшему износу подвержена I ступень экономайзера, где вследствие снижения температуры газового потока повышается концентрация золы и уменьшается кинематическая вязкость газов.

Золовой износ труб воздухоподогревателей котлов имеет местный характер. Износ локализуется по глубине трубы, периметру трубы и отдельным трубам. Наибольший износ золой происходит на глубине от 1 до 2,5 диаметров теплообменной трубы из-за сжатия потока на входе. С увеличением степени износа трубы растет неравномерность распределения износа по периметру. Сквозной износ локализуется на ограниченном участке поверхности трубы.

В первые 2 – 3 года эксплуатации нового котла в периоды плановых ремонтов следует производить осмотр всей поверхности труб первых двух рядов шахматных пучков, всех изгибов труб и крайних змеевиков по всей высоте пакета. Во время ремонтов и осмотров следует контролировать поперечные и продольные шаги труб пакета, и в случае их искажения при ремонте выполнять рихтовку, т.к. нарушение межтрубных расстояний является одной из причин значительного местного золowego износа и повреждения труб.

Для контроля за интенсивностью износа труб воздухоподогревателя устанавливают алюминиевые индикаторы, представляющие собой разрезные

цилиндрические вставки из листового алюминия толщиной 0,45 мм, которые погружают в трубу на глубину 120 мм (зону наибольшего износа).

Малая толщина индикаторов позволяет пренебречь при установке в трубы их аэродинамической нетождественностью, но ограничивает продолжительность испытания. Ограничение объясняется тем, что после появления сквозного износа индикатора дальнейшее изнашивание становится неконтролируемым. У извлеченных после испытания индикаторов измеряется наибольшая глубина износа. Результаты измерений пересчитывают на ресурс труб, учитывая, что износостойкость стали в 3 раза выше износостойкости алюминия. Алюминиевыми индикаторами, устанавливаемыми на входе в трубы воздухоподогревателей, можно после сравнительно короткого испытания определить ресурс труб и, следовательно, время до их замены. Этим же методом можно оценить эффективность защиты воздухоподогревателя от эрозионного износа. Продолжительность испытания 2,5 – 3,5 тыс. ч.

Наиболее эффективный метод борьбы с золовым износом в паровых котлах состоит в снижении скорости газового потока. Для изученных топлив предельно допустимые скорости газов на входе в первый пакет конвективной шахты при твердом шлакоудалении следует принимать при проектировании котла. Уменьшению золового износа способствует организация сжигания топлива в топках с жидким шлакоудалением и высоким шлакоулавливанием.

При проектировании парового котла, предназначенного для сжигания многозольного топлива с абразивной золой, недопустимо размещение конвективной поверхности нагрева в опускном газоходе в непосредственной близости от поворотной камеры. Нежелательна компоновка конвективных поверхностей в виде плотных пучков. Относительный поперечный шаг должен быть не менее 2,5, а относительный продольный – не менее 1,87.

Для защиты конвективных пакетов, стыкуемых в середине газохода или в местах примыкания их к стенке газохода можно устанавливать в газовых коридорах дырчатые короба (рисунок 71) с определенным гидравлическим сопротивлением, способствующим выравниванию поля скоростей по сечению газохода. Для уменьшения аварийности из-за золового износа труб конвективного пучка, примыкающих к обмуровке, на работающем котле рекомендуется отглушать эти трубы по рабочему телу. Таким образом, наиболее изнашиваемые трубы становятся неработающими, «холостыми» или «манекенами».

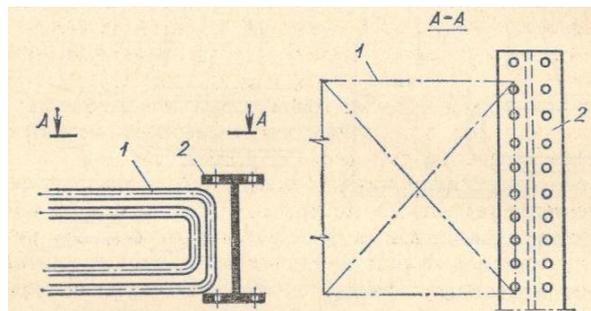


Рисунок 71 – Схема установки дырчатых коробов

1 – конвективный пучок труб; 2 – дырчатые короба.

Износ труб конвективного пакета в местах примыкания к стенкам газохода значительно выше среднего износа пакета из-за пониженного гидравлического сопротивления каналов между пакетом и стенкой газохода и вследствие этого более высоких скоростей газового потока в этих каналах, что видно из рисунке 72.

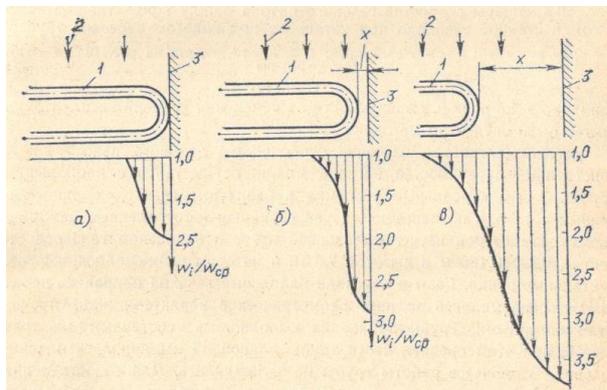


Рисунок 72 – Эпюры скоростей газового потока между конвективным пакетом и стенкой газохода

1 – конвективный пакет; 2 – направление движения потока газов; 3 – стенка газохода; а –  $x = 0$ ; б –  $x = 50$  мм; в –  $x = 500$  мм;  $w_i$  и  $w_{cp}$  – соответственно местная и средняя скорости газов в газоходе

Для выравнивания скорости газового потока по всему сечению газохода предложена установка отрезков труб в один или два ряда (рисунок 73), что способствует существенному уменьшению эрозионного износа труб, примыкающих к стенке газохода. Шаг этих труб выбирают так, чтобы создать необходимое местное сопротивление потоку.

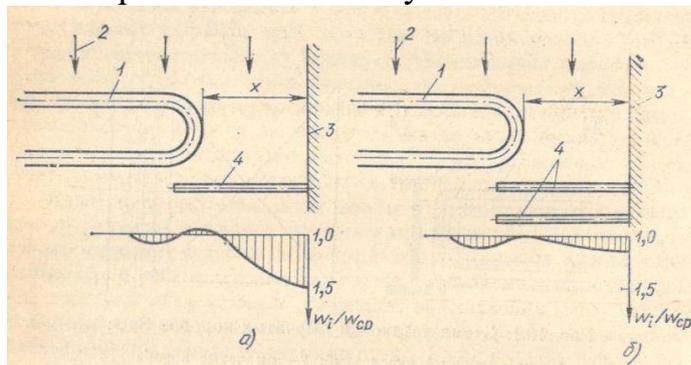


Рисунок 73 – Эпюры скоростей газового потока между конвективным пакетом и стенкой газохода при установке под пакетом отрезков труб

а – один ряд труб; б – два ряда труб; 1,2,3 – то же, что на рисунке 72; 4 – трубы;  $x = 500$  мм.

Для индивидуальной защиты участков труб, включая подверженные повышенному эрозионному износу омываемые газами гибы, применяют накладку съемных стальных манжет. Однако последние ухудшают условия теплопередачи от теплоносителя (газов) к рабочему телу.

Для защиты трубчатого воздухоподогревателя от повышенного эолового износа устанавливаются на входе в каждую трубу стальные насадки того же диаметра, что и трубы. Насадки прихватывают электросваркой к выступающим из трубной доски трубам и вместе с последней закрывают слоем торкрета. При такой схеме защиты труб воздухоподогревателя наибольшему износу будут подвержены сменные насадки. Ресурс труб воздухоподогревателя возрастет примерно в 2,5 раза и в зависимости от изменения условий эксплуатации может быть оценен по методике.

Экспериментальное изучение особенностей эолового износа новых конструкций поверхностей нагрева можно осуществить с наибольшим приближением к реальным условиям в байпасных газоходах промышленных котлов. Так, например, перед серийным изготовлением мембранных экономайзеров изучен их эоловый износ в байпасном газоходе сечением  $0,24 \times 0,185$  м и высотой 7,5 м, в котором размещались экспериментальные пучки. Газы в опускной байпасный газоход обирались перед РВП и сбрасывались за ним. Геометрические характеристики пучков были натурными. Трубы в панелях выполнялись составными из трех частей, при этом средняя часть трубы длиной 85 мм являлась измерительной. В процессе работы трубы не охлаждались. Для сопоставления особенностей износа наряду с мембранными пучками исследованы в сходных условиях шахматные пучки из гладких труб. Перед установкой в газоход образцы труб взвешивались и обмерялись. На стенде проводились измерения температур и расхода газов, концентрации и фракционного состава золы. Пучки труб находились в эксплуатации 8 – 13 тыс. ч. Скорости газов в пучках были повышенными, для того чтобы получить заметный износ за ограниченное время эксперимента. Утонение стенок опытных образцов измерялось через  $15^\circ$  по окружности трубы. Взвешиванием определялась убыль массы при эоловом износе.

Локальный износ мембранных пучков оказался меньше, чем гладкотрубных (при равных скоростях и одинаковой геометрии), на 4 – 17 %.

### 2.7.2 Определение абразивных свойств уноса и интенсивности износа сталей

Определение коэффициента абразивности производится согласно ГОСТ 21708-76 с помощью стандартизированной аппаратуры. Золовоздушный поток разгоняется центробежной силой в трубке, вращающейся вокруг вертикальной оси. На одном из концов трубки (второй заглушен) укрепляется кассета с изнашиваемым стальным образцом.

Если предположить, что износ образца  $\Delta m$ , кг, пропорционален кинетической энергии массы абразива, то

$$\Delta m = a \frac{G \omega_0^2}{2} \quad (14)$$

где  $a$  – коэффициент, равный убыли массы образца на 1 Дж кинетической энергии абразива или доле кинетической энергии абразива, пропорциональной работе разрушения образца, кг/Дж,

$\Delta m$  – износ образца, кг;

$G$  – используемая за опыт масса абразива;  
 $w_0$  – скорость частиц абразива при соударении, м/с.

$$a = \frac{2\Delta m}{G \cdot \omega_0^2} \quad (15)$$

Коэффициент абразивности зависит от плотности, твердости, размера и формы золых частиц, угла атаки и износостойкости металла.

Уравнение (14) связывает износ образца с массой использованного в опыте абразива. Для определения возможной длительности эксплуатации трубы необходимо знать ее линейный износ. Очевидно, что

$$\Delta m = IS\rho \quad (16)$$

где  $I$  – средняя глубина износа, м;  
 $S$  – площадь изнашиваемой поверхности, м<sup>2</sup>;  
 $\rho$  – плотность изнашиваемого материала, кг/м<sup>3</sup>.

Масса абразива определяется по формуле

$$G = \mu_3 \omega S_\tau \quad (17)$$

где  $G$  – масса абразива;  
 $\mu_3$  – концентрация золы, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\tau$  – продолжительность изнашивания, с;  
 $\omega$  – скорость потока в суженном сечении газохода, м/с.

Подставляя выражения (16) и (17) в уравнение (14), получаем

$$I = \frac{a\mu_3\omega^3\tau}{2\rho} \quad (18)$$

Для использования уравнения (18) в качестве расчетного в него необходимо ввести коэффициенты, учитывающие вероятность соударения  $\eta$  (на абразивметре  $\eta = 1$ ), неравномерность полей скорости  $k_w$  и концентрации золы  $k_\mu$  в реальном трубном пучке, отношение расчетной нагрузки к среднеэксплуатационной  $k_D = D_H/D_{cp}$  и эффект ряда  $k_p$ .

Средняя концентрация золы в газовом потоке с учетом уноса несгоревших частиц топлива может быть определена по формуле

$$\mu_3 = \left[ \frac{a_{yH} \cdot A^P}{(100 - \Gamma_{yH})V_\Gamma} \right] \cdot \left[ \frac{273}{273 + \vartheta_\Gamma} \right] \quad (19)$$

где  $\Gamma_{yH}$  – содержание горючих в уносе, %;  
 $V_\Gamma$  – объем дымовых газов на 1 кг сожженного топлива, м<sup>3</sup>/кг;  
 $\vartheta_\Gamma$  – температура потока газа при входе в пучок труб, °С.

С учетом неравномерности поля концентрации золы в потоке фактическая концентрация золы будет  $k_\mu \cdot \mu_3$  где  $k_\mu$  – коэффициент, учитывающий неравномерность поля концентраций золы.

Вероятность удара частицы о стенки труб зависит от ее размера (маленькие частички отклоняются газовым потоком, обтекающим трубы и не участвуют в износе), диаметра труб, температуры и скорости потока. Вероятность ударов частиц о стенку  $\eta$  определяют как отношение количества ударившихся частиц к исходному количеству частиц.

Неравномерность износа по рядам труб учитывается коэффициентом ряда  $k_p$ , связанным с сечением, в котором выбирают расчетную скорость потока. Интенсивность износа труб во втором ряду шахматного пучка больше, чем в среднем по пучку. Для определения износа в этом ряду следует ввести в формулу (18) величину  $k_p$ . Зона наиболее интенсивного износа шахматного пучка расположена вдоль образующих, отстоящих от лобовой точки трубы приблизительно на  $30 - 60^\circ$ . Поэтому в формулу (18) следует ввести коэффициент неравномерности износа по периметру трубы  $k_a$ .

С учетом замечаний, принимая плотность металла трубы  $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$  и выражая время в часах, получаем расчетное уравнение для максимальной глубины износа трубы

$$I_{\text{макс}} = 0,2293 \cdot a \cdot \eta \cdot k_p \cdot k_a \cdot k_\mu \cdot \mu_3 \cdot \left( \frac{k_\omega \cdot \omega}{k_D} \right)^3 \tau \quad (20)$$

где  $I_{\text{макс}}$  – максимальная глубина износа;

$a$  – коэффициент, равный убыли массы образца на 1 Дж кинетической энергии абразива или доле кинетической энергии абразива, пропорциональной работе разрушения образца, кг/Дж;

$\eta$  – вероятность ударов частиц о стенку;

$k_p$  – коэффициент, связанный с сечением трубы, в котором выбирают расчетную скорость потока;

$k_a$  – коэффициент неравномерности износа по периметру трубы;

$k_\mu$  – коэффициент, учитывающий неравномерность поля концентраций золы;

$\mu_3$  – концентрация золы, кг/м<sup>3</sup>;

$\omega$  – скорость потока в суженном сечении газохода, м/с;

$k_\omega$  – коэффициент, учитывающий неравномерность полей скорости;

$k_D$  – коэффициент нагрузки;

$\tau$  – годовое число часов работы котла, ч.

В котлах нередко случаи неточной установки труб и выхода отдельных труб коридорного пучка в шахматное расположение. Поэтому оценку износа коридорных пучков рекомендуется производить по той же формуле, что и шахматных. При работе трубы в течение 10 лет допустимое максимальное утонение стенки  $0,2 \cdot 10^{-3}$  м/ч. Если подставить эту величину в уравнение (20) и

решить его относительно скорости потока, то получится формула определения максимальной скорости потока

$$\omega_{\max} = \sqrt[3]{\frac{0,2 \cdot 10^{-3}}{0,2293 \cdot a \cdot \eta \cdot \kappa_p \cdot \kappa_\alpha \cdot \kappa_\mu \cdot \mu_s \cdot \left(\frac{\kappa_\omega}{\kappa_D}\right)^3 \tau}} \quad (21)$$

На коэффициент абразивности золы ее фракционный состав влияет неоднозначно. Имеет значение не только размер частиц, но и коэффициент полидисперсности золы, взвешенной в потоке газов.

Особенности топочного режима могут влиять на форму золовых частиц, поэтому необходимо определение коэффициента абразивности для конкретной золы. При вычислении по уравнению (15) коэффициент абразивности включает износостойкость стали. Исследования на абразивметре показывают, что износостойкость сталей разных марок (12Х1МФ, 12Х12МФСР, Х16Н9М2, 12Х18Н12Т, ЭП838) практически одинакова и совпадает с износостойкостью стали 20 при температурах металла до 350 °С.

Износ сталей при температуре выше 350 °С нельзя характеризовать коэффициентом абразивности, определенным относительно металла при комнатной температуре.

В потоке дымовых газов высокой температуры износ может возрасти из-за коррозионных процессов, приводящих к окалинообразованию на поверхности труб. В этом случае степень увеличения износа труб будет зависеть от физико-химических свойств дымовых газов, т.е. от их состава и температуры, окалиностойкости и физико-механических свойств материала труб при данной температуре стенки и свойств окарины – прочности ее, сцепления с основным металлом и способности противостоять золовому износу.

Однако с повышением температуры газов абразивность золы может уменьшаться, так как изменяются твердость и форма частиц, падает концентрация золы и коэффициент вероятности удара частиц о трубы.

Для прогноза сложного износа поверхностей нагрева котлов, работающих при высокой температуре в среде агрессивных газов, коэффициент износа образца стали может быть определен экспериментально в лабораторных условиях при температуре, равной температуре изнашиваемых поверхностей нагрева в условиях газовой среды такого же состава, и концентрации и скорости движения частиц, соответствующих изучаемому газопотоку.

### 2.7.3 Коррозионный износ поверхностей нагрева

Различают высокотемпературную и низкотемпературную коррозию поверхности нагрева котла. Под *высокотемпературной коррозией* понимается коррозионное разрушение металла труб поверхностей нагрева, омываемых продуктами сгорания с высокой температурой ( $\theta_{\Gamma} > 700^{\circ}\text{C}$ ). *Низкотемпературной коррозии* подвержены поверхности нагрева, имеющие температуру стенки ниже температуры точки росы дымовых газов.

Три основных вида высокотемпературной коррозии имеют различный химический характер: окисление в газообразной фазе, натриево-ванадиевая коррозия при работе котла на мазуте и коррозия под воздействием отложений на поверхностях нагрева.

Общим условием возникновения газовой высокотемпературной коррозии является омывание экранных труб продуктами неполного сгорания при отсутствии кислорода. При этих условиях в восстановительной среде продуктов сгорания образуется  $H_2S$ , который играет роль основного коррозионного агента (сульфидная коррозия).

Снижение концентрации  $H_2S$  (ниже 0,01 %), а также восстановительной способности топочных газов резко снижает скорость коррозии. Снижение температуры топочных газов в пристенной области уменьшает вероятность протекания реакций топочных газов с оксидной пленкой, снижает скорость диффузии топочных газов через отложения, уменьшает глубину их проникновения в отложения. Максимум кривой скорости коррозии наблюдают при температуре стенки около 550 °С.

Появление в пристенной зоне продуктов неполного сгорания при отсутствии кислорода вызывается неравномерным распределением воздуха между горелками, неравномерной по времени подачей пыли в горелки, большими присосами воздуха в топке, подачей сбросного воздуха выше основного ядра горения, недостатками аэродинамики топки, приводящими к набросу факела на экраны.

Основные мероприятия по снижению скорости высокотемпературной сульфидной коррозии должны быть направлены на усовершенствование топочного процесса.

Для защиты от коррозии на трубы наносят защитное покрытие с целью создания прочной пленки с малой скоростью диффузии, например покрытий на основе Al, Cr, Si, Mg, Ti. Покрытия должны быть достаточно плотными, иначе их функции не будут выполнены.

Основные мероприятия по снижению скорости высокотемпературной сульфидной коррозии должны быть направлены на усовершенствование топочного процесса.

По данным ВТИ, для защиты от коррозии представляет интерес нанесение на трубы защитного покрытия с целью создания прочной пленки с малой скоростью диффузии, например покрытий на основе Al, Cr, Si, Mg, Ti. Покрытия должны быть достаточно плотными, иначе их функции не будут выполнены.

При сжигании мазута экраны НРЧ могут быть подвержены сульфидной коррозии в большей мере из-за существенного роста тепловой нагрузки топочных экранов. Мероприятия по предупреждению сульфидной коррозии аналогичны изложенным выше, однако в части организации топочного процесса они легче осуществимы. Для мощных котлов необходимо: многоярусное расположение горелок с умеренным теплонпряжением поперечного сечения топочной камеры (не более 3,5 МВт/м<sup>2</sup> на один ярус

горелок), снабжение парового котла устройствами для внутренней промывки НРЧ от отложений и совершенствование системы водоподготовки.

Рециркуляция топочных газов приводит к снижению  $t_{ст}$ , но концентрация  $H_2S$  и скорость коррозии экранов снижаются в малой степени.

Действие присадок на основе  $MgCl_2$  не обеспечивает полного прекращения коррозии НРЧ.

Создание паровой завесы вблизи труб НРЧ защищает их от воздействия коррозионно-активных компонентов топочных газов и препятствует повышению температуры труб. Эффективность зависит от способа ввода пара, конструкции паровых аппаратов и места их установки.

При сжигании некоторых твердых топлив (например, березовского угля и особенно прибалтийский сланцев) наблюдается высокотемпературная коррозия под слоем отложений золы. Установлено, что в сланцевой золе наиболее высокой коррозионной активностью обладают хлориды щелочных металлов при температуре стенки до  $600\text{ }^{\circ}C$  возрастает коррозионная активность  $CaCl_2$ . Роль сульфатов в процессе коррозии повышается при температурах стенки более  $650 - 700\text{ }^{\circ}C$ . Допустимая температура для сталей должна быть ограничена.

Коррозионная активность отложений при сжигании канско-ачинских углей в 3 – 6 раз меньше, чем при сжигании сланцев.

Высокотемпературная коррозия в конвективной части котла при сжигании мазута также вызвана воздействием газовой среды на металл, однако в отличие от коррозии НРЧ коррозионные процессы в конвективной части протекают в условиях присутствия в топочных газах избыточного кислорода. При этом окисление металла кислородом многократно ускоряется в присутствии входящих в состав отложений ванадия и натрия.

Одним из сильнейших катализаторов высокотемпературной кислородной коррозии является пятиокись ванадия  $V_2O_5$ , проявляющаяся лишь в присутствии щелочей. В отсутствие кислорода ванадиевая коррозия металла не имеет места, так как пятиокись ванадия не окисляет металла и не переходит в низшие окислы. Соединения серы также стимулируют высокотемпературную коррозию, особенно система  $SO_2 - SO_3 - O_2$ . Сульфаты щелочных металлов вместе с соединениями ванадия образуют легкоплавкие эвтектики и являются главными компонентами, определяющими появление загрязнений и коррозии.

Коррозионное действие серы мазута проявляется в процессе соединения ее с компонентами золы, где активную роль играет  $SO_2$ , а  $V_2O_5$  является катализатором.



Образующиеся в ходе реакции  $SO_3$  и атомарный кислород активно воздействуют на металл. Активно действуют на процесс коррозии в присутствии  $V_2O_5$  и  $Fe_2O_3$  сульфаты щелочных металлов, образуя с  $SO_2$  и  $O_2$  пиросульфаты – термически нестойкие и легкоплавкие соединения, сильно разъедающие сталь и окислы при  $600\text{ }^{\circ}C$ , достигая максимума при  $700 - 750\text{ }^{\circ}C$ .

Начиная с температуры 650 °С происходит быстрое разрушение ферритных и аустенитных сталей.

Высокотемпературной коррозии подвержены различные неохлаждаемые элементы котла: подвески, дистанционные гребенки, каркас, а также трубы пароперегревателя при высокой температуре перегрева пара.

Опытами ВТИ установлено, что максимальная скорость коррозии стали имеет место при соотношении  $V_2O_5/Na_2SO_4 = 87/13$  или  $V/Na = 12$ .

Снижения скорости этого вида коррозии можно достигнуть применением соединений кальция или магния, например  $MgCl_2$  в количестве 0,6 – 0,8 кг/т мазута. Однако наиболее действенным способом является работа труб пароперегревателя с температурой стенки менее 600 °С, чему способствует, в частности, борьба с температурными развертками. Сжигание мазута с минимальными избытками воздуха в газоплотных топках и наладка процесса горения в топке тоже способствуют уменьшению высокотемпературной коррозии.

Интенсификация золового заноса и образование связанных отложений на низкотемпературных поверхностях при сжигании любых золосодержащих топлив происходят при появлении на поверхности нагрева влаги.

Низкотемпературная коррозия поражает конвективные поверхности нагрева, воздухоподогреватели, а иногда и экономайзеры, металлические газоходы, роторы дымососов и металлические дымовые трубы при сжигании сернистых топлив, особенно мазутов.

При наличии в топке избытка воздуха часть  $SO_2$  доокисляется в  $SO_3$  атомарным кислородом, образующимся в высокотемпературной зоне факела за счет цепных реакций горения и термической диссоциации. При высоких температурах  $SO_3$  может разрушаться. При температуре газов 1200 – 1250 °С эти процессы завершаются. В конвективных газоходах концентрация  $SO_3$  может возрасти за счет доокисления  $SO_2$  под влиянием каталитического воздействия отложений на поверхностях нагрева.

При сжигании сернистых твердых топлив процесс осложняется связыванием части серы (до 50 % в сланцах) с содержащейся в летучей золе окисью кальция и магния, а также адсорбированием части образующегося в топочной камере серного ангидрида летучей золой. Все эти процессы влияют на температуру точки росы.

Температуру точки росы при сжигании любого твердого топлива можно рассчитать по формуле

$$t_p^{H_2SO_4} = t_p^{H_2O} + 201 \cdot \sqrt[3]{\frac{S_{PP}^P}{K}}, \quad (23)$$

где  $S_{PP}^P$  - приведенное содержание серы в топливе, %-кг/МДж;

$t_p^{H_2O}$  - температура точки росы водяных паров, определяемая по парциальному давлению их в дымовых газах;

$K$  – коэффициент, зависящий от содержания в топливе золы, окиси кальция и магния.

При сжигании мазута температуру точки росы ориентировочно определяют по формуле

$$t_p^{H_2SO_4} = t_p^{H_2O} + 205 \cdot \sqrt{S_{ПР}^P \cdot O_2} \quad (24)$$

где  $O_2 = 21(\alpha - 1)/\alpha$  – концентрация избыточного кислорода в газовом потоке, %.

Коррозионный процесс, приводящий к разрушению низкотемпературных поверхностей нагрева, можно разделить условно на два этапа.

На первом этапе происходят конденсация паров серной кислоты на внешней поверхности отложений и перенос ее сквозь слой отложений к поверхности металла. Этап представляет собой совокупность ряда последовательных элементарных массообменных процессов.

На втором этапе протекают реакции взаимодействия раствора серной кислоты с металлом. Этот этап характеризуется физико-химическими процессами образования сернокислого, закисного или окисного железа.

Количество сконденсированной кислоты зависит от температуры поверхности и концентрации серного ангидрида и водяных паров, определяющих содержание паров серной кислоты в дымовых газах. Наиболее интенсивное выпадение  $H_2SO_4$  при сжигании мазута в большинстве случаев происходит в интервале температур от 105 до 138 °С. Выше 140 °С  $H_2SO_4$  обычно находится в виде перегретого пара, ниже 104 °С – частично в виде аэрозоля (тонкого тумана), большая часть которого удаляется в атмосферу.

Скорость коррозии низкотемпературных поверхностей нагрева определяется рядом факторов, действующих неоднозначно: количеством выпадающей серной кислоты и ее концентрацией в пленке, температурой, составом дымовых газов и характером отложений, аэродинамическими факторами, наконец, составом металла поверхностей. Для каждой марки стали максимальная скорость коррозии наблюдается при определенной концентрации  $H_2SO_4$ . Некоторые из этих факторов зависят от качества топлива и режима его сжигания, нагрузки котла, его конструктивных особенностей.

Существенное влияние на скорость коррозии имеет растворимость продуктов коррозии в серной кислоте (чем выше растворимость, тем интенсивнее коррозия). При останове парового котла кислые отложения золы адсорбируют воду, гидролизуются и выделяют кислоту непосредственно на поверхности металла. Это приводит к резкому увеличению скорости стояночной коррозии, для защиты от которой применяют различные способы консервации котла.

При сжигании мазута максимальная скорость коррозии имеет место при температуре, которая ниже точки росы на 35 – 40 °С, т.е. соответствует температуре стенки 100 – 110 °С, а минимальные значения скорости коррозии наблюдаются при температуре стенки 85 и 140 °С. Уменьшение коэффициента избытка воздуха в топке заметно снижает скорость коррозии.

Эффективным способом борьбы с низкотемпературной коррозией является сжигание мазута с предельно малыми коэффициентами избытка воздуха (1,02 – 1,03) в топке с цельносварными газоплотными экранами и совершенной автоматикой процесса горения, обеспечивающей равномерное распределение топлива и воздуха между горелками. Недостатком этого способа является рост локальных тепловых нагрузок на топочные экраны.

При сжигании сернистых мазутов ввод инертных газов до 20 – 30 % по объему в зону горения снижает содержание  $SO_3$  в продуктах горения и скорость коррозии на 40 – 60 %. Эффективным способом борьбы с коррозией является применение нейтрализующих присадок путем подмешивания к мазуту перед его распылением. Применяются присадки, меняющие структуру золы и повышающие температуру размягчения и плавления ее компонентов. Этими свойствами обладают соединения магния, кальция, силикаты алюминия и др.

#### **2.7.4 Методы контроля коррозионной активности дымовых газов**

Коррозионные повреждения поверхностей нагрева оцениваются контрольными осмотрами до и после каждой камлания эксплуатации, при этом ведется непрерывное наблюдение за газовым сопротивлением отдельных элементов парового котла. При осмотрах отбираются пробы отложений для определения количества и состава и прежде всего содержания железа. На протяжении всего времени наблюдений осуществляется непрерывный контроль за качеством сжигаемого топлива.

Скорость коррозии при испытаниях определяется с помощью зондов по убыли массы экспериментальных образцов, помещаемых в соответствующие зоны топки или конвективной шахты. Перед взвешиванием образцов зонда прокорродировавшая их поверхность обмывается дистиллированной водой.

Растворенное в воде железо в виде  $FeSO_4$ ,  $Fe_2(SO_4)_3$  и других соединений определяется фотокалориметрическим методом и вычисляется в  $г/(м^2 \cdot ч)$ . Результаты сопоставляются со скоростью коррозии, полученной прямым методом при взвешивании образца. Это позволяет существенно повысить надежность результатов эксперимента. В процессе опыта контролируется и поддерживается постоянной (на заданном уровне) температура образцов путем изменения количества охлаждающего агента.

При использовании зондов большое значение имеет длительность опытов (1000 – 2500 ч), так как скорость коррозии в зависимости от времени, как правило, имеет затухающий характер и в начале она может быть в несколько раз больше средней скорости за длительный период.

Влияние первоначальных оловых отложений на скорость высокотемпературной коррозии сталей разных марок исследовано на сегментобразных образцах размером 25×18×3 мм. Образцы устанавливались на держателях и охлаждались пропускаемым через держатели потоком воздуха. Температура образцов, введенных в газопоток, поддерживалась постоянной за счет изменения расхода воздуха. Для предотвращения коррозии нерабочие поверхности образцов хромировались, а рабочие поверхности образцов

шлифовались. Такой зонд позволял изучить влияние отложений на процесс коррозии сталей как на лобовой, так и на тыльной стороне трубы.

Для изучения коррозии экономайзера используется змеевиковый зонд с установленными в нем опытными образцами отрезков труб из разных сталей. При испытаниях контролируются расход воды через змеевик, давление и температура воды на входе и выходе. Для определения действительной скорости коррозии воздухоподогревателя в трубчатом воздухоподогревателе вместо основных труб монтируется несколько опытных, а в регенеративном устанавливается несколько опытных листов набивки. В опытные трубы или листы набивки зачеканивают несколько термопар по высоте опытных элементов, показания которых регистрируются потенциометром. Скорость коррозии определяют вышеописанными методами.

Для суждения о коррозионной активности дымовых газов отказываются от определения абсолютной скорости коррозии, особенно при сравнительных испытаниях после усовершенствования или реконструкции котла, и ограничиваются определением показателя коррозионной активности газов с помощью прибора ЦКТИ (рисунок 74).

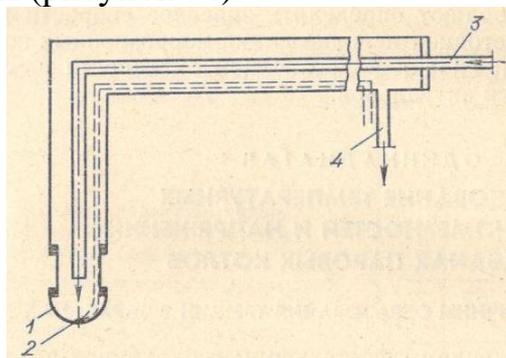


Рисунок 74 – Прибор ЦКТИ для определения коррозионной активности дымовых газов

1 – сегмент, охлаждаемый воздухом; 2 – термопара; 3 – подвод охлаждаемого воздуха; 4 – отвод охлаждаемого воздуха.

Прибор состоит из измерительной части – шаровых охлаждаемых воздухом сегментов 1 с зачеканенными в них термопарами 2. Сегменты устанавливают на трубу, служащую для подвода 3 и отвода 4 охлаждающего воздуха. Опыты проводятся при температурах сегментов 60, 80, 100 °С в течение 60 минут. Количество прокорродировавшего железа определяют по анализу смыва с сегмента дистиллированной воды.

Многие специалисты считают, что для определения сернокислотной агрессивности дымовых газов, которая находится в прямой зависимости от количества находящегося в них серного ангидрида, более оперативным методом является определение значения температуры точки росы.

Необходимо отметить, что точное определение содержания серного ангидрида представляет собой более сложную задачу, чем непосредственное определение температуры точки росы. Для измерения температуры точки росы дымовых газов обычно применяют прибор, изображенный на рисунке 75.

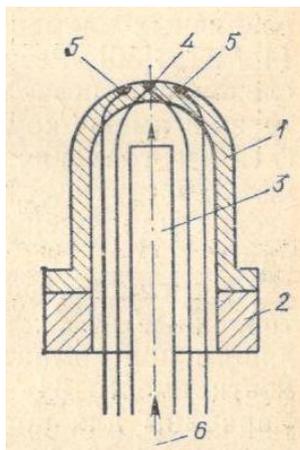


Рисунок 75 – Схема датчика прибора для измерения температуры точки росы

1 – колпачок; 2 – кольцо; 3 – труба; 4 – термопара; 5 – электроды.

Измерительный элемент прибора чаще всего представляет собой колпачок 1 из жаропрочного стекла, закрепленный кольцом 2 (рисунок 75) к охлаждаемой водой штанге. На лобовой части колпачка впаяны одна или две термопары 4 для измерения температуры поверхности и электроды 5, к которым подводится напряжение. Колпачок изнутри охлаждается воздухом или двуокисью углерода б, подаваемой по трубе 3. Колпачок с держателем на штанге с системой охлаждения вводится в газопровод. При появлении росы на его стенках образуется жидкая пленка и возникает проводимость между электродами; при высыхании пленки проводимость исчезает.

Обычно за температуру точки росы принимают момент трогания с места стрелки прибора, измеряющего сопротивление (проводимость) пленки. Недостаток такого определения заключается в субъективной оценке электрического состояния, отвечающего температуре точки росы и невозможности сравнения результатов, полученных разными авторами. Более объективная, но трудоемкая оценка температуры точки росы отвечает максимальной скорости изменения силы тока от температуры стенки. По этой методике измерений в поток газов вводят датчик прибора несколько раз, каждый раз тщательно очищая колпачок перед введением в газопровод и охлаждая его в газопроводе до различных температур.

Следует отметить, что измерения температуры точки росы не позволяют определить значение скорости коррозии, поэтому методика использования коррозионных зондов для изучения и оценки коррозионной активности дымовых газов остается актуальной.

## 2.8 Исследование температурных неравномерностей и напряжений в барабанах паровых котлов

### 2.8.1 Причины образования трещин в барабанах

Напряжениям, действующим в барабанах котлов в стационарных и переходных режимах, уделяется большое внимание в связи с трещинами, которые возникают в различных элементах барабанов котлов на давление 10 и

14 МПа. Причины образования трещин имеют комплексный характер и связаны с технологией изготовления исходного стального листа и барабана из него, конструкцией барабана и уровнем расчетных и фактических напряжений, режимно-эксплуатационными факторами.

К трещинообразованию более склонны барабаны, изготовленные из сталей с высоким пределом текучести, достигающим при комнатной температуре до 85 % предела прочности вместо 64 – 72 % у обычных углеродистых сталей. Барабаны для котлов высокого давления обычно изготавливаются из стали 16ГНМ, обладающей высоким пределом текучести. Использование таких сталей позволяет уменьшить толщину стенки барабанов, которая составляет 83 – 100 мм, и соответственно их массу, что упрощает технологию производства.

Во всех случаях трещины начинаются от коррозионных язв, образовавшихся на поверхности отверстия или штуцера и являющихся сильным дополнительным концентратором напряжений. При возникновении на некоторых этапах работы котла повышенных температурных напряжений суммарные локальные деформации могут оказаться достаточными для образования начальной трещины у язв, расположенных на участках действия наибольших напряжений. Развитие трещины прекращается после снятия кратковременного пика напряжений, коррозионный же процесс продолжается.

Наиболее характерные места повреждений барабанов котлов:

1) трещины усталостно-коррозионного происхождения на поверхности отверстий и примыкающих к ним участках поверхности обечаек. Преимущественная ориентация – вдоль образующей барабана; наряду с этим встречаются трещины, расположенные радиально относительно отверстий. Трещины образуются главным образом у отверстий водоопускных труб, но могут появляться и у отверстий труб ввода пароводяной смеси, отвода пара, подвода питательной воды, рециркуляции, аварийного слива, присоединения водоуказательных приборов и др. Указанные повреждения связаны с конструктивными, технологическими и эксплуатационными факторами;

2) трещины на внутренней поверхности штуцеров;

3) трещины в днищах барабана. В барабанах котлов 14 МПа трещины чаще образуются на внутренней поверхности днищ, преимущественно в местах приварки заводских монтажных деталей и около лазовых отверстий. В барабанах котлов 10 МПа трещины возникают на внутренней поверхности днищ;

4) трещины и другие дефекты технологического происхождения в основных сварных соединениях барабанов, зонах приварки внутривибарабанных устройств, швах приварки штуцеров и защитных рубашек;

5) трещины на внутренней поверхности обечаек различной ориентации, главным образом в барабанах котлов 14 МПа.

Для анализа работы барабана кроме периодических его осмотров необходима проверка условий его эксплуатации, и в частности уровня действующих в нем напряжений при имевших место наиболее неблагоприятных режимах работы котла.

Температурные напряжения связаны с температурными неравномерностями в барабане при постоянном и переменном режимах работы котла. Температурные неравномерности возникают при пуске, останове, переходе с одной нагрузки на другую и колебаниях нагрузки, изменении давления в барабане и температуры питательной воды, уровня воды в барабане.

В случае аварийного останова котла (при свищах в трубах экономайзера, перегревателя, разрыве экранных труб) и в режиме ускоренного пуска температурные напряжения в барабане могут достигать чрезмерных значений, особенно у краев трубных отверстий в местах присоединения опускных труб. Эти напряжения изменяются при пусках от нуля до максимума.

В постоянном режиме работы возможны колебания температур на кромках отверстий водоопускных труб с большой частотой, но малой амплитудой вследствие недостатков в конструкции узла подвода питательной воды и других причин. В барабане при различных режимах работы котла можно выделить три идеализированных вида изменения температуры среды: скачкообразное (тепловой удар), изменение с постоянной скоростью, гармонические колебания.

### 2.8.2 Температурные неравномерности в барабане и методы их расчета

При переходных тепловых режимах в теле барабана могут возникать температурные неравномерности, характеризующиеся перепадом температур по толщине стенки  $\Delta t$ , разностью между температурами верхних и нижних образующих по внутреннему диаметру барабана  $\delta t$ , разностью температур по длине образующих барабана, т. е. между солевыми и чистыми отсеками при ступенчатом испарении разностью температур по длине верхней и нижней образующих днищ  $\delta t_2$ . При переходном и постоянном тепловом режимах котла на отдельных участках барабана возможна температурная неравномерность  $\delta t_3$  около штуцеров, по которым протекает среда с температурой, отличающейся от температуры насыщения (вводы питательной воды, растворов корректирующих воду добавок, выходы линий циркуляции экономайзеров, водяные линии водоуказательных приборов и др.). Возможны также циклические изменения температуры некоторых участков металла барабана при колебании температур среды и резкие изменения температуры металла при тепловых ударах (при скачкообразном изменении температуры среды в барабане на  $50^\circ\text{C}$  и более). При пуске котла в процессе заполнения его водой и подъеме температуры рабочей среды (воды, пара) в стенках барабана возникает разность температур  $\Delta t$ . Подъем температуры рабочей среды при пусках ведут по графику, имеющему примерно линейный закон с начальным скачком температуры стенки от  $t_1$  до  $t_0$ ,  $^\circ\text{C}$ ,

$$t_c = t_0 + V_\tau \quad (25)$$

где  $t_1$  – начальная температура стенки,  $^\circ\text{C}$ ;

$t_0$  и  $t_c$  — соответственно начальная и текущая температуры среды,  $^\circ\text{C}$ ;

$V$  – скорость подъема температуры среды, °C/с;

$t$  — время, с.

При повышении температуры среды по линейному закону температура в любой точке и перепад температур по толщине плоской стенки могут быть определены с достаточной точностью по следующей формуле:

$$t = t_0 + V_\tau - [V/(2a)] [s^2 (1 + 2/Bi) - x^2], \quad (26)$$

где  $t$  – температура стенки в момент времени  $\tau$  в точке с координатой  $x$ , °C;

$x$  – расстояние от наружной поверхности стенки, м;

$a$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;

$Bi$  – критерий БиО ( $Bi = \alpha s/\lambda$ );

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи от рабочей среды к стенке, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности металла, Вт/(м·К);

$s$  – толщина стенки, м.

При останове котла перепад температур в стенке определяется в основном тепловым потоком к среде – пару или воде, находящимся внутри барабана. Тепловым потоком в окружающую среду при наличии достаточной тепловой изоляции можно пренебречь.

Тепловой поток к среде, определяемый скоростью снижения температуры насыщения, относительно мал, и потому изменение температуры металла по толщине стенки невелико. Образование значительного перепада температур по толщине стенки при останове возможно лишь в тех случаях, когда на внутреннюю поверхность попадает питательная вода низкой температуры, поступающая в барабан при подпитке котла.

Разность между температурами верхних и нижних образующих барабана  $\delta t$ . При пуске и останове котла возникают температурные неравномерности между верхними и нижними образующими барабана. Эти явления объясняются различными условиями теплообмена между стенкой и греющей средой в паровом и водяном объемах барабана. При пуске котла пар, имеющий температуру выше температуры холодной стенки барабана, конденсируется на ее поверхности, образуя стекающую вниз пленку конденсата.

Теплообмен в верхней (паровой) части барабана происходит при пленочной конденсации с высоким коэффициентом теплоотдачи,  $\alpha_1 = 17000 \div 23000$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Теплообмен в нижней части барабана происходит при конвекции с меньшим коэффициентом теплоотдачи  $\alpha_2$  от воды к стенке, косвенно зависящим от прогрева экранных контуров, а следовательно, от интенсивности циркуляции в них,  $\alpha_2 = 2300 \div 3500$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). При остановках быстрее охлаждаются нижние части барабана, омываемые водой.

По мере падения давления пар, находящийся в соприкосновении с верхними частями барабана, не конденсируется, так как температура металла стенки в данном случае выше температуры насыщения. На границе со стенкой

происходит перегрев пара при теплообмене, характеризующемся малым коэффициентом теплоотдачи, до  $\alpha_1 = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

В нижней части барабана теплоотдача происходит за счет конвекции и кипения циркулирующей воды на границе с более нагретой стенкой, при  $\alpha_2$  до  $9000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Разность между температурами верхних и нижних частей барабана в этом случае определяется соотношением  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , а также скоростью охлаждения его стенок.

Разность температур по длине нижних образующих барабана между солевыми и чистыми отсеками  $\delta/t$  при пуске котла объясняется более поздним возникновением циркуляции в контурах солевых отсеков и наличием застойных масс воды в их водяных объемах. Разности температур по длине нижних образующих  $\delta/t$  и между верхними и нижними образующими  $\delta t$  могут быть выражены общей формулой

$$\delta t_1 = \left( \frac{Vs^2}{a} \right) \left( \frac{1}{Bi_2} - \frac{1}{Bi_1} \right) = V_\varphi \left[ \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{\alpha_1 \alpha_2} \right] \quad (27)$$

где  $\varphi = scp$  – аккумулярующая способность,  $\text{кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;

$s$  – толщина стенки, м;

$c$  – теплоемкость стали,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;

$\rho$  – плотность стали,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Разность температур между верхними и нижними образующими считают незначительной, если  $\delta t = 5 \div 6 \text{ }^\circ\text{C}$ ; средней, если  $\delta t = 30 \div 40 \text{ }^\circ\text{C}$ ; очень большой, если  $\delta t \geq 70 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Разность температур по образующим днищ  $\delta t_2$ . Низшие значения температур наблюдаются на торцах днищ, а наибольшие – на границе с цилиндрической частью барабана. Такое распределение температур можно объяснить конструкцией днищ и наличием более интенсивного теплообмена с окружающей средой торцов днищ. Методы расчета их в днищах не разработаны.

Разность температур  $\delta t_2$  возникает на участках присоединения к барабану штуцеров, по которым протекает среда с температурой, отличающейся от температуры стенки барабана. Например, появление значительной разности температур возможно при периодических подпитках вовремя пусков и остановов котлов, когда температура питательной воды может существенно отличаться от температуры стенки барабана вследствие слабого ее подогрева в экономайзере и охлаждения в длинных подводящих питательных магистралях. Расчетная оценка их затруднительна.

Тепловые удары могут иметь место при заполнении неостывшего барабана водой, возникновении свищей в трубах пароперегревателя и экономайзера, разрыве экранных труб (происходит резкое охлаждение температуры стенки), разогреве холодного барабана паром в начале пуска котла (происходит подъем температуры стенки до  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и в других случаях.

Колебания температуры стенки возникают при периодических колебаниях температуры среды из-за неудовлетворительного смешения питательной воды с котловой. Изменение температуры зависит от амплитуды и периода колебаний, а также температуры среды, коэффициента теплоотдачи, теплопроводности и др.

### **2.8.3 Температурные напряжения в барабане и методика их расчета**

В настоящее время нет теоретически обоснованных методик расчета на прочность сложнапряженного состояния толстостенных элементов котла под влиянием внутреннего давления, температурных неравномерностей, концентрации этих напряжений на кромках отверстий, ослабляющего действия коррозионной среды и т. д.

В основу расчета положен принцип оценки прочности по предельной нагрузке при расчетном давлении рабочего тела, температурные напряжения в указанных элементах не учитываются, напряжениями под влиянием оваллизации барабана, массы барабана, воды в нем и деформации от соединенных с барабаном трубопроводов ввиду малости пренебрегают.

Приведенное (эквивалентное) напряжение в стенке барабана, находящейся в сложнапряженном состоянии, может быть рассчитано по формулам теории прочности, когда напряжения, действующие по координатным осям, определены. Приведенное (эквивалентное) напряжение можно сопоставить со стандартной механической характеристикой материала при заданной температуре – пределом текучести  $\sigma_T$ , определенным экспериментально. Однако результаты такого сопоставления, например  $\sigma_{прив} \leq \sigma_T$ , не позволяют судить о прочности наиболее напряженных кромок отверстий. Для этого необходим учет местных напряжений в барабане, зачастую превышающих  $\sigma_T$ . Методика определения допустимых градиентов температур в барабане на основе анализа малоциклового усталости слабых мест приведена ниже.

Напряжения, вызванные перепадом температуры по толщине стенки, на основании теории упругости в длинных цилиндрах при заданных свойствах материала (коэффициенте удлинения  $\beta$ , модуле упругости  $E$ , коэффициенте Пуассона  $\nu$ ) зависят от абсолютного значения температурного перепада по толщине стенки  $\Delta t$  и характера распределения температур. Преобразование общих формул для расчета температурных напряжений с учетом параболического закона изменения температуры по толщине стенки в процессе пуска позволяет получить расчетные уравнения для определения напряжения в текущей точке стенки.

Расчеты по этим уравнениям требуют большой тщательности, так как отношение внутреннего диаметра барабана к наружному близко к единице. Напряжения на внутренней поверхности стенки можно определять по упрощенной формуле:

$$\sigma_{\Delta t} = \pm \frac{1}{\frac{3\beta E \nu s^2}{(1-\nu) \cdot a}} \quad (28)$$

Напряжения, получаемые по формуле (28), следует увеличивать на 15 – 20 % для учета потерь теплоты через несовершенную изоляцию и других факторов, не принятых во внимание при выводе этой формулы.

Температурные напряжения, вызванные разностью температур верхних и нижних образующих барабана,  $\delta t$ . Анализ решения задачи о температурных напряжениях в цилиндрической части барабанов, полученного приближенным методом теории оболочек, показывает, что наибольшую величину имеет осевое напряжение  $\sigma_{a\delta t}$

$$\sigma_{a\delta t} = \beta E \delta t f(\varphi_1), \quad (29)$$

где  $f(\varphi_1)$  – геометрический параметр, зависящий от характера кривой распределения температур по периметру барабана.

Формула (29) справедлива, если барабан рассматривать как цилиндрическую оболочку. Для эксплуатируемых и изготавливаемых в настоящее время барабанов ( $D_{\text{н}}/D_{\text{вн}} = 1,10 \div 1,14$ ) такое допущение вполне приемлемо,  $f(\varphi_1)$  зависит от положения уровня в барабане, интенсивности теплоотдачи от воды к стенке и т. п. При возникновении разности температур прогиб барабана ограничивается подсоединенными к нему трубами. Для зоны подсоединения опускных труб, примыкающей к нижней образующей, параметр  $f(\varphi_1)$  может быть как положительным (растяжение), так и отрицательным (сжатие) (см. ниже). При отсутствии данных для указанной зоны можно принимать: при растяжении  $f(\varphi_1) = 0,3$ ; при сжатии  $f(\varphi_1) = -0,2$ .

Напряжения от внезапного изменения температуры среды на  $\Delta t_0$ , °C (от теплового удара) для случая бесконечно большой интенсивности теплообмена между средой и поверхностью можно вычислить по формуле:

$$\sigma_{\Delta t_0} = \pm \frac{\beta E \Delta t_0}{1-\nu} \quad (30)$$

Результаты расчета по (30) получаются завышенными. При нагреве температурные напряжения на внутренней поверхности сжимающие (отрицательные), при охлаждении – растягивающие (положительные).

Напряжения при периодических колебаниях температуры среды

$$\sigma_{\text{КОЛЕБ}} = \pm \frac{\beta E A_0}{1-\nu} \quad (31)$$

где  $A_0$  – амплитуда колебаний температуры металла, которая имеет сложную функциональную зависимость от амплитуды колебаний температуры среды  $A$ , периода этих колебаний  $T$ , коэффициента температуропроводности  $a$  и параметра  $H = \alpha/\lambda$ .

Установившиеся колебания температуры среды вызывают колебания напряжений в симметричном цикле. Неустановившиеся колебания приводят к несимметричному циклу колебаний напряжений с размахом, соответствующим размаху колебаний температуры среды. Допустимые перепады температур и скорости их изменения в барабанах должны обосновываться расчетом, исходным условием которого является предотвращение повреждений из-за малоциклового усталости. При этом следует учитывать концентрацию напряжений около трубных отверстий и в других местах.

Напряжения, возникающие в кромках отверстий,  $\sigma^k$  определяются умножением температурных напряжений и напряжений от внутреннего давления, отнесенных к неослабленному сечению барабана, на соответствующий коэффициент концентрации  $\alpha$

$$\sigma^k = \alpha \sigma \quad (31)$$

Значения коэффициентов  $\alpha$ , входящих в формулу (31), приведены в таблице 5 или определяются по графикам (рисунок 76).

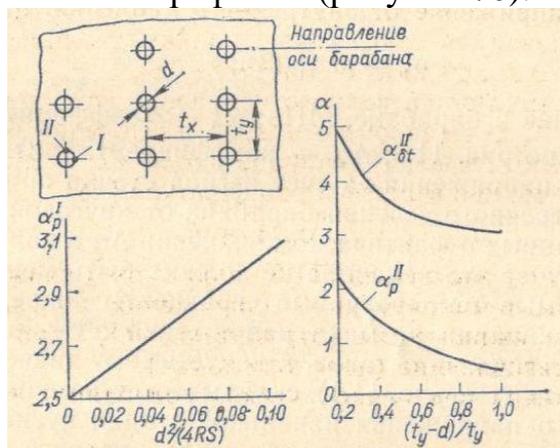


Рисунок 76 – Графики концентрации напряжений около трубных отверстий

$d$  – диаметр отверстий в барабане;  $t_x$  и  $t_y$  – соответственно продольный и поперечный шаги между ними; I и II – точки контроля концентрации;  $\alpha_p$  – коэффициент концентрации напряжений от внутреннего давления;  $\alpha_{\sigma t}$  – то же от  $\delta t$ ,  $R$  – внутренний радиус барабана;  $S$  – толщина его стенки.

Таблица 5 – Коэффициенты концентрации напряжений околотрубных отверстий

Температурное напряжение	Коэффициенты концентрации напряжений околотрубных отверстий в точках по рисунку 76	
	I	II
От разности температур верхней и нижней образующих $\sigma_{\delta t}$ :		
- аксиальное (индекс а)	1,0	по рисунку 76 0,2
- тангенциальное (индекс т)	1,8	
От перепада температур по толщине стенки $\sigma_{\Delta t}$ и $\sigma_{\Delta t 0}$	2,0	2,0

При расчете допустимых температурных градиентов определяющими могут быть напряжения, возникающие около отверстий со стороны как продольных, так и поперечных мостиков (в точках I или II на рисунок 76). Принятые в таблице 5 значения коэффициентов идут в запас прочности.

Напряжения от внутреннего давления в точке I рассчитывают по формуле:

$$\sigma_p^I = \sigma_p (\alpha_p^I + \Delta\alpha) \quad (32)$$

где  $\sigma_p$  – напряжение от внутреннего давления, МПа,

$$\sigma_p = \frac{pD_{\text{вн}}}{2S} \quad (33)$$

где  $p$  – давление в барабане, МПа;

$\alpha_p^I$  – коэффициент, определяемый по рисунку 76;

$\Delta\alpha$  – коэффициент, учитывающий увеличение напряжения за счет изгиба стенки при отличии формы поперечного сечения барабана от круговой (при отсутствии данных о фактическом значении  $\Delta\alpha$  в каждом конкретном случае эта величина не должна быть меньше 0,3).

Допустимые температурные градиенты определяются при приравнении размаха напряжений  $\sigma^{PA3M}$ , возникающих за цикл пуск – останов, к допустимому значению размаха. Размах складывается из наибольшего сжимающего напряжения начальной стадии пуска и наибольшего растягивающего напряжения первого периода снижения давления  $\sigma_{\text{МАКС}}^{\text{ОХЛ}}$ .

Максимальное растягивающее напряжение может быть вычислено суммированием напряжения при рабочем давлении с напряжением, равным 60 – 70 % значения, определенного по формуле (30), Дело в том, что напряжения  $\sigma_{\Delta\alpha}$  устанавливаются после начала охлаждения лишь спустя некоторый период, в течение которого происходит снижение напряжений от внутреннего давления.

Допустимый размах напряжений в кромке отверстий  $\sigma_{\text{ДОП}}^{\text{PA3M}}$  зависимости от числа циклов  $N$  для каждой марки стали имеет свое значение.

Борьба за надежность барабана – это недопущение наиболее опасных режимов эксплуатации, например заполнения водой неостывшего барабана, режимов пуска с неравномерным прогревом циркуляционных контуров, усиленного расхолаживания при останове и т. д. Важное значение имеет должная организация водного режима котла, так как коррозионные процессы играют решающую роль в трещинообразовании.

#### **2.8.4 Мероприятия по уменьшению температурных неравномерностей и напряжений в барабанах**

Для предотвращения повреждений осуществляют мероприятия по улучшению конструкции барабанов, ужесточению требований к качеству

металла, пересмотру технологии, разработке способов ремонта барабанов и введению современных методов контроля за состоянием металла барабанов.

Важным фактором в появлении и развитии трещин являются высокие температурные напряжения, связанные главным образом с попаданием в горячий барабан относительно холодной воды, вызывающей резкое охлаждение поверхностного слоя металла.

Развитию трещин способствуют также коррозионные процессы, особенно стояночная коррозия. Условия для появления опасных температурных напряжений в барабанах могут создаваться при подаче любым способом воды в неостывший опорожненный барабан; подпитках в процессе остановов; попадании питательной воды по линиям рециркуляции экономайзера при растопках и остановах во время подпиток котла в случаях ошибочно открытых задвижек на этих линиях; растопках и остановах котла при отсутствии надлежащего контроля за температурным состоянием барабана.

Контроль температурного состояния барабанов в эксплуатации для котлов давлением 10 и 14 МПа является обязательным для обеспечения правильного ведения переходных режимов оперативным персоналом; выявления наиболее опасных режимов работы барабанов и их устранения; обеспечения надежного контроля при работе котлов в маневренном режиме.

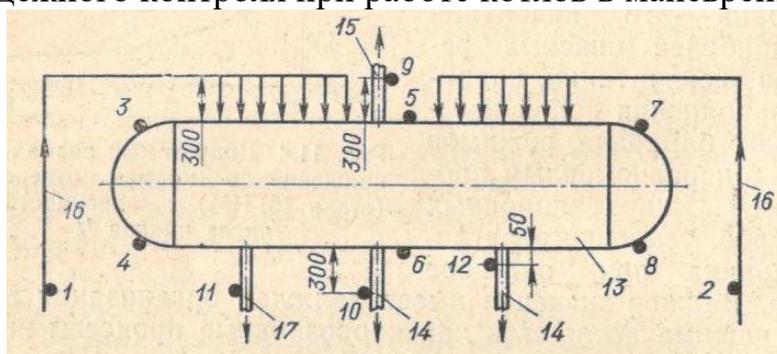


Рисунок 77 – Схема размещения термопар на барабане котла для эксплуатационного контроля

1 – 12 – номера термопар; 13 – барабан; 14 – водоопускная труба; 15 – паровыводящая труба; 16 – труба подвода питательной воды; 17 – труба рециркуляции водяного экономайзера.

Барабаны оснащаются термопарами по схеме, показанной на рисунке 77. Термопары на стенках барабанов котлов 14 МПа устанавливают запеканкой; во всех прочих случаях термопары зачеканивают в приваренные бобышки с одним или двумя сверлениями для электродов из хромель-алюмелевой проволоки.

Правильность смонтированной схемы измерений следует проверять при стационарном режиме работы котла. Разбежки в показаниях всех термопар не должны превышать 5 – 10 °С (за исключением термопар 1, 2 и 11), скорость изменения температуры насыщения (основной показатель режима пуска и останова) определяют при пуске – по термопаре 9 на паровыводящей трубе; при

останове котла с уровнем воды в барабане – по термопарам 10,12 на водоопускной трубе.

При остановках котла с опорожненным барабаном контроль за температурой насыщения осуществляют по давлению в барабане. Перепад температур между верхней и нижней образующими барабана при пуске и останове котла для указанной группы котлов не должен превышать 60 °С. Разница температур воды и стенки барабана при его заполнении не должна превышать ±40 °С.

Перепад температур между стенкой барабана и водой при заполнении котла определяют: для гидроопрессовки – как максимальную разницу между показаниями термопар на верхней образующей барабана (3, 5, 7) и температурой воды; до растопочного уровня – как максимальную разницу между показаниями термопар на нижней образующей (4, 6, 5) и температурой воды. Температуру воды при заполнении через экономайзер определяют по термопарам 1 и 2.

Регистрация температур барабана должна осуществляться при пусках, остановках, заполнении котла водой, гидроопрессовке. При полупиковом и пиковом режимах эксплуатации регистрация температур должна осуществляться непрерывно.

При: пуске котла значительного снижения температурных неравномерностей и напряжений в стенке барабана можно добиться только совместным применением ряда мероприятий. Главное средство повышения надежности барабана при растопке состоит в обеспечении равномерного прогрева контуров естественной циркуляции с максимально возможным объемным расходом пара от котла. Поэтому пуск следует производить с возможно большим числом одинаково загруженных форсунок (горелок). Расход топлива при этом устанавливается в зависимости от принятого графика пуска. Эффективность прогрева отдельных контуров целесообразно контролировать по показаниям термопар\* устанавливаемых на нижних экранных коллекторах. Сравнение этих показаний между собой, а также с температурой барабана позволит судить о степени прогрева и его равномерности. Перепад температур по толщине стенки и возникающие при этом напряжения ограничиваются регламентированным темпом пуска (выше приведены допустимые скорости повышения температуры насыщения).

Уменьшение разности температур между верхними и нижними образующими барабана достигается организацией предварительного прогрева барабана, например насыщенным паром соседних котлов, который вводят по трубе с отверстиями, расположенной вблизи от нижней образующей барабана. При пуске котла растягивающие напряжения от внутреннего давления алгебраически складываются с температурными растягивающими напряжениями на наружной поверхности стенки и сжимающими напряжениями на внутренней поверхности стенки, которые возникают из-за разности температур по ее толщине. Это происходит потому, что волокна металла, примыкающие к внутренней поверхности стенки, прогреваются быстрее. Возникающие в них линейные удлинения опережают возможности, накла-

дымаемые более холодными волокнами металла, примыкающими к наружной поверхности стенки.

В начальный период пуска сжимающие температурные напряжения будут значительно больше растягивающих от внутреннего давления, благодаря чему возрастет размах напряжений за цикл работы котла на внутренней поверхности барабана, на которую дополнительно влияет коррозионное воздействие котловой воды. Долговечность металла при циклическом нагружении снижается на порядок и более. Более опасной в смысле возникновения возможных повреждений является внутренняя поверхность стенки барабана.

При останове котла основными составляющими напряжений в стенке барабана являются напряжения от внутреннего давления и от разности температур. В начальной стадии останова существенная роль принадлежит температурным напряжениям, вызванным разностью температур по толщине стенки. Они увеличивают размах напряжений за цикл пуск – постоянный режим – останов. В дальнейшем при снижении давления может возникнуть большая разница температур между верхом и низом барабана.

В блочных установках лучшим средством снижения температурных неравномерностей при останове котла является снижение его нагрузки с соответствующим плавным снижением параметров.

Снижение температурной неравномерности при останове котла, работающего на общую паровую магистраль, может быть достигнуто заполнением барабана котловой водой до верхней образующей (по разработке ВТИ). При этом барабан должен быть оборудован дополнительными специальными водомерными устройствами. Этот способ неприменим при аварийных остановах котла с упуском воды, так как приводит к тепловому удару.

Второй способ состоит в охлаждении барабана насыщенным паром от соседних котлов, подаваемым по трубам с отверстиями вблизи верхней и нижней образующих барабана. В этом случае устройство сложнее, но эффективно и допустимо к использованию при любых остановах.

Для устранения дополнительных термических напряжений необходимо устанавливать защитные рубашки на выводах линии трубы циркуляции экономайзера, вводах питательной воды, вводах фосфатов и других дозируемых добавок, водяных штуцерах водоуказательных приборов, вводах пара для разогрева барабана (рисунок 78 и 79).

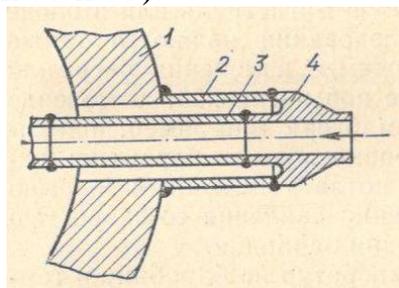


Рисунок 78 – Схема штуцера с паровой рубашкой

1 – барабан; 2 – штуцер; 3 – вставка; 4 – предохранительный патрубкок.

Рубашки на вводах ниже уровня в барабане должны быть проточными. В этом случае через рубашку организуется проток котловой воды со сбросом ее в опускную трубу экрана, чтобы исключить заполнение рубашки переохлажденной котловой водой. Необходимо также обеспечить надежную тепловую изоляцию всего барабана; содержать в исправности реперы, контролируемые температурные перемещения всех основных элементов котла; устранять при ремонтах все возникающие в процессе эксплуатации помехи температурным перемещениям (скопления золы, шлака, зажатие труб элементами каркаса и т. п.). Размах суммарных напряжений за цикл снизится при использовании барабанов с более толстой стенкой (120 мм) и позволит увеличить темп растопки по сравнению с указанным выше.

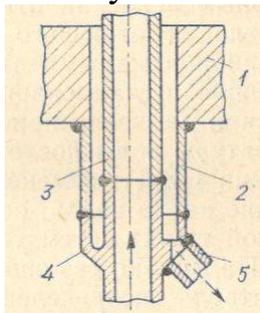


Рисунок 79 – Схема штуцера с дренируемой рубашкой

1 – барабан; 2 – штуцер; 3 – вставка; 4 – предохранительный патрубкок; 5 – дренажный патрубкок.

### 2.8.5 Контроль распределения температур и напряжений в барабане

Стремление к повышению маневренности работающих котлов, необходимость в разработке безопасных режимов для котлов с барабанами новой конструкции и усовершенствование этих конструкций, а также потребность в углубленном анализе причин повреждения барабана и создании более совершенных методов аналитических расчетов оставляют актуальными задачи квалифицированных исследований температурных градиентов в барабане. Не меньший интерес представляет организация и совершенствование методов измерений действующих в барабане напряжений, особенно на внутренней поверхности стенки, так как аналитические расчеты не могут учесть всех особенностей режима работы.

Исследования проводятся в стационарных и нестационарных условиях при различных нагрузках котла. К нестационарным режимам относятся прежде всего пуск и останов котла, работающего на общую магистраль или в блоке с турбиной. Важными для исследования являются также следующие нестационарные режимы: изменения нагрузки; колебания давления при работе под нагрузкой; изменение температуры воды после экономайзера (например, при отключении ПВД); изменение уровня воды в барабане; заполнение котла водой; останов котла с имитацией разрыва экранной трубы путем уменьшения давления со скоростью до 1 МПа/мин, но без опорожнения барабана.

Контроль распределения температур по барабану и температур стенок различного рода штуцеров осуществляют с помощью поверхностных термопар.

Обычно используются хромель-копелевые или хромель-алюмелевые термопары из термоэлектродной проволоки диаметром не более 1 мм. Для измерения малых градиентов температур используется проволока диаметром 0,15 мм. Поверхностные термопары устанавливаются при помощи приваренных бобышек, чеканки или контактной сварки в зависимости от места установки.

Для регистрации показаний термопар используются электронные автоматические потенциометры. При разработке объема температурного контроля барабанов следует учитывать, что в зависимости от принятой технологии пусков может иметь место поступление среды из пароперегревателя в барабан.

По данным ВТИ, на отдельных котлах наблюдалось попадание в барабан насыщенного, а иногда и перегретого пара из-за выкипания воды в пароперегревателе при его закупорке водой после гидравлического испытания или (во время простоя). В таких случаях термопары, устанавливаемые в верхней части барабана (на паропроводящих трубах), показывают на начальном этапе пуска повышенную температуру. Наряду с этим на завершающей стадии пуска может наблюдаться снижение температуры в зоне опускных труб, что вызывается периодической подпиткой котла. Наиболее резко это проявляется при пусках котла на холодной воде и после кратковременных простоев. При этом режиме также наблюдаются высокочастотные колебания температур стенки и кромок очков труб, не менее опасные, чем разности температур по образующим. Для фиксации этих колебаний необходимо обеспечить соответствующее быстродействие регистрирующих приборов.

Типовая схема установки поверхностных термопар для контроля за температурой металла барабана по его длине (по верхней, нижней, средней образующим) на наружной и внутренней поверхностях стенки, насыщенного пара, стенки барабана возле водоподводящего штуцера, на рубашке ввода и температуры воды показана на рисунке 80.

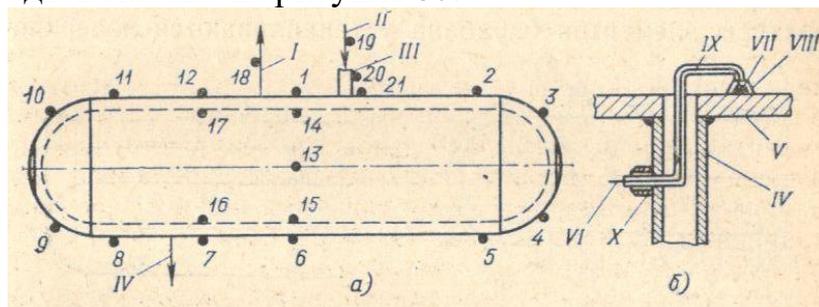


Рисунок 80 – Типовая схема экспериментального температурного контроля на барабане

а – схема установки датчиков; б – схема узла вывода термопары из барабана; 1 – 13 – термопары на наружной поверхности стенки барабана по верхней, нижней и осевой образующим; 14 – 17 – то же на внутренней поверхности стенки; 18 – поверхностная термопара на паропроводящей трубе I; 18 – 21 – поверхностные термопары соответственно на трубопроводе из водяного экономайзера II, рубашке ввода трубопровода III в барабан, барабане возле штуцера; IV – водоопускная труба; V – стенка барабана; VI –

термоэлектродный провод; VII – бобышка; VIII – колпачок; IX – защитная труба; X – штуцер.

Для снятия кривой распределения температур по периметру барабана поверхностные термопары устанавливаются по его окружности выше и ниже уровня воды. При стационарном режиме и номинальных параметрах разность температур верха и низа составляет всего 2 – 5 °С. Кривые температурных полей по толщине стенки снимают с помощью глубинных термопар, спаи которых приваривают в соответствующих точках по толщине стенки барабана. Кривые температурных полей в стенке могут иметь различный вид: некоторые близки к параболе, другие к линейной зависимости. Это определяется многими причинами: повышенными тепловыми потерями, неустановившимся характером поля, изменяющейся скоростью нагрева и охлаждения и т. д.

Для контроля температурных градиентов в местах присоединения штуцеров устанавливаются поверхностные термопары на наружной стенке барабана возле штуцера и теле трубы для ввода раствора фосфата или других дозируемых примесей, линии рециркуляции экономайзера, водяной линии водоуказательной колонки, на нескольких (двух-трех) трубах подвода воды из экономайзера аналогично показанному на рисунке 80.

Для определения частоты и амплитуды колебаний температуры элементов барабана устанавливаются поверхностные и гильзовые термопары по схеме, показанной на рисунок 81. Для сокращения числа устанавливаемых термопар расширенные наблюдения могут быть выполнены на одной стороне барабана.

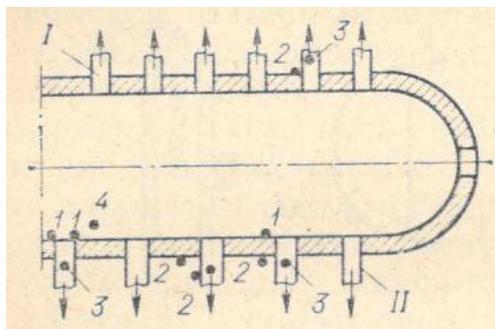


Рисунок 81 – Схема измерений для определения частоты и амплитуды колебаний температуры элементов барабана

1 – термопары на внутренней поверхности барабана или очка; 2 – то же на наружной поверхности барабана или труб; 3 – то же в гильзе; 4 – то же в потоке у очка; I – паропроводящие трубы; II – водоопускные трубы.

В котлах со ступенчатым испарением в солевом отсеке барабана температуру воды можно считать равной температуре насыщения, и она изменяется в соответствии с изменением давления. В чистом отсеке барабана температура воды определяется условиями смешения потоков кипящей котловой воды, выходящей из циклонов, воды, поступающей из экономайзера, и пара, сносимого в опускные трубы. Возможны также колебания температуры

среды из-за колебаний давления (следовательно, температуры насыщения) при колеблющейся нагрузке котла. Обычно наблюдается небольшой размах колебаний температуры воды, поступающей в опускные трубы, от 3 до 15 °С с периодами 2 – 10 с. При неблагоприятных режимах котла (в период пуска) иногда возникают колебания температуры воды у отдельных очков опускных труб с размахом 70 – 100 °С и периодом 3 – 8 с, что недопустимо.

Обработка материалов испытаний сводится к построению графиков изменения температур во времени при различных режимах работы котла и к построению полей температур по периметру барабана, толщине стенки и т.п., которые используются для расчетов действующих напряжений в барабане с учетом их концентрации в слабых местах для различных режимов работы котла. При чрезмерных температурных напряжениях задача состоит в отработке безопасных режимов, исключая недопустимые температурные напряжения.

Большой интерес представляют исследования напряжений в барабане в указанных выше стационарных и нестационарных режимах с помощью тензодатчиков. Принципиальная схема установки тензодатчиков в аксиальном (осевом) и тангенциальном (касательном) направлениях на участках наружной поверхности барабана показана на рисунке 82. Определение напряжений в стенке барабана по его наружной поверхности можно проводить с помощью тензометров МЭИ механического типа с перекатывающейся стрелкой (рисунок 83).

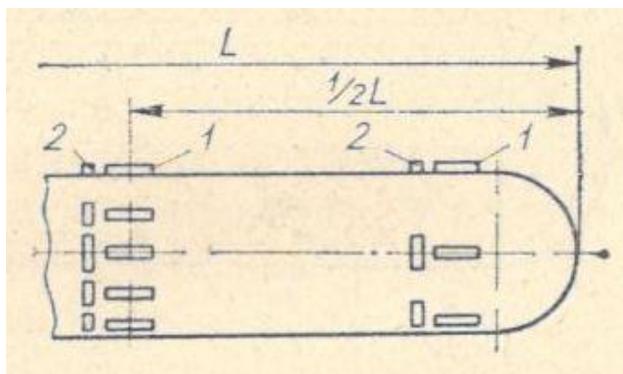


Рисунок 82 – Схема экспериментального контроля напряжений на участках наружной поверхности стенки барабана

1 – аксиальные тензодатчики; 2 – тангенциальные тензодатчики.

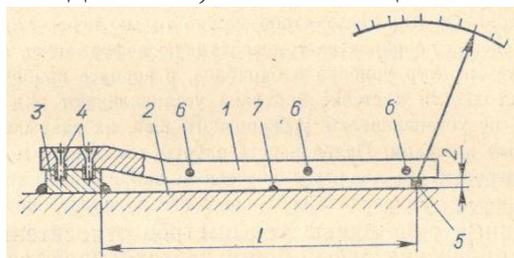


Рисунок 83 – Схема аксиального механического тензометра:

1 – корпус прибора; 2 – стенка барабана; 3 – приваренная пластинка; 4 – прижимные винты; 5 – измерительный ролик со стрелкой; 6 и 7 – термопары

соответственно для контроля температуры корпуса прибора и наружной поверхности стенки барабана; 1 – база тензодатчика (100 – 200 мм)

Принцип действия механического тензометра основан на перекачивании цилиндра (измерительный ролик), зажатого между неподвижной (корпус) и подвижной (испытываемая упругие деформации стенка барабана) плоскостями. К цилиндру (ролику) прикреплена стрелка, конец которой описывает кривую, представляющую собой ветвь удлиненной циклоиды. При малом диаметре ролика (2 мм) форма кривой приближается к дуге окружности. Корпус прибора выполняется из той же стали, что и обследуемый объект. База прибора, т. е. расстояние от оси ролика до закрепленного конца корпуса, составляет 100 – 200 мм. Следовательно, эти тензометры не позволяют определить концентрацию напряжений, например, вблизи отверстий, так как дают представление об уровне суммарных напряжений в отдельных зонах барабана (в среднем на длине базы), в том числе от разности температур по толщине стенки и по окружности, от влияния овальности поперечного сечения барабана и др. Оценить напряжения у внутренней поверхности барабана при использовании этих тензометров можно только пересчетом.

Для введения поправок на температурную деформацию, вызванную разностью температур прибора и барабана, в корпусе прибора и у наружной поверхности в стенке барабана устанавливают ряд термопар. Тензометры не устанавливают у сварочного шва, их закрывают теплоизоляционным кожухом. Правильность работы тензометра можно определить сравнением его данных с расчетным напряжением от внутреннего, давления при гидравлической опрессовке холодного котла.

Найденные с помощью тензометров относительные упругие механические деформации пересчитываются в соответствующие аксиальные и тангенциальные напряжения по формулам

$$\sigma_a = \frac{E(\delta_a - \nu\delta_T)}{1 - \nu^2} \quad (34)$$

$$\sigma_T = \frac{E(\delta_T - \nu\delta_a)}{1 - \nu^2} \quad (35)$$

где  $\sigma_a$  и  $\sigma_T$  – соответственно аксиальное и тангенциальное напряжения, МПа;

$E$  – модуль упругости материала барабана с учетом его температуры, МПа;

$\nu$  – коэффициент Пуассона;

$\delta_a$  и  $\delta_T$  – относительные упругие деформации поверхности барабана соответственно в аксиальном и тангенциальном направлениях, рассчитанные на основании показания тензометра по формуле

$$\delta = \frac{d\delta_{\text{о.с.}}}{(R \cdot l) - \beta(t_6 - t_k)} \quad (36)$$

где  $\delta$  – относительная упругая деформация (аксиальная и тангенциальная);

$\delta_{\text{о.с.}}$  – отклонение стрелки тензометра;

$d$  – диаметр ролика, м;

$R$  – длина стрелки, м;

$l$  – база тензометра, м;

$\beta$  – коэффициент линейного расширения;

$(t_6 - t_k)$  – разность температур между барабаном и корпусом тензометра, К.

Для измерения концентрации напряжений используются термокомпенсированные микротензодатчики, характеризующиеся малыми геометрическими размерами тензорешеток. Широкое применение их пока ограничено из-за технологических трудностей изготовления микротензодатчиков.

Тенденция микротензометрии заключается в освоении и внедрении фольговых микротензодатчиков общепринятого номинального электрического сопротивления  $R_T = 100 \div 200$  Ом из константановой фольги толщиной 0,003 – 0,005 мм. Из-за упругой деформации детали его сопротивление изменяется на  $\Delta R_\delta$ . Точность и достоверность измерения деформации, напряжений, давлений и других механических параметров зависят от стабильности и воспроизводимости основной измерительной характеристики микротензодатчиков.

$$\frac{\Delta R_\delta}{R_T} = f(\delta) \quad (37)$$

где  $\delta = \Delta l/l$  — относительная упругая деформация детали, а также высокого коэффициента тензочувствительности  $k = \Delta R_\delta / (R_T \delta)$  и малых температурных приращений сопротивления  $\Delta R_i / R_T = \varphi(t)$  наклеенного микротензодатчика, малой ползучести при нагрузке микротензодатчиков и других факторов. При наклейке микротензодатчиков на внутренней стенке барабана их необходимо защищать от воздействия внутренней среды, что приводит к некоторому изменению измеряемых напряжений.

Для защиты используются привариваемые герметично к барабану стальные или фольговые колпачки. Самокомпенсированные термостойкие тензодатчики ИМАШ приваривают точечной конденсаторной сваркой к наружной и внутренней поверхности барабана. Для регистрации деформаций используются 12-точечные приборы ЭТП-209, дающие точечную запись с циклом 20 с.

Расчет напряжений ведут по (34) и (35). В местах установки микротензодатчиков обычно монтируют поверхностные термопары для

регистрации температур. Обработка материалов испытаний сводится к построению графических зависимостей изменения напряжения от различных параметров или во времени, сравнению их с полученными расчетным путем. При чрезмерных напряжениях задача состоит в отработке безопасных режимов, исключающих недопустимые температурные напряжения. Наиболее опасной является внутренняя поверхность стенки барабана, где тензометрирование трудно осуществимо.

По этим причинам натурное измерение напряжений не является широко распространенным методом изучения условий работы барабана и находится в стадии освоения.

## 2.9 Испытания и наладка топочных экранов прямоточных котлов

### 2.9.1 Конструктивные и режимные факторы, влияющие на гидравлический режим контура при принудительном движении рабочего тела

Для любой схемы конструктивного выполнения топочных экранов прямоточного котла (примеры компоновок приведены на рисунке 84) надежность парогенерирующих труб в большой степени зависит от устойчивости движения, т. е. постоянства расхода рабочей среды через параллельные трубы и панели, включенные между точками общего давления. Границы устойчивости определяются путем анализе уравнения движения среды в нестационарном режиме. Выделяются два вида неустойчивости (частные случаи решения задачи) – апериодическая и колебательная. Анализ показывает, что границы апериодической неустойчивости совпадают с экстремумами статической гидравлической характеристики, а колебательная (соответствует пульсациям) определяется решением динамической задачи.

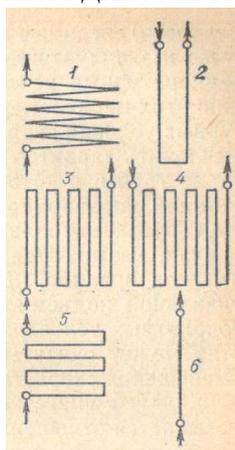


Рисунок 84 – Типы элементов топочных экранов современных прямоточных котлов

1 – горизонтальная навивка типа Рамзина; 2 – U-образная вертикальная; 3,4 – многоходовые вертикальные соответственно с нечетным и четным числом ходов; 5 – горизонтально-подъемная; 6 – одноходовая вертикальная.

Гидравлическая характеристика получается интегрированием уравнения движения в установившемся (стационарном) режиме. Гидравлическая характеристика выражает связь между расходом рабочей среды и полным перепадом давления, возникающим при ее движении.

Неодинаковость температурного режима труб гидравлического элемента в основном определяется существующими тепловой и гидравлической неравномерностями. Исходной причиной разверок являются неравномерности, вносимые при проектировании, изготовлении, монтаже и эксплуатации парового котла. Наиболее опасный температурный режим соответствует определенному сочетанию этих неравномерностей. Поэтому при анализе температурных условий гидравлических элементов необходимо устанавливать характер неравномерностей в трубах и проверять такие трубы, в которых суммарное влияние различных сочетаний неравномерностей приводит к наихудшим условиям. Трубы, находящиеся в наихудших температурных условиях, называются разверенными. В прямоточных котлах это, как правило, наиболее обогреваемые трубы. При вертикальной подъемной компоновке труб в наиболее неблагоприятных условиях при больших тепловых неравномерностях может оказаться слабообогреваемая труба за счет уменьшения скорости среды в ней.

*Коэффициентом температурной разверки* называется отношение температуры среды на выходе из разверенной трубы к средней температуре на выходе из элемента.

*Коэффициентом тепловой разверки* называется отношение приращения энтальпии в отдельной трубе (витке) к среднему приращению ее в элементе.

*Коэффициентом гидравлической разверки* называется отношение расхода среды в отдельной трубе (витке) к среднему расходу в трубах элемента.

*Коэффициентом неравномерности тепловосприятости* в элементе называется отношение среднего удельного тепловосприятости разверенной трубы (витка) к среднему удельному тепловосприятости элемента.

*Коэффициентом гидравлической неравномерности* называется отношение полного коэффициента гидравлического сопротивления разверенной трубы к полному коэффициенту гидравлического сопротивления элемента.

*Коэффициентом конструктивной нетождественности* называется отношение обогреваемой поверхности отдельной трубы (витка) к средней обогреваемой поверхности труб элемента.

Во всех случаях, когда нарушение надежности обогреваемых элементов не связано с нарушением гидравлического режима (застой, опрокидывание), опасными являются трубы наиболее обогреваемые и с наименьшим расходом среды, надежность должна проверяться по тепловой разверке.

При нарушении нормального гидравлического режима (застой, опрокидывание) ненадежными могут быть подъемные трубы с наименьшим тепловосприятием. В этом случае коэффициент тепловой разверки определяют для наименее обогреваемой трубы при наименьшем значении коэффициента гидравлической разверки.

Возможность опрокидывания потока при сверхкритическом давлении проверяется путем построения гидравлических характеристик. Для предотвращения застоя в наименее обогреваемой трубе вертикального подъемного прямоточного элемента сверхкритического давления ограничивается минимально допустимая скорость потока при наименьшей нагрузке. В вертикальных подъемных контурах при сверхкритическом давлении опрокидывание потока исключено.

Гидравлическая характеристика прямоточных элементов может быть многозначной, т. е. одному перепаду давления могут соответствовать несколько расходов среды. При подъемных, подъемно-опускных, горизонтальноподъемных и опускных элементах многозначность зависит от соотношения нивелирных напоров и потерь от трения в отдельных ходах элемента.

В прямоточных котлах докритического давления с горизонтальной навивкой многозначность является в основном следствием различия зависимостей гидравлических сопротивлений в экономайзерных и испарительных участках.

Для горизонтальных контуров в области низких входных энтальпий (840 кДж/кг и ниже) гидравлические характеристики имеют два экстремума, а при более высоких энтальпиях – ни одного. В прямоточных котлах докритического давления с подъемными (вертикальными и горизонтально-подъемными) панелями характеристика практически однозначна, но возможны застой и опрокидывание потока. Проверка должна производиться при минимальной нагрузке котла для того хода, в котором начинается парообразование.

Исследования выявили значительное влияние геометрии контура на особенности гидравлических режимов при сверхкритическом давлении. В этом смысле компоновки можно разделить на три характерные группы: горизонтальные контуры, вертикальные с нечетным и четным числом ходов. Разверки, связанные с многозначностью гидравлических характеристик и возможностью перехода с правой ветви характеристики на левую (апериодическая неустойчивость), для горизонтальных контуров не является лимитирующим фактором (так как проявляются при входных энтальпиях 750 кДж/кг и ниже).

В одноходовых подъемных контурах апериодическая неустойчивость практически отсутствует. Вертикальные многоходовые контуры с нечетным числом ходов и первым подъемным ходом занимают промежуточное положение между одноходовыми подъемными и горизонтальными, они имеют область апериодической неустойчивости при входных энтальпиях ниже 1000 кДж/кг, которая ликвидируется при 1250 кДж/кг и выше. В связи с этим апериодическая неустойчивость в таких контурах практически не встречается даже при пусках и может проявляться в этот период при грубых нарушениях режима.

Одно- и многоходовые контуры с нечетным числом ходов и первым опускным ходом имеют широкую область апериодической неустойчивости и в парообразующих элементах не применяются.

Вертикальные многоходовые контуры с четным числом ходов характеризуются широкой областью аperiodической неустойчивости, особенно П- и U-образные. В U-образных контурах аperiodическая неустойчивость может возникать при достижении выходной энтальпии в трубах 3350 кДж/кг и выше, что практически может быть реализовано при нарушении нормальных режимов работы котла (например, при значительных нарушениях соотношения вода – топливо).

С повышением входной энтальпии границы аperiodической неустойчивости заметно сужаются, и при ее значениях более 1500 кДж/кг гидравлическая характеристика становится однозначной. В растопочных режимах, когда входная энтальпия ниже 1500 кДж/кг, для исключения аperiodической неустойчивости необходимо обеспечить достаточный массовый расход. При достижении границы аperiodической неустойчивости отдельные трубы U-образного контура переходят в режим опрокинутого движения потока.

Для П-образных контуров область аperiodической неустойчивости получается большой и возникает при достижении выходной энтальпии в трубах 1675 – 2100 кДж/кг. В связи с этим такая компоновка парообразующих элементов не применяется.

С увеличением числа ходов в контуре при четном их количестве лимитирующим показателем надежности гидравлики остается аperiodическая неустойчивость. Область возможного их использования та же, что и для U-образных контуров. При входных энтальпиях потока 2500 кДж/кг и выше могут использоваться компоновки произвольной геометрической конфигурации.

В современных котлах число параллельно включенных труб порой превышает тысячу, поэтому по конструктивным соображениям они объединяются в параллельные панели по 40 – 60 труб с необогреваемыми участками на входе и выходе. В зависимости от конструктивного выполнения панелей гидравлические режимы в них могут заметно отличаться от режимов работы труб внутри панелей, поэтому необходимо анализировать параллельную работу панелей. При правильной компоновке точек общего давления разбивка на панели повышает надежность за счет уменьшения тепловой неравномерности в отдельных параллельно включенных элементах, т. е. аналогична секционированию контура естественной циркуляции.

Таким образом, благоприятные гидравлические характеристики топочных панелей различной компоновки, получивших признание в котлостроении, возможны при определенных входных энтальпиях среды и массовой скорости. Для обеспечения умеренных значений гидравлической разверки и изменения общего расхода среды в элементах с горизонтальной и горизонтальнонаклонной навивкой при нестационарных режимах гидравлическая характеристика их в рабочей области должна быть достаточно крутой.

Гидравлические характеристики парогенерирующих элементов всех типов улучшаются (расширение области однозначности и возрастание крутизны) при увеличении энтальпии среды на входе и повышении рабочего

давления. Поэтому их следует проверять при номинальной и наименьшей возможной в эксплуатации энтальпии на входе, а при растопочных режимах, начиная с энтальпии 800 кДж/кг, вплоть до номинальной.

В развернутом витке, работающем в вынужденном перепаде давления всей панели, расход среды может оказаться меньше среднего, а температура на выходе из него чрезмерно высокой. Кроме того, при уменьшении массовой скорости в развернутом витке он может оказаться в области ухудшенного теплообмена и многозначности гидравлической характеристики. В этом случае устойчивость потока, может быть обеспечена, если перепад давления в контуре (панели) больше перепада давления в точке минимума гидравлической характеристики развернутого витка. При этом следует учитывать возможность увеличения перепада давления в точке минимума характеристики развернутого витка при повышении тепловой нагрузки.

Тепловая неравномерность в параллельных змеевиках может приводить к значительной гидравлической разверке и как следствие к росту температур среды на выходе из наиболее обогреваемых труб, особенно при пониженной нагрузке: последние и являются поэтому более опасными.

Резкое снижение расхода и повышение температуры среды в наиболее обогреваемых трубах многотрубного контура характеризует собой теплогидравлическую разверку, которая не зависит от многозначности. Основными параметрами, определяющими теплогидравлическую разверку, являются: давление, энтальпия на входе, приращение энтальпии, коэффициент тепловой неравномерности.

С повышением энтальпии среды на входе, приращения энтальпии и коэффициента тепловой неравномерности теплогидравлическая разверка увеличивается, может приобрести кризисный характер и привести к разрушению трубы. Так, например, при сверхкритическом давлении при входе в зону большой теплоемкости начинается более крутой рост удельных объемов среды, поэтому в трубах с повышенным обогревом значительно увеличиваются гидравлические потери и сокращается массовый расход.

При определенных условиях среда в развернутой трубе стремительно выходит на перегрев, расход падает, происходят гидравлическое «зажатие» и перегрев трубы вплоть до ее разрушения. Наиболее опасными с этой точки зрения являются режимы эксплуатации на малых нагрузках, при набросках теплоты, повышении тепловосприятости, перекосах в топке и т. п.

Исключением является вертикальная подъемная компоновка топочных экранов сверхкритического давления, при которой в условиях тепловой неравномерности в наиболее неблагоприятном режиме могут оказаться слабообогреваемые трубы из-за резкого уменьшения в них скорости движения потока или застоя. При докритическом давлении слабообогреваемые трубы выходят на застой или опрокидывание потока.

Общий характер теплогидравлической разверки при сверх- и докритических давлениях одинаков. С ростом давления разверка в области экстремумов уменьшается, а экстремальные значения входных энтальпий сдвигаются в большую сторону. Область повышенной теплогидравлической

разверки при сверхкритическом давлении совпадает с рабочей областью НРЧ, испытанию и наладке режима работы которой следует уделять большое внимание. По энтальпии на выходе из элемента область повышенной разверки при докритических давлениях соответствует зоне начала кипения, а при сверхкритических – зоне вблизи точки максимальной теплоемкости, т. е. там, где начинается наиболее интенсивное увеличение удельного объема.

Зона ухудшенного теплообмена возможна для любых давлений при больших тепловых нагрузках и относительно малых массовых скоростях среды в парогенерирующей трубе. При этих условиях массообмен между ядром потока и пристенной зоной может оказаться недостаточным для выравнивания энтальпий по поперечному сечению потока, в результате чего вблизи стенки трубы образуется зона среды с повышенной энтальпией, более высоким удельным объемом и низкой теплопроводностью. Все это приводит к ухудшению теплообмена и возможному повреждению труб.

Зона ухудшенного теплообмена сужается с ростом давления, массовой скорости и с уменьшением тепловой нагрузки. При докритическом давлении возможна зона ухудшенного теплообмена в области высоких паросодержаний при большой линейной скорости потока.

При неблагоприятном сочетании тепловой нагрузки и массовой скорости на горизонтальных участках труб наблюдается расслоение потока: вблизи верхней образующей концентрируется среда с повышенной энтальпией, высоким удельным объемом и низкой теплопроводностью. Это также может привести к повреждению труб. Повреждения труб из-за расслоения потока при сверхкритическом давлении не наблюдались.

Повышение мощности парового котла и топочного устройства требует более квалифицированной эксплуатации, так как повышаются удельные тепловые нагрузки, коэффициенты тепловой неравномерности и глубина возмущений (например, при включении и отключении более мощных горелочных аппаратов). Все это приводит к снижению запаса, прочности металла парогенерирующих труб и накладывает более жесткие требования на наладку и отработку надежных режимов эксплуатации.

В мощных котлах с газоплотными панелями возникает проблема уменьшения разности температур среды в стыкуемых панелях разных ходов, особенно при отключении ПВД. Появляется необходимость натурального определения температурных напряжений в стыкуемых панелях для разработки мероприятий по их ограничению. Снижение коэффициента избытка воздуха в газоплотных топках, особенно при сжигании газа и мазута, вызывает увеличение удельных тепловых потоков на топочные экраны и утяжеляет условия работы труб и плавников.

При регулировании нагрузки методом скользящего давления котел при снижении нагрузки переходит от сверхкритического на докритическое давление с двухфазной средой в парогенерирующих трубах. Двухфазная среда усиливает теплогидравлические разверки, появляется опасность расслоения пароводяной смеси в горизонтальных и слабонаклоненных трубах, возникает неравномерная раздача пароводяной смеси в коллекторах по параллельно

включенным трубам парогенерирующих элементов. Последнее дополнительно усиливает теплогидравлические разверки, увеличивает опасность появления зон ухудшенного теплообмена. Переход на режим регулирования нагрузки скользящим давлением пара, особенно газомазутных котлов, требует проведения предварительного расчетного анализа и экспериментальной проверки температурного режима труб топочных экранов при различных нагрузках.

При определенных условиях возможны циклические колебания расхода среды (колебательная неустойчивость) с амплитудой, зависящей от режимных параметров и конструктивных характеристик элемента, называемые пульсациями. Для горизонтальных контуров при входных энтальпиях 840 кДж/кг и выше ограничивающим фактором является колебательная неустойчивость, особенно для котлов среднего давления. Для котлов высокого и сверхвысокого давлений пульсации наблюдаются очень редко. Пульсации могут возникать в отдельных витках при неизменном тепловом и гидравлическом режимах котла, они появляются в результате изменения одного из режимных параметров в элементе и самопроизвольно не затухают. При установившихся пульсациях потока амплитуда изменения составляющих перепада давления и фазовый сдвиг между ними таковы, что общие потери давления в витке остаются почти постоянными. При этом расходы и другие параметры в параллельных трубах пульсируют в различных фазах. Период колебаний расхода (пульсации) между точками общего давления пропорционален времени прохождения потока по витку и может составлять десятки секунд и даже минуты. Пульсации потока в парогенерирующих элементах недопустимы, так как могут вызвать повреждение труб в результате перегрева металла или переменных температурных (усталостных) напряжений.

При сверхкритическом давлении пульсации в элементах котла появляются, если приращение энтальпии более 1460 кДж/кг, т. е. в практических установках они не имеют места, поскольку энтальпии не превышают энтальпий нормальных режимов работы.

Особую опасность представляют и потому требуют экспериментальной проверки переходные режимы работы котла. Опасен режим перехода с мазута на пыль, когда наблюдается кратковременный нерегулируемый выброс пыли в топку, вызывающий из-за резкого броска тепловой нагрузки колебания расхода рабочего тела. Резкие изменения тепловой нагрузки могут вызываться включением, отключением и переключением горелок. Неравномерное распределение тепловых потоков по ширине топки особенно сильно сказывается в котлах с вертикальными панелями, где наиболее опасным будет включение горелок, вызывающее несимметричное расположение ядра факела. В котлах с горизонтальным расположением труб более опасна тепловая неравномерность по высоте топки, особенно при концентрации максимума тепловых нагрузок в области конца экономайзерного участка. Глубокие нарушения общего теплового режима котла наблюдаются при включении обдувочных аппаратов, вызывающем иногда пульсацию расхода среды в витках НРЧ.

Экспериментальные и расчетно-аналитические исследования влияния динамических возмущений изменением тепловой нагрузки и расходом среды на развертки, связанные с многозначностью гидравлических характеристик, показывают, что результат определяется стационарным режимом, становившимся в конце процесса возмущения. Это объясняется инерционным (постепенным) изменением после динамического возмущения теплофизических параметров в развернутой трубе (по ее длине и главное во времени) вплоть до установившегося конечного состояния. Переходные процессы, связанные с динамическими возмущениями становятся более инерционными с повышением давления. Динамическое возмущение, связанное с кратковременным прекращением питания, в витках с входной энтальпией среды ниже точки максимальной теплоемкости может вызвать реализацию многозначности характеристики, если после возмущения будет восстановлен прежний режим питания.

В переходных режимах высокая чувствительность СРЧ и особенно ВРЧ является следствием в первую очередь того, что температуры среды на выходе из этих элементов (400 – 430 °С) лежат выше границы больших теплоемкостей. В этом диапазоне температур изменение приращения энтальпии среды из-за увеличения теплового потока (наброс) или при нарушении соотношения вода – топливо приводит к заметному увеличению температур среды. Повышение температур труб этих элементов определяется уменьшением коэффициента теплоотдачи из-за роста температуры среды, уменьшения расхода или увеличения теплового потока. Таким образом, возмущения нарушением соотношения вода – топливо должны быть ограничены и не превышать 10 – 11 %.

### **2.9.2 Режимы испытания топочных экранов прямоточных котлов**

Испытания топочных экранов прямоточных котлов проводятся на головном образце для выявления условий работы новых типов панелей и на эксплуатируемом котле в случае предполагаемых серьезных изменений режима работы (например, изменение вида топлива), а также для выяснения причин повреждения труб топочных экранов. В зависимости от целей испытаний перед началом их организации проводят тщательный расчетный анализ подлежащих экспериментальному изучению топочных панелей. При этом определяют массовые скорости среды, запасы надежности по устойчивости потока, гидравлическим и температурным разверткам, а также температурный режим труб, потери давления в элементах, необходимость установки дроссельных шайб и их размеры. Расчет, как правило, производят на каждом виде топлива для номинальной и наименьшей гарантированной заводом – изготовителем нагрузки котла, а также для растопочных режимов.

Поскольку основным методом анализа гидравлической работы обогреваемых элементов котла в настоящее время – является построение и анализ семейства гидравлических характеристик элемента (или элементов, включенных параллельно между точками одинакового давления) при различных сочетаниях конструктивных и режимных параметров, исследования

отличаются большой трудоемкостью и затрудняют обобщение получаемых результатов, так как необходимо фиксировать большое число исходных данных.

Наиболее важными работами по наладке и испытанию топочных экранов являются:

- наладка температурного режима поверхностей нагрева и выявление условий, вызывающих как кратковременные, так и длительные отклонения температуры металла труб от расчетных значений в стационарных и переменных режимах работы котла;

- исследование гидравлических характеристик, теплогидравлических разверок и условий появления опрокидывания и других видов гидродинамической неустойчивости;

- исследование условий возникновения расслоения и обеспечение равномерной раздачи пароводяной смеси;

- исследование условий возникновения пульсаций и изыскание способов их предотвращения;

- исследование коррозионной стойкости и длительной прочности металла труб поверхностей нагрева.

Наиболее теплонапряженной поверхностью являются панели НРЧ, поэтому при проведении испытаний им уделяют наибольшее внимание. В стационарных условиях испытания проводят в широком диапазоне нагрузок (от 40 – 50 % до 100 % номинальной), при разной температуре питательной воды (включенных и отключенных ОВД, отключенной одной из ступеней ПВД регенеративного подогрева), при различных (реально возможных) коэффициентах избытка воздуха в топке, различном сочетании работающих горелок и различных видах сжигаемого на электростанциях топлива.

В ряде случаев опыты начинают с растопочной нагрузки. На головных образцах котлов в программу следует включать оценку характера и размеров тепловых перекосов по газовому тракту котла, чувствительности к ним схемы пароводяного тракта.

В нестационарных условиях опыты проводятся при резких несбалансированных расходах воды и топлива, что имеет место прежде всего при регулировании котла. В диапазоне нагрузок от 40 – 50 до 100 % номинальной при включенных и отключенных ПВД опыты проводятся с возмущением расходом топлива при постоянном расходе питательной воды и возмущением расходом питательной воды при постоянном расходе топлива, а также изменением давления. Возмущение топливом можно осуществлять изменением его подачи через все работающие горелки, а также включением или отключением одной-двух горелок (разных в ряду и ярусах), а также мельничных систем. Переключения горелок и мельничных систем более чувствительны, так как эти местные возмущения влияют на тепловые перекосы по газовому тракту, осложняя работу пароводяной системы. Возмущения обычно составляют 20 – 25 % исходных значений, а продолжительность (от внесения до снятия возмущения) от 5 до 45 минут. Большие возмущения приближаются к аварийным. Возмущение водой наносят резким уменьшением

расхода воды. Рост температуры среды и металла в НРЧ при увеличении расхода топлива происходит с меньшим запаздыванием, чем при уменьшении расхода воды. Ограничением величины и продолжительности возмущений обычно является предельная температура пара, достигаемая в пароперегревательном тракте (за ВРЧ и ширмами). В испытаниях допускается кратковременное (на 2 – 5 минуты) повышение температур пара по отношению к расчетным до 50 °С за ВРЧ и далее.

При изменении нагрузки и вида топлива представляют интерес следующие режимы: нагружение после пуска; подъём нагрузки (1 – 3 МВт/мин); снижение нагрузки на всех видах топлива, могущих иметь место на данной ТЭС. Более сложными являются режимы изменения нагрузки с одновременным переходом на другой вид топлива. Например, при нагружении котла с одновременным переходом с мазута на пыль наблюдаются резкие, непродолжительные (2 – 3 мин) выбеги температур металла и среды экранных труб, вызванные нарушением соответствия вода – топливо из-за чрезмерного увеличения тепловыделения в топке при выбросе пыли из пылепитателей.

Быстрые разгрузка и нагрузка котла могут иметь место в аварийных случаях и сопровождаются нарушением соотношения вода – топливо. Для проверки надежности работы элементов пароводяного тракта в подобных ситуациях проводятся опыты со снижением за 1 мин расхода воды при имеющей место нагрузке до пускового расхода.

Опытная проверка и отработка режимов пуска из холодного состояния блока проводятся после длительного простоя, пуска, остывшего котла на неостывшую турбину, пусков из промежуточных тепловых состояний, т. е. после простоя 1 – 3 ч, 6 – 8 ч, из горячего резерва (простой до 50 минут). В связи с тем, что котел (после останова блока) расхолаживается быстрее турбины, наиболее тяжелым режимом является пуск холодного котла на неостывшую турбину при обходной пусковой схеме блока. В этом режиме пуска промперегреватель до толчка турбины и взятия нагрузки не охлаждается паром, что приводит к повышению температуры газов перед водяным экономайзером, энтальпии среды на входе в НРЧ и возможным повреждениям ее труб. Из-за неустойчивого регулирования возможно нарушение соотношения вода – топливо в режимах пуска и останова котла, поэтому проверка режима останова является важным пунктом программы испытаний.

Необходима экспериментальная проверка допустимой продолжительности перерыва питания котла водой, которая возможна при аварийном отключении работающего питательного насоса и автоматическом включении резервного (15 – 20 с), а также при ложном закрытии клапана регулирующих органов. Автоматическая защита отключает котел, когда расход питательной воды по любой из ниток уменьшается до определенного значения на время более 30 с.

Допустимая продолжительность перерыва питания должна быть экспериментально обоснована, так как необоснованный аварийный останов и последующий пуск котла создают серьезные осложнения и затраты в эксплуатации.

Допустимая продолжительность перерыва питания определяется температурным режимом наиболее теплонапряженной поверхности нагрева – НРЧ. Данные ряда опытов подтверждают возможность прекращения питания на 30 с при номинальной и на 60 с при 50 %-ной нагрузке.

Для котлов с пылеугольными топками при жидком шлакоудалении необходима опытная проверка надежности работы НРЧ в области ванны жидкого шлака при останове котла.

Исследования показали экономическую целесообразность перевода блоков сверхкритического давления при частичных нагрузках на пониженное (докритическое) давление. Основным лимитирующим фактором в этих режимах становится неустойчивость движения пароводяной смеси в испарительной части тракта. Кроме того, возникают трудности, связанные с пульсацией потока, неравномерной раздачей двухфазной среды в коллекторах.

При интенсивном и неравномерном шлаковании стен топки котла сверхкритического давления определение уровня допустимых массовых скоростей в НРЧ и выбор типа навивки должны производиться с учетом влияния шлакования на устойчивость гидродинамики.

### **2.9.3 Методы исследования топочных экранов прямооточных котлов**

Наименее благоприятные условия тепловой работы НРЧ могут быть определены по распределению падающих тепловых потоков в двух сечениях:

- по высоте топки при различной паропроизводительности и неизменном расположении работающих горелок;
- по ширине топки при различном расположении работающих горелок и постоянной производительностью котла.

Проверку устойчивости потока в трубах НРЧ и других панелях удобно проводить в период пуска или останова котла, когда резко изменяются параметры среды (массовая скорость, давление и др.) при работе по пусковой схеме. Особенно опасен режим перехода мазута на пыль.

Быстрое разгружение и поддержание нагрузки холостого хода в опытах осуществляются после предварительного перевода топки с пыли (при твердом рабочем топливе) на мазут путем уменьшения расхода воды до пускового и переводом части расхода пара на БРОУ. В этом режиме испытаний может возникнуть пульсация расхода среды, как правило, затухающая через 3 – 4 минуты.

При исследовании влияния перерывов питания дистанционно закрывают клапан дифференциального регулятора питания со щита управления при трех различных нагрузках котла.

Для изучения условий работы поверхностей нагрева в соответствии с целями испытаний разрабатывается схема измерений, которая позволяет определить тепловые разверки по змеевикам отдельных панелей, их тепловосприятости, температурный режим в обогреваемой зоне и гидравлический режим и в случае необходимости – напряжения, возникающие в плавниках экранов. Большое значение при испытаниях играет качество монтажа всех приспособлений схемы измерений.

Определение температуры металла труб в обогреваемой зоне и локальных тепловых потоков проводится при помощи температурных вставок ЦКТИ (рисунок 85). Вставка ЦКТИ имеет толщину стенки на лобовой образующей большую, чем толщина стенки экранной трубы.

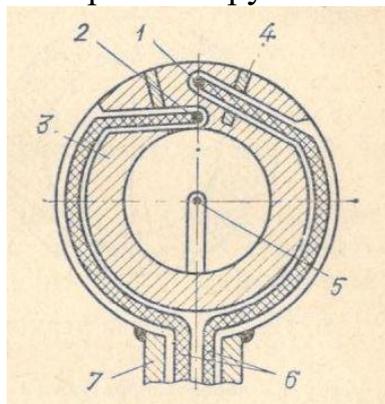


Рисунок 85 – Температурная вставка ЦКТИ (поперечное сечение)

1 и 2 – точки установки горячих спаев термопар по толщине стенки; 3 – корпус вставки; 4 – продольные прорези, заполненные изоляционным материалом; 5 – термопара в микрогильзе для измерения температуры среды; 6 – выводы термопар 1 и 2; 7 – штуцер для вывода термопар.

Толщина стенки выбирается такой, чтобы в радиальном направлении можно было расположить две термопары на разном расстоянии от наружной образующей. Термопары включаются по дифференциальной схеме. Растечка теплоты по стенке уменьшена наличием радиальных прорезей, заполненных огнеупорной массой. Максимальная ошибка определения локального теплового потока с помощью вставки ЦКТИ не более  $\pm 7\%$ . Однако эти вставки сложнее, требуют предварительной тарировки и имеют другие условия работы по сравнению с трубой (освещенность факелом и наружные загрязнения выступающей части вставки), что может отразиться на результатах.

Для цельносварных экранов, которыми оборудуются мощные котлы, целесообразно из-за простоты конструкции использовать температурные вставки ВТИ с термопарами, измеряющими температуру в лобовой образующей трубы, вершине плавника с огневой стороны и тыльной точке трубы. Разности температур зависят от воспринятого теплового потока, поэтому могут быть использованы для его определения. Для котлов с цельносварными экранами исключается проникновение горячих газов из топки в тыльную часть труб, поэтому термопары могут быть выведены достаточно надежно. Заделка термопар во вставке показана на рисунке 86.

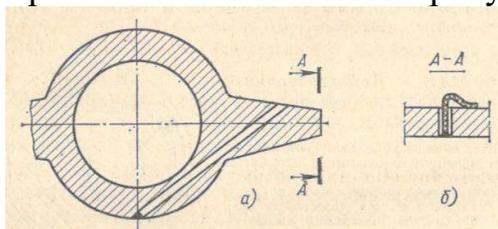


Рисунок 86 – Схема заделки термопар для вставки с плавниковыми трубами

а – в трубу на лобовой образующей для измерения температуры в лобовой образующей трубы; б – в вершину плавника с огневой стороны (для измерения температуры в вершине плавника с огневой стороны)

В стенке трубы выполняется косое сверление, соединяющее лобовую точку трубы с серединой плавника в тыльной части. Через это сверление заводится термопара. Выход сверления заваривается, затем в наплавленном металле делается отверстие 1 мм, в котором зачеканиваются электроды термопары. В плавнике термопару либо зачеканивают с огневой стороны либо приваривают в заглобления отдельными электродами (ВТИ).

ЦКТИ для плавниковых труб экранов применяет усовершенствованную вставку, но более сложную по сравнению с описанной выше.

Температурные вставки монтируются на некоторых трубах экранов в наиболее теплонапряженных участках панелей по ширине и высоте экранов. Наиболее теплонапряженные места определяются или по результатам расчетных проработок, или из анализа эксплуатации котла. Перед началом испытаний выполняют вырезки ряда образцов труб в местах сварки вставок; металл подвергают анализу, чтобы установить, не был ли металл перегрет.

Научно обоснованных норм установки числа вставок на топочном экране не существует. Необходимо стремиться к оптимальному количеству температурных вставок, так как их большое число усложняет схему экспериментального контроля, затрудняет обработку опытных данных, удорожает работы.

В случае недостаточного количества вставок можно не выявить опасных режимов и сделать неправильные выводы. Например, при наладке гидродинамики котла ТГМП- 114 (производительность корпуса 132 кг/с) по ширине панели каждого из двух потоков НРЧ в области максимальных тепловых нагрузок установлено по три температурные вставки. На головных образцах котлов вставки монтируются для каждого потока на трех-четыре отметках по высоте фронтальной, задней и одной боковой стен.

Падающие и отраженные локальные тепловые потоки по высоте и периметру топки могут быть определены с помощью переносных термозондов. Однако с увеличением единичной мощности котлов, их усложнением и особенно применением наддува затрудняется использование термозондов.

Температура металла труб в необогреваемой зоне определяется для выявления температурной разверки среды в экранных трубах. Температура среды в подводящих и отводящих трубах каждой поверхности нагрева, в обогреваемых трубах и необогреваемых трубопроводах определяется глубинными (гильзовыми) термопарами.

Расход среды в экранных трубах, определяется с помощью напорных трубок. Измерения выполняют через каждые 20 труб панели, как правило, только на головном образце котла при больших длинах коллекторов, большой гидравлической и тепловой неравномерностях экрана, когда имеются опасения

возникновения неустойчивого гидравлического режима работы экрана. Эти измерения на серийных котлах проводятся редко.

Перепад давления между отдельными коллекторами измеряется мембранными дифманометрами.

Давление рабочей среды в топочных экранах измеряется, как правило, в перепускных трубах или в коллекторах экранов образцовыми манометрами.

Тепловой поток, воспринимаемый топочным экраном, является одним из наиболее важных параметров, определяющих надежность работы котла. Тепловые потоки по высоте и периметру топки могут быть определены путем выделения калориметрических контуров в интересующих панелях. При сверхкритическом давлении с этой целью используются рабочие трубы экранов (их замена и самостоятельное питание не требуются, так как отсутствует двухфазный поток).

Наиболее полное исследование можно провести на экранных трубах с автономным питанием, так называемых автономных витках.

Для измерения температур и напряжений в стыкуемых панелях плавниковых экранов разных гидравлических ходов вырезают участок плавниковых экранов и на их место вваривают тензометрические термовставки.

На каждой термовставке, представляющей собой участок плавниковых экранов, соответствующий вырезанному, с необогреваемой стороны монтируют самокомпенсированные тензорезисторы с базой 5 мм. Их устанавливают для измерения упругих деформаций в продольном и поперечном направлениях на лобовой образующей двух средних труб, под углом  $45^\circ$  к ним и в вершинах прилегающих плавников. Термопары на термовставках устанавливают на обогреваемой и необогреваемой сторонах. Во всех термовставках измеряют температуру рабочей среды. Под двумя термовставками устанавливают температурные вставки для определения локального теплового потока. Описанное устройство достаточно сложно и используется при детальном исследовании панелей нового типа.

При проведении испытаний обязательно выполнение общих измерений, характеризующих режим работы топки и котла в целом. Важным является контроль за составом и температурой газа по ширине газохода поворотной камеры.

#### **2.9.4 Обработка экспериментальных данных и наладка надежной работы панелей топочных экранов**

По измеренным давлениям и температурам среды на входе и выходе из каждой панели, а также отдельных змеевиков (в которых производились измерения) расчетом определяют входные, выходные значения энтальпии, ее приращение, а также плотность среды.

Линейные скорости среды в трубах, в которых установлены напорные трубки, рассчитывают по формуле (38) при известной плотности среды, определяют массовую скорость в этих трубах и коэффициенты гидравлической разверки в них по (39). При известных конструктивных характеристиках элемента и плотности среды в каждом гидравлическом ходе находят потери ни-

великого давления, а затем гидравлические потери, по которым определяют суммарные коэффициенты сопротивления и коэффициенты гидравлической неравномерности.

$$\omega = \kappa_{Н.Т} \sqrt{\frac{\Delta h \cdot (\rho_{ж} - \rho_{пр}) \cdot 2g}{\rho}} \quad (38)$$

где  $\omega$  – скорость однофазного потока, м/с;  
 $\kappa_{Н.Т}$  – коэффициент напорной трубки;  
 $\Delta h$  – видимое показание дифманометра, м;  
 $\rho_{ж}$  и  $\rho_{пр}$  – плотность соответственно замыкающей жидкости в дифманометре и воды над ней, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\rho$  – плотность воды в трубах циркуляционного контура, кг/м<sup>3</sup>.

$$\rho_r = \frac{G_T}{G} \quad (39)$$

где  $\rho_r$  – коэффициент гидравлической разверки;  
 $G_T$  – расход среды в отдельной трубе;  
 $G$  – средний расход в трубах.

По опытным данным для каждого режима работы котла находят характерные точки, которые наносят на расчетную гидравлическую характеристику, причем массовая скорость в контуре  $pw = G/f$ , где  $G$  – общий массовый расход через контур.

Графические зависимости анализируемых величин при стационарных режимах нередко изображаются как функции нагрузки (или другого, интересующего практику параметра), а при нестационарных режимах — как функции времени. При различных возмущениях (например, изменением тепловой нагрузки и расхода среды) на графиках наносят изменение во времени сопротивления, энтальпии на выходе, массовой скорости, коэффициента тепловой неравномерности.

Полученные в опытах данные о разверках, неравномерностях, изменениях параметров от различных факторов и во времени тщательно анализируются, и разрабатываются рекомендации, направленные на повышение надежности топочных экранов и уточнение нормативных материалов.

Устойчивость НРЧ котлов докритического давления в отношении разверки, несмотря на большие приращения энтальпии, может быть обеспечена благодаря работе в относительно благоприятной области входных энтальпий; применению навивки Рамзина, обеспечивающей минимальные тепловые неравномерности; использованию шайбования и ступенчатых витков.

Во многих случаях при дросселировании, которое требуется для предотвращения пульсаций, обеспечивается необходимая крутизна характеристики и отсутствие теплогидравлических разверок.

В подъемно-опускных элементах с нижним раздающим коллектором однозначность и необходимая крутизна характеристики обеспечиваются для котлов любого давления при числе ходов более десяти; при меньшем числе ходов может возникнуть необходимость реконструкции навивки.

Надежность гидравлического режима U-образных панелей и с подъемно-опускным движением (при верхнем расположении коллекторов) при малом (меньше восьми) числе ходов можно обеспечить ограничением минимальных массовых расходов. Вертикальные панели имеют благоприятную гидравлическую характеристику и малочувствительны к тепловым возмущениям при правильном выборе скоростей и энтальпий на входе в них.

Надежный температурный режим в развернутых витках может быть обеспечен изменением компоновки элемента либо дросселированием витков на входе. Если тепловая неравномерность в элементе определяется конструктивной нетождественностью, возможно применение неравномерного дросселирования, когда в трубах (элементах) с большим тепловосприятием устанавливаются шайбы большего диаметра. Однако при сверхкритическом давлении шайбование в большинстве случаев неприменимо, так как большое увеличение сопротивления НРЧ невыгодно и часто недопустимо по располагаемому напору питательного насоса.

Реконструкцией панелей НРЧ можно существенно уменьшить гидравлические и температурные разверки. Необходимо уменьшать число параллельно включенных элементов, заменяя их на последовательное с установкой промежуточных коллекторов. Последние должны быть расположены так, чтобы в них было обеспечено перемешивание среды, а конструкция раздающей системы учитывала ее свойства.

Выбор массовых скоростей и тепловосприятий панелей для каждой схемы их конструктивного выполнения индивидуален, определяется расчетной и опытной проверкой и зависит от вида сжигаемого топлива и топочной камеры и организации сжигания топлива, определяющих средние и местные тепловые потоки и тепловые неравномерности.

Для обеспечения надежности любой схемы экранов с минимальными затратами на собственные нужды важным является создание и наладка топочного устройства, обеспечивающего наиболее равномерный обогрев всех поверхностей топки и отдельных ее участков, исключение касания факелом топочных панелей. При многоярусном расположении горелок умеренной производительности могут быть уменьшены местные и тепловые потоки, что особенно важно для мазутных топков. Кроме того, в этом случае имеется возможность регулирования производительности котла отключением отдельных горелок без заметного увеличения тепловой неравномерности. Снижения местных удельных нагрузок экранов при большом расчетном теплонапряжении сечения топки можно добиться изменением числа и схемы

размещения горелок, организацией рециркуляции газов в зону наибольших температур через специальные сопла или горелки.

Чувствительность топочных панелей к теплогидравлическим разверкам повышается на малых нагрузках, набросах теплоты (например, включение горелок), повышении тепловосприятости, перекосах в топке и т. п. Для предотвращения теплогидравлических разверок необходимо снизить локальные тепловые потоки, устранить наброс факела на экранные поверхности, уплотнить топку, устранить несоответствие полей распределения тепловых потоков в топочной камере и схемы включения экранных панелей НРЧ. Конструктивные и режимные мероприятия (аналогичные указанным выше) должны быть направлены на снижение тепловой неравномерности, уменьшение приращения энтальпии в панелях, прежде всего установкой промежуточных смешивающих коллекторов и перераспределением расхода топлива между ярусами горелок, а также шайбованием, как правило, в подводящих трубопроводах.

Постоянное и одинаковое шайбование всех труб уменьшает относительное значение переменного и неодинакового по длине трубы гидравлического сопротивления, зависящего от обогрева, и тем самым тормозит гидравлическое зажатие горячих труб. Стабилизация расходов среды дросселированием становится ощутимой при сопротивлении шайб, близком к сопротивлению поверхности нагрева.

Для уменьшения тепловых неравномерностей целесообразны навивки, охватывающие четверть периметра топки, например половину ширины бокового и половину ширины заднего экранов и т. д. Теплогидравлическая разверка существенно уменьшается при применении панелей с подъемным движением среды (вертикальных, без опускных труб), которые находят широкое применение в котлах сверхкритического давления мощностью 500 МВт и более. Благоприятные (допустимые) приращения энтальпии и тепловой разверки должны быть подтверждены экспериментально. Превышение этих значений может привести к разрушению труб.

Элементы пароводяного тракта котла с большими входными энтальпиями в номинальных условиях, имеющие, как правило, однозначные гидравлические характеристики, при низких входных энтальпиях и малых тепловых нагрузках могут иметь многозначные гидравлические характеристики. Для обеспечения устойчивости при работе в области многозначности необходимо поддерживать массовую скорость на внешней ветви характеристики, соответствующую перепаду давления в точке минимума гидравлической характеристики развернутой трубы с определенным коэффициентом запаса.

Расход питательной воды на котел при пуске должен определяться по нижнему пределу массовой скорости в лимитирующем элементе. По данным промышленных испытаний, при пуске котла следует принимать коэффициент запаса, учитывающий эксплуатационные отклонения расхода и тепловых нагрузок от средних значений, для которых выполнены расчеты гидравлических характеристик элемента и развернутой трубы, равный 1,5, для эксплуатационных режимов 1,2 – 1,3. Однако выполнение этих условий может

оказаться недостаточным для обеспечения устойчивости при таком сильном динамическом возмущении, как кратковременное прекращение движения среды (например, прекращение питания котла на 15 – 20 с при аварийном переходе с одного питательного насоса на другой).

Особого внимания заслуживает вопрос о разверках из-за многозначности гидравлических характеристик параллельных контуров с отводящими опускными необогреваемыми трубопроводами. Неравномерность обогрева экранов приводит к различию нивелирных составляющих перепада давления и гидравлических потерь не только в поверхностях нагрева, но и в необогреваемой опускной системе. Перенос смесительного коллектора в верхнюю точку параллельных контуров обеспечивает перевод их гидравлических характеристик из многозначных в однозначные. Этот пример убеждает в серьезном влиянии геометрических отметок размещения коллекторов на гидравлическую характеристику.

Уменьшение числа ходов и значительное снижение разности температур в стыкуемых панелях газоплотных экранов могут быть достигнуты при применении комбинированной циркуляции, когда при нагрузке котла ниже 80 % номинальной часть потока перед встроенной задвижкой отбирается и нагнетается на вход в НРЧ. Комбинированная циркуляция способствует снижению и теплогидравлических разверок, так как уменьшается приращение энтальпий в парогенерирующих элементах. Применение комбинированной циркуляции в пусковых режимах позволяет сократить прямоточный расход до 10 – 15 %. Однако применение комбинированной циркуляции создает проблемы при регулировании котла сверхкритического давления на скользящих параметрах, при этом усложняются способы предотвращения интенсивных внутренних отложений из-за значительного увеличения энтальпий на входе в парогенерирующие элементы для газомазутных топок с высокими тепловыми нагрузками. Особое значение приобретает разработка смесительных устройств, которые должны при минимальных гидравлических потерях обеспечить смешение циркулирующего и основного потоков. Снижение разности температур в стыкуемых панелях может быть достигнуто также байпасированием первого хода НРЧ.

Одним из критериев надежности температурного режима плавниковой трубы является тот факт, что температура в вершине плавника должна быть меньше или равна температуре лобовой образующей собственно трубы и не превышать расчетную температуру по условиям длительной прочности и жаростойкости. По условию жаростойкости экранные трубы выполняются обычно с большим запасом, если исключить режимы ухудшенного теплообмена и отсутствует интенсивное образование внутренних отложений окислов железа или других примесей воды.

Возможность возникновения пульсаций уменьшается с увеличением давления и массовой скорости, а также при уменьшении удельного тепловосприятия элемента. В горизонтальных контурах докритического давления возможно возникновение пульсаций при входных энтальпиях 840 кДж/кг и выше. Эффективный способ предотвращения пульсаций – увеличение

сопротивления экономайзерной части витков (ступенчатые витки и шайбы на входе в них при докритическом давлении).

При интенсивном и неравномерном шлаковании стен топки котла сверхкритического давления в слабообогреваемых панелях с подъемным движением при относительно небольших массовых скоростях  $1200 \text{ кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$  и номинальной нагрузке возможны застой и повреждение металла труб при пониженных нагрузках блока. При сжигании шлакующих топлив необходимы проектирование или реконструкция существующих топочных панелей на увеличенные массовые скорости ( $2000 \text{ кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$  при номинальной нагрузке), целесообразно применение навивки горизонтального типа или многоходовых, при которых исключаются застойные явления.

При переводе действующих энергоблоков на скользящие параметры лимитирующим фактором в большинстве случаев оказывается теплогидравлическая разверка между параллельными подпотоками, если таковые имеются в схеме, реже (при больших массовых скоростях, характерных для экранов газомазутных котлов) – пульсация. Влияние раздачи двухфазной среды в промежуточных коллекторах является менее значительным благодаря умеренному приращению энтальпии в отдельных ступенях многоступенчатых схем, которым свойственны такие коллекторы.

Относительно простым и эффективным средством уменьшения теплогидравлических разверок и пульсаций являются гидродинамические перемычки между полупотоками в сочетании с шайбованием подводящих труб (с небольшим сопротивлением, равным  $0,28 \text{ МПа}$ ), что позволяет обеспечить разгрузку блока сверхкритического давления на скользящем давлении до  $40 \%$ .

При отсутствии нарушений гидравлического режима надежность работы поверхностей нагрева котла на скользящем давлении заметно возрастает в связи со снижением давления в пароводяном тракте, а также с уменьшением температуры среды в поверхностях нагрева.

При динамических возмущениях тепловой нагрузкой и расходом среды предотвращение разверок, связанных с многозначностью гидравлических характеристик, обеспечивается, если для установившегося после возмущения состояния перепад давления в элементе будет выше перепада давления в точке минимума гидравлической характеристики развернутой трубы. Таким образом, знание статических гидравлических характеристик для режимов работы до и после нанесения возмущения достаточно для разработки мероприятий, обеспечивающих надежность работы элемента в период наносимых возмущений.

Наладочные работы, включающие совершенствование конструкции и режима топочных экранов, должны обеспечить такой тепловой режим работы труб и гидравлический режим пароводяного тракта, чтобы при тепловосприятии лобовой образующей трубы, равном падающему тепловому потоку, температура экранных труб была вне области ползучести металла и было обеспечено также отсутствие газовой коррозии и внутренних отложений.

## 2.10 Испытания и наладка пароперегревателей паровых котлов

### 2.10.1 Анализ проектных и эксплуатационных данных пароперегревателя до проведения испытания

Пароперегреватели в паровых котлах (высокого и сверхкритического давлений) воспринимают больше половины теплоты, подводимой к теплоносителю. Металл труб пароперегревателя работает в наиболее тяжелых температурных условиях, поэтому доля повреждаемости труб пароперегревателей достаточно высока. Проведение испытаний и наладки пароперегревателей актуально как для головных образцов котлов, так и для находящихся в эксплуатации.

Испытаниям для выявления причин отклонения температуры перегретого пара от нормы и причин аварийного состояния должны предшествовать анализ и изучение проекта пароперегревателя, особенно его тепловых и гидравлических расчетов, а также изучение режимов работы и всех происшедших аварий с испытуемым объектом.

При изучении проекта следует обращать особое внимание на расчетное распределение тепловосприятий между отдельными частями (радиационной, ширмовой, конвективной, отличающимися характером обогрева), ступенями и секциями перегревателя (последние отличаются взаимным расположением в газовом тракте). При ознакомлении с проектом наиболее детально изучаются элементы и компоновочные схемы, впервые примененные на изготовленном паровом котле. Для разработки программы испытаний и системы измерений следует четко представить вопросы, подлежащие проверке во время проведения опытов, особенно применительно к новым конструктивным решениям. Основные показатели надежности поверхности нагрева проверяются расчетом. Гидравлический расчет проводят при номинальной и пониженных нагрузках котла, а также при растопочном режиме. При этом для каждого элемента пароперегревателя определяют массовые скорости, гидравлические разверки, потерн давления, запасы надежности по температурному режиму труб и застою пара.

Гидравлическая характеристика пароперегревателей рассчитывается для определения перепада давления и распределения расходов пара по параллельным потокам в следующих случаях: при сложной компоновке пароперегревателя (например, с несколькими параллельными секциями, резко различающимися по конструкции и обогреву), анализе повреждений, проверке пароперегревателя на растопочных режимах, сравнении методов регулирования перегрева.

Перепады давления в пароперегревателе,  $\Delta P_{\Pi}$ , определяются как сумма сопротивлений всех его трубных элементов, регуляторов перегрева, паросепарационных устройств и арматуры

$$\Delta P_{\Pi} = \Delta P_{\text{ЭЛ}} + \Delta P_{\text{СЕП}} + \Delta P_{\text{РЕГ}} + \Delta P_{\text{АРМ}} \quad (40)$$

где  $\Delta P_{\Pi}$  – перепады давления в пароперегревателе, Па;

$\Delta P_{\text{ЭЛ}}$  – сопротивление трубных элементов пароперегревателя, Па;  
 $\Delta P_{\text{СЕР}}$  – сопротивление паросепарационных устройств, Па;  
 $\Delta P_{\text{РЕГ}}$  – сопротивление регуляторов перегрева, Па;  
 $\Delta P_{\text{АРМ}}$  – сопротивление арматуры, Па;

Перепады давления в элементах (ступенях, секциях) перегревателя, Па, находятся по выражению

$$\Delta P_{\text{ЭЛ}} = \Delta P_{\text{ТР}} + \Delta P_{\text{М}} + \Delta \bar{P}_{\text{КОЛ}} \pm \Delta P_{\text{НИВ}} \quad (41)$$

где  $\Delta P_{\text{ЭЛ}}$  – перепады давления в элементах, Па;  
 $\Delta P_{\text{ТР}}$  и  $\Delta P_{\text{М}}$  – потери давления от трения и в местных сопротивлениях (в том числе в дроссельных шайбах), Па;  
 $\Delta \bar{P}_{\text{КОЛ}}$  – разность потерь давления в коллекторах для средних труб элемента, Па;  
 $\Delta P_{\text{НИВ}}$  – нивелирный перепад давления, Па, который учитывается только при расчетах гидравлической разверки между трубами одноходовых панелей радиационных и ширмовых перегревателей в котлах с давлением выше 10 МПа и при значительной тепловой неравномерности между трубами.

Полный перепад давления в перегревателях при сложной их компоновке определяется по предварительно рассчитанным гидравлическим характеристикам.

Гидравлическая разверка в пароперегревательных элементах вызывается изменением давления вдоль коллекторов, различием полных коэффициентов сопротивления и тепловосприятливости труб, нивелирных перепадов давления в коллекторах и трубах. При расчете перегревателя со сложной компоновкой коэффициенты гидравлической разверки следует определять по гидравлическим характеристикам.

Обследуя перегреватель эксплуатируемого котла, необходимо выполнить следующие работы: изучить состояние труб с внутренней и наружной сторон; осмотреть неповрежденные участки труб, делая вырезку образцов, которые разрезаются по оси; составить план расположения пораженных и претерпевших ранее аварию труб, чтобы выявить закономерности в повреждениях; установить, имеется ли изменение диаметра труб (наличие крипа), при помощи калибров в холодном состоянии котла; рассчитать гидравлическую разверку и температуру стенки труб ненадежного в эксплуатации элемента перегревателя. По возможности точно представить себе влияние состояния топки и топочного режима на причины аварийного состояния перегревателя и отклонения температуры перегретого пара от расчетных значений во всех эксплуатационных режимах работы котла. По вахтенным журналам, регистрационным лентам щитовых приборов, аварийным картам и опросу персонала установить влияние режимных факторов и состояния котла на температуру пара, а также выявить, нет ли совпадений моментов разрыва труб с

изменением нагрузки котла и впрыскивающих устройств, коэффициента избытка воздуха в топке, шлакованием топочных экранов, изменением режима работы топки (в частности, схемы работающих горелок и положения факела в топке), качества и температуры питательной воды и т. п.

Всестороннее изучение проектных и расчетных материалов перегревателя головного образца котла и детальное обследование перегревателя эксплуатируемого котла позволяют грамотно и целенаправленно разработать программу испытаний, не перегружая ее ненужными работами и максимально сокращая объем измерений с сохранением надежности результатов опытов.

Испытания перегревателей головного образца котла проводятся со снятием тепловой и гидравлической характеристик, а также статических характеристик регулирования. На типовых котлах обычно снимают температурные и регулировочные характеристики, особенно при смене топлива, когда возрастает общий уровень перегрева пара или имеет место шлакование; повышении параметров пара; расширении интервала регулирования нагрузок котла за пределы, предусмотренные заводом. Могут проводиться испытания для выбора оптимальных размеров и соотношений впрысков, а также для оценки или выбора иных средств регулирования температуры перегрева пара. Испытания проводятся для проверки надежности работы пароперегревателей в эксплуатационных условиях, оценки его работы после реконструкции или выявления причин аварийности. Объем конкретных исследований зависит от поставленной задачи.

Трубы и коллекторы перегревателей находятся под воздействием высоких температур и внутреннего давления рабочего тела. Кроме того, трубы омываются высокотемпературным коррозионно-активным потоком газов. Все это приводит к тому, что металл этих элементов работает на верхнем пределе по условиям ползучести и окалинообразования.

Жаропрочность сталей обычно характеризуется пределами ползучести и длительной прочности, определяемыми стандартными методами. Для металла труб перегревателей и паропроводов допустимая скорость ползучести не более 1 % (для трубы 1 % ее диаметра) за 100 тыс. ч работы. В процессе ползучести жаропрочные стали могут терять пластичность и хрупко разрушаться. Поэтому в условиях длительного действия температуры и напряжений необходимо определять изменение прочности и пластичности этих сталей, доводя образцы до разрушения.

Предполагается, что срок службы труб (их ресурс) должен составлять 100 тыс. ч, или около 15 лет. Повышение температуры металла вызывает сокращение срока его службы, которое можно оценить по формуле Ларсена-Миллера

$$T_1 (20 + \lg \tau_1) = T_2 (20 + \lg \tau_2), \quad (42)$$

где  $T_1$  и  $T_2$  – соответственно расчетная и действительная температуры стали, К;

$\tau_1$  и  $\tau_2$  – соответственно расчетный ( $10^5$  ч) и действительный срок службы металла, ч.

В условиях длительной работы металла жаропрочность определяется также и жаростойкостью, т. е. способностью противостоять коррозионному воздействию среды (пара, газов). В случае непрерывного окалинообразования толщина стенки трубы уменьшается, что в свою очередь приводит к повышению действующих напряжений и изменению условий безопасности работы. Для каждой марки стали существует определенная температура, выше которой начинается интенсивный процесс окисления под действием агрессивных дымовых газов. Жаропрочные стали должны иметь высокое сопротивление усталости (в том числе термической) и эрозии.

При расчетах на прочность исходным является предел длительной прочности при заданной температуре. Однако в условиях эксплуатации процесс ползучести протекает при переменных температурах и напряжениях, определяющих развитие в металле усталостных явлений, которые приводят к преждевременному разрушению труб. Совместное действие на металл явлений ползучести и усталости представляет собой сложный процесс.

При оценке температурного режима элементов пароперегревателя в условиях пуска котла обычно исходят из двух главных характеристик: скорости изменения и достигаемого верхнего предела температуры. Допустимое значение скорости изменения температур в необогреваемых толстостенных элементах (коллекторы, пароперепускные трубопроводы) и возникающих при этом градиентов температур оценивают по анализу малоциклового усталости слабых мест.

### **2.10.2 Экспериментальные исследования пароперегревателей**

Одной из важнейших задач испытаний является снятие статических характеристик пароперегревателя в целом и отдельно каждой его ступени, части. Проведению опытов должна предшествовать тщательная наладка топчного режима, а именно: выбор рациональной схемы работающих горелок, обеспечение равномерного распределения топлива и воздуха между ними, выбор соотношения расходов первичного и вторичного воздуха, обеспечение необходимой крутки воздуха, оптимальной тонкости помола пыли и в конечном итоге расчетных потерь теплоты от химической и механической неполноты сгорания.

Статическими характеристиками пароперегревателя в целом являются зависимости условной (приведенной) температуры пара от нагрузки котла при оптимальном коэффициенте избытка воздуха в топке и коэффициента избытка воздуха при различных нагрузках. Под условной (приведенной) температурой перегретого пара понимают температуру, которую имел бы пар при отключенных средствах регулирования. Статические характеристики перегревателя позволяют судить о наиболее тяжелом режиме работы котла с точки зрения температуры металла труб и о том, в какой степени удастся поддерживать расчетный перегрев во всем необходимом интервале нагрузок, не накладывая при этом ограничений, препятствующих экономичному ведению топчного процесса. В последнее время при построении статических характеристик вместо условной температуры пара строятся приращения

температур пара по ступеням и перегревателя в целом в зависимости от указанных параметров, позволяющие судить о соответствии поверхности нагрева ступеней требованиям. Для прямоточных котлов подобные характеристики возможны при фиксированной точке начала перегрева.

В стационарном режиме опыты проводятся обычно в диапазоне нагрузок от 50 до 100 % номинальной. Минимальная нагрузка устанавливается в зависимости от конкретных условий на электростанции и типа топочного устройства. При проведении опытов, особенно на головных образцах котлов или при изменении марки топлива, могут встретиться затруднения в достижении номинальной нагрузки или необходимого коэффициента избытка воздуха из-за повышения температуры пара сверх расчетной. Опыты проводятся при четырех – пяти нагрузках и трех – четырех значениях коэффициента избытка воздуха при каждой нагрузке, начиная с нагрузки 70 – 90 % номинальной как более надежной с точки зрения получения конечного результата. Если при номинальной нагрузке не удастся построить по данным опыта статическую характеристику во всем диапазоне изменения параметра, то ее экстраполируют, сохраняя характер кривой, полученный при пониженной нагрузке. Статические характеристики обязательно строятся при различной температуре питательной воды (включенных и отключенных ПВД).

Для мощных паровых котлов большое значение приобретает изучение влияния на статические характеристики перегревателя различных схем подачи топлива и воздуха по горелкам, особенно при многоярусном их расположении. Если необходимо решить вопрос о том, за счет какой части или ступени перегревателя следует изменить его тепловосприятие, а также при более углубленном изучении работы перегревателя определяют температуры в промежуточных точках между частями и ступенями перегревателя. При изучении статических характеристик регулирования температуры пара, т. е. зависимости температуры пара после пароперегревателя от положения регулирующего органа, следует иметь в виду важность оценки влияния на перегрев всех средств регулирования, которыми оборудован котел (пароохладители, поворотные горелки, переключение ярусов горелок, рециркуляция газов и др.).

Основной характеристикой радиационной части пароперегревателя является зависимость температуры стенки от нагрузки котла при оптимальных параметрах топочного процесса и средствах регулирования перегрева, а также зависимость температуры стенки от коэффициента избытка воздуха. На надежность работы радиационной части перегревателя оказывают большое влияние схема работающих горелок и положение факела в топке, определяющие локальные тепловые потоки на перегреватель. Изменение коэффициента избытка воздуха влияет на интенсивность излучения и положение факела в топке. При исследовании радиационных перегревателей должны быть изучены вариации локальных тепловых потоков при различных схемах подачи топлива и воздуха по горелкам независимо от нагрузки котла и избытка воздуха в топке.

В прямоточных котлах отключение горелки или переход с одной горелки на другую вызывает серьезные возмущения пароводяного тракта, которые также должны быть объектом изучения. При исследованиях радиационных перегревателей барабанных котлов должны быть изучены режимы при повышенных расходах воды на впрыски (например, при общей завышенной поверхности пароперегревателя или питании котла водой с температурой ниже расчетной), так как при этом сокращается массовый расход пара через радиационный перегреватель, включенный до мест подачи воды на впрыски.

Важной задачей испытания пароперегревателя является снятие его тепловой характеристики, определяющей надежность работы труб. Пароперегреватель считают работающим надежно, если при всех стационарных и переходных режимах температура стенки трубы в любой точке его поверхности нагрева ниже максимально допустимой температуры, определенной из механического расчета трубы на прочность.

Максимально допустимая температура зависит от толщины стенки и марки стали. Средняя температура по ее толщине влияет на сопротивление ползучести. Наружная температура стенки, влияющая на сопротивляемость окислению, не должна превышать задаваемого предела. Необходимо проводить опыты для выяснения причин и определения значений температурных разверок и коэффициентов тепловой разверки. Эти разверки могут быть вызваны неоднородностью газового поля из-за конструктивных особенностей котла (например, взаимной ориентацией труб и поля температур) или режима его работы, а именно: схемы подачи топлива и воздуха через горелки, состояния и характеристик дымососов, явлений шлакования и золового заноса и т. п.

Причиной тепловых разверок могут быть гидравлические особенности секции (подводы и отводы пара, коллекторы, змеевики). Благоприятным распределением пара по отдельным змеевикам является такое, при котором обеспечивается не равенство скоростей пара в трубах, а одинаковые значения конечных температур пара на выходе из них.

Надежность температурного режима перегревателя, удовлетворительная при номинальном давлении, может оказаться пониженной при промежуточных давлениях, например в режиме пуска для радиационной и ширмовой частей пароперегревателя. Следует иметь в виду, что в радиационной части перегревателя температурная (и тепловая) разверка на выходе из труб не дает прямых указаний на то, какие трубы работают в опасных условиях. Местный перегрев металла из-за удара в трубы факела, разрыхления и выпучивания в сторону топки отдельной трубы, отслоения шлака или удаления его обдувкой может даже сочетаться с общим недогревом пара в данной трубе. Максимумы локальных тепловых потоков распространяются на ограниченную поверхность, вызывают местный перегрев металла, но не дают существенного подогрева пара. Анализ температурного режима стенки следует начинать с задания наиболее тяжелых условий, т. е. таких, которые заведомо хуже имеющих место в эксплуатации. Если выяснится, что температуры металла при этом ниже допустимых, дальнейшие исследования становятся ненужными.

Важной задачей испытаний является получение отдельных точек гидравлических характеристик панелей и секций перегревателя, нанесение их на расчетные и определение по гидравлическим характеристикам коэффициентов гидравлической разверки. Анализ причин гидравлической разверки в элементах перегревателя (из-за изменения давления вдоль коллекторов, различия полных коэффициентов сопротивлений и тепловосприятливости труб, нивелирных перепадов давления в коллекторах и трубах) ведется на основании данных опытов о перепадах давлений.

*Причинами разрушения металла перегревателя могут быть:*

- несоответствие прочностных характеристик металла труб принятым при проектировании;
- наружная и внутренняя коррозия металла, перегрев сверх допустимой величины или циклически действующие термические напряжения;
- дефекты изготовления труб или их заводской или монтажной сварки;
- недостатки конструкции отдельных узлов и гидравлической схемы элемента перегревателя;
- недостаточная отмывка или продувка паром после кислотной промывки;
- повышенные термические напряжения из-за больших температурных градиентов в цельносварных радиационных панелях и ширмах из плавниковых труб.

Перед организацией испытания для выяснения причин повреждения труб перегревателя делают вырезки образца из поврежденных труб. С целью исключения возможности разрушения из-за ошибочной сварки трубы из менее жаропрочной стали для вырезанного образца определяют марку стали, например стилископированием или иным методом. По образцам, вырезанным из поврежденной трубы вне зоны обогрева, визуально устанавливают дефекты изготовления трубы, например различную толщину стенок, вкрапление шлака, расслоение металла и т. п.

В специальной лаборатории проводятся металлографические исследования поврежденного участка трубы и неповрежденного вне зоны обогрева для конвективных перегревателей, с лобовой и тыльной сторон трубы – для радиационных перегревателей.

В конвективных перегревателях при нормальной эксплуатации разность температур между стенкой и паром невелика, и поэтому структура металла в обогреваемой и необогреваемой частях трубы одинакова.

Изменение структуры (размер зерна, сфероидизация перлита, графитизация и др.) свидетельствует о росте разности температур и является основанием для выяснения причин, вызывающих локальный перегрев змеевика.

В радиационных перегревателях разность температур стенки по лобовой и тыльной образующим трубы всегда значительна, различие структур металла неизбежно и служит показателем характера теплового режима трубы.

Обычно исследования позволяют установить причину повреждений, но отличаются большой трудоемкостью, длительностью и высокой стоимостью работ.

В некоторых случаях (при частичной закупорке труб сварочным гратом,

эрозионном износе и т. п.) всесторонние испытания могут не вскрыть причин повреждений. Причины повреждений могут быть установлены при проведении опыта, ориентированного на выяснение особенностей объекта, свойственных принятой гипотезе о причинах повреждений. Объем, длительность и затраты на такие исследования значительно меньше предыдущих.

Предположительная совокупность явлений и процессов, вызвавших повреждение, выдвигается на основании анализа всех известных факторов, в число которых обычно входят топография и периодичность разрушений, сведения о металле, показания штатных приборов, состояние топки и топочный режим, расчетные данные о гидравлической разверке и температуре стенки и т. п.

Статические характеристики перегревателя и его элементов не дают полного представления об условиях тепловой его работы и максимальных температурах труб. В действительности котел испытывает изменения нагрузок и режимов, в нем происходят периодические возмущения, вызываемые колебаниями в подаче топлива, его свойствах, включением и отключением ПВД и т. д. Переходные режимы являются постоянным состоянием котла, а равновесные (статические) – исключением. В переходных режимах температуры труб отдельных элементов перегревателя могут превышать расчетные их значения. Особенно тяжелый режим работы перегревателя может возникнуть при пуске из различных тепловых состояний котла и останове. Поэтому испытания должны включать исследования условий работы перегревателя в режимах пусков и при останове котла и снятие динамических характеристик при наиболее частых в эксплуатации возмущениях.

При отработке допустимой скорости пуска котла из различных тепловых состояний особое внимание следует обратить на температурный режим работы труб радиационного, ширмового, конвективного перегревателей барабанных котлов, охлаждаемых собственным паром; труб ширмового и конвективного перегревателей прямоточных котлов, работающих в первый период пуска на обеспаренном режиме; труб промежуточного перегревателя всех котлов при однобайпасной пусковой схеме, когда охлаждение промперегревателя осуществляется только паром, поступающим из турбины. Работу пароперегревателя изучают путем нанесения наиболее часто встречающихся в эксплуатации возмущений:

- подъемом и снижением нагрузки на всех видах топлива, сжигаемого на ТЭС;
- расходом топлива, например изменением схемы подачи топлива и воздуха через горелки;
- переходом с одного вида топлива на другое (эти возмущения в наибольшей степени отражаются на работе радиационной и ширмовой частей перегревателя);
- расходом воды в прямоточных котлах; включением или отключением ПВД расшлаковками и т. п.

Для оценки тепловой работы пароперегревателя и ее элементов организуют измерения температур пара по отдельным змеевикам и после

элемента (панели, секции) в целом, а также температур металла в наиболее теплонапряженных участках труб.

В конвективных перегревателях за температуру пара в отдельных змеевиках принимают температуру металла поверхности трубы при условии, что в месте установки горячего спая поверхностной термопары тепловые потоки нагрева или охлаждения минимальны. Обычно этим требованиям удовлетворяют участки труб вне зоны обогрева, т.е. вне газохода. Если это по конструктивным или иным причинам невозможно, термопары устанавливают в газоходе. Места крепления горячих спаев термопар покрывают теплоизоляцией. Термопары размещают, как правило, на внешней нитке многониточного конвективного перегревателя, однако в коротких (часто однопетельных) змеевиках термопары устанавливают и на внутренних нитках для оценки тепловой разверки по глубине секции и расчета максимальной разверки по секции в целом. На входных участках змеевиков термопары устанавливают в том случае, если к раздающему коллектору пар подведен не одной трубой и необходим контроль за начальной разверкой температур.

С помощью глубинных (гильзовых) термопар контролируется температура пара в подводящих к коллекторам и отводящих паропроводах всех частей, ступеней и секций пароперегревателя.

Термопары равномерно размещают по ширине газохода (ступени или секции) конвективной части пароперегревателя. Дополнительные термопары устанавливают на змеевиках с повышенным гидравлическим сопротивлением (например, с увеличенной длиной или большим числом гибов) или более интенсивным обогревом (обращенных к обмуровке или газовым коридорам, где из-за меньшего коэффициента сопротивления газового канала имеет место более высокая скорость потока газов).

Чаще ставят термопары в аварийных очагах. При исследованиях температурных разверок, вызванных неоднородностью газового поля или гидравлическими особенностями пакета, обычно достаточно 10 – 15 точек измерения. Число точек измерения по ширине газохода будет зависеть от числа размещенных по ширине газохода секций перегревателя. К 100 %-ному охвату измерениями температур труб прибегают тогда, когда предполагается наличие случайных отклонений, например при закупорке отдельных змеевиков сварочным графом, окалине и или другими посторонними предметами. Примеры схем установки поверхностных термопар на трубах секций конвективных перегревателей приведены на рисунке 87.

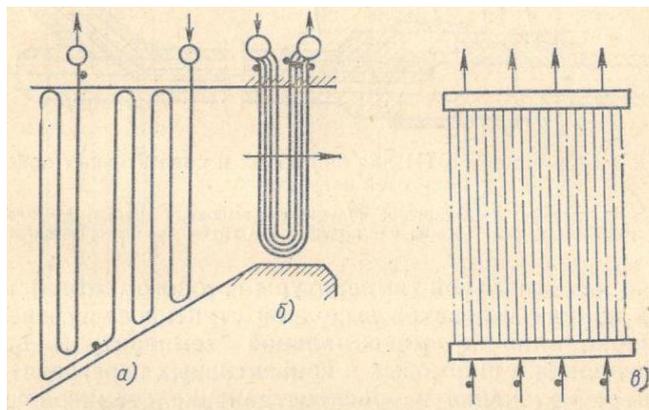


Рисунок 87 – Схемы установки поверхностных термопар на конвективном пароперегревателе

а – однониточный; б – четырехниточный; в – на нескольких подводящих трубах к раздающему коллектору

В практике исследований конвективных пароперегревателей нередко приходится ограничиваться расчетным определением температуры стенки обогреваемой трубы на основании данных измерений температуры пара и известной температуры газов. В прямоточных котлах при серьезных исследованиях все чаще прибегают к установке температурных вставок с шагом 1 м и более по ширине газохода. Их устанавливают в первую очередь на лобовых змеевиках первой по ходу газов ступени перегревателя (оценивают влияние максимальной температуры газового потока) и выходных концах змеевиков выходной ступени перегревателя (оценивают влияние максимальной температуры пара).

Для установки в ширмовых и конвективных перегревателях получила признание и распространение температурная вставка ВТИ с внутренним выводом термопар, благодаря чему выводные их концы защищены от воздействия высокотемпературных газов (рисунок 88).

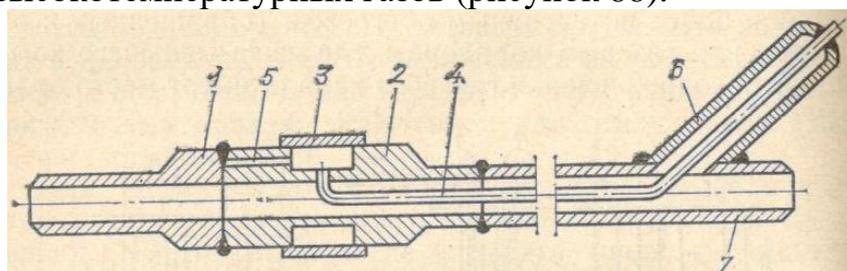


Рисунок 88 – Схема вставки ВТИ для ширмовых и конвективных поверхностей нагрева

1,2 – части корпуса; 3 – защитное кольцо; 4 – выводная трубка; 5 – отверстие для термопары диаметром 2,5 – 2,8 мм; 6 – штуцер; 7 – труба поверхности нагрева.

При измерении температуры пара в змеевиках ширмовых пароперегревателей отдельные ширмы рассматривают как неделимый элемент

и устанавливают гильзовые термопары прежде всего на отводящих паропроводах после каждой из ширм, чтобы выявить межширмовую температурную и тепловую разверки, являющиеся следствием неравномерности поля газового потока (рисунок 89).

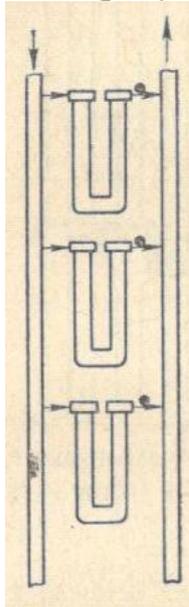


Рисунок 89 – Схема установки гильзовых термопар после каждой ширмы

Для определения внутриширмовой разверки, возникающей из-за неодинакового освещения факелом лобовых и внутренних змеевиков, а также из-за различного гидравлического сопротивления змеевиков ширмы поверхностные термопары устанавливают вне зоны обогрева на выходе из лобового и внутреннего змеевиков на каждой из ширм ступени. Для более полного изучения внутриширмовых разверок выбирают одну из ширм (обычно среднюю) и устанавливают поверхностные термопары на выходных участках всех ее змеевиков, распространяя полученные результаты о разверках на остальные ширмы данной ступени перегревателя (рисунок 90).

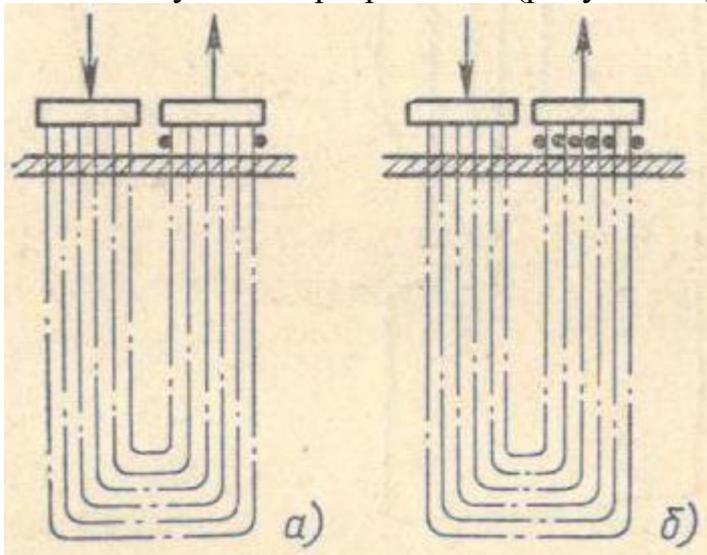


Рисунок 90 – Схемы установки поверхностных термопар на ширме

а – термопары на лобовом и внутреннем змеевиках; б – термопары на всех змеевиках.

Внутришпирмовые разверки существенно больше межшпирмовых. Для определения температуры стенки трубы в обогреваемой зоне шпирмовой части перегревателя, при известном распределении температур пара по змеевикам шпирмы, температурные вставки монтируют на задних трубах крайних и средней выходных шпирм и лобовых трубах шпирм, обращенных к факелу (рисунок 91).

В радиационной части перегревателя возможен местный перегрев металла из-за удара факела в трубы, разрыхловки и выпучивания в сторону топki отдельных труб. Максимумы локальных тепловых потоков распространяются на ограниченную поверхность и не дают существенного подогрева пара, вызывая местный перегрев металла. Поэтому наряду с измерением температуры среды поверхностными термопарами в необогреваемой части труб основным методом исследований радиационного перегревателя является прямое измерение температуры обогреваемой стенки трубы или определение ее расчетом по измеренным радиационными термозондами полям тепловых потоков от факела.

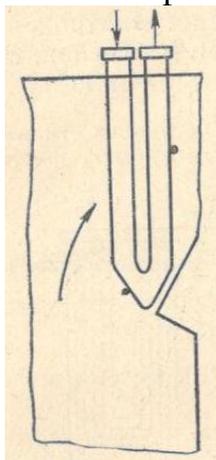


Рисунок 91 – Схема установки температурных вставок на выходных

Использование термозондов не требует больших трудозатрат и позволяет изучить изменение тепловых потоков по большому полю при различных неблагоприятных режимах заботы. Однако этот метод определения температуры стенки менее точен по сравнению с измерениями с помощью температурных вставок, позволяющих к тому же в случае необходимости измерить розетку температур по периметру трубы. Кроме того, с ростом единичной мощности котлов и габаритов топki, а также при использовании наддува в газомазутных котлах измерение падающих и отраженных тепловых потоков термозондами становится практически невозможным и роль температурных вставок возрастает.

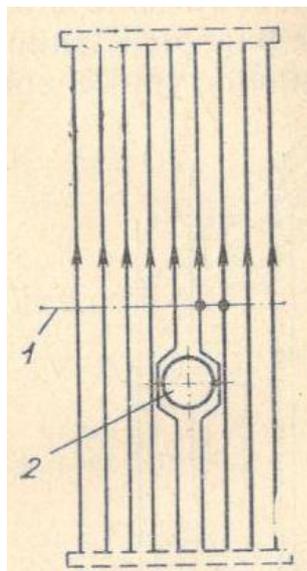


Рисунок 92 – Схема установки температурных вставок на панели радиационного перегревателя барабанного котла

1 – уровень установки вставок; 2 – амбразура

Схему установки температурных вставок на радиационной части перегревателя разрабатывают исходя из ожидаемой или известной топографии тепловых потоков. Максимальные тепловые потоки обычно совпадают с максимальными значениями температур факела, поэтому предварительно целесообразно снять поле температур с помощью оптического пирометра.

В радиационных перегревателях барабанных котлов при размещении панели по всей высоте топки температурные вставки устанавливают на средней трубе экрана на уровне максимальных температур факела (тепловой поток на средние трубы панели выше, чем на угловые), целесообразна также установка вставок на трубе, отогнутой для амбразуры (имеет большее гидравлическое сопротивление) и соседней с ней (рисунок 92). В прямоточных котлах температурные вставки устанавливают на первых по ходу газов трубах ВРЧ, работающих с повышенной температурой пара и встречающих высокотемпературные газы (рисунок 93).

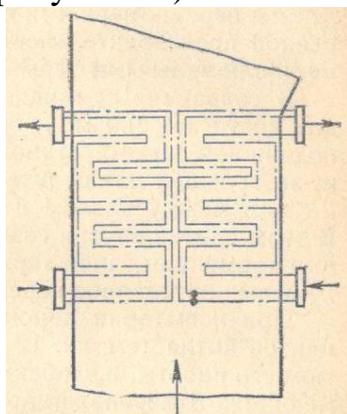


Рисунок 93 – Схема установки температурных вставок на двух первых трубах ВРЧ прямоточного котла

С помощью температурных вставок определяют локальные тепловые потоки. Для оценки тепловой неравномерности панели радиационного перегревателя можно использовать калориметрические трубы или автономные витки со всеми необходимыми средствами измерительной техники. Однако из-за трудоемкости к этим измерениям прибегают редко.

Для снятия во время опыта отдельных точек и нанесения их на расчетные гидравлические характеристики панелей, секций и элементов пароперегревателя осуществляется отбор импульсов статических давлений из выходных и входных коллекторов, а также по их длине. Статические давления измеряются манометрами; измерения падения давления желательно вести дифференциальным методом. Массовый расход пара по параллельно включенным трубам определяют с помощью напорных трубок, как правило, только на головном образце котла. Массовый расход среды через секцию или панель обычно известен, так как с помощью сужающих устройств измеряют паропроизводительность котла и расходы воды на впрыски. В случае необходимости напорными трубками можно измерить динамические напоры в паропроводах, подводящих или отводящих пар от панели или секции.

Для суждения о причинах температурной разверки важно изучить температурное поле газового потока в плоскости, нормальной к оси труб. Выбор газохода, в котором организуются эти измерения, определяется компромиссом между желанием получить истинную температуру газов, например, за ширмами, с одной стороны, и надежностью данных, а также долговечностью измерительной аппаратуры – с другой. Таким газоходом нередко является газоход поворотной камеры.

Перед установкой измерительной системы определяют минимально необходимое число точек и их размещение в газоходе на основании данных тарировки. Оценка достаточности принятого числа точек зависит от выявленной неравномерности поля температур. Для котлов умеренной производительности поле температур снимают хромель-алюмелевыми термопарами на подвижной штанге.

В современных мощных котлах живое сечение газоходов достигает  $100 \text{ м}^2$  и более. Измерения термопарами на подвижной штанге становятся затруднительными, так как из-за большой длины штанга не вписывается между котлами или между котлом и стеной, прогибается в газоходе. В этом случае внутри газохода либо монтируют стационарные термопары, либо термопары на штанге спускают сверху, через потолочное перекрытие.

При испытании пароперегревателя, как и других элементов котла, ведется контроль за режимом его работы, и особенно за режимом работы топки. Кроме общих измерений (паропроизводительность и параметры пара, расход и температура питательной воды и т. д.) считается обязательным анализ газов в газоходе после пароперегревателя или после экономайзера с предварительной тарировкой сечения по  $\text{RO}_2$ .

В журнале общих наблюдений отмечают число и номера работающих горелок (мельниц), дутьевых вентиляторов, дымососов, все изменения режима работы котла в продолжение опытов, время включения и отключения

обдувочных устройств. Для обработки и анализа результатов испытаний должны быть подробные данные о топливе.

## **2.11 Испытания и наладка конвективных экономайзеров, паропроводов и арматуры**

### **2.11.1 Характерные повреждения экономайзеров**

Экономайзеры располагаются по газовому тракту котлов после пароперегревателя и омываются газами с относительно низкой температурой. Однако при работе с малыми нагрузками, во время пусков и остановов при недостаточно налаженных режимах охлаждения температура стенок отдельных труб экономайзера может достигать опасных значений.

На электростанциях наблюдаются различные повреждения водяных экономайзеров: отдулины в наиболее обогреваемых участках, внутренняя пароводяная коррозия, истирание труб золой, наружная сернокислотная коррозия при сжигании топлива с повышенным содержанием серы, а также повреждения сварных соединений труб.

Причины развития дефектов в сварных соединениях заключаются в различных тепловых явлениях, связанных с работой экономайзеров. Расслоение пароводяной смеси в кипящих экономайзерах и неравномерность питания (в барабанных котлах) могут приводить к периодическим значительным изменениям температуры металла труб.

Срок службы металла и сварных соединений, работающих при колеблющемся температурном режиме, может оказаться значительно короче по сравнению со сроком их работы с неизменной, даже более высокой температурой. В значительной мере интенсивность разрушения металла зависит от амплитуды и частоты колебаний. Внезапные резкие изменения температур металла также могут быть причиной дефектов, возникающих в сварных соединениях труб экономайзеров. Циклические изменения температур металла наблюдаются при пусках и остановах, неравномерном газовом обогреве труб по ширине экономайзера из-за газовых перекосов, неустойчивом режиме работы котла, значительных колебаниях нагрузки или неравномерном питании, колебании температуры питательной воды.

Для предупреждения опасного нагрева труб экономайзеров при пуске котла существует несколько способов их охлаждения. В конструкциях отечественных барабанных котлов широко применяется устройство циркуляции котловой воды в контуре экономайзера при пусках соединением его входного коллектора с барабаном котла. Основным условием надежной работы такой схемы является устойчивое движение воды в контуре барабан – экономайзер – барабан. Нормально вода, циркулирующая в этом контуре, должна иметь температуру насыщения, соответствующую тому давлению, которое в каждый данный момент устанавливается в котле. По мере роста давления в котле растет и температура котловой воды, циркулирующей в контуре. При подкачке питательной воды котловая вода из экономайзера вытесняется и заменяется питательной. В конце пуска температура котловой

воды может значительно превышать температуру питательной воды, особенно при отключенных ПВД. В таких случаях разность температур котловой и питательной воды в периоды подпитки может достигать 200 °С, а температура металла может при этом изменяться на 60 – 70 °С. Напряжения, возникающие в металле при нестационарных температурных режимах, могут постепенно усиливать первоначальные дефекты сварных соединений труб экономайзера, образовавшиеся при его изготовлении или монтаже.

При малых тепловых нагрузках поверхности экономайзера во время пуска котла в растопочном циркуляционном контуре возникает движение воды с пониженной скоростью. В этих условиях напор, создаваемый в контуре, может оказаться недостаточным для преодоления гидравлического сопротивления змеевиков экономайзера, движение воды в них будет происходить с малой скоростью, при которой трудно ожидать равномерного распределения ее по всем змеевикам. В отдельных змеевиках может прекращаться движение воды, затем после прогрева и частичного испарения вода будет выходить толчком из трубы в барабан с последующим заполнением труб новыми порциями воды и т. д.

Режим работы такой трубы будет связан с колебаниями температур металла, которые могут оказаться опасными даже при низком уровне температур и сравнительно небольших тепловых нагрузках поверхности нагрева. Таким образом, широко распространенная схема охлаждения труб экономайзера при пуске барабанных котлов с помощью рециркуляции воды имеет серьезные недостатки.

Второй достаточно распространенный способ охлаждения экономайзера при пуске, состоящий в непрерывной прокачке небольшого расхода питательной воды (в барабанных котлах около 15 – 20 % после достижения температур газов перед экономайзером 350 – 400 °С), имеет существенные преимущества перед описанным выше. В целях сокращения потерь воды при пуске барабанных котлов основное внимание следует уделять сокращению продолжительности пуска.

Недостаточно продуманный режим остановов барабанного котла также может быть вреден для сварных соединений труб экономайзера. Вредное влияние могут оказывать периодические прокачки питательной воды для ускорения охлаждения труб экономайзера, а также режим останова с периодическими подпитками, особенно при открытой задвижке на линии рециркуляции воды в экономайзер. Целесообразно применять непрерывную прокачку воды в количестве 5 – 15 % (определяется опытным путем) в барабанных котлах, по возможности без сброса воды из барабана, т. е. при длительной работе котла на растопочную линию.

В прямоточных и барабанных котлах кроме режимов пуска и останова для изучения условий работы труб экономайзеров представляют интерес режимы при изменении нагрузки и колеблющейся нагрузке, изменении температуры питательной воды, газовых перекосах, подъеме и снижении давления.

Повреждения экономайзеров обычно являются результатом сочетания недостатков его конструкции и режима эксплуатации котла. Устранение неполадок требует знания и учета тепловых и гидравлических условий работы отдельных их элементов (ступеней, секций, змеевиков). Надежность работы экономайзеров в значительной мере связана с возможными гидравлическими и температурными неравномерностями между его отдельными змеевиками, особенно при широких секциях экономайзеров.

Существенное влияние могут оказывать схемы подвода воды к коллектору экономайзера и отвода воды из экономайзера, различные коэффициенты гидравлических сопротивлений змеевиков из-за различной шероховатости, наличия местных отложений, сварочного грата и т. п. Знак коэффициентов гидравлической разверки наиболее полно можно оценить лишь по экспериментальным данным

При сложной компоновке, особенно в кипящих ступенях экономайзеров, распределение воды между параллельно включенными змеевиками зависит кроме указанных факторов также от устойчивости движения потока, определяемого однозначностью гидравлических характеристик, отсутствием пульсаций, застоя и опрокидывания потока в отдельных трубах. Из-за тепловой неравномерности гидравлические характеристики отдельных змеевиков кипящих экономайзеров могут быть нетождественны друг другу.

При шлаковании котла на экономайзеры переносится значительная часть теплоты, поэтому схема и конструкция их должны быть рассчитаны на работу при повышенном тепловосприятии и глубоком кипении с достаточными запасами по устойчивости гидродинамики и с расчетом ее на режимы максимальной зашлаковки.

Тепловая неравномерность экономайзера, как правило, связана с распределением температуры и скорости газового потока и неравномерностью загрязнения поверхности. Тепловая разверка II ступени экономайзера обычно увеличивается из-за неодинаковых температур воды, поступающей из I ступени, так как промежуточное перемешивание потока перебросом воды справа налево и слева направо между коллекторами ступеней не дает идеального выравнивания температур воды. Все это может привести к расслоению потока в выходных участках некоторых труб змеевиков кипящего экономайзера и повышению температуры металла в обогреваемой зоне.

#### **2.11.1.1 Испытания экономайзеров**

Испытаниям экономайзеров должны предшествовать анализ и изучение проекта, режимов работы, предшествующих аварий и проверочный гидравлический расчет, которые позволят грамотно и целенаправленно разработать программу испытаний, не перегружая ее ненужными работами и максимально сокращая объем измерений с сохранением надежности результатов.

Гидравлические характеристики экономайзеров рассчитывают для определения рабочего перепада давления и распределения расходов рабочей среды по параллельным потокам в следующих случаях:

- при сложной компоновке, включающей несколько контуров или нерегулируемых потоков с подъемно-опускным движением;
- наличии ступеней экономайзера, имеющих несколько параллельно включенных секций, заметно отличающихся по конструкции или обогреву;
- наличии в элементе резко развернутых труб.

Перепад давления в элементе экономайзера подсчитывается по формуле

$$\Delta P_{\text{ЭЛ}} = \Sigma \Delta P_{\text{ТР}} + \Delta P_{\text{М}} \pm \Delta P_{\text{НИВ}} + \Delta P_{\text{УСК}} \quad (43)$$

где  $\Sigma \Delta P_{\text{ТР}}$ ,  $\Delta P_{\text{М}}$ ,  $\Delta P_{\text{УСК}}$  – потери давления от трения, в местных сопротивлениях и от ускорения, Па;

$\Delta P_{\text{НИВ}}$  – нивелирный перепад давления, Па.

Расчет перепадов давления в развернутой трубе должен выполняться с учетом действительных ее размеров и коэффициентов сопротивления.

Целью испытания экономайзера является снятие тепловой и гидравлической (в случаях, указанных выше) характеристик и повышение надежности его работы, изучение условий эксплуатации после реконструкции или выявление причин аварийности.

В стационарных условиях испытания проводят в диапазоне нагрузок от 50 % до номинальной при включенных и отключенных ПВД и различных коэффициентах избытка воздуха. При сжигании сильношлакующих топлив важно проверить режим работы экономайзеров при зашлакованных поверхностях нагрева котла. Кроме того, режим работы экономайзера проверяют при пуске котла, останове, в процессе изменения нагрузки, при включении и отключении ПВД, подъеме и снижении давления, т. е. в нестационарных условиях, когда имеют место возмущения водой или топливом и их небаланс. Длительность возмущений в значительной степени определяется типом и конструкцией котла. Во всяком случае, значение возмущения должно быть согласовано с имеющими место в эксплуатации, например с возмущением, вызываемым несогласованностью питания с расходом топлива в режиме пуска и т. д. Режимы с возмущением расходов топлива или воды следует проводить во всем диапазоне изучаемых нагрузок, давлений и температур питательной воды. Опыты с уменьшенным расходом воды важны для проверки экономайзера в наиболее тяжелых условиях небаланса расходов воды и топлива.

Опыты с повышенным расходом воды позволяют с достаточной степенью точности определить тепловосприятие и паросодержание в кипящей ступени экономайзера. Опыты при пусках должны охватывать все возможные в эксплуатации варианты пусков котла (на общую магистраль, на турбину при скользящем давлении, из разных тепловых состояний).

После составления программы испытаний, ознакомления с котлом, экономайзером и их расчетными и эксплуатационными показателями составляют схему измерений.

Для определения тепловосприятий, коэффициентов загрязнения или

тепловой эффективности отдельных ступеней и секций измеряют температуру и давление воды по отдельным ступеням и секциям, температуру дымовых газов до и после отдельных ступеней, определяют состав дымовых газов, отбирают пробы очаговых остатков. Общие измерения, характеризующие режим работы котла и его элементов, производят по предварительно проверенным и налаженным приборам эксплуатационного контроля.

При сложной схеме экономайзера (например, при наличии элементов или труб с опускным движением в конвективной шахте и др.), а также при пусковых режимах или небольших нагрузках котлы могут работать при многозначных гидравлических характеристиках.

Для характеристики гидравлических разверок, их анализа и определения коэффициента гидравлической разверки измеряют динамические напоры в крайнем, среднем и промежуточном змеевиках и изменение статических давлений по длине коллекторов. В кипящих экономайзерах гидравлическую разверку проверяют по гидравлическим характеристикам, могут быть построены разверочные характеристики.

Тепловые характеристики каждой секции экономайзера определяют путем измерения приращения температур воды в крайнем, среднем и промежуточном змеевиках для некипящей ступени; в крайнем, среднем и каждом седьмом—десятом змеевиках для кипящей ступени экономайзера. Оценить тепловую разверку кипящей ступени путем измерения температуры среды на выходе из змеевиков можно только в режиме увеличенного расхода воды, т. е. при искусственном переводе этой ступени экономайзера в некипящий режим. В противном случае необходимо снять поле температур газового потока до и после кипящей ступени экономайзера.

На выходных участках змеевиков кипящей ступени экономайзера устанавливают температурные вставки для измерения температуры металла труб, особенно при режимах работы, сопровождающихся расслоением пароводяной смеси.

В экономайзере, подверженном эоловому износу, одной из важных задач является контроль за интенсивностью износа.

Надежность гидравлического режима экономайзеров определяется нормальными температурными условиями работы металла при устойчивом движении, невозможностью застоя и опрокидывания потока в отдельных трубах, отсутствием пульсаций, кипения воды в некипящих элементах или полного испарения в кипящих, обеспечением отвода газов и отсутствием скоплений внутренних отложений. В кипящих экономайзерах не должно быть расслоения потока. Достаточную для этого, массовую скорость определяют для минимальной нагрузки котла, при которой возможно кипение в разверенной трубе.

Во избежание перегрева разверенных труб кипящего экономайзера паросодержание в них не должно превышать 80 %. Проверку следует производить для экономайзеров, имеющих среднее паросодержание на выходе более 25 %, а также для обогреваемых отводящих и подвесных труб и при сжигании сильношлакующих топлив. Массовая скорость в кипящих

экономайзерах должна обеспечивать безопасный температурный режим труб при номинальной и растопочной нагрузках. Для некипящих экономайзеров докритического давления и конвективных экономайзеров сверхкритического давления исходное значение массовой скорости потока должно предотвращать скопление газовых пузырей. Минимальная массовая скорость в развернутой трубе должна быть не менее  $300 \text{ кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$ .

### **2.11.2 Испытания паропроводов и арматуры**

В паропроводе действуют напряжения от внутреннего давления, компенсационные изгибающие и от температурных неравномерностей. Статическая радиальная разность температур, вызванная теплоотдачей в окружающую среду, невелика, если тепловая изоляция паропровода отвечает правилам технической эксплуатации. При неустановившемся тепловом режиме (например, при прогреве) паропровода в нем возникает динамическая разность температур по толщине стенки, которая, суммируясь со статической, определяет появление у его наружной поверхности дополнительных растягивающих, а на внутренней – сжимающих аксиальных и тангенциальных напряжений. При высоких скоростях изменения температуры среды (до  $5^\circ\text{C}/\text{мин}$ ) главную роль играет тепловой удар, определяемый условиями прогрева паропровода. При прогреве паропровода в горизонтальных его участках возможно образование разности температур между верхними и нижними образующими. При пуске котла прогрев паропровода возможен собственным паром при открытой главной задвижке и паром высокого потенциала. В первом случае возможно образование перепада температуры между верхними и нижними образующими из-за конденсации пара в начальной стадии прогрева.

Перепад температур в стенке паропровода может достигать больших значений, если паропровод прогревается паром высокого потенциала, при открытии главной паровой задвижки после подъема параметров на котле. Для уменьшения температурных неравномерностей и температурных напряжений паропровод следует прогревать одновременно с подъемом параметров пара в котле собственным паром. При выборе допустимой скорости прогрева паропровода необходимо учитывать марку стали и ее физические свойства. Скорость прогрева может ограничиваться другими толстостенными элементами энергоблока, особенно выходными коллекторами пароперегревателей, если они выполнены из сталей аустенитного класса. Если же таких ограничений нет, то допустимые градиенты температур в стенке паропровода при прогреве паром определяют на основании анализа малоциклового усталости.

При останове котла его паропровод остывает по длине неравномерно: большую температуру имеют участки, расположенные вблизи котла и турбины (или магистрального паропровода турбинного отделения), меньшую – участки в средней его части. В соответствии с профилем паропровода образующийся конденсат стекает в сторону турбинного отделения и, попадая на нагретые участки, охлаждает их. При этом могут возникать разности температур по периметру паропровода, вызывающие появление значительных температурных

напряжений. Поэтому при выводе котла в холодный резерв целесообразно применять обеспаривание паропровода, что позволяет предупредить процесс конденсации пара при повышенном давлении и тем самым обеспечить в нем более равномерное распределение температур.

Для контроля температурного режима паропровода при нестационарных процессах устанавливают поверхностные термомпары по верхней и нижней образующим паропровода в следующих местах: на горизонтальном участке за котлом в области измерения температуры пара, перед глазной паровой задвижкой, на фасонных элементах паропровода. Как обычно, контролируют расход пара и его параметры. Измерение напряжений, возникающих в паропроводах при их прогреве и расхолаживании, можно выполнять с помощью механических тензометров.

Задача наладки состоит в отработке безопасных режимов прогрева паропровода с тем, чтобы температурные напряжения не достигали чрезмерно высоких значений.

Значительная температурная неравномерность наблюдается в литых корпусах паровых задвижек при их прогреве в открытом положении. Так, например, в задвижках с условным диаметром  $D_y = 175$  мм разность между температурами корпуса в проточной части и его низа при прогреве достигала  $250 - 300$  °С. Это явление объясняется застоем конденсата, образующегося в нижней части при малом расходе пара.

При наборе нагрузки скопившийся конденсат испаряется, что ведет к выравниванию температур в корпусе. При выравнивании температур корпуса происходит скачкообразное повышение температуры нижней его части, скорость роста температуры достигает  $8,3$  °С/мин, что вызывает значительный перепад температуры по толщине стенки. Дренирование нижней части задвижки со сбросом скопившегося конденсата в тот же паропровод позволяет снизить разбежки температур в 3 раза, т. е. до  $100$  °С, и избежать скачкообразного прогрева нижней части литого корпуса. При прогреве паропровода острым паром в момент открытия задвижки температура ее стенок изменяется со скоростью до  $25$  °С/мин, что свидетельствует о преимуществах прогрева паропровода вместе с пуском котла.

Фланцевое соединение корпуса задвижки отстаёт в прогреве от проточной части на  $150$ °С, крышка фланца – на  $200$  °С, шпильки – на  $250$  °С. В стационарных условиях температура этих элементов отличается от наиболее прогретой части задвижки на  $40 - 150$ °С в зависимости от состояния изоляции. Установка глубинных термопар в шпильки показывает, что при тщательной тепловой изоляции задвижки температура шпилек ниже температуры пара на  $35$  °С. Все это приводит к самозатяжке соединения, но иногда вызывает столь значительные дополнительные растягивающие напряжения в шпильках, что приводит к их обрыву. При выполнении ремонтных работ затяжка шпилек должна производиться под контролем (например, по шпилькам с индикаторами для измерения их упругого удлинения и последующего расчета напряжений по закону Гука). Для контроля за прогревом элементов задвижек целесообразно

установка поверхностных термометров в указанных местах. Изменение температур паропровода, арматуры и параметров наносят на график во времени.

На ряде электростанций неоднократно происходили повреждения паропроводов свежего пара и промперегрева, вызванные попаданием в них конденсата из дренажных, байпасных, импульсных линий и отводов на предохранительные клапаны. В основном металле выявлены сквозные трещины, располагающиеся радиально у отверстия дренажа, а также поперечные трещины на некотором расстоянии от места врезки дренажа в паропровод. При расположении дренажной запорной арматуры на значительном расстоянии от места врезки в основной трубопровод в дренажной линии накапливался конденсат, который периодически забрасывался в паропровод при колебании в нем давления. Забросы воды вызывали резкие колебания температуры металла паропровода, приводившие к образованию трещин, развивающихся со временем до сквозных. Аналогичные повреждения имели место на паропроводах после промежуточного пароперегревателя. Для предотвращения указанных повреждений паропроводов предлагается: устанавливать индивидуальные запорные вентили на каждой дренажной линии вблизи места ее присоединения к паропроводам при тщательной изоляции арматуры и линии; выполнять постоянно действующие трубопроводы прогрева тупиковых участков.

Все толстостенные элементы котлов (барабаны, выходные коллекторы пароперегревателей, участки паропроводов, в которые может попадать конденсат) во время капитальных ремонтов подвергают ультразвуковому контролю.

### 3 Задания для самостоятельной работы студентов заочной формы обучения

#### 3.1 Методические указания по выполнению самостоятельной работы

##### Самостоятельная работа № 1 «Наладочные и исследовательские работы, их задачи и организация»

*студент должен знать:*

- порядок и правила проведения наладки и испытаний теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения;
- правила и нормы охраны труда при проведении наладки и испытаний теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения;
- правила оформления отчетной документации по результатам испытаний и наладки теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения.

Студентам необходимо подготовить опорный конспект по данной теме

##### Самостоятельная работа № 2 «Расчет погрешностей измерений»

*студент должен уметь:*

- выполнять обработку результатов наладки и испытаний теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения.

Студентам необходимо решить задачи и ответить письменно на вопросы.

**Задача 1** Определить относительную погрешность прибора, если известно: показание прибора (измеренное значение) равно 3, а действительное значение измеряемой величины – 2,97.

**Задача 2** Определить вероятную погрешность измерения, если известно:  $x_1 = 2$ ;  $x_2 = 2,3$ ;  $x_3 = 2,6$ ;  $x_4 = 2,9$ ;  $x_5 = 3,2$ . Составить графики зависимости вероятной погрешности от ряда измеренных значений.

Вопросы:

1. Назовите виды погрешностей измерений.
2. Что называют вариацией показаний и как ее определяют?
3. Что называется измерением?
4. Дайте определение порога чувствительности прибора.
5. Что понимают под случайной погрешностью?
6. Как определяется относительная и абсолютная погрешности?
7. Как определяется приведенная погрешность?

### **Самостоятельная работа № 3 «Измерение температуры. Вторичные измерительные приборы»**

*студент должен знать:*

- назначение, конструктивные особенности и характеристики контрольных средств, приборов и устройств, применяемых при эксплуатации, наладке и испытаниях теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения

Студентам необходимо подготовить опорный конспект по данной теме.

### **Самостоятельная работа № 4 «Измерение давления и перепада давления. Измерение расхода»**

*студент должен знать:*

- назначение, конструктивные особенности и характеристики контрольных средств, приборов и устройств, применяемых при эксплуатации, наладке и испытаниях теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения

Студентам необходимо подготовить опорный конспект по данной теме.

### **Самостоятельная работа № 5 «Измерительные преобразователи. Измерение расхода специальным сужающим устройством»**

*студент должен знать:*

- назначение, конструктивные особенности и характеристики контрольных средств, приборов и устройств, применяемых при эксплуатации, наладке и испытаниях теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения

Студентам необходимо подготовить опорный конспект по данной теме.

### **Самостоятельная работа № 6 «Расчет гидравлических сопротивлений необогреваемых элементов»**

*студент должен знать:*

- характеристики, конструктивные особенности, назначение и режимы работы теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения;

Студентам необходимо подготовить опорный конспект по данной теме.

### **Самостоятельная работа № 7 «Гидравлические характеристики обогреваемых прямоточных котлов»**

*студент должен знать:*

- характеристики, конструктивные особенности, назначение и режимы работы теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения;

Студентам необходимо подготовить опорный конспект по данной теме

### **Самостоятельная работа № 8 «Расчет циркуляции в барабанных котлах»**

*студент должен знать:*

- характеристики, конструктивные особенности, назначение и режимы работы теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения;
- порядок и правила проведения наладки и испытаний теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения;
- правила и нормы охраны труда при проведении наладки и испытаний теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения.

Студентам необходимо подготовить опорный конспект по данной теме.

### **Самостоятельная работа № 9 «Температурный режим обогреваемых котельных труб»**

*студент должен знать:*

- характеристики, конструктивные особенности, назначение и режимы работы теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения;
- порядок и правила проведения наладки и испытаний теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения;
- правила и нормы охраны труда при проведении наладки и испытаний теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения.

Студентам необходимо подготовить опорный конспект по данной теме.

### **Самостоятельная работа № 10 «Расчет элементов котлов на прочность»**

*студент должен знать:*

- характеристики, конструктивные особенности, назначение и режимы работы теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения;
- порядок и правила проведения наладки и испытаний теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения;
- правила и нормы охраны труда при проведении наладки и испытаний теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения.

Студентам необходимо подготовить опорный конспект по данной теме.

### **Самостоятельная работа № 11 «Оценка долговечности элементов котлов при малоцикловой усталости и ползучести»**

*студент должен знать:*

- характеристики, конструктивные особенности, назначение и режимы работы теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения;
- порядок и правила проведения наладки и испытаний теплотехнического

оборудования и систем тепло- и топливоснабжения;

- правила и нормы охраны труда при проведении наладки и испытаний теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения.

Студентам необходимо подготовить опорный конспект по данной теме.

### **Самостоятельная работа № 12 «Наблюдение за металлом в процессе наладки и эксплуатации котлов»**

*студент должен знать:*

- характеристики, конструктивные особенности, назначение и режимы работы теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения;

- порядок и правила проведения наладки и испытаний теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения;

- правила и нормы охраны труда при проведении наладки и испытаний теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения.

Студентам необходимо подготовить опорный конспект по данной теме.

### **Самостоятельная работа № 13 «Методика испытаний паровых котлов»**

*студент должен знать:*

- характеристики, конструктивные особенности, назначение и режимы работы теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения;

- порядок и правила проведения наладки и испытаний теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения;

- правила и нормы охраны труда при проведении наладки и испытаний теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения.

Студентам необходимо подготовить опорный конспект по данной теме.

## **Самостоятельная работа № 14 «Отбор и приготовление проб топлива и очаговых остатков»**

*студент должен знать:*

- характеристики, конструктивные особенности, назначение и режимы работы теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения;
- порядок и правила проведения наладки и испытаний теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения;
- правила и нормы охраны труда при проведении наладки и испытаний теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения.

Студентам необходимо подготовить опорный конспект по данной теме.

## **Самостоятельная работа № 15 «Обработка материалов испытаний парового котла»**

*студент должен знать:*

- постановление, распоряжение, приказы, методические и нормативные материалы по вопросам организации пусконаладочных работ;
- правила и нормы охраны труда при проведении наладки и испытаний теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения;
- правила оформления отчетной документации по результатам испытаний и наладки теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения.

Студентам необходимо подготовить опорный конспект по данной теме.

## **Самостоятельная работа № 16 «Теплохимические испытания и химические промывки котлов»**

*студент должен знать:*

- характеристики, конструктивные особенности, назначение и режимы работы теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения;
- назначение, конструктивные особенности и характеристики контрольных средств, приборов и устройств, применяемых при эксплуатации, наладке и испытаниях теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения;
- постановление, распоряжение, приказы, методические и нормативные материалы по вопросам организации пусконаладочных работ;
- порядок и правила проведения наладки и испытаний теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения;
- правила и нормы охраны труда при проведении наладки и испытаний теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения.

Студентам необходимо подготовить опорный конспект по данной теме.

### **Самостоятельная работа № 17 «Эффективность экспериментально-наладочных, научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ»**

*студент должен знать:*

- характеристики, конструктивные особенности, назначение и режимы работы теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения;
- назначение, конструктивные особенности и характеристики контрольных средств, приборов и устройств, применяемых при эксплуатации, наладке и испытаниях теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения;
- постановление, распоряжение, приказы, методические и нормативные материалы по вопросам организации пусконаладочных работ;
- порядок и правила проведения наладки и испытаний теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения;
- правила и нормы охраны труда при проведении наладки и испытаний теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения.

Студентам необходимо подготовить опорный конспект по данной теме.

## **3.2 Задания для выполнения домашней контрольной работы студентов заочной формы обучения**

### **3.2.1 Указания к выполнению домашней контрольной работы**

Контрольная работа выполняется по вариантам. Студент выполняет вариант контрольного задания, соответствующей последней цифре своей зачетной книжки.

Работа, выполненная по другому варианту, не будет приниматься к рассмотрению.

Домашняя контрольная работа выполняется в печатном виде. Каждый вопрос должен начинаться с нового листа. Ответы на вопросы должны быть полными, иметь поясняющие рисунки (схемы), список использованных источников. Отвечать на вопросы домашней контрольной работы следует после изучения соответствующих разделов и тем. Оформляется контрольная работа согласно «Общим требованиям к правилам оформления текстовых учебных документов для студентов БЦБК ФГБОУ ВО "БРГУ"».

Студенты, получившие неудовлетворительную оценку за выполненную работу, выполняют работу другого варианта по указанию преподавателя.

### **Вариант 1**

1. Пусковая наладка теплоиспользующих установок, тепловых сетей предприятия.
2. Изучение аэродинамических характеристик воздушного и топливного трактов.
3. Абразивный износ и меры по его ослаблению.
4. Режимы испытаний топочных экранов прямоточных котлов

### **Вариант 2**

1. Схемы установки средств измерений при испытании.
2. исследования аэродинамики топочных камер и горелочных устройств.
3. Определение абразивных свойств уноса и интенсивности износа сталей.
4. Методы исследования топочных экранов прямоточных котлов.

### **Вариант 3**

1. Методика испытаний и обработки результатов измерений.
2. Наладка грелок для газового и жидкого топлив.
3. Коррозионный износ поверхностей нагрева.
4. Обработка экспериментальных данных и наладка надежной работы панелей топочных экранов.

### **Вариант 4**

1. Классификация и организация испытаний паровых котлов.
2. Наладка пылеугольных горелок.
3. Методы контроля коррозионной активности дымовых газов.
4. Анализ проектных и эксплуатационных данных пароперегревателя до проведения испытания.

### **Вариант 5**

1. Запорная арматура. Схемы.
2. Определение полей скоростей, концентраций, температур.
3. Причины образования трещин в барабане.
4. Экспериментальные исследования пароперегревателей.

### **Вариант 6**

1. Предохранительные, обратные и регулирующие клапаны. Схемы.
2. Определение тепловой эффективности топочных экранов.
3. Температурные неравномерности в барабане и методы их расчета.
4. Повреждения экономайзеров.

### **Вариант 7**

1. Водоуказательные приборы. Схемы.
2. Классификация золовых отложений.
3. Температурные напряжения в барабане и методика их расчета.
4. Испытания паропроводов и арматуры.

### **Вариант 8**

1. Общие вопросы испытаний и наладки пылесистем.
2. Меры борьбы с наружными золовыми отложениями.
3. Мероприятия по уменьшению температурных неравномерностей и напряжений в барабанах.
4. Испытания экономайзеров.

### **Вариант 9**

1. Испытания пылесистемы с шаровой барабанной мельницей.
2. Методика исследований наружных золовых отложений.
3. Конструктивные и режимные факторы, влияющие на гидравлический режим контура при принудительном движении рабочего тела.
4. Исследования температурного и гидравлического режимов работы экранных труб с помощью автономных и выделенных витков.

### **Вариант 10**

1. Испытания среднеходовых, молотковых мельниц и мельниц-вентиляторов.
2. Контроль распределения температур и напряжений в барабане.
3. Нормы качества питательной, котловой воды, пара и конденсата.
4. Стали для труб поверхностей нагрева и паропроводов, для крепления деталей и узлов.

## **3.3 Критерии оценок**

**оценка «5»** - если домашняя контрольная работа студента выполнена в полном объеме, в соответствии с требованиями. Ответы на вопросы полностью раскрыты, имеют поясняющие рисунки (схемы) и список использованных источников.

**оценка «4»** - если домашняя контрольная работа студента выполнена в полном объеме, в соответствии с требованиями, но имеются замечания по выполнению контрольной работы.

**оценка «3»** - если домашняя контрольная работа студента выполнена в не полном объеме и ответы на вопросы даны кратко.

## Глоссарий

*Абразивные материалы* – материалы, обладающие высокой твердостью и используемые для обработки поверхности различных материалов: металлов, керамических материалов, горных пород, минералов, стекла, кожи, резины и других.

*Амбразура* – отверстие для введения огня

*Аэросмесь* – топливовоздушная смесь, однородная смесь топлива (твёрдого в пылевидном состоянии, жидкого распылённого на мельчайшие капли, или газообр.) с воздухом.

*Байпас 1* – это перемычка в виде отрезка трубы, которая устанавливается между прямой и обратной проводкой обычного радиатора отопления.

*Байпас 2* – резервный путь, запасной маршрут для неперемного обеспечения функционирования системы при наступлении нештатного (аварийного) состояния.

*Бобышка* – это прилив, находящийся на литой детали. Его предназначение – это усиления сечения детали в местах, на которые установлены крепежные болты, вверчены шпильки и так далее. Бобышки – б это закладные устройства, и монтируются с применением технологического и инженерного оборудования в системах коммуникаций (трубопровод, водопровод, газопровод, нефтепровод и другие), для монтажа термодатчиков, измерительных приборов давления уровня, присоединения импульсных трубопроводов и арматуры, с учетом их рабочего давления – до сорока МПа. Бывает большое количество видов бобышек.

*ВРЧ* – высокая радиационная часть.

*ВТИ* – всероссийский теплотехнический институт.

*ВНИИМТ* – Всероссийский научно-исследовательский институт металлургической теплотехники.

*ВНИИАМ* – Всероссийский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт атомного и энергетического машиностроения.

*Выпучина* – Дефект поверхности, представляющий собой локальный пологий прогиб поверхности изнутри элемента с утонением стенки или без него

*Выхолащивание* – оскопление, выкладывание, обеднение, облегчение.

*Грат* – излишки металла, остающиеся на кромках изделий после какого л, процесса обработки.

*Десорбция* – удаление адсорбированного вещества с поверхности адсорбента. Десорбция обратна адсорбции и происходит при уменьшении концентрации адсорбируемого вещества в среде, окружающей адсорбент, а также при повышении температуры.

*Дегазация* – один из видов обеззараживания, представляющий собой уничтожение (нейтрализацию) отравляющих веществ (боевых отравляющих веществ) или удаление их с зараженной поверхности, местности, сооружений, одежды и т. д. в целях снижения заражённости до допустимой нормы или полного исчезновения. Дегазация проводится физическим, химическим и

механическим способами. Механический способ предполагает удаление аварийно химических опасных веществ с поверхности, территории, отдельных предметов. Физический способ предполагает обработку зараженных предметов и материалов горячим воздухом, водяным паром. При применении этих двух способов сильно действующие ядовитые вещества не разрушаются, а только удаляются. Химический же способ уничтожает (нейтрализует) сильно действующие ядовитые вещества посредством их разложения и перевода в другие, нетоксичные соединения с помощью специальных дегазирующих веществ окислительно-хлорирующего и щелочного действия. Дегазация проводится путём протирания зараженных поверхностей дегазирующими растворами с помощью щеток, ветоши и специальной техники, а также газовым потоком с помощью тепловых машин. Дегазация одежды, обуви и предметов домашнего обихода из различных тканей может производиться путём проветривания, кипячения, обработки водяным паром. Дегазация территорий может осуществляться путём поливки дегазирующими растворами, распыления сухих дегазирующих средств, срезания и удаления верхнего зараженного слоя почвы (снега) или изоляции зараженной поверхности с использованием настилов из соломы, досок и др. Зараженный слой грунта срезают и вывозят в специально отведенные места для захоронения или засыпают его песчаной землей, гравием, щебнем.

*Дефект «закат»* – нарушения сплошности материала, распространяющиеся в глубь материала под большим или меньшим углом к поверхности; края дефекта почти прямолинейны; как правило, дефект идет вдоль прутка или проволоки в направлении, обычно противоположном направлению течения металла при прокатке.

*Дефект «плена»* – это дефект отливки в виде самостоятельного металлического или окисного слоя на поверхности отливки, образовавшегося при недостаточно спокойной заливке.

*Дефект «волосовина»* – этот дефект представляет нарушение сплошного состояния металла, напоминающее очень тонкую трещину различной длины: от одного до нескольких десятков миллиметров. Ширина таких дефектов разнообразна и зависит от природы волосовины.

*Дефект «рыхлота»* – это дефект отливки в виде скопления мелких усадочных раковин.

*Зачеканка* – плотная заделка раструбов трубопроводов или швов между тубингами тоннельной обделки расширяющимся цементом с помощью ручных чеканок или пневматических молотков с чеканками.

*Зола* – нестораемый остаток, образующийся из минеральных примесей топлива при полном его сгорании.

*Золовой износ* – разрушение металлических стенок поверхности нагрева котла твёрдыми частицами, уносимыми газовым потоком.

*Ингибитор* – общее название веществ, подавляющих или задерживающих течение физиологических и физико-химических (главным образом ферментативных) процессов. Особое практическое значение имеют ингибиторы коррозии металла. По современным представлениям, механизм действия

ингибиторов коррозии имеет электрохимическую природу. Применительно к коррозии металла ингибитором называют вещество, которое, адсорбируясь на поверхности металла, делает её потенциал положительнее, тем самым замедляя процесс коррозии. К ингибиторам также часто причисляют вещества, снижающие активность коррозионной среды или создающие на поверхности металла защитные пленки, являющиеся продуктом взаимодействия ингибитора с раствором, металлом или продуктом его коррозии (кроющие ингибиторы). Известно большое количество веществ, которые можно рассматривать в качестве ингибиторов коррозии. Наиболее четко ингибиторное действие выражено у аминов, азотсодержащих гетероциклических соединений, тиолов, мочевины и тиомочевины, сульфидов, альдегидов и др.

*Константан* – термостабильный сплав на основе меди.

*Крейцмейсель* – разновидность зубила, который предназначен для прорубки шпоночных пазов, узких канавок и углублений в твёрдых материалах. При помощи крейцмейселя вырезают бороздки при разрезании больших металлических поверхностей.

*Мастерок* – лопатка особой формы, которой при работе наносят раствор каменщики или штукатурки.

*МВН* – минимальная весовая норма.

*МО ЦКТИ* – Московское отделение, Центральный научно-исследовательский и проектно-конструкторский котлотурбинный институт

*НПО ЦКТИ* – ОАО «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И. И. Ползунова» (ранее Центральный научно-исследовательский и проектно-конструкторский котлотурбинный институт им. И. И. Ползунова, ЦКТИ).

*НРЧ* – низкая радиационная часть.

*Ниппель* – деталь механизма, прибора (металлическая соединительная трубка с резьбой на концах).

*Нетожественность* – несовпадение.

*Опрессовка* – гидравлические или пневматические испытания на прочность и плотность (герметичность) трубопровода или другого оборудования работающего под давлением.

*ОП-7 и ОП-10* – вспомогательные вещества, представляющие собой продукты обработки смеси моно- и диалкилфенолов окисью этилена. Вспомогательные вещества ОП-7 и ОП-10 относятся к неионогенным поверхностно-активным веществам. Применяются в качестве смачивающих, эмульгирующих, стабилизирующих поверхностно-активных веществ. Хорошо растворимы в воде.

*Охрупчивание* – вследствие потери пластичности или вязкости, или и того и другого, материалом, обычно металлом или сплавом. Много форм хрупкости могут вести к хрупкому разрушению.

*Ползучесть* – медленная, происходящая с течением времени деформация твёрдого тела под воздействием постоянной нагрузки или механического

напряжения. Ползучести в той или иной мере подвержены все твёрдые тела – как кристаллические, так и аморфные.

*Предел ползучести* – характеристика деформационных свойств упругопластических материалов, выражаемая через максимальное напряжение, при котором скорость деформации ползучести или её полная величина не превышают заданных величин.

*Предел длительной прочности* – напряжение, подсчитанное по первоначальной площади сечения образца, при котором происходит разрушение образца при данной температуре через заранее заданный промежуток времени. Этот промежуток времени называется базой испытания.

*Промперегрев* – то же, что промежуточный перегрев; перегрев пара, отработавшего в цилиндре высокого давления турбины, для более эффективного повторного использования в последующих цилиндрах.

*Разбаланс* – нарушение баланса.

*Разностенность труб* – дефект формы трубы в виде неравномерной толщины стенки.

*Ранжир* – определенный порядок расположения, размещения чего-либо (обычно по убывающей).

*Раскисление металлов* – процесс удаления из расплавленных металлов (главным образом стали и других сплавов на основе железа) растворённого в них кислорода, который является вредной примесью, ухудшающей механические свойства металла.

*Расшлаковка* – очищение.

*Сепарат* – жидкая фаза, получаемая из пароводяной смеси после сепаратора.

*Спекаемость* – свойство некоторых материалов (например, глины) по мере нагревания (при обжиге) в результате частичного плавления наиболее легкоплавких составляющих в определенном температурном интервале размягчаться и уплотняться, а при охлаждении приобретать новые свойства, в том числе повышать свою прочность.

*СРЧ* – средняя радиационная часть.

*Тарировка* – проверка показаний измерительного прибора, включая его регулирование и перенастройку.

*Тепловая разверка* – неравномерное приращение энтальпии нагреваемой среды в параллельно включённых трубах.

*Термозонд* – двусторонний радиометр, позволяющий производить отдельные измерения тепловых потоков, падающих на него с двух сторон.

*Термофорез* – движение частиц в поле температурного градиента.

*Торкретирование* – это метод бетонных работ, при котором бетонная смесь слоями наносится на бетонируемую поверхность под давлением сжатого воздуха. Другими словами, этот процесс является механическим нанесением бетона. *Торкрет* – установка, как правило, состоит из бетон - шприц машины и компрессора.

*Турбулизация потока* – искусственное ускорение потока от ламинарного течения к турбулентному путем введения в поток специальных устройств турбулизаторов.

*Температурное напряжение* – вид механического напряжения, возникающего в какой-либо среде вследствие изменения температуры либо неравномерности его распределения. Температурные напряжения могут возникать как в твёрдых телах, так и в газах.

*Тепловая усталость металла* – явление разрушения металла вследствие повторных нагревов и охлаждений.

*Траверса* – элемент несущей конструкции: горизонтальная балка опирающаяся на вертикальные опоры или подвешенная.

*Утонение металла* – уменьшение толщины металла вследствие чрезмерного его удаления при обработке абразивным инструментом.

*Флотация* – процесс разделения мелких твёрдых частиц в водной суспензии или растворе

*Футеровка* – специальная отделка для обеспечения защиты поверхностей от возможных механических, термических и химических повреждений.

*Шпiндель* – вал, имеющий правые и левые обороты вращения. В металлообработке *шпiнделем* называют вал, снабжённый устройством для закрепления обрабатываемого изделия (заготовки) в зажимном патроне токарного станка, либо режущего инструмента на фрезерных санках

*Щелочение* – добавления едкого натра в воду, питающую паровые котлы.

*Эжекция* – процесс смешения двух каких-либо сред (пара и воды, воды и песка и т.п.), в котором одна среда, находясь под давлением, воздействует на другую и, увлекая за собою, выталкивает её в необходимом направлении.

*Эжектирование* – это приведение в движение пара или газа путем разряжения среды, которая создается другим, движущимся с большей скоростью, рабочим потоком.

## **Заключение**

В данном методическом пособии МДК 03.01 «Наладка и испытания теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения» представлены темы для самостоятельного изучения междисциплинарного курса с полным курсом лекций и содержит задания для выполнения домашней контрольной работы для студентов заочной формы обучения специальности 13.02.02 Теплоснабжение и теплотехническое оборудование.

## Список использованных источников

### Основные источники:

1. Мычко, В. С. Слесарное дело : учебное пособие / В. С. Мычко. – 3-е изд., стер. – Минск : РИПО, 2020. – 221 с. : схем., табл., ил. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=601336> (дата обращения: 19.05.2021). – Библиогр. в кн. – ISBN 978-985-7234-28-8. – Текст : электронный.

2. Технология и организация работ по строительству объектов: водоснабжения и водоотведения : [12+] / сост. В. П. Дьяков. – Москва ; Берлин : Директ-Медиа, 2020. – 118 с. : табл., ил. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=577853> (дата обращения: 22.05.2021). – Библиогр.: с. 101. – ISBN 978-5-4499-1304-3. – DOI 10.23681/577853. – Текст : электронный.

### Дополнительные источники:

3. Долотова И.В. Методическое пособие по организации самостоятельной работы студентов, с конспектом лекций и глоссарием по МДК 03.01 Наладка и испытания теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения, часть 1, 2018. – 120с.

4. Долотова И.В. Методическое пособие по организации самостоятельной работы студентов, с конспектом лекций и глоссарием по МДК 03.01 Наладка и испытания теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения, часть 2, 2018. – 137с.

5. <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=444432> Фещенко, В.Н. Токарная обработка : учебник / В.Н. Фещенко, Р.Х. Махмутов. - 7-е изд., испр. и доп. - Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2016. - 460 с. : ил., табл., схем. - Библиогр. в кн. - ISBN 978-5-9729-0131-9

6. <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=499501> Каплан, Б.Ю. Гидравлика и гидропривод : учебное пособие / Б.Ю. Каплан ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Высшая школа народных искусств (академия). - Санкт-Петербург : Высшая школа народных искусств, 2018. - 84 с. : табл., граф., ил. - Библиогр. в кн. - ISBN 978-5-906697-66-0

7. <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=463689> умцова, Т.К. Технология столярных работ : учебное пособие / Т.К. Сумцова. - Минск : РИПО, 2015. - 304 с. : схем., табл., ил. - Библиогр.: с. 291. - ISBN 978-985-503-471-2