МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СССР
ГЛАВНОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ
ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ ПО НАЛАДКЕ, СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ТЕХНОЛОГИИ
И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ И СЕТЕЙ "СОЮЗТЕХЭНЕРГО"

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИСПЫТАНИЯМ ПАРОВЫХ КОТЛОВ ПРИ РАЗДЕЛЬНОМ И СОВМЕСТНОМ СЖИГАНИИ ПРИРОДНОГО ГАЗА И МАЗУТА

СЛУЖБА ПЕРЕДОВОГО ОПЫТА ПО "СОЮЗТЕХЭНЕРГО"
Москва 1988

gost.e-ecolog.ru

Р А З Р А Б О Т А Н О предприятиями "Южтехэнерго" и "Средазтехэнерго" Производственного объединения по наладке, совершенствованию технологии и эксплуатации электростанций и сетей "Союзтехэнерго"

И С П О Л Н И Т Е Л И В.А.ГАДЯК (Южтехэнерго), В.И.ИЛЬИН (Средазтехэнерго)

У Т В Е Р Ж Д Е Н О Производственным объединением по наладке, совершенствованию технологии и эксплуатации электростанций и сетей "Союзтехэнерго" 29.06.87 г.

Главный инженер К.В.ШАХСУВАРОВ

© СПО Союзтехэнерго, 1988.

УДК 621.18-62-634.2.001.4

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИСПЫТАНИЯМ ПАРОВЫХ КОТЛОВ ПРИ РАЗДЕЛЬНОМ И СОВМЕСТНОМ СЖИГАНИИ ПРИРОДНОГО ГАЗА И МАЗУТА

Вводятся впервые

Срок действия установлен
с 01.06.87 г.
до 01.06.92 г.

Настоящие Методические указания распространяются на стационарные паровые котлы паропроизводительностью от 3 до 4000 т/ч и абсолютным давлением от 0,9 до 25,0 МПа (от 9 до 255 кгс/см^2), с прямым сжиганием мазута и природного газа.

Методические указания не распространяются на котлы для парогазовых и МГД-установок, котлы-утилизаторы, энерготехнологические котлы, а также другие котлы специального назначения.

Методические указания обязательны для персонала предприятий и подразделений ПО "Союзтехэнерго", а также могут быть рекомендованы для персонала пусконаладочных, научно-исследовательских организаций, специализированных предприятий-изготовителей и потребителей оборудования, проводящего испытания котельного оборудования.

I. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

I.I. Методические указания устанавливают методы и последовательность проведения испытаний стационарных паровых котлов, сжигающих мазут и природный газ.

I.2. В зависимости от целей и задач испытания котлов по назначению подразделяются на следующие виды:

определительные;

контрольные;

сравнительные.

I.3. Определительные испытания паровых котлов проводятся в целях определения характеристик экономичности работы котлов с заданными значениями точности и достоверности. При этом в зависимости от категории сложности (см."Прейскурант на экспериментально-наладочные работы и работы по совершенствованию технологии и эксплуатации электростанций и сетей". - М.: СПО Союзтехэнерго, 1982) устанавливается объем определяемых характеристик и, следовательно, измерений.

I.3.I. По I категории сложности объем параметров и характеристик, определяемых экспериментально, а также расчетным путем, включает:

паропроизводительность котла;

параметры пара за котлом (температура и давление);

параметры пара промежуточного перегрева перед и за котлом;

параметры питательной воды перед котлом;

тепловую мощность котла;

КПД брутто;

тепловые потери (q_2, q_3, q_4, q_5);

расход тепла на индивидуальные собственные нужды (распыливание мазута, предварительный подогрев воздуха, обдувку конвективных поверхностей нагрева, турбопривод тягодутьевых устройств, турбопривод питательных насосов, подогрев мазута);

расход электроэнергии на индивидуальные собственные нужды (тягодутьевые устройства, дымососы рециркуляции, приводы питательных и бустерных насосов, РВП, мазутных насосов, регулирующих устройств и др.);

характеристики воздушного баланса (коэффициенты избытка воздуха в горелках, на выходе из топки, за котлом, присосы воздуха в топку, конвективные газоходы, воздухоподогреватели);

температурные характеристики пароводяного и газовоздушного трактов котла (зависимость температур от нагрузки котла);

гидравлическую характеристику пароводяного тракта (зависимости давлений пара и воды за отдельными поверхностями нагрева от нагрузки котла);

аэродинамическую характеристику газовоздушного тракта (зависимости давлений, разрежений дымовых газов, воздуха за отдельными поверхностями нагрева от нагрузки котла);

тепловосприятие поверхностей нагрева;

параметры, характеризующие оптимальный режим работы котла (топочный режим - параметры топлива перед горелками, пара перед форсунками, состав дымовых газов в режимном сечении; воздушный режим - температура воздуха перед котлом, холодного воздуха; режим пароводяного тракта - расход воды на впрыски; температура среды в характерных точках, степень байпасирования поверхностей нагрева; режим газового тракта - степень рециркуляции, температура газов в характерных сечениях; режим работы вспомогательных механизмов - давление, разрежение среды, степень открытия регулирующих устройств, токовая нагрузка приводов, частота вращения).

Все перечисленные характеристики и параметры определяются в рабочем диапазоне нагрузок котла для установления соответствия техническим условиям, оценки экономичности эксплуатации котла и составления энергетической (нормативной) характеристики.

I.3.2. По II категории сложности объем определяемых параметров и характеристик тот же, что и по I категории, за исключением тепловосприятия поверхностей нагрева; характеристики определяются в рабочем диапазоне нагрузок для установления фактической экономичности работы котла и составления энергетической характеристики.

I.3.3. По III категории сложности определяются параметры, характеризующие оптимальные режимы эксплуатации котла, и параметры, необходимые для составления режимной карты, а также для оценки надежности работы котла и вспомогательного оборудования.

I.4. Контрольные испытания проводятся в целях определения соответствия парового котла требованиям нормативно-технической документации, а также подтверждения гарантий предприятия-изготовителя, касающихся:

паропроизводительности;

КПД брутто;

давления и температуры пара;

основных параметров, характеризующих работу вспомогательного оборудования;

дополнительных параметров, гарантируемых поставщиком по соглашению с заказчиком.

I.5. Сравнительные испытания однотипных котлов проводятся в идентичных условиях для сравнения показателей экономичности их работы с заданными значениями точности и достоверности.

I.6. Контрольные и сравнительные испытания проводятся согласно п.I.I.I.03 Прейскуранта ПО "Союзтехэнерго" (I категория сложности) с введением понижающего коэффициента на соответствующее уменьшение объема работ.

I.7. Для всех видов испытаний и категорий сложности КПД котла определяется по обратному балансу.

I.8. Измерения величин при проведении определительных (I и II категории сложности), контрольных и сравнительных испытаний выполняются с точностью, обеспечивающей определение КПД брутто котла с погрешностью не более ±I% абс.

I.9. При проведении определительных испытаний по III категории сложности (не требующих определения абсолютных значений характеристик) допускается использование измерительных средств и упрощенных методов расчета, обеспечивающих погрешность определения КПД брутто котла до ±2% абс.

I.I0. Испытания условно можно разделить на следующие этапы:

подготовка;

предварительные испытания;

режимные опыты;

балансовые опыты;

предварительная обработка результатов измерений;

окончательная обработка результатов измерений;

составление технического отчета или заключения.

I.II. Испытания паровых котлов выполняются пусконаладочными, научно-исследовательскими организациями и специализированными подразделениями предприятий-изготовителей и потребителей оборудования, имеющими разрешение на проведение испытаний на газоиспользующем оборудовании.

I.I2. При проведении контрольных испытаний опытных, опытно-промышленных и головных образцов оборудования форма и объем участия организации-разработчика и предприятия-изготовителя определяются технической программой испытаний.

2. НОРМЫ И ПОКАЗАТЕЛИ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЯЕМЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

2.I. В соответствии с ГОСТ 8.010-72, методики выполнения измерений, используемые при испытаниях, должны содержать нормы и показатели точности определяемых характеристик объекта испытаний.

2.2. Точность измерения (определения) значения величины выражается интервалом, в котором с установленной вероятностью P (для рассматриваемых испытаний принято $P = 0{,}95$) находится суммарная погрешность измерения Δ.

Форма представления результата измерений следующая:

$$X \pm \Delta, P, \qquad (I)$$

где X - среднеарифметическое значение параметра;

Δ - погрешность измерения (суммарная) параметра;

P - установленная вероятность нахождения значения параметра X в интервале $\pm\Delta$.

Интервал $\pm\Delta$, принятый предварительно, именуется также нормой точности или допуском на точность измерения величины.

2.3. Суммарная погрешность Δ включает случайную погрешность результата измерений Δ° и неисключенную систематическую погрешность результата измерений Δ_c.

Неисключенная систематическая погрешность измерения образуется из составляющих, в качестве которых могут быть неисключенные систематические погрешности: метода измерения, средств измерений, вызванные другими источниками.

Методы определения суммарной погрешности прямых измерений регламентируются ГОСТ 8.207-76.

2.4. Максимально допустимая погрешность определения КПД брутто при определительных испытаниях I и II категорий, сравнительных и контрольных испытаниях должна быть не более $\pm$I% абс., для определительных испытаний III категории $\pm$2% абс.

2.5. Учитывая, что для большинства газомазутных котлов $q_3 + q_4 \approx 0$, а $q_2 \geqslant q_5$, можно считать, что $\Delta\eta \simeq \Delta q_2$. Следовательно, погрешность КПД брутто котла однозначно определяется погрешностью определения q_2. Поэтому точность определения q_2 будет того же уровня, что и точность определения КПД брутто.

2.6. Основными составляющими, определяющими погрешность q_2, являются погрешности определения химического состава, измерения температуры уходящих газов и температуры холодного воздуха.

Для обеспечения допуска на определение q_2 в пределах ±1% абс. необходимо, чтобы погрешность определения объема трехатомных газов не превышала ±6% отн., а температуры уходящих газов ±3%.

2.7. Суммарные относительные погрешности результата измерения параметров не должны превышать значений, указанных в табл.I.

Таблица I

Параметр	Средство измерения	Относительная среднеквадратическая погрешность, %
I. Расход воды	Сужающее устройство	± (I,5÷I,7)
2. Расход пара	То же	± (2,5÷3,0)
3. Расход топлива	-"-	± (2,5÷3,0)
4. Расход воздуха, газа	Напорная трубка	± (2,0÷2,5)
5. Температура	Термоэлектрический преобразователь	± (2,0÷5,0)
	Термопреобразователь сопротивления	± (0,25÷0,5)
	Жидкостный термометр	± (2,0÷2,5)
6. Давление	Пружинный манометр	± (I,8÷2,6)
	Жидкостный тягонапоромер	± (2,0÷2,5)
	Микроманометр	± (0,5÷I,0)
7. Содержание в дымовых газах:	Газоанализатор ГХП	
RO_2		± (3,0÷3,2)
O_2		± (3,3÷3,7)
8. Расход электроэнергии собственных нужд	Ваттметры	± I,5
	Электрические счетчики	± (2,5÷3,0)
9. Удельная теплота сгорания топлива		± (I,0÷I,2)

3. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

3.I. Общие требования к средствам измерений

3.I.I. При испытаниях должны применяться средства измерений (СИ), прошедшие государственную или ведомственную поверку в соответствии с ГОСТ 8.002-86 и ГОСТ 8.513-84.

3.I.2. Средства измерений должны подвергаться поверке непосредственно перед началом испытаний и повторной поверке после испытаний.

3.I.3. Отклонение условий работы СИ от нормальных вызывает дополнительную погрешность измерений и должно учитываться при испытаниях.

3.I.4. Для измерения величин при испытаниях должны применяться регистрирующие СИ с непрерывной или периодической регистрацией (с интервалом по возможности не более 2 мин).

При большом количестве измеряемых параметров (I00 и более) целесообразно применять автоматизированные системы сбора информации с записью на накопителях (перфо- или магнитной ленте) с последующей статистической обработкой с применением ЭВМ.

Использование показывающих СИ допускается при небольшом объеме измерений и для измерений второстепенных параметров.

3.I.5. При определительных испытаниях II и III категорий сложности следует использовать штатные средства измерения параметров, за исключением параметров, характеризующих экономичность и надежность работы котла, если суммарная относительная погрешность результата их измерений не превышает значений, указанных в табл.I.

3.I.6. При необходимости на СИ должны быть предварительно представлены протоколы поверки с поправками. На измерения давлений должны быть рассчитаны поправки на гидростатический столб жидкости.

3.I.7. При применении показывающих СИ расположение и их группировка должны быть выполнены исходя из условий удобства считывания показаний.

3.I.8. Отсчет показаний приборов должен производиться с частотой, необходимой для получения достоверного среднеарифметического значения параметра (для параметров, входящих в объем опре-

деляемых характеристик, должно быть не менее I5 равномерно расположенных отсчетов).

3.I.9. Количество и номенклатура необходимых материалов и приборов, преобразователей, пробоотборников и приспособлений, соединительных электрических и трубных проводок, а также электро- и теплоизоляционных материалов и химических реактивов определяется рабочей программой испытаний либо заказной спецификацией и зависит от паропроизводительности и типа котла.

3.2. Средства измерений исходных параметров

3.2.I. Измерение расхода

3.2.I.I. Расходы пара, воды, мазута и природного газа измеряются расходомерами с использованием в качестве преобразователей сужающих устройств.

3.2.I.2. Сужающие устройства устанавливаются в трубопроводах с однофазной средой. Сужающие устройства, вторичные приборы и их монтаж должны соответствовать требованиям РД-50-2I3-80 "Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами".

3.2.I.3. При измерениях расходов пара, воды, жидкого и газообразного топлива применяются дифманометры по ГОСТ I8I40-84.

3.2.I.4. Для измерения расходов воздуха и дымовых газов используются напорные трубки или специальные сужающие устройства, которые должны иметь известные расходные коэффициенты, определяемые путем градуировки в аэродинамической трубе, и пройти метрологическую аттестацию.

3.2.I.5. При определении расходов дымовых газов и воздуха с помощью сужающих устройств и напорных трубок вторичными преобразователями являются дифманометры - тягонапоромеры, микроманометры по ГОСТ 2648-78 и ГОСТ III6I-84, а также тензорезисторные преобразователи типа "Сапфир".

3.2.I.6. Место установки напорных трубок в газовоздуховодах должно выбираться из условий равномерности поля скоростей по сечению, отсутствия зон обратных токов и равномерности температур.

В случае отсутствия таких мест необходимо выполнять тарировки сечений, где устанавливаются датчики, с целью определения коэффициентов неравномерности поля скоростей.

3.2.2. Измерение температуры

3.2.2.I. Температура среды измеряется с помощью жидкостных термометров, термопреобразователей сопротивления, термоэлектрических преобразователей.

3.2.2.2. Жидкостные термометры применяются для измерения температур от минус 30 до плюс 650°С и должны соответствовать ГОСТ 2823-73Е.

Термопреобразователи сопротивления по ГОСТ 6651-78 в комплекте со вторичными приборами применяются для измерения температур от минус 200 до плюс 650°С.

Термоэлектрические преобразователи в комплекте со вторичными приборами применяются для измерения температур от минус 200 до плюс 2200°С. Градуировочные характеристики термоэлектрических преобразователей должны соответствовать ГОСТ 3044-84.

3.2.2.3. Место установки преобразователя для измерения температуры должно выбираться из условий обеспечения равномерного по сечению распределения температур среды.

3.2.2.4. Достоверность определения средних по сечению газо- или воздуховодов температур дымовых газов и воздуха должна обеспечиваться дублированием измерений, применением многоточечной по сечению газовоздуховода схемы измерений, выбором места измерения с равномерным распределением температур среды по сечению, тарировкой сечения, где устанавливаются датчики.

Температуру уходящих газов целесообразно измерять в сечении за дымососами (за исключением котлов, работающих под давлением).

3.2.2.5. При измерении температуры жидкостными термометрами для уменьшения погрешности измерения гильза для термометра должна быть заполнена при измерении температур от 0 до 200°С термостойкой жидкостью (компрессорное масло), при температуре более 200°С - бронзовыми (медными) или чугунными опилками.

3.2.2.6. Рекомендуемые типы преобразователей и вторичных приборов для измерения температуры сред приведены в табл.2.

Таблица 2

Среда	Тип преобразователя	Тип вторичного прибора
Вода, мазут, природный газ, воздух, дымовые газы, пар (до 200°С)	Термопреобразователи сопротивления ТСП-5081-01, ТСМ-0879, ТСМ-75-01	КСМ4-229, КСМ4-293 (295), универсальный переносный прибор Р4833
Вода, пар (до 500°С)	Термопреобразователи сопротивления ТСП-8051, ТСМ-0879, ТСП-717, ТСП-1179	КСМ4-229 (293,295), универсальный переносный прибор Р4833
Вода, пар (до 600°С)	Преобразователи термоэлектрические ТХА-081, ТХА-1172П, ТХК-2076 (до 400°С)	КСП4-007 (008, 037, 038), универсальный переносный прибор Р4833
Воздух, дымовые газы при температуре до 600°С	Преобразователи термоэлектрические: ТХК-1489, ТХК-0179, ТХК-0279-01	КСП4-007(008,037,038), универсальный переносный прибор Р4833
Св.600 до 1000	ТХА-0279-01	То же
Св.1000 до 1300	ТПР-0573,ТПР-0679	КСП4-045(046,047)
Вода, воздух, природный газ при температуре до 100°С	Термометр стеклянный ТЛ-2 (№ 1, 2), ТЛ-4 (№ 2, 3), ТЛ-7	
Вода, пар, воздух, дымовые газы при температуре до 300°С	ТЛ-2, ТЛ-3, ТЛ-4	

3.2.3. Измерение давления и разрежения

3.2.3.1. Для измерения давления и разрежения среды используются пружинные манометры, жидкостные тягонапоромеры, микроманометры, а также тензорезисторные преобразователи измерительные типа "Сапфир".

3.2.3.2. Используемые для измерений давления среды (пар, вода, жидкое и газообразное топливо) пружинные манометры должны соответствовать ГОСТ 2405-80. Манометр следует выбирать так, чтобы максимальное значение его шкалы превышало среднее измеряемое при постоянном или плавно изменяющемся давлении в 1,5 раза, а при колеблющемся - в 2 раза. Наименьшее значение измеряемого дав-

ления должно быть больше значения, соответствующего одной трети шкалы манометра.

3.2.3.3. Используемые для измерения давления тензорезисторные преобразователи типа "Сапфир" должны соответствовать ТУ 25-02.720I36-8I, их расположение и установка - ГОСТ I5I50-69.

3.2.3.4. Для измерения давления в газовоздушном тракте котла используются жидкостные тягонапоромеры по ТУ 25.II.9I8-8I и ТУ 25.II.935-8I и микроманометры по ГОСТ III6I-84.

Жидкостные тягонапоромеры используются при измерении давления (разрежения) выше 20 кПа (200 кгс/м^2).

Для более точного измерения давления и разрежения до 20 кПа применяются микроманометры с постоянным или переменным углом наклона измерительной трубки.

Плотность рабочей жидкости в тягонапоромере определяется при температуре окружающей среды.

3.2.3.5. Типы преобразователей и вторичных приборов, рекомендуемые для измерения давления, приведены в табл.3.

Таблица 3

Среда	Тип преобразователя	Тип вторичного прибора
Вода, пар, мазут, природный газ	Манометр МТИ моделей I2I8, I2I6, I232, I246	
	Преобразователь измерительный избыточного давления "Сапфир-22ДИ" моделей 2I40,2I50,2I60, 2I70	Потенциометры типа КСУ4, другие приборы, работающие в комплекте с источниками постоянного тока
Воздух, дымовые газы, природный газ	Манометр чашечный однотрубный с наклонной трубкой МЧН-240	
	Тягонапоромер жидкостный ТНЖ-Н, ТДЖ-IXI60, ТДЖ-IX250, ТДЖ-IX400, ТДЖ-IX630	
	Преобразователь измерительный избыточного давления "Сапфир-22ДИ" моделей 2II0,2I20,2I30, "Сапфир-22ДИВ" моделей 2320,2330	Потенциометры типа КСУ4, другие приборы, работающие в комплекте с источниками постоянного тока

3.2.4. Отбор проб и анализ дымовых газов

3.2.4.I. Правильность отбора проб определяет в основном точность и достоверность результатов анализов газов.

3.2.4.2. Пробы газов следует отбирать в сечениях с равномерными полями газового состава и скоростей после элементов, которые служат хорошими турбулизаторами потока (поверхности нагрева, сужения газоходов), а также в местах, исключающих присосы холодного воздуха.

Проверка равномерности химического состава дымовых газов выполняется тарировкой сечения газохода, из которого отбирается проба газа. При обнаружении значительной неравномерности поля концентраций (более $\pm 5\%$ отн. по RO_2) необходимо выбрать другое сечение газохода. В противном случае следует применять газозаборные устройства, усредняющие пробы газов по сечению газохода, или вводить в результаты анализа поправки на неравномерность химического состава.

3.2.4.3. Отбор проб дымовых газов следует производить в сечениях газохода за конвективными пароперегревателями либо экономайзером (для газоплотных котлов), с левой и правой сторон газохода, в месте, где продукты горения достаточно хорошо перемешаны и охлаждены до температуры ниже $600^{\circ}C$ (режимная точка), и за дымососами (балансовая точка) для котлов с уравновешенной тягой или за последней поверхностью нагрева для котлов, работающих под наддувом.

3.2.4.4. Отбор проб дымовых газов из газоходов большого поперечного сечения (за пароперегревателем, экономайзером, где тарировку сечений выполнить очень трудно) должен производиться газозаборными трубками в исполнении, позволяющем максимально усред-

нить пробу газа по сечению газохода. Трубки для отбора проб должны быть прямыми, доступными для очистки и продувки сжатым воздухом и изготавливаться из жаростойкого материала.

При температурах отбираемых газов выше 600°С следует пользоваться охлаждаемыми газозаборными стальными трубками. Применение медных или латунных трубок для отбора проб дымовых газов допустимо при температуре в газоходе не выше 200°С.

3.2.4.5. Газоимпульсные трубки (для транспорта проб газа от места отбора к месту анализа) должны быть бесшовными, без гибов (не допускается изменение наклона), в которых возможно образование гидрозатворов.

3.2.4.6. Малая протяженность газохода и небольшое разрежение в нем (до сечения, где температура газов около 600°С - режимная точка) позволяют для большинства конструкций котлов пренебречь присосами холодного воздуха на этом участке, а полученные значения коэффициента избытка воздуха отнести к сечению на выходе из топки. Допускается также определение коэффициента избытка воздуха в дымовых газах в сечении на выходе из топки как разность коэффициента избытка воздуха в режимном сечении и нормативных присосов в расположенные на данном участке (от выхода из топки до режимного сечения) поверхности нагрева.

3.2.4.7. Отбор проб газов из сечения за дымососами производится без предварительной тарировки этих сечений.

3.2.4.8. Для определения содержания RO_2 и O_2 в дымовых газах применяются газоанализаторы химические стеклянные переносные ручного действия типа "Орса" (газоанализаторы ВТИ и ГХП по ГОСТ 6329-74Е), а также другие газоанализаторы, обеспечивающие необходимую точность анализа пробы.

При соблюдении всех правил анализа газоанализатор ГХП позволяет определять содержание RO_2 и O_2 в пробе в лабораторных условиях с точностью ±0,2% абс., а газоанализатор ВТИ - с точностью 0,05% абс. при температуре окружающей среды 20°С.

3.2.4.9. Содержание горючих составляющих в дымовых газах (CO, H_2, CH_4) определяется с помощью хроматографа "Газохром-3I0I", имеющего пороговую чувствительность (% абс.) 5×10^{-4} по H_2 и 1×10^{-3} по CO и CH_4.

3.2.5. Отбор проб и анализ топлива

3.2.5.I. Для анализа топлива отбираются основная и резервная пробы. Пробы жидкого топлива отбираются из специального штуцера малыми порциями равномерно в течение всего времени испытания в соответствии с ГОСТ 2517-85.

3.2.5.2. Пробы газообразного топлива отбираются непрерывно либо через одинаковые промежутки времени в соответствии с ГОСТ I8917-82. Анализ газа производится в соответствии с требованиями ГОСТ I0062-75.

3.2.6. Измерение расхода электроэнергии

3.2.6.I. Расход электроэнергии на привод вспомогательных механизмов котла определяется с достаточной точностью с помощью переносных ваттметров класса 0,2-0,5, подключенных к штатным трансформаторам тока и напряжения, или посредством поверенных электрических счетчиков класса 0,5-I,0.

4. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ИСПЫТАНИЙ

4.I. Подготовка испытаний

4.I.I. Изучение технической документации (проектной, заводской, ремонтной и отчетной) котла и котельно-вспомогательного оборудования для выявления особенностей котельной установки. Ознакомление с техническими отчетами по испытаниям однотипных котельных установок.

4.I.2. Ознакомление с режимом эксплуатации котельной установки (топливоснабжение и топливоприготовление, режим сжигания топлива, обеспеченность котла тягой и дутьем, особенности режима эксплуатации, диапазон эксплуатационных нагрузок, занос поверхностей нагрева золовыми отложениями, способы их удаления и работа средств очистки, работа средств регулирования, автоматики и защиты, надежность работы отдельных узлов и установки в целом, плотность топки и газоходов).

4.I.3. Осмотр котла и котельно-вспомогательного оборудования с целью оценки их состояния (проверка соответствия конструк-

ции узлов и их элементов проектно-конструкторской документации и требованиям других нормативно-технических документов).

4.I.4. Анализ результатов по пп. 4.I.I, 4.I.2, 4.I.3, составление и передача заказчику перечня работ по устранению выявленных недостатков оборудования, устройств регулирования и СИ и подготовке установки к испытаниям.

4.I.5. Определение объема испытаний и подготовка технической документации.

Разработка и составление технической и рабочей программ испытаний в соответствии с их видом и категорией и согласование с заказчиком. Разработка режимных заявок. Техническая и рабочая программы должны быть составлены в соответствии с "Положением о порядке разработки согласования и утверждения программ испытаний" от I4 августа I986 г. (М.: СПО Союзтехэнерго, I986).

В технической программе уточняются:

цель испытаний и обоснование необходимости их проведения; краткая характеристика испытуемого оборудования; краткая характеристика испытаний, их особенности и объем;

данные о состоянии установки, в том числе газоплотности, состоянии поверхностей нагрева, работе обдувочных устройств, рабочие схемы пароводяного и газовоздушного трактов и вспомогательного оборудования;

условия и режимы работы котла при проведении испытаний, действия оперативного персонала в аварийных ситуациях, длительность испытаний и их характеристика;

общие вопросы эксплуатации, лица, ответственные за подготовку проведения опытов, обеспечение режимов работы оборудования и техники безопасности, распределение обязанностей между заказчиком и исполнителем во время проведения испытаний;

возможности лаборатории при проведении необходимых анализов топлива.

В рабочей программе уточняются:

назначение испытаний;

количество, продолжительность опытов и их характеристика;

условия проведения опытов;

виды средств измерений, отклонения от типовой методики измерений, метод обработки результатов измерений, методы определения поправок к температуре уходящих газов и КПД брутто котла;

объем измерений, места установки СИ, периодичность регистрации значений параметров;

условия, при которых опыт считается неудовлетворительным и должен быть прекращен;

другие вопросы, обусловленные особенностями конструкции или спецификой эксплуатации котельной установки.

Разрабатываются схемы экспериментального контроля и задания на подготовительные работы, подготавливается необходимая нормативно-техническая документация.

4.I.6. Технический надзор за монтажом и наладкой схемы экспериментального контроля (изготовление приспособлений, выбор участков и мест для установки и монтаж приспособлений на котле, наладка и проверка СИ). Оборудование постов наблюдений. Составление схем маршрутов при считывании показаний приборов. Подготовка журналов наблюдений. Подготовка необходимого количества материалов и реактивов.

4.I.7. Комплектование испытательной бригады соответствующими специалистами и наблюдателями. Обучение наблюдателей.

4.2. Предварительные испытания

4.2.I. Проверка (визуальная) качества распыливания, производительности и подбор рабочего и резервного комплектов форсунок для установки в горелки котла. Проверка форсунок производится на водяном стенде. Разница в производительности форсунок, выбранных для установки на котел, не должна превышать I,5%.

4.2.2. Проверка равномерности расхода топлива по горелкам, выполняемая с учетом давления топлива перед горелками.

4.2.3. Тарировка сечений газовоздуховодов, в которых устанавливаются преобразователи измерений расходов, температур и газозаборные устройства, с целью определения средних по сечению значений измеряемых величин.

Тарировка сечений производится при номинальной, минимальной и промежуточной нагрузках рабочего диапазона.

4.2.4. Поверка СИ.

4.2.5. Проведение опытов по оценке и выравниванию расходов воздуха по горелкам и дымовых газов рециркуляции по вводам (горелкам, соплам).

Опыты (I-2) проводятся при номинальной или близких к ней нагрузках. Оценка равномерности расхода воздуха (дымовых газов) выполняется по результатам измерений расходов воздуха (газов) или по статическому давлению в газовоздуховодах.

4.2.6. Проведение опытов с целью визуальной оценки качества сжигания топлива и положения факела в топке.

Оценка положения факела и качества сжигания мазута производится по яркости пламени, заполнению факелом топочного пространства, отсутствию горящих крупных капель ("мушек") и "дымления", положению и характеру корня факела у горелок.

При сжигании природного газа оптимальное положение факела определяется по заполнению топочного пространства, характеру факела (светящийся или несветящийся), отсутствию светящихся полос.

4.2.7. Определение присосов наружного воздуха в топку и газовый тракт котла.

Опыты по определению присосов проводятся при нагрузках, близких к номинальной.

4.2.8. Проведение двух-трех опытов по определению характеристик эксплуатационного режима работы котла. Комплексная проверка схемы экспериментального контроля в полном объеме.

Опыты проводятся с целью уточнения состояния и особенностей эксплуатации котельной установки.

4.2.9. Обработка и анализ результатов предварительных испытаний, проверка предварительных выводов о состоянии котельной установки, составление заключения (отчета) о готовности котельной установки к последующему этапу испытаний.

4.3. Режимные опыты

4.3.I. Режимные опыты проводятся с целью определения оптимальных значений параметров режима работы котельной установки и составления режимной карты эксплуатации установки, а также для экспериментального определения поправок к КПД котла и температуре уходящих газов на изменение основных режимных параметров.

Режимные опыты включают:

4.3.I.I. Определение оптимальных значений избытков воздуха на выходе из топки.

Определяемые характеристики: оптимальный коэффициент избытка воздуха на выходе из топки, потери тепла с уходящими газами, с химической неполнотой сгорания, с механической неполнотой сгорания (только для мазута при предварительно обоснованной необходимости ее определения), удельные расходы электроэнергии на привод тягодутьевых машин, параметры, характеризующие режим сжигания топлива, работу воздухоподогревателя, экономайзера и пароперегревателей, аэродинамические и температурные характеристики, надежность отдельных узлов и элементов котла.

Оптимальные значения избытка воздуха определяются при двух-четырех значениях нагрузки котла: номинальной, минимальной и двух промежуточных. Значение коэффициента избытка воздуха определяется по результатам газового анализа.

При каждой нагрузке котла проводится эксперимент, состоящий из двух-пяти опытов, отличающихся значением коэффициента избытка воздуха на выходе из топки. Минимальное значение коэффициента избытка воздуха устанавливается на уровне, при котором появляются продукты неполного сгорания топлива (критический избыток воздуха), максимальный - на уровне, при котором не превышаются допустимые верхние пределы температур пара за котлом и за отдельными ступенями пароперегревателей. Интервал изменения избытка воздуха устанавливается равным 4-5% абс.

За оптимальное значение коэффициента избытка воздуха на выходе из топки принимается значение критического избытка, увеличенное на I-3% абс. на нечувствительность средств автоматического регулирования расходов топлива и воздуха, или значение, при котором обеспечивается номинальная температура пара за котлом. Если для контроля процесса сжигания топлива применяются автоматические регистраторы продуктов неполного сгорания (CO и H_2), оптимальный избыток воздуха устанавливается на уровне критического. Последнее справедливо в случае, если по условиям надежности работы пароперегревателей и экранной системы топки не имеется особых требований к значению коэффициента избытка воздуха на выходе из топки.

4.3.I.2. Определение значений коэффициента рециркуляции дымовых газов, обеспечивающих номинальное значение температуры свежего пара и пара промперегрева за котлом, а также надежную работу экранной системы топочной камеры.

Определяемые характеристики: оптимальное распределение дымовых газов по вводам, значение коэффициента рециркуляции газов, потери тепла с уходящими газами и удельный расход электроэнергии на привод дымососов рециркуляции, температура пара за котлом и за отдельными поверхностями нагрева, параметры, характеризующие режим горения топлива, аэродинамические и температурные характеристики, надежность отдельных узлов и элементов котла.

Значение коэффициента рециркуляции газов определяется при двух-четырех значениях нагрузки котла: номинальной, минимальной и двух промежуточных. При каждой нагрузке котла проводятся три-четыре опыта, отличающиеся значением коэффициента рециркуляции газов. Минимальное и максимальное значения коэффициента рециркуляции устанавливаются из условий обеспечения предельно допустимых значений температур пара промперегрева за котлом и отдельными ступенями пароперегревателя, а также условиями надежности работы экранной системы топочной камеры.

Коэффициент рециркуляции газов определяется одним из двух методов: методом прямых измерений расхода газов рециркуляции или по изменению сопротивления участка конвективной шахты. При этом следует учитывать, что с изменением значения коэффициента рециркуляции газов изменяются и присосы воздуха в газоход дымовых газов, включенный в тракт рециркуляции.

Значением коэффициента рециркуляции газов, принимаемым за оптимальное, считается значение, при котором температура пара промперегрева соответствует номинальному значению (для проектного диапазона нагрузок), регуляторы температуры пара по ступеням пароперегревателя находятся в рабочем диапазоне, показатели температурной надежности работы пароперегревателей - в допустимых пределах и коэффициент избытка воздуха в топке - оптимальный.

4.3.I.3. Определение минимальной длительной нагрузки котла без изменения состава работающего вспомогательного оборудования и количества работающих горелочных устройств.

Определяемая характеристика - минимальная устойчивая нагрузка котла без изменения состава работающего вспомогательного оборудования и количества работающих горелок при условии обеспечения надежной работы всех узлов и элементов котла и параметров пара за котлом в допустимых пределах.

Минимальная нагрузка определяется путем ступенчатого снижения давления мазута (газа) перед горелками с соответствующей коррекцией подачи воздуха (снижение тепловой нагрузки) до уровня, при котором появляются признаки ухудшения горения топлива или другие ограничения режима работы котла. После этого нагрузка котла повышается на 5-8%, и при этой нагрузке проводится опыт для проверки надежности работы установки и определения параметров режима работы котла.

Если нагрузка котла снижается ниже уровня, гарантированного заводом-изготовителем, то обязательна проверка надежности циркуляции или гидродинамики, температурного режима поверхностей нагрева по тракту рабочей среды и качества пара (для барабанных котлов) путем выполнения специальных испытаний.

4.3.I.4. Определение минимальной нагрузки котла с изменением состава работающего вспомогательного оборудования.

Определяемая характеристика - минимальная нагрузка котла с оптимальным сочетанием работающих горелок и их количеством по условиям надежности топочного режима и поддержания температуры пара за котлом в допустимых пределах.

Указанный опыт проводится аналогично опыту по п.4.3.I.3.

Оптимальное количество и сочетание горелок определяются по минимуму суммы потерь тепла с уходящими газами и расходов электроэнергии на тягу и дутье (в том числе и на привод дымососа рециркуляции) при удовлетворительном топочном режиме (отсутствии продуктов химической и механической неполноты сгорания), поддержании температуры пара промперегрева в допустимых пределах и непревышении допустимых пределов температурных показателей надежности поверхностей нагрева и других узлов и элементов котла.

4.3.I.5. Определение максимальной нагрузки котла при работе с одним дутьевым вентилятором или одним дымососом и на разных частотах вращения их приводов.

Опыт по определению максимальной нагрузки котла проводится в следующем порядке. Сначала устанавливается нагрузка котла на уровне 0,55-0,60 номинальной с сохранением оптимальных для данной нагрузки значений коэффициента избытка воздуха в топке и степени рециркуляции газов. В дальнейшем при сохранении неизменными коэффициента избытка воздуха и разрежения в верху топки проводится разгрузка дутьевого вентилятора (дымососа) до полного закрытия

направляющих аппаратов и остановки с одновременным нагружением другого вентилятора (дымососа). После стабилизации режима работы котла, выравнивания воздушных и газовых перекосов, ступенчато (по 5-10%) увеличивается нагрузка котла до полной загрузки оставшегося в работе дутьевого вентилятора (дымососа). При этом коэффициент избытка воздуха и степень рециркуляции газов должны поддерживаться на оптимальном для данной нагрузки уровне.

Возможность работы котла на одном (одной паре) дымососе или вентиляторе и необходимость отключения воздухоподогревателя определяются схемой газовоздушного тракта котла. Она же определяет особенности проведения эксперимента.

При определении максимальной нагрузки котла при работе тягодутьевых устройств на I скорости опыт проводится практически так же, как и предыдущий.

После разгрузки котла до 0,55-0,60 номинальной тягодутьевые устройства переводятся на низшую скорость вращения, после чего ступенями (по 5-10%) увеличивается нагрузка котла до полной загрузки дымососов и вентиляторов с поддержанием оптимальных значений коэффициента избытка воздуха в топке и степени рециркуляции газов.

После стабилизации режима работы котла и установления значений режимных параметров работы котла на оптимальном уровне проводится регистрация необходимых параметров.

4.3.I.6. Определение оптимального угла установки регистров горелок (для горелок, оборудованных лопаточным аппаратом с изменяемым углом).

Определяемые характеристики: оптимальный угол установки лопаток регистра и удельный расход электроэнергии на дутьевые вентиляторы.

Опыты проводятся при трех нагрузках котла: номинальной, минимальной и промежуточной.

На каждой нагрузке проводятся три опыта, отличающиеся различным углом установки лопаток (максимальный, минимальный и промежуточный). В каждом опыте определяется изменение критического избытка воздуха на выходе из топки и удельный расход электроэнергии на привод дутьевых вентиляторов.

Оптимальный угол установки лопаток регистров определяется исходя из минимальных критических избытков воздуха в топке, минимальных расходов электроэнергии на привод вентиляторов, оптимального положения факела в топке, оптимальных значений температуры металла топочных экранов и пароперегревателя.

4.3.I.7. Определение влияния изменения температуры питательной воды на температуру уходящих газов и потери тепла с уходящими газами.

Испытания проводятся при двух-трех значениях нагрузки котла: номинальной, минимальной и одной промежуточной.

На каждой нагрузке проводятся три-четыре опыта, отличающиеся различным значением температуры питательной воды. Изменение температуры питательной воды производится изменением расхода пара на ПВД или их последовательным отключением при постоянном тепловыделении в топке. При этом номинальные параметры пара за котлом поддерживаются снижением расхода питательной воды на котел и расходами воды на впрыскивающие пароохладители. Поэтому рассматриваемая поправка является суммарной поправкой на изменение температуры питательной воды и ее расхода.

4.3.I.8. Определение влияния температуры воздуха на входе в воздухоподогреватель на температуру и потери тепла с уходящими газами.

Испытания проводятся при двух-трех значениях нагрузки котла: номинальной, минимальной и одной промежуточной.

На каждой нагрузке проводятся три-четыре опыта, отличающиеся различным значением температуры воздуха на входе в воздухоподогреватель. Температура воздуха перед воздухоподогревателем изменяется изменением расхода пара на калориферы или расхода рециркулирующего горячего воздуха - в зависимости от способа предварительного подогрева воздуха.

Во всех опытах с разной температурой воздуха перед воздухоподогревателем тепловыделение в топке поддерживается постоянным.

При подогреве воздуха рециркуляцией части горячего воздуха поправка представляет собой сумму изменений, вызванных изменением температуры воздуха на входе в воздухоподогреватель и расхода воздуха через воздухоподогреватель.

4.3.2. Опыты по пп.4.3.I.7 и 4.3.I.8 проводятся при экспериментальном методе определения поправок к температуре уходящих газов и КПД брутто котла.

4.3.3. На основании результатов испытаний составляется временная режимная карта эксплуатации котла.

Режимная карта должна включать:

параметры, задаваемые в соответствии с диспетчерским графиком работы оборудования, максимальной экономичностью котла и надежностью его отдельных элементов и узлов;

параметры, по которым ведется контроль режима работы котла и его вспомогательного оборудования.

К первой группе параметров относятся: параметры пара за котлом, питательной воды перед котлом, топлива перед горелками (и его распределение по горелкам), воздуха перед котлом, содержание кислорода в дымовых газах, расход топлива.

Ко второй группе параметров относятся: температура и давление среды по пароводяному, воздушному и газовому трактам в характерных сечениях, расход воды на впрыскивающие пароохладители, сопротивление отдельных элементов воздушного и газового трактов, положение некоторых регулирующих органов, а также парамеры, характеризующие работу вспомогательных механизмов котла.

Объем параметров, вносимых в режимную карту, должен быть достаточным для возможности организации экономичного и надежного режима работы котла и минимальным, позволяющим оперативному персоналу эффективно контролировать эти параметры.

Режимная карта должна включать также характеристику топлива и параметры, описывающие состояние котла, для которых она составлена.

Значения параметров приводятся в режимной карте для нагрузок котла в пределах рабочего диапазона с интервалом I0-I5% номинальной.

Пример режимной карты приведен в приложении I.

4.4. Балансовые опыты

4.4.I. Балансовые опыты проводятся для определения фактической экономичности работы котла при оптимальных значениях

режимных параметров, корректировки временной режимной карты, а также составления проекта нормативной характеристики котла.

В балансовых опытах определяются:

тепловые потери (с уходящими газами), КПД котла брутто, удельные расходы электроэнергии на привод тягодутьевых устройств, дымососов рециркуляции, питательных насосов и других механизмов, удельные расходы тепла на калориферы, обдувочные устройства поверхностей нагрева, турбопривод тягодутьевых машин и питательных насосов.

4.4.2. Опыты проводятся при четырех-пяти значениях нагрузки: номинальной, минимальной и трех промежуточных.

Для повышения достоверности результатов и проверки их воспроизводимости опыты рекомендуется дублировать. Основной и дублирующий опыты не должны проводиться в один и тот же день.

Результаты опытов считаются воспроизводимыми, если разность в значении КПД брутто, приведенного к единым условиям, не превышает 0,5% абс.

4.4.3. Значения параметров режима работы котла при проведении опытов задаются в соответствии с временной режимной картой.

5. УСЛОВИЯ ИСПЫТАНИЙ

5.I. Режимные и балансовые испытания проводятся после устранения недостатков в работе котла, выявленных в процессе подготовки испытаний и анализа результатов предварительных испытаний.

5.2. Состояние и условия эксплуатации котла и вспомогательного оборудования должны соответствовать проектной и заводской документации, а также требованиям ПТЭ, инструкций и других нормативно-технических документов.

5.3. Изменения значений параметров режима работы котла не должны выходить за допустимые пределы.

5.4. В котле должно сжигаться топливо с характеристиками, предусмотренными рабочей программой испытаний.

5.5. Режим работы котла должен быть стабильным. Регуляторы топлива и воздуха должны работать в режиме стабилизации расхода. Тепловыделение в топке (расходы топлива, воздуха и газов рециркуляции) должно поддерживаться стабильным.

5.6. Непрерывная продувка котла должна быть закрыта, если это допускается водно-химическим режимом, либо необходимо учитывать ее расход.

5.7. Примерно за I ч до начала серии опытов (при одной нагрузке или проводимых в один день) должна быть выполнена очистка поверхностей нагрева от золовых отложений.

5.8. При проведении режимных опытов методом однофакторного эксперимента должно обеспечиваться неизменное значение всех режимных параметров работы котла, за исключением параметра, влияние которого на характеристики котла определяется.

5.9. Длительность опыта регламентируется временем, необходимым для отбора требуемого количества проб топлива и дымовых газов и отсчетов значений параметров в количестве, достаточном для их статической обработки (не менее I5 равномерно расположенных отсчетов). Интервал времени между отсчетами должен выбираться от 2 до I5 мин.

5.I0. До начала опытов и между ними должны обязательно выдерживаться следующие условия работы котла:

продолжительность работы котла от растопки до начала испытания - не менее 24 ч;

длительность выдерживания испытательной нагрузки непосредственно перед опытом - не менее 3 ч;

допустимое отклонение нагрузки котла в период ее выдерживания непосредственно перед опытом для котлов паропроизводительностью более 200 т/ч - не более $\pm$5%, для котлов паропроизводительностью менее 200 т/ч - не более $\pm$I0%;

продолжительность перерыва между двумя режимами испытаний (при постоянном тепловыделении в топке) - не менее 30 мин (определяется стабилизацией наиболее инерционных параметров режима работы котла, в основном температурой уходящих газов);

допустимые колебания нагрузки во время перерыва между опытами для котлов паропроизводительностью более 200 т/ч - не более $\pm$5%, для котлов паропроизводительностью менее 200 т/ч - не более $\pm$I0%;

продолжительность режимных опытов - не менее 60 мин;

продолжительность основных (балансовых) опытов - не менее 90 мин.

5.II. Допустимые отклонения основных параметров работы котла в период проведения опытов приведены в табл.4.

5.I2. На диаграммных лентах самопишущих приборов, используемых при испытаниях, должны быть указаны дата проведения испытаний, наименование измеряемой величины, шкала прибора, его номер, класс точности и сделаны отметки начала и конца опыта.

5.I3. В журнале наблюдения должны быть указаны наименование объекта испытаний, дата проведения и номер опыта, режим работы котла, номер поста наблюдения, фамилия (и подпись) наблюдателя, измеряемые физические величины и их единицы измерения, время отсчета и показания измерительных приборов.

5.I4. В дневник испытаний должны быть занесены дата испытаний, номер опыта, особенности режима работы котла, замеченные отклонения режимов от заданного, выполненные переключения в схемах оборудования, характеристика ведения опыта, возможные причины отклонения параметров, предварительное заключение о качестве проведенного опыта.

Таблица 4

Параметр	Максимально допустимое отклонение значения параметра в опыте от номинального значения (%) не более
I. Расход питательной воды для котлов паропроизводительностью:	
более 200 т/ч	±3
менее 200 т/ч	±6
2. Давление пара	±6
3. Температура перегретого пара (свежего и промперегрева)	±2
4. Температура питательной воды	±2
5. Содержание кислорода в дымовых газах	±0,3
6. Давление топлива перед горелками при сжигании:	

Окончание таблицы 4

Параметр	Максимально допустимое отклонение значения параметра в опыте от номинального значения (%) не более
мазута	±I кгс/см^2
природного газа	±0,0I кгс/см^2
7. Температура воздуха на входе в котел (воздухоподогреватель)	±5
8. Мощность, потребляемая электроприводами вспомогательных механизмов	±2,5

5.I5. Опыт должен быть прерван или забракован после его проведения в случае серьезных противоречий в полученных результатах, значительного расхождения (или изменения в процессе ведения опыта) характеристик топлива, недопустимого изменения (колебания) давлений и температур пара и других параметров, а также изменения схемы и состава работающего оборудования, вызвавших нарушение стабильности режима (колебания параметров имели место длительное время, их значения выходили за пределы, указанные в п.5.II).

6. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

6.I. Обработка результатов измерений производится в два приема: предварительная, проводимая в ходе испытаний или сразу же по окончании серии опытов, и окончательная, осуществляемая после завершения испытаний.

6.2. Предварительная обработка результатов измерений позволяет оценить выполненный эксперимент с точки зрения соблюдения условий его проведения, достоверности полученных результатов. При предварительной обработке используются, как правило, упрощенные методы расчета и эмпирические уравнения.

По результатам предварительной обработки при необходимости составляется и выдается заказчику предварительное заключение.

6.3. Окончательная обработка материалов включает:

отбор материалов измерений, подлежащих обработке и анализу;

расшифровку диаграммных лент самопишущих приборов и накопителей информации автоматических систем измерений с учетом масштабов и поправок;

статистическую обработку результатов измерений параметров ("ручную" или с использованием ЭВМ);

расчет и составление тепловых балансов котла, определение его характеристик и их анализ;

составление таблиц результатов измерений, построение отчетных графических зависимостей;

расчет и анализ погрешностей результатов измерений и обработки.

6.4. Статистическая обработка результатов измерений выполняется следующим образом:

6.4.1. Обнаруживаются и исключаются из ряда измерений параметра значения, сильно отличающиеся от остальных.

6.4.2. Исключаются в соответствии с ГОСТ 11.002-73 грубые погрешности.

6.4.3. Вычисляется среднее арифметическое значение результатов измерений, принимаемое за результат измерения.

6.4.4. Учитываются в среднем арифметическом значении результатов измерений известные систематические погрешности.

6.4.5. Рассчитываются погрешности результатов измерений и их доверительные границы в соответствии с ГОСТ 8207-76.

6.5. По формулам, представленным в приложении 2, рассчитываются показатели и характеристики котла (тепловые потери, КПД брутто, удельные расходы тепла и электроэнергии на собственные нужды, теплопроизводительность и др.). Результаты расчетов представляются в виде таблиц и графиков зависимостей характеристик и показателей котла от теплопроизводительности (паровой нагрузки). В объем графической части могут быть включены и другие функциональные зависимости, характеризующие особенности режима работы котла.

6.6. Определяются поправки к температуре уходящих газов, КПД брутто и расходам электроэнергии на собственные нужды на изменение: температуры воздуха на входе в воздухоподогреватель

(при его подогреве в калориферах или рециркуляцией горячего воздуха), температуры холодного воздуха, коэффициента избытка воздуха на выходе из топки (в "режимном" сечении), присосов воздуха в газовый тракт котла, степени рециркуляции газов, температуры питательной воды, а также влажности и теплоты сгорания топлива.

Предпочтительным методом определения перечисленных поправок является аналитический с использованием методики расчетов конвективных систем передачи тепла. Исходной информацией для указанного метода являются результаты измерений, выполненных в процессе проведения испытаний, или данные теплового расчета котла.

Поправки могут быть получены и опытным путем. Однако этот метод более трудоемкий, требует проведения специальных опытов. При этом поправки на изменение температуры холодного воздуха и присосов воздуха в газовый тракт экспериментально определить практически невозможно. При экспериментальном методе опыты по определению поправок совмещаются с режимными опытами.

6.7. С помощью поправок показатели и характеристики котла приводятся к единым значениям режимных параметров (оптимальным или проектным).

6.8. Рассчитываются погрешности определенных показателей и характеристик котла, полученных путем косвенных измерений.

Погрешность Δ_z косвенного измерения рассчитывается по следующей формуле

$$\Delta_z = \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\Delta_x\right)^2 + \ldots + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\Delta_y\right)^2}, \qquad (2)$$

где $\frac{\partial z}{\partial x}, \ldots, \frac{\partial z}{\partial y}$ – частные производные функциональной зависимости $z = f(x, \ldots, y)$;

$\Delta_x, \ldots, \Delta_y$ – погрешности (среднеквадратические) прямых измерений параметров $x, \ldots, y$.

Пример расчета погрешности КПД брутто приведен в приложении 3.

6.9. При составлении характеристик котла необходимо руководствоваться следующими положениями:

характеристики составляются при оптимальных условиях работы котла, а именно: расчетных (номинальных) параметрах пара, температуре питательной воды, температуре холодного воздуха, а также оптимальных значениях коэффициента избытка воздуха в топке, коэффициента газовой рециркуляции, нормированных значениях при-

сосов воздуха в газовый тракт, температуры воздуха на входе в воздухоподогреватель и др.;

приведение характеристик котла к расчетным (оптимальным, номинальным) значениям параметров режима работы выполняется с помощью поправок.

6.10. При составлении энергетической (нормативной) характеристики котла и вспомогательного оборудования необходимо руководствоваться "Руководящими указаниями по объему, содержанию и форме типовых энергетических характеристик турбо- и котлоагрегатов" (М.: СЦНТИ ОРГРЭС, 1973).

6.11. В любом приводимом результате последняя значащая цифра должна быть того же порядка (находиться в той же десятичной позиции), что и погрешность.

Рассчитанные погрешности должны округляться до одной значащей цифры.

Однако используемые в расчетах числа должны содержать на одну значащую цифру больше, чем это оправдано точностью. Это уменьшит неточности, возникающие при округлении чисел. В конце расчета окончательный результат следует округлить и избавиться от этой добавочной и незначащей цифры.

7. ФОРМА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ И ТРЕБОВАНИЯ К СОСТАВЛЕНИЮ ТЕХНИЧЕСКОГО ОТЧЕТА (ЗАКЛЮЧЕНИЯ)

7.1. Результаты испытаний оформляются в виде технического отчета или заключения.

7.2. Отчеты по испытаниям должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ 7.32-81 или СТП 70I0000302-82 и содержать:

обоснование проведения испытаний, их цели и задачи;

краткую характеристику испытываемого оборудования, значения проектных (расчетных или заданных техническими условиями) характеристик котла;

программу и методику испытаний с конкретным описанием схемы экспериментального контроля и перечнем использованных СИ;

характеристики состояния оборудования, режимов эксплуатации и условий проведения экспериментов;

результаты испытаний в виде графиков функциональных зависимостей, сводных таблиц и их анализ;

заключения по результатам испытаний, выводы и рекомендации;

акты осмотров оборудования с оценкой состояния его отдельных узлов и оборудования в целом, если это оговорено технической программой.

7.3. В объем графической части должны входить:

зависимости режимных параметров работы котла (коэффициентов избытка воздуха на выходе из топки и за котлом; температур питательной воды, воздуха на входе в воздухоподогреватель, степени газовой рециркуляции, температуры уходящих газов и других параметров, влияющих на экономичность) от нагрузки (тепловой или паровой);

зависимости потерь тепла, КПД брутто от нагрузки котла;

зависимости удельных расходов тепла и электроэнергии на собственные нужды от нагрузки котла;

зависимость удельного расхода тепла на турбоустановку (по результатам испытаний или типовой энергетической характеристики);

другие зависимости (аэродинамическая, гидравлическая и температурная), дополняющие объем результатов испытаний.

7.4. Таблицы результатов испытаний должны содержать результаты прямых измерений величин, необходимых для расчета характеристик котла (тепловых потерь, КПД брутто, расходов тепла и электроэнергии на собственные нужды, теплопроизводительности), величин, характеризующих режим работы котла (гидравлический, аэродинамический, температурный), характеристики и данные по режиму сжигания топлива, а также величины, определяющие надежность отдельных узлов и котла в целом и включенные в объем экспериментального контроля.

7.5. Поправки на изменение режимных параметров представляются в виде графиков или таблиц. Поправки составляются к температуре уходящих газов, КПД брутто котла, удельным расходам тепла и электроэнергии на собственные нужды котла.

8. ПРАВИЛА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ

8.I. По результатам испытаний делаются выводы об:

уровне экономичности котельной установки;

причинах несоответствия экономичности требованиям нормативно-технической документации и техническим условиям (если такое несоответствие имеется);

возможных путях повышения уровня технико-экономических показателей котельной установки и конкретных мероприятиях (если таковые можно обосновать по результатам испытаний) устранения причин пониженной экономичности;

выявленных недостатках в состоянии и эксплуатации котельной установки или ее отдельных узлов и возможных путях их устранения.

8.2. Выводы об экономичности котельной установки должны делаться на основании сравнения значений технико-экономических показателей, полученных при испытаниях (с учетом допуска на измерение), с аналогичными значениями технической (теплового расчета), нормативно-технической (ГОСТ 3619-82) документации, а также с техническими условиями на поставку котла.

8.3. Выводы о причинах несоответствия значений технико-экономических показателей требованиям вышеперечисленной документации должны быть обоснованы данными результатов испытаний, а в случае необходимости - результатами дополнительных расчетных или экспериментальных испытаний.

8.4. Рекомендации по повышению экономичности и устранению выявленных недостатков должны быть конкретными и обоснованы расчетами их эффективности.

9. ТРЕБОВАНИЯ ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

9.I. Лица, участвующие в проведении испытаний, должны знать и выполнять "Правила техники безопасности при эксплуатации тепломеханического оборудования электростанций и тепловых сетей", утвержденные Минэнерго СССР 5 ноября I985 г. (М.: Энергоиздат, I985). В удостоверении о проверке знаний должна быть сделана соответствующая запись.

IO. ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ ПРИ СОВМЕСТНОМ СЖИГАНИИ ПРИРОДНОГО ГАЗА И МАЗУТА

IO.I. Общие положения

IO.I.I. Испытаниям при совместном сжигании природного газа и мазута должны предшествовать испытания при раздельном сжигании каждого из этих видов топлива.

Совместное сжигание возможно двумя способами:

в каждой горелке сжигается только один вид топлива или

в каждой горелке сжигаются оба вида топлива.

В дальнейшем под испытаниями при совместном сжигании природного газа и мазута понимаются испытания при подаче каждого вида топлива в разные горелки.

IO.I.2. Виды испытаний, объем экспериментально определяемых характеристик, а также характеристик, определяемых расчетным путем на основании экспериментальных данных, точность измерения величин, этапы испытаний, организации, проводящие испытания, определяются, как и при проведении испытаний с раздельным сжиганием каждого вида топлива.

IO.2. Нормы и показатели точности определяемых характеристик

Нормы и показатели точности принимаются согласно разд.2.

Повышаются требования к точности измерения расхода топлива, относительная среднеквадратическая погрешность которого не должна превышать $\pm 2,5\%$.

IO.3. Средства измерений

Общие требования к средствам измерений исходных параметров изложены в разд.3.

Для повышения точности измерения расходов природного газа и мазута рекомендуется устанавливать дополнительно (если они не предусмотрены проектом) расходомеры для измерения расхода топлива в диапазоне от IO до 30% номинального.

Это позволит определять расходы топлива размером 75 и 25% номинального с одинаковой степенью точности. Кроме того, это позволит измерить расход топлива с малой его долей в смеси (порядка 30%) с такой же точностью, как при его раздельном сжигании.

I0.4. Последовательность испытаний

I0.4.I. Подготовка испытаний осуществляется согласно п.4.I.

I0.4.I.I. При изучении состояния топливоиспользования ТЭС особое внимание следует обращать на:

соотношение долей сжигаемых природного газа и мазута за несколько предшествующих лет (в целом за год и по отдельным периодам года);

распределение топлива по котлам (раздельное сжигание каждого вида топлива, совместное сжигание топлив в отдельных котлах);

соотношение долей топлив при их совместном сжигании в одном котле;

предполагающееся поступление топлив в ближайшие годы.

I0.4.I.2. При изучении материалов ранее проведенных на исследуемом паровом котле испытаний с раздельным сжиганием каждого вида топлива особое внимание следует уделить определению:

вида топлива, наиболее предпочтительного для отдельных диапазонов нагрузок с точки зрения надежности и экономичности работы котельной установки;

диапазонов качественного регулирования нагрузки при сжигании каждого вида топлива;

возможности поддержания температуры пара в требуемых пределах для отдельных диапазонов нагрузок при сжигании каждого вида топлива.

I0.4.I.3. В перечень подготовительных работ, выдаваемый заказчику, необходимо включить техническое задание на установку расходомеров малого расхода.

I0.4.I.4. Расчетным путем провести предварительную оценку качественного и количественного регулирования нагрузки котла при различных соотношениях долей природного газа и мазута. Определить параметры настройки режима (давление природного газа, мазута и воздуха перед горелками) в зависимости от нагрузки, количества работающих горелок, доли природного газа и мазута.

I0.4.2. Предварительные испытания проводятся согласно п.4.2.

Повторная тарировка сечений газовоздухопроводов проводится, если в конструкцию котла были внесены изменения, делающие невозможным использование результатов предыдущих тарировок.

При проведении двух-трех опытов с сжиганием каждого вида топлива для определения характеристик эксплуатационного режима и уточнения состояния котельной установки нагрузки (максимальная, минимальная и промежуточная) и параметры устанавливаются такими же, как в ранее проведенных балансовых опытах. По результатам опытов вводятся поправки в параметры, необходимые для настройки режимов.

I0.4.3. Режимные опыты проводятся согласно п.4.3.I.

Природный газ и мазут сжигают в разных горелках. Режимы проводят при условии, что теплопроизводительность всех горелок при сжигании обоих видов топлива одинаковая.

Долю мазута при совместном сжигании устанавливают по согласованию с заказчиком и оговаривают в технической программе. Рекомендуется проводить опыты при долях мазута, близких к 0,25; 0,50 и 0,75. При одинаковой теплопроизводительности горелок доля мазута равна отношению количества работающих мазутных горелок к общему количеству работающих горелок.

Температура воздуха перед воздухоподогревателем при совместном сжигании топлив устанавливается такой же, как при раздельном сжигании мазута.

При проведении опытов на все работающие горелки подается одинаковое количество воздуха. Если количество работающих горелок при совместном сжигании топлив равно количеству работающих горелок при раздельном сжигании топлив, давление природного газа и мазута перед горелками устанавливают, как при раздельном их сжигании при той же нагрузке. В противном случае вводятся поправки.

I0.4.3.I. Определение влияния расположения газовых и мазутных горелок.

Определяется оптимальное расположение горелок с точки зрения надежности работы элементов котла и поддержания температур за отдельными ступенями пароперегревателей (основного и промежуточного).

На номинальной нагрузке при каждой доле мазута проводят два-четыре опыта. В одних опытах мазут сжигают в нижних ярусах, в других - в верхних, в третьих - на каждом из ярусов располагается одинаковое количество мазутных и газовых горелок.

Количество работающих горелок принимается, как при раздельном сжигании каждого вида топлива. В большинстве случаев оно равно полному количеству горелок. Если количество горелок при раздельном сжигании природного газа и мазута разное, то принимается либо среднее, либо наибольшее значение.

Значение коэффициента избытка воздуха в режимной точке устанавливается равным наибольшему из оптимальных значений избытков воздуха при раздельном сжигании топлив, увеличенному на 2% абс. из-за трудности установки требуемых значений избытков воздуха в горелках при совместном сжигании обоих видов топлива.

10.4.3.2. Определение оптимальных значений избытков воздуха на выходе из топки.

Определяемые характеристики принимаются согласно п.4.3.1.1.

Серия из четырех-пяти опытов проводится при каждой принятой доле мазута на двух-четырех нагрузках котла: номинальной, минимальной и двух промежуточных. Опыты проводятся согласно п.4.3.1.1.

Расположение горелок при номинальной нагрузке принимается согласно п.10.4.3.1, при минимальной нагрузке - согласно п.10.4.3.5.

10.4.3.3. Определение значений коэффициента рециркуляции дымовых газов.

Определяемые характеристики принимаются согласно п.4.3.1.2.

Опыты проводятся при каждой принятой доле мазута на тех же нагрузках котла, что и опыты по п.10.4.3.2 при оптимальных значениях избытков воздуха. Опыты проводятся согласно п.4.3.1.2.

10.4.3.4. Определение минимальной длительной нагрузки котла без изменения состава работающего вспомогательного оборудования и количества работающих горелок.

Определяемые характеристики принимаются согласно п.4.3.1.3.

Опыты проводятся при каждой принятой доле мазута согласно п.4.3.1.3.

10.4.3.5. Определение минимальной нагрузки котла с изменением состава работающего вспомогательного оборудования и количества работающих горелок.

Определяемые характеристики принимаются согласно п.4.3.I.4.

Опыты проводятся при каждой принятой доле мазута и делятся на две части:

опыты по определению оптимального расположения горелок при минимальной длительной нагрузке котла, определенной согласно п.I0.4.3.4. Эти опыты проводятся согласно п.I0.4.3.I;

опыты по определению минимальной нагрузки при найденном оптимальном расположении горелок. Эти опыты проводятся согласно пп.4.3.I.3 и 4.3.I.4.

I0.4.3.6. Определение максимальной нагрузки котла при работе с одним дутьевым вентилятором или одним дымососом и на разных частотах вращения их приводов.

Определяемые характеристики и последовательность проведения опытов - согласно п.4.3.I.5.

Опыты проводятся только в том случае, если количество работающих горелок при сжигании смеси отличается от количества работающих горелок при раздельном сжигании топлив.

I0.4.3.7. Количество опытов по определению оптимальных значений избытков воздуха можно сократить, если выяснится, что они попадают в интервал между оптимальными значениями избытков воздуха при раздельном сжигании топлив.

I0.4.4. Балансовые опыты.

Определяемые характеристики и последовательность проведения опытов приведены в п.4.4.

Опыты проводятся при каждой принятой доле мазута.

I0.5. Условия испытаний

Условия испытаний должны соответствовать требованиям разд.5.

Длительность перерыва между опытами при постоянном тепловыделении в топке, но при разных долях мазута (производится переключение горелок с одного вида топлива на другое) должна быть не менее 60 мин.

10.6. Обработка результатов измерений

Обработка результатов измерений проводится согласно разд.6. При составлении характеристик котла рекомендуется для разных нагрузок указывать оптимальную долю мазута.

Величины, отнесенные к I $м^3$ природного газа и I кг мазута, определяют по формулам для раздельного сжигания природного газа и мазута. Так же определяют потери тепла и КПД брутто котельной установки. Затем безразмерные характеристики усредняют с учетом долей природного газа и мазута по тепловыделению или по внесенному теплу в топку согласно формулам п.10 приложения 2.

Доля мазута определяется несколькими способами, после чего принимается ее значение (одно из значений, среднее и т.д.). Различие между долями, определенными по тепловыделению или по внесенному теплу в топку, несущественно - менее 3%.

10.7. Форма представления результатов испытаний и требования к составлению технического отчета (заключения)

При представлении результатов испытаний следует руководствоваться требованиями разд.7. В объем графической части включить зависимости определяемых характеристик от принятых долей мазута.

10.8. Правила принятия решений по результатам испытаний

При принятии решений руководствоваться требованиями разд.8.

По результатам испытаний делаются выводы о том, в каких диапазонах нагрузок какое соотношение топлив является наиболее предпочтительным.

Приложение I
Рекомендуемое

ВРЕМЕННАЯ РЕЖИМНАЯ КАРТА КОТЛА ТГМП-204 № 5 ЗАПОРОЖСКОЙ ГРЭС ПРИ СЖИГАНИИ МАЗУТА

Параметр	Нагрузка котла, %							Допустимые отклонения параметра (в единицах измерения)
	100	90	80	70	60	50	40	
Первичный тракт								
Расход питательной воды на котел, кг/с	738	664	590	517	443	369	295	±14
Температура питательной воды перед котлом, °С	272	270	266	257	250	240	228	±3
Температура среды до ВЗ, °С	406	404	402	398	396	396	396	±3
Давление среды до ВЗ, МПа	26,6	25,8	25,3	24,4	24,6	24,3	24,1	±0,3
Температура пара за ШПП, °С	440	440	438	436	432	432	434	±5
Температура пара перед II впрыском, °С	480	480	480	480	480	478	478	±5
Температура перегретого пара за котлом, °С	545	545	545	545	542	540	540	±5
Давление перегретого пара за котлом, МПа	24,9	24,5	24,2	24,1	24,0	23,9	23,8	±0,3

Параметр	Нагрузка котла, %							Допустимые отклонения параметра (в единицах измерения)
	100	90	80	70	60	50	40	
Тракт промперегрева								
Температура пара промперегрева за котлом, °С	545	545	545	540	540	540	540	±3
УП заслонок на байпасе регулирующей ступени, %	100	100	100	0	0	0	0	±5
Топливо								
Температура мазута перед котлом, °С	130	130	130	130	130	130	130	±5
Давление мазута за регулирующим клапаном, МПа	3,6	2,8	2,3	1,8	1,4	1,1	0,7	±0,05
Давление пара перед форсунками, МПа	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	±0,05
Расход мазута на котел, кг/с	49,9	45,5	41,0	36,0	31,5	26,5	22,0	±1,4
Воздух								
Температура воздуха перед РВП, °С	70	74	76	80	83	86	90	±3
Температура горячего воздуха, °С	360	340	330	315	300	295	290	±7
Частота вращения турбопривода ТДВ, об/мин	5300	4750	4250	3600	3000	3000	3000	±50
Давление воздуха за ТДВ, кПа	8,5	7,3	6,1	4,3	2,8	2,8	2,8	±0,3

Сопротивление РВП по воздушной стороне, кПа	I,30	I,I0	0,80	0,60	0,50	0,50	0,50	+0,I5; -0,20
Дымовые газы								
Давление вверху топочной камеры, кПа	4,3	3,6	2,9	2,0	I,3	I,25	I,2	±0,I5
Сопротивление РВП по газовой стороне, кПа	I,50	I,30	I,I0	0,90	0,70	0,65	0,60	+0,I5; -0,20
Содержание кислорода в газах в сечении за регулирующей ступенью промежуточного пароперегревателя, %	0,6	0,6	0,6	0,6	0,8	3,9	6,3	±0,I
УП направляющих аппаратов ДРГ, %	65	65	65	I00	I00	I00	I00	±5
Температура уходящих газов, °С	I52	I50	I47	I44	I43	I43	I43	±3
УП шиберов на коробах подачи газов рециркуляции в верх топочной камеры, %	20	20	20	20	20	20	20	±3
УП шиберов на коробах подачи газов рециркуляции в горелки	I00	I00	I00	I00	I00	I00	I00	-

Характеристика мазута: $Q_i^r \simeq 9670$ ккал/кг, $W_x^r \simeq 0,7\%$, $S^r \simeq 2,4\%$.

Мазутные форсунки - типа "Титан".

Приложение 2

Обязательное

РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ ОПРЕДЕЛЯЕМЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Теплопроизводительность котла

Величина	Расчетная формула
Абсолютное давление питательной воды перед котлом $P_{п.в}$, МПа (кгс/см^2)	$\bar{P}_{п.в.} + P_{бар}$
Энтальпия питательной воды $i_{п.в}$, кДж/кг (ккал/кг)	Таблицы водяного пара
Абсолютное давление перегретого пара за котлом $P_{пе}$, МПа (кгс/см^2)	$\bar{P}_{пе} + P_{бар}$
Энтальпия перегретого пара за котлом $i_{пе}$, кДж/кг (ккал/кг)	Таблицы водяного пара
Тепло, отданное в котле перегретому пару, $Q_{пе}$, МДж/с (Гкал/ч)	$D_{пе}(i_{пе} - i_{п.в}) \cdot 10^{-3}$
Абсолютное давление пара промперегрева перед котлом $P'_{вт}$, МПа (кгс/см^2)	$\bar{P}'_{вт} + P_{бар}$
Энтальпия пара промперегрева перед котлом $i'_{вт}$, кДж/кг (ккал/кг)	Таблицы водяного пара
Абсолютное давление пара промперегрева за котлом $P''_{вт}$, МПа (кгс/см^2)	$\bar{P}''_{вт} + P_{бар}$
Энтальпия пара промперегрева за котлом $i''_{вт}$, кДж/кг (ккал/кг)	Таблицы водяного пара
Абсолютное давление воды на впрыск в промежуточный пароперегреватель $P^{впр}_{вт}$, МПа (кгс/см^2)	$\bar{P}^{впр}_{вт} + P_{бар}$

Величина	Расчетная формула
Энтальпия воды на впрыск в промежуточный пароперегреватель $i_{вт}^{впр}$, кДж/кг (ккал/кг)	Таблицы водяного пара
Тепло, отданное в котле пару промперегрева $Q_{вт}$, МДж/с (Гкал/ч)	$\left[D_{вт}\left(i''_{вт}-i'_{вт}\right)+D_{вт}^{впр}\left(i''_{вт}-i_{вт}^{впр}\right)\right]10^{-3}$
Абсолютное давление продувочной воды $p_{пр}$, МПа (кгс/см^2)	$\bar{p}_{ср}+p_{бар}$
Энтальпия продувочной воды $i_{пр}$ кДж/кг (ккал/кг)	Таблицы водяного пара
Тепло, отданное с продувочной водой, $Q_{пр}$, МДж/с (Гкал/ч)	$D_{ср}\left(i_{пр}-i_{п.в}\right)10^{-3}$
Абсолютное давление насыщенного пара, отдаваемого на сторону $p_{н.п}$, МПа (кгс/см^2)	$\bar{p}_{н.п}+p_{бар}$
Энтальпия насыщенного пара, отдаваемого на сторону, $i_{н.п}$, кДж/кг (ккал/кг)	Таблицы водяного пара
Тепло, отданное с насыщенным паром, $Q_{н.п}$, МДж/с (Гкал/ч)	$D_{н.п}\left(i_{н.п}-i_{пв}\right)10^{-3}$
Теплопроизводительность котла $Q_{к.а}$, МДж/с (Гкал/ч)	$Q_{пе}+Q_{н.п}+Q_{вт}+Q_{пр}$

2. Объем воздуха и продуктов сгорания при сжигании мазута

Величина	Расчетная формула
Приведенный углерод K^p, %	$C^p + 0{,}375\,S^p$
Теоретически необходимое количество, м³/кг:	
сухого воздуха V_0^c	$0{,}0889\,K^p + 0{,}265\,H^p - 0{,}0330\,O^p$
влажного воздуха V_0	$V_0^c(1 + 0{,}0016\,d_в)$
Объем сухих дымовых газов, м³/кг:	
в режимном сечении $V_{с.г}^т$	$1{,}86\,\frac{K^p}{RO_2^т + CO^т + CH_4^т}$
в балансовом сечении $V_{с.г}^{ух}$	$1{,}86\,\frac{K^p}{RO_2^{ух} + CO^{ух} + CH_4^{ух}}$
Содержание азота в дымовых газах, %:	
в режимном сечении $N_2^т$	$100 - (RO_2^т + O_2^т + CO^т + H_2^т + CH_4^т)$
в балансовом сечении $N_2^{ух}$	$100 - (RO_2^{ух} + O_2^{ух} + CO^{ух} + H_2^{ух} + CH_4^{ух})$
Коэффициент избытка воздуха:	
в режимном сечении $\alpha_т$	$\frac{N_2^т - \frac{N_2^{тл}}{V_{с.г}^т}}{N_2^т - \frac{N_2^{тл}}{V_{с.г}^т} - 3{,}76\left[O_2^т - 0{,}5(CO^т + H_2^т) - 2CH_4^т\right]}$
в балансовом сечении $\alpha_{ух}$	$\frac{N_2^{ух} - \frac{N_2^{тл}}{V_{с.г}^{ух}}}{N_2^{ух} - \frac{N_2^{тл}}{V_{с.г}^{ух}} - 3{,}76\left[O_2^{ух} - 0{,}5(CO^{ух} + H_2^{ух}) - 2CH_4^{ух}\right]}$
в горелках $\alpha^г$	$\alpha_т - \Delta\alpha_т$

Величина	Расчетная формула
Объем водяных паров, вносимых с паром форсунок и воздухом $W_{ф}$, %	$0{,}1293\alpha^{т}V_0 d_в + 100\,G_ф$
Объем водяных паров в дымовых газах, м³/кг:	
в режимном сечении $V^{т}_{H_2O}$	$0{,}0124\left[9H^{р} - \frac{9K^{р}(0{,}09H_2^{т} + 0{,}18CH_4^{т})}{0{,}54(RO_2^{т} + CO^{т} + CH_4^{т})}\right] + W^{р} + W_{ф}$
в балансовом сечении $V^{ух}_{H_2O}$	$0{,}0124\left[9H^{р} - \frac{9K^{р}(0{,}09H_2^{ух} + 0{,}18CH_4^{ух})}{0{,}54(RO_2^{ух} + CO^{ух} + CH_4^{ух})}\right] + W^{р} + W_{ф}$
Объем дымовых газов в балансовом сечении $V_г^{ух}$, м³/кг	$V^{ух}_{с.г} + V^{ух}_{H_2O}$
Коэффициент рециркуляции дымовых газов r, %	$\left(\sqrt{\frac{S_{кш}}{S^{o}_{кш}}} - 1\right)\cdot 100$ или $\frac{V_{г.рц}}{V_г}\cdot 100$
Расход дымовых газов, м³/с (м³/ч):	
после места отбора на рециркуляцию $V_г$	$(V^{т}_{с.г} + V^{т}_{H_2O})\cdot B$
на рециркуляцию $V_{г.рц}$	$\omega_{г.рц}\cdot F$

3. Объем воздуха и продуктов сгорания при сжигании природного газа

Величина	Расчетная формула
Теоретически необходимое количество, $м^3/м^3$:	
сухого воздуха V_0^c	$0{,}0476\left[0{,}5\,CO^{тл}+0{,}5H_2^{тл}+1{,}5\,H_2S^{тл}+2CH_4^{тл}+\right.$ $\left.+\Sigma\left(n+\frac{m}{4}\right)C_nH_m^{тл}-O_2^{тл}\right]$
влажного воздуха V_0	$V_0^c(1+0{,}0016\,d_в)$
Объем сухих дымовых газов, $м^3/м^3$:	
в режимном сечении $V_{с.г}^{т}$	$\frac{RO_2^{тл}+CO^{тл}+CH_4^{тл}+H_2S^{тл}+2C_2H_4^{тл}+\Sigma nC_nH_m^{тл}}{RO_2^{т}+CO^{т}+CH_4^{т}}$
в балансовом сечении $V_{с.г}^{ух}$	$\frac{RO_2^{тл}+CO^{тл}+CH_4^{тл}+H_2S^{тл}+2C_2H_4^{тл}+\Sigma nC_nH_m^{тл}}{RO_2^{ух}+CO^{ух}+CH_4^{ух}}$
Содержание азота в дымовых газах, %:	
в режимном сечении $N_2^{т}$	$100-\left(RO_2^{т}+O_2^{т}+CO^{т}+H_2^{т}+CH_4^{т}\right)$
в балансовом сечении $N_2^{ух}$	$100-\left(RO_2^{ух}+O_2^{ух}+CO^{ух}+H_2^{ух}+CH_4^{ух}\right)$
Коэффициент избытка воздуха:	
в режимном сечении $\alpha_т$	$\frac{N_2^{т}-\frac{N_2^{тл}}{V_{с.г}^{т}}}{N_2^{т}-\frac{N_2^{тл}}{V_{с.г}^{т}}-3{,}76\left[O_2^{т}-0{,}5\left(CO^{т}+H_2^{т}\right)-2CH_4^{т}\right]}$

Величина	Расчетная формула
в балансовом сечении $\alpha_{ух}$	$\dfrac{N_2^{ух} - \dfrac{N_2^{тл}}{V_{с.г}^{ух}}}{N_2^{ух} - \dfrac{N_2^{тл}}{V_{с.г}^{ух}} - 3{,}76\left[O_2^{ух} - 0{,}5\left(CO^{ух} + H_2^{ух}\right) - 2CH_4^{ух}\right]}$
Объем водяных паров в дымовых газах, $м^3/м^3$:	
в режимном сечении $V_{H_2O}^{т}$	$0{,}01\left[H_2^{тл} + 2CH_4^{тл} + H_2S^{тл} + \Sigma\frac{m}{2}C_nH_m^{тл} + \frac{d_г^{тл}}{8{,}04}\right] + \frac{1{,}293\,V_0\,\alpha_т\,d_в}{8{,}04}$
в балансовом сечении $V_{H_2O}^{ух}$	$0{,}01\left[H_2^{тл} + 2CH_4^{m} + H_2S^{тл} + \Sigma\frac{m}{2}C_nH_m^{тл} + \frac{d_г^{тл}}{8{,}04}\right] + \frac{1{,}293\,V_0\,\alpha^{ух}\,d_в}{8{,}04}$
Объем дымовых газов в балансовом сечении $V_г^{ух}$, $м^3/м^3$	$V_{с.г}^{ух} + V_{H_2O}^{ух}$
Коэффициент рециркуляции дымовых газов r, %	$\left(\sqrt{\frac{S_{кш}}{S_{кш}^{г}}} - 1\right)\cdot 100$ или $\frac{V_{г.рц}}{V_г}\cdot 100$
Расход дымовых газов, $м^3/с$, ($м^3/ч$):	
после места отбора на рециркуляцию, $V_г$	$\left(V_{с.г}^{т} + V_{H_2O}^{т}\right)\cdot B$
на рециркуляцию $V_{г.рц}$	$\omega_{г.рц}\cdot F$

4. Располагаемое тепло

Величина	Расчетная формула
Присосы воздуха в воздухоподогреватель $\Delta\alpha_{вп}$	$\alpha_{ух} - \alpha_т$ или прямым измерением
Коэффициент избытка воздуха в калориферах $\beta_к$	$\kappa(\alpha_т - \Delta\alpha_т + \Delta\alpha_{вп})$
Теплоемкость воздуха до калориферов $C'_в$, кДж/(м^3. °С) [ккал/(м^3.°С)]	$(a_0 + a_1 t'_в + a_2 t'^2_в + a_3 t'^3_в + a_4 t'^4_в)\cdot 4{,}187$ (значения a_i – по разд.7)
Энтальпия воздуха до калориферов $I'_в$, кДж/кг (ккал/кг)	$V_0 c'_в t'_в$
Теплоемкость воздуха после калориферов $C''_в$, кДж/(м^3.°С) [ккал/(м^3.°С)]	$(a_0 + a_1 t''_в + a_2 t''^2_в + a_3 t''^3_в + a_4 t''^4_в)\cdot 4{,}187$ (значения a_i – по разд.7)
Энтальпия воздуха после калориферов $I''_в$, кДж/кг (ккал/кг)	$V_0 c''_в t''_в$
Тепло, внесенное в котел подогретым воздухом в калориферах $Q_{в.вн}$, кДж/кг (ккал/кг)	$\beta_к(I''_в - I'_в)$
Коэффициент избытка воздуха после дутьевых вентиляторов β'	$\alpha_т - \Delta\alpha_т + \Delta\alpha_{вп}$
Теплоемкость воздуха перед дутьевым вентилятором $c'_{вд}$, кДж/(м^3.°С) [(ккал/(м^3.°С)]	$(a_0 + a_1 t'_{вд} + a_2 t'^2_{вд} + a_3 t'^3_{вд} + a_4 t'^4_{вд})\cdot 4{,}187$ (значения a_i – по разд.7)
Энтальпия воздуха перед дутьевым вентилятором $I'_{вд}$, кДж/кг (ккал/кг)	$V_0 c'_{вд} t'_{вд}$
Тепло, внесенное в котел подогретым воздухом в дутьевом вентиляторе $Q_{вд}$, кДж/кг (ккал/кг)	$\beta'(I'_в - I'_{вд})$

Величина	Расчетная формула
Теплоемкость мазута $c_м^{тл}$, кДж/(кг·°С) [ккал/(кг·°С)]	$(0{,}415+0{,}0006\,t_{тл}^{м})\ 4{,}187$
Физическое тепло мазута $i_м^{тл}$, кДж/кг (ккал/кг)	$c_м^{тл}\cdot t_{тл}^{м}$
Теплоемкость водяных паров в природном газе $c_{H_2O}^{тл}$, кДж/(м³·°С) [ккал/(м³·°С)]	$\left(a_0+a_1 t_{тл}^{г}+a_2 t_{тл}^{г2}+a_3 t_{тл}^{г3}+a_4 t_{тл}^{г4}\right)\cdot 4{,}187$ (значения a_i – по разд.7)
Теплоемкость природного газа $c_г^{тл}$, кДж/(м³·°С) [ккал/(м³·°С)]	$\frac{1}{\gamma^{г}}\left[0{,}01\left(CH_4^{тл}\cdot C_{CH_4}^{тл}+H_2^{тл}C_{H_2}^{тл}+N_2^{тл}C_{N_2}^{тл}+CO^{тл}\cdot C_{CO}^{тл}+\right.\right.$ $\left.\left.+RO_2^{тл}C_{RO_2}^{тл}+\Sigma C_n H_m^{тл}C_{C_nH_m}^{тл}\right)+0{,}00124\,C_{H_2O}^{тл}\,d_г^{тл}\right]\cdot 4{,}187$
Физическое тепло природного газа $i_г^{тл}$, кДж/м³ (ккал/м³)	$c_г^{тл}\cdot t_{тл}^{г}$
Энтальпия пара на распыл $i_ф$, кДж/кг (ккал/кг)	Таблицы водяного пара
Тепло, вносимое в котел с паровым дутьем $Q_{ф}^{\cdot}$, кДж/кг (ккал/кг)	$G_ф\left(i_ф-600\right)$
Располагаемое тепло при сжигании мазута $Q_р^{р.м}$, кДж/кг (ккал/кг)	$Q_н^{р}+Q_{в.вн}+i_м^{тл}+Q_{вд}+Q_ф$
Располагаемое тепло при сжигании природного газа $Q_р^{р.г}$, кДж/м³ (ккал/м³)	$Q_н^{р}+Q_{в.вн}+Q_{вд}+i_г^{тл}$

5. Теплосодержание воздуха и дымовых газов

Величина	Расчетная формула
Теплоемкость газов при температуре уходящих газов $C_{RO_2}, C_{CH_4}, C_{H_2}, C_{CO}, C_{H_2}, C_{O_2}, C_{H_2O}, C_{C_nH_m}$, кДж/(м³·°С) [ккал/(м³·°С)]	$(a_0 + a_1\vartheta_{ух} + a_2\vartheta_{ух}^2 + a_3\vartheta_{ух}^3 + a_4\vartheta_{ух}^4)\cdot 4{,}187$ (значения коэффициентов a_i – по разд.7)
Энтальпия сухих дымовых газов $I_{с.г}^{ух}$ при $\alpha = 1$, кДж/кг (ккал/кг)*; кДж/м³ (ккал/м³)**	$0{,}01\, V_{с.г}^{ух}\vartheta^{ух}(RO_2^{ух}C_{RO_2} + CH_4^{ух}C_{CH_4} + N_2^{ух}C_{N_2} + CO^{ух}C_{CO} + H_2^{ух}C_{H_2} + O_2^{ух}C_{O_2} + C_nH_m^{ух}C_{C_nH_m})\frac{100-q_4}{100}$
Энтальпия водяных паров $I_{H_2O}^{ух}$ при $\alpha = 1$, кДж/кг (ккал/кг); кДж/м³ (ккал/м³)	$V_{H_2O}^{ух} C_{H_2O}\vartheta^{ух}$
Энтальпия уходящих газов $I^{ух}$ при $\alpha = 1$, кДж/кг (ккал/кг); кДж/м³ (ккал/м³)	$I_{с.г}^{ух} + I_{H_2O}^{ух}$
Теплоемкость воздуха при температуре уходящих газов $C_в$, кДж/(м³·°С) [ккал/(м³·°С)]	$(a_0 + a_1\vartheta_{ух} + a_2\vartheta_{ух}^2 + a_3\vartheta_{ух}^3 + a_4\vartheta_{ух}^4)\cdot 4{,}187$ (значения коэффициентов a_i – по разд.7)
Энтальпия теоретически необходимого воздуха при температуре уходящих газов $I_в^0$, кДж/кг (ккал/кг); кДж/м³ (ккал/м³)	$V_в^0 C_в \vartheta_{ух}$
Энтальпия дымовых газов при температуре уходящих газов $I^{ух}$, кДж/кг (ккал/кг); кДж/м³ (ккал/м³)	$I_{с.г}^{ух} + (\alpha_{ух} - 1)I_в^0$
Теплоемкость воздуха при температуре холодного воздуха $C_{хв}$, кДж/(м³·°С) [ккал/(м³·°С)]	$(a_0 + a_1 t_{хв} + a_2 t_{хв}^2 + a_3 t_{хв}^3 + a_4 t_{хв}^4)4{,}187$ (значения коэффициентов a_i – по разд.7)

Величина	Расчетная формула
Энтальпия теоретически необходимого воздуха при температуре холодного воздуха $I_{хв}$, кДж/кг (ккал/кг); кДж/м^3 (ккал/м^3)	$V_в^o C_{хв} t_{хв}$

*При сжигании мазута.

**При сжигании природного газа.

6. Тепловой баланс котла

Величина	Расчетная формула	
	Мазут	Газ
Потери тепла с уходящими газами q_2, %	$\frac{(I_г^{ух} - \alpha_{ух} I_{хв})(100 - q_4)}{Q_р^{р.м}}$	$\frac{I_г^{ух} - \alpha_{ух} I_{хв}^o}{Q_р^{р.г}}$
Потери тепла от химической неполноты сгорания q_3, %	$\frac{V_{с.г}^т}{Q_р^{р.т}}\left(30{,}18CO^т + 85{,}55CH_4^т + 27{,}94H_2^т + 141{,}1\Sigma C_n H_m^т\right)\frac{100 - q_4}{100}$	$\frac{V_{с.г}^т}{Q_р^{р.г}}\left(30{,}18CO^т + 85{,}55CH_4^т + 27{,}94H_2^т + 141{,}1\Sigma C_n H_m^т\right)\cdot 100$
Потери тепла от механической неполноты сгорания q_4, %	$\frac{780 M V_{с.г}^{ух}}{Q_н^р}$	
Потери тепла из-за наружного охлаждения q_5, %	$a_o + a_1 D_{пе} + a_2 D_{пе}^2 + a_3 D_{пе}^3$ (значения коэффициентов a_i – по разд.8)	$a_o + a_1 D_{пе} + a_2 D_{пе}^2 + a_3 D_{пе}^3$ (значения коэффициентов a_i – по разд.8)
Суммарные потери тепла Σq, %	$q_2 + q_3 + q_4 + q_5$	$q_2 + q_3 + q_5$
Коэффициент полезного действия котельного агрегата (брутто) $\eta_{к.а}$, %	$100 - \Sigma q$	

7. Коэффициенты полиномов расчета теплоемкости воздуха и дымовых газов

Газ	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
RO_2	$3{,}8231419\cdot10^{-1}$	$2{,}5207184\cdot10^{-4}$	$-1{,}6633384\cdot10^{-7}$	$7{,}6427112\cdot10^{-11}$	$-2{,}0555466\cdot10^{-14}$
CH_4	$3{,}7002972\cdot10^{-1}$	$1{,}7125252\cdot10^{-4}$	$5{,}8326777\cdot10^{-7}$	$-1{,}1547981\cdot10^{-9}$	$1{,}0438520\cdot10^{-12}$
N_2	$3{,}0929091\cdot10^{-1}$	$-5{,}3739164\cdot10^{-6}$	$6{,}2620324\cdot10^{-8}$	$-4{,}7710105\cdot10^{-11}$	$1{,}5436120\cdot10^{-14}$
CO	$3{,}1004196\cdot10^{-1}$	$9{,}3869493\cdot10^{-6}$	$-3{,}1934747\cdot10^{-8}$	$2{,}3601401\cdot10^{-10}$	$-3{,}1468532\cdot10^{-13}$
H_2	$3{,}0502797\cdot10^{-1}$	$3{,}8432404\cdot10^{-5}$	$-9{,}7465055\cdot10^{-8}$	$1{,}1480190\cdot10^{-10}$	$-4{,}3706331\cdot10^{-14}$
O_2	$3{,}1118876\cdot10^{-1}$	$3{,}8834457\cdot10^{-5}$	$2{,}5241034\cdot10^{-8}$	$-3{,}2737862\cdot10^{-11}$	$1{,}1991440\cdot10^{-14}$
H_2O	$3{,}5672216\cdot10^{-1}$	$2{,}479524\cdot10^{-5}$	$5{,}7207221\cdot10^{-8}$	$-3{,}5893369\cdot10^{-11}$	$9{,}1538884\cdot10^{-15}$
C_nH_m	$5{,}2810839\cdot10^{-1}$	$6{,}7319522\cdot10^{-4}$	$6{,}5078543\cdot10^{-8}$	$-3{,}5766312\cdot10^{-10}$	$2{,}0541957\cdot10^{-15}$

8. Коэффициент полинома расчета потерь тепла из-за наружного охлаждения котла

Коэффициент	Паропроизводительность, т/ч	
	20-100	100-900
a_0	$0,15996826 \cdot 10^{1}$	0,81825397
a_1	$-0,23848966 \cdot 10^{-1}$	$-0,12802068 \cdot 10^{-2}$
a_2	$0,20064935 \cdot 10^{-3}$	$0,63997113 \cdot 10^{-6}$
a_3	$0,62289562 \cdot 10^{-6}$	$0,13468014 \cdot 10^{-9}$

9. Тепловой баланс котла (по приведенным характеристикам топлива)

Величина	Расчетная формула	
	Мазут	Газ
1. Потери тепла с уходящими газами q_2, %	$(K\alpha_{ух}+C)\left(\vartheta_{ух}-\frac{\alpha_{ух}}{\alpha_{ух}+B}t_{хв}\right)A_t\left(1-0,01q_4\right)K_q \cdot 10^{-2}$ (коэффициенты К,С,В - по разд.II) $A_t = 1+0,013\left(\frac{\vartheta_{ух}-150}{100}\right)$ $K_q = \frac{Q_н^р}{1+Q_{в.вн}^п \cdot 10^{-3}+\frac{i_{тл}}{Q_н^р}}$ $\left(\frac{i_m}{Q_н^р}\right) \approx c_{маз}^п t_{маз} \cdot 10^{-3}$	$i_{тл}$ - по разд.4
2. Приведенное тепло, внесенное в котел с подогретым воздухом, $Q_{в.вн}^п$, кДж/кг (ккал/кг); кДж/м^3 (ккал/м^3)	$0,35\beta'\Delta t_{под}$	
3. Нагрев воздуха в калорифере $\Delta t_{под}$, °С	$t_в'' - t_в'$	

Величина	Расчетная формула	
	Мазут	Газ
4. Приведенная теплоемкость мазута $c''_{маз}$, I/°C	$\frac{c_{маз}}{Q^p_н} \cdot 10^5$	-
5. Потери тепла от химической неполноты сгорания q_3, %	$A(\alpha_т - \rho) Q_{пр.г} (1 + 0{,}006 W^п) \times (100 - q_4) \cdot K_q \cdot 10^{-5}$	$A(\alpha_т - \rho) Q_{пр.г} (1 + 0{,}006 W^г) \times K_q \cdot 10^{-3}$
	(коэффициенты A, ρ - по разд.II)	
6. Суммарная теплота сгорания газообразных горючих компонентов, содержащихся в I м³ сухих продуктов сгорания $Q_{пр.г}$, кДж/м³ (ккал/м³)	$30{,}18\,CO^т + 25{,}79\,H_2^т + 85{,}55\,CH_4^т$	
7. Приведенная влажность $W^п$, кг·%/кДж (кг·%/ккал), м³·%/кДж (м³·%/ккал)	$\frac{W^р}{Q^р_н} \cdot 10^5$	
8. Потери тепла от механической неполноты сгорания q_4, %	См. разд.6, п.3	-
9. Потери тепла из-за наружного охлаждения q_5, %	См. разд.6, п.4	
I0. Суммарные потери тепла Σq, %	$q_2 + q_3 + q_4 + q_5$	$q_2 + q_3 + q_5$
II. Коэффициент полезного действия котельного агрегата (брутто) $\eta_{к.а}$, %	$100 - \Sigma q$	

10. Расчеты при совместном сжигании природного газа и мазута

Величина	Расчетная формула
Доля мазута по тепловыделению по измеренным расходам каждого вида топлива q	$\frac{B_{маз} \cdot Q^{р}_{н.маз}}{B_{газ} \cdot Q^{с}_{н.газ} + B_{маз} \cdot Q^{р}_{н.маз}}$
Расход природного газа, выраженный через условное топливо, $B^{ус}_{газ}$, т/ч	$\frac{B_{газ} \cdot Q^{с}_{н.газ}}{8,14}$ или $\frac{B_{газ} \cdot Q^{с}_{н.газ}}{7 \cdot 10^{3}}$
Расход мазута, выраженный через условное топливо, $B^{ус}_{маз}$, т/ч	$\frac{B_{маз} \cdot Q^{р}_{н.маз}}{8,14}$ или $\frac{B_{маз} \cdot Q^{р}_{н.маз}}{7000 \cdot 10^{3}}$
Доля мазута по тепловыделению, выраженная через расходы условного топлива, q	$\frac{B^{ус}_{маз}}{B^{ус}_{газ} + B^{ус}_{маз}}$
Доля мазута по тепловыделению, выраженная через число работающих газовых и мазутных горелок (при одинаковых значениях тепловыделения в горелках) q	$\frac{n_{маз}}{n_{газ} + n_{маз}}$
Максимальное объемное содержание трехатомных продуктов сгорания в сухих дымовых газах при сжигании природного газа $(RO_2^{макс})_{газ}$, %	$\frac{100 \cdot (RO_2)_{газ}}{100 - 4,76 \cdot (O_2)_{газ}}$
Максимальное объемное содержание трехатомных продуктов сгорания в сухих дымовых газах при сжигании мазута $(RO_2^{макс})_{маз}$, %	$\frac{100 \cdot (RO_2)_{маз}}{100 - 4,76 \cdot (O_2)_{маз}}$

Величина	Расчетная формула
Максимальное объемное содержание трехатомных продуктов сгорания в сухих дымовых газах при совместном сжигании природного газа и мазута $(RO_2^{макс})_{совм}$, %	$\frac{100(RO_2)_{совм}}{100-4{,}76(O_2)_{совм}}$
Приведенный объем трехатомных продуктов сгорания при сжигании природного газа $(V_{RO_2})^{п}_{газ}$, $\frac{м^3 \cdot 4{,}19 \cdot 10^3}{кДж}$ $(\frac{м^3 \cdot 10^3}{ккал})$	$0{,}1177(1 + 0{,}006\, W^{п}_{газ})$
Приведенный объем трехатомных продуктов сгорания при сжигании мазута $(V_{RO_2})^{п}_{маз}$, $\frac{м^3 \cdot 4{,}19 \cdot 10^3}{кДж}$ $(\frac{м^3 \cdot 10^3}{ккал})$	$0{,}165(1 + 0{,}006\, W^{п}_{маз})$
Приведенная влажность природного газа $W^{п}_{газ}$, $\frac{кг \cdot 4{,}19 \cdot 10^5}{кДж}$ $(\frac{кг \cdot 10^5}{ккал})$	$\frac{W^{р}_{газ}}{Q^{с}_{н.газ}} \cdot 4{,}187 \cdot 10^3$ $\left(\frac{W^{р}_{газ}}{Q^{с}_{н.газ}} \cdot 10^3\right)$
Приведенная влажность мазута $W^{п}_{маз}$, $\frac{кг \cdot 4{,}19 \cdot 10^5}{кДж}$ $(\frac{кг \cdot 10^5}{ккал})$	$\frac{W^{р}_{маз}}{Q^{р}_{н.маз}} \cdot 4{,}187 \cdot 10^3$ $\left(\frac{W^{р}_{маз}}{Q^{р}_{н.маз}} \cdot 10^3\right)$
Доля мазута по тепловыделению по результатам газового анализа q (при $q_3 = 0$)	$\frac{(RO_2^{макс})_{совм} \cdot \frac{(V_{RO_2})^{п}_{газ}}{RO_2^{макс}_{газ}} - \dots}{(V_{RO_2})^{н}_{маз} - (V_{RO_2})^{п}_{газ} - \dots}$ $\dots \frac{-(V_{RO_2})^{п}_{газ}}{-(RO_2^{макс})_{совм} \cdot \left[\frac{(V_{RO_2})^{п}_{маз}}{RO_2^{макс}_{маз}} - \frac{(V_{RO_2})^{п}_{газ}}{RO_2^{макс}_{газ}}\right]}$
Доля мазута по внесенному теплу в топку по измеренным расходам каждого вида топлива q'	$\frac{B_{маз} \cdot Q^{р}_{р.маз}}{B_{газ} \cdot Q^{р}_{р.газ} + B_{маз} \cdot Q^{р}_{р.маз}}$

Величина	Расчетная формула
Доля мазута по внесенному теплу в топку по измеренному расходу мазута q'	$\frac{B_{маз} \cdot Q^{р}_{р.маз}}{10^{5} \cdot Q_{ку} / \eta^{бр}_{ку.совм}}$, где $\eta^{бр}_{ку.совм} = \frac{\eta^{бр}_{ку.газ} + \eta^{бр}_{ку.маз}}{2}$ (принято).
Доля мазута по внесенному теплу в топку по измеренному расходу природного газа q'	$\frac{10^{5} \cdot Q_{ку} / \eta^{бр}_{ку.совм} - B_{газ} \cdot Q^{р}_{р.газ}}{10^{5} \cdot Q_{ку} / \eta^{бр}_{ку.совм}}$ или $\frac{10^{8} \cdot Q_{ку} / \eta^{бр}_{ку.совм} - B_{газ} \cdot Q^{р}_{р.газ}}{10^{8} \cdot Q_{ку} / \eta^{бр}_{ку.совм}}$, где $\eta^{бр}_{ку.совм} = \frac{\eta^{бр}_{ку.газ} + \eta^{бр}_{ку.маз}}{2}$ (принято).
Доля природного газа	$(1-q)$ или $(1-q')$
Потери тепла с уходящими газами $q_{2\,совм}$, %	$q_{2\,газ} \cdot (1-q) + q_{2\,маз} \cdot q$
Потери тепла от химической неполноты сгорания $q_{3\,совм}$, %	$q_{3\,газ} \cdot (1-q) + q_{3\,маз} \cdot q$
Потери тепла от механической неполноты сгорания $q_{4\,совм}$, %	$q_{4\,маз} \cdot q$
Потери тепла от наружного охлаждения $q_{5\,совм}$, %	$q_{5\,газ} \cdot (1-q) + q_{5\,маз} \cdot q$
Суммарные потери тепла $\Sigma q_{совм}$, %	$q_{2\,совм} + q_{3\,совм} + q_{4\,совм} + q_{5\,совм}$
Коэффициент полезного действия котельной установки (брутто) $\eta^{бр}_{ку}$, %	$100 - \Sigma q_{совм}$

II. Усредненные по видам топлива значения коэффициентов

Топливо	K	C	A	B	ρ
Мазут	$3,495+0,02W^{п}$	$0,44+0,04W^{п}$	I,I0	0,I3	0,057
Природный газ	3,53	0,60	I,II	0,I8	0,II0

I2. Параметры, определяемые прямыми измерениями

Избыточное давление, МПа (кгс/см^2):
- питательной воды $\bar{P}_{пв}$
- перегретого пара за котлом $\bar{P}_{пе}$.
- пара промперегрева перед котлом $\bar{P}'_{вт}$
- пара промперегрева за котлом $\bar{P}''_{вт}$
- воды на впрыск в промежуточный пароперегреватель $\bar{P}^{впр}_{вт}$
- продувочной воды $\bar{P}_{пр}$
- насыщенного пара, отдаваемого на сторону $\bar{P}_{н.п}$

Температура, ^{o}C:
- питательной воды $t_{пв}$
- перегретого пара за котлом $t_{пе}$
- пара промперегрева перед котлом $t'_{вт}$
- пара промперегрева за котлом $t''_{вт}$
- воды на впрыск в промежуточный пароперегреватель $t^{впр}_{вт}$, ^{o}C.

Расход, кг/с (т/ч):
- перегретого пара за котлом $D_{пе}$
- пара через промежуточный пароперегреватель $D_{вт}$
- воды на впрыск в промежуточный пароперегреватель $D^{впр}_{вт}$
- продувочной воды $D_{пр}$
- насыщенного пара, отдаваемого на сторону $D_{н.п}$

Содержание, %:
- углерода $C^{р}$
- водорода $H^{р}$
- серы $S^{р}$
- кислорода $O^{р}$
- азота $N^{р}$

Зольность $A^{р}$, %.

Влажность W^p, %.
Влагосодержание воздуха $d_в$, г/кг.
Удельный расход пара на распыл мазута $G_ф$, кг/кг.
Присосы воздуха в топку $\Delta\alpha_т$.
Концентрация углерода в дымовых газах при сжигании мазута $\mu_г$, г/м^3.
Содержание в природном газе, %:
- метана $CH_4^{тп}$
- этана $C_2H_6^{тп}$
- пропана $C_3H_8^{тп}$
- бутана $C_4H_{10}^{тп}$
- пентана $C_5H_{12}^{тп}$
- водорода $H_2^{тп}$
- окиси углерода $CO^{тп}$
- сероводорода $H_2S^{тп}$
- кислорода $O_2^{тп}$
- трехатомных газов $RO_2^{тп}$
- азота $N_2^{тп}$

Влагосодержание в природном газе $d_г^{тп}$, г/м^3.
Температура воздуха, ^oC:
- до калориферов $t_в'$
- после калориферов $t_в''$
- перед дутьевым вентилятором $t_{вд}'$

Температура мазута $t_м^{тп}$, ^oC.
Температура природного газа $t_г^{тп}$, ^oC.
Плотность природного газа $\gamma^г$, кг/м^3.
Давление пара на распыливание мазута $P_ф$, МПа (кгс/см^2).
Температура пара на распыливание мазута $t_ф$, ^oC.
Температура уходящих газов $\vartheta_{ух}$, ^oC.
Температура холодного воздуха $t_{хв}$, ^oC.
Содержание в дымовых газах в режимном сечении, %:
- кислорода $O_2^т$
- трехатомных газов $RO_2^т$
- окиси углерода $CO^т$
- водорода $H_2^т$
- азота $N_2^т$
- метана $CH_4^т$

Содержание в дымовых газах в балансовом сечении, %:
кислорода $O_2^{ух}$
трехатомных газов $RO_2^{ух}$
окиси углерода $CO^{ух}$
водорода $H_2^{ух}$
азота $N_2^{ух}$
метана $CH_4^{ух}$
Электрическая нагрузка $N_{эл}$, МВт.
Коэффициент байпасирования калориферов по воздуху К.
Сопротивление конвективной шахты котла с включенной рециркуляцией газов $S_{кш}$, кПа (кгс/см^2).
То же с отключенной рециркуляцией $S^{o}_{кш}$, кПа (кгс/м^2).
Расход дымовых газов на рециркуляцию $V_{ГРЦ}$, м^3/с (м^3/ч).
Расход дымовых газов после места забора на рециркуляцию $V_г$, м^3/с (м^3/ч).
Расход топлива B, кг/с (т/ч); для газа - м^3/с (м^3/ч).

Приложение 3
Обязательное

ПРИМЕР РАСЧЕТА ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КПД БРУТТО КОТЛА

I. В качестве исходных данных взяты результаты испытаний котла ТГМП-II4 энергоблока 300 МВт при сжигании сернистого мазута.

Исходные данные

Топливо: удельная теплота сгорания $Q^p_н$ = 9660 ккал/кг; элементарный состав - S^p = I,7%, W^p = I,6%, H^p = II,4%, A^p = 0,06%, N^p+O^p = 0,6%, C^p = 84,64%, тепло подогрева топлива $Q_{тп}$ = 60 ккал/кг;

Состав уходящих газов: RO_2 = II,3%, O_2 = 5,8%, H_2 = 0, CO = 0, N_2 = 82,9%, температура уходящих газов - I54,3°С;

Температура холодного воздуха - 25°С, тепло, полученное воздухом в паровых калориферах, $Q_{в.вн}$ = 8I,6 ккал/кг.

Теплоемкость: сухих продуктов сгорания при температуре уходящих газов $C_{с.г}$ =0,3221 ккал/(м^3·°С), водяных паров - C_{H_2O} =

0,3617 ккал/(м^3·°С), холодного воздуха – $C_{х.в}$ = 0,3153 ккал/(м^3·°С), $V_{с.г}$ = 14,0 м^3/кг, V_{H_2O} = 1,55 м^3/кг, V_0 = 10,73 м^3/кг, Q_2 =6,83%.

2. Средние квадратические погрешности (суммарные) измерений исходных величин равны: $\Delta Q_н^р$ = ± 100 ккал/кг, $\Delta H^р$= ±0,5%, $\Delta S^р$= ±0,5%, $\Delta W^р$= ±0,2%, $\Delta C^р$ = ±1,0%, $\Delta Q_{тл}$ = ±5 ккал/кг, $\Delta Q_{в.вн}$ = ±5 ккал/кг, ΔRO_2= ±0,5%, ΔO_2 = ±0,6%, $\Delta T_{ух}$ = ±5°С, $\Delta t_{хв}$ = ±3°С, $\Delta C_{с.г}$ = 0,002 ккал/(м^3·°С), ΔC_{H_2O} = $\Delta C_{хв}$ = 0,001 ккал/(м^3·°С).

3. Расчет погрешностей.

В общем виде погрешность косвенного измерения, к которым относятся потери тепла с уходящими газами и КПД брутто, определяется согласно разд.6 Методических указаний.

Погрешность определения располагаемого тепла топлива:

$$\Delta Q_р^р = \sqrt{(\Delta Q_н^р)^2+(\Delta Q_{тл})^2+(\Delta Q_{в.вн})^2} =$$

$$= \sqrt{100^2 + 5^2 + 5^2} \simeq 100 \text{ ккал/кг, т.е. } \Delta Q_р^р \simeq \Delta Q_н^р.$$

Погрешность определения приведенного углерода топлива:

$$\Delta K^р = \sqrt{(\Delta C^р)^2+(0{,}375\Delta S^р)^2} = \sqrt{1^2+(0{,}375\cdot 0{,}5)^2} \simeq 1{,}0\%,$$

т.е. $\Delta K^р \simeq \Delta C^р$.

Погрешность определения объема сухих продуктов сжигания топлива:

$$\Delta V_{с.г} = \sqrt{\left(\frac{\partial V_{с.г}}{\partial K^р}\Delta K^р\right)^2+\left(\frac{\partial V_{с.г}}{\partial RO_2}\Delta RO_2\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(1{,}855\frac{1}{RO_2}\Delta K^р\right)^2 + \left(1{,}855\frac{K^р}{(RO_2)^2}\Delta RO_2\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(1{,}855\frac{1}{11{,}3}\cdot 1\right)^2 + \left(1{,}855\frac{84{,}64}{11{,}3^2}\,0{,}3\right)^2} =$$

$$= \sqrt{(0{,}164\cdot 1)^2 + (1{,}230\cdot 0{,}5)^2} = 0{,}64 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Погрешность определения объема теоретически необходимого количества воздуха:

$$\Delta V_0 = \sqrt{(0{,}09\cdot\Delta C^p)^2+(0{,}268\cdot\Delta H^p)^2+(0{,}034\cdot\Delta S^p)^2} =$$

$$= \sqrt{(0{,}09\cdot 1)^2 + (0{,}268\cdot 0{,}5)^2 + (0{,}034\cdot 0{,}5)^2} = 0{,}16 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

С достаточной для практических расчетов точностью можно принять:

$$\Delta V_0 \simeq 0{,}269\,\Delta H^p.$$

Погрешность определения объема водяных паров:

$$\Delta V_{H_2O} = \sqrt{(0{,}11196\,\Delta H^p)^2+(0{,}01244\,\Delta W^p)^2+(0{,}016085\,\Delta V_0)^2} =$$

$$= \sqrt{(0{,}111960{,}5)^2+(0{,}012440{,}2)^2+(0{,}0160850{,}16)^2} = 0{,}06 \text{ м}^3/\text{кг}$$

или $\Delta V_{H_2O} \simeq 0{,}11196\,\Delta H^p$.

Погрешность определения коэффициента избытка воздуха в дымовых газах:

$$\Delta\alpha_{yx} = \sqrt{\left[\frac{3{,}76\cdot O_2}{(N_2-3{,}76\,O_2)^2}\Delta N_2\right]^2 + \left[\frac{3{,}76\,N_2}{(N_2-3{,}76\,O_2)^2}\Delta O_2\right]^2} =$$

$$= \sqrt{\left[\frac{3{,}76\cdot 5{,}8}{(82{,}9-3{,}76\cdot 5{,}8)^2}\cdot 0{,}8\right]^2 + \left[\frac{3{,}76\cdot 82{,}9}{(82{,}9-3{,}76\cdot 5{,}8)^2}\cdot 0{,}6\right]^2} = 0{,}05,$$

причем $\Delta N_2 = \sqrt{(\Delta RO_2)^2+(\Delta O_2)^2} = \sqrt{0{,}5^2+0{,}6^2} \simeq 0{,}8\,\%$.

Учитывая, что $\frac{\partial\alpha}{\partial O_2} \gg \frac{\partial\alpha}{\partial N_2}$, можно принять

$$\Delta\alpha_{yx} = \frac{3{,}76\,N_2}{(N_2-3{,}76\cdot O_2)^2}\Delta O_2.$$

Погрешность определения потерь тепла с уходящими газами определяется из следующего выражения:

$$\Delta q_2 = 100\sqrt{\left(\frac{\partial q_2}{\partial V_{c.г}}\Delta V_{c.г}\right)^2+\left(\frac{\partial q_2}{\partial C_{c.г}}\Delta C_{c.г}\right)^2+\left(\frac{\partial q_2}{\partial V_{H_2O}}\Delta V_{H_2O}\right)^2+}$$

$$\overline{+\left(\frac{\partial q_2}{\partial C_{H_2O}}\Delta C_{H_2O}\right)^2+\left(\frac{\partial q_2}{\partial T_{yx}}\Delta T_{yx}\right)^2+\left(\frac{\partial q_2}{\partial V_0}\Delta V_0\right)^2+\left(\frac{\partial q_2}{\partial\alpha_{yx}}\Delta\alpha_{yx}\right)^2+\left(\frac{\partial q_2}{\partial C_{xв}}\Delta C_{xв}\right)^2+}$$

$$\cdots + \left(\frac{\partial q_2}{\partial t_{хв}}\Delta t_{хв}\right)^2 + \left(\frac{\partial q_2}{\partial Q_р^р}\Delta Q_р^р\right)^2,$$

Частные производные в вышеприведенном выражении равны:

$$\frac{\partial q_2}{\partial V_{с.г}} = \frac{C_{с.г}\,T_{ух}}{Q_р^р} = \frac{0{,}3221\cdot 154{,}3}{9801{,}6} = 5{,}07\cdot 10^{-3};$$

$$\frac{\partial q_2}{\partial C_{с.г}} = \frac{V_{с.г}\,T_{ух}}{Q_р^р} = \frac{14{,}0\cdot 154{,}3}{9801{,}6} = 220{,}4\cdot 10^{-3};$$

$$\frac{\partial q_2}{\partial V_{H_2O}} = \frac{C_{H_2O}\,T_{ух}}{Q_р^р} = \frac{0{,}3617\cdot 154{,}3}{9801{,}6} = 5{,}69\cdot 10^{-3};$$

$$\frac{\partial q_2}{\partial C_{H_2O}} = \frac{V_{H_2O}\,T_{ух}}{Q_р^р} = \frac{1{,}55\cdot 154{,}3}{9801{,}6} = 24{,}4\cdot 10^{-3};$$

$$\frac{\partial q_2}{\partial T_{ух}} = \frac{V_{с.г}\cdot C_{с.г} + V_{H_2O}\cdot C_{H_2O}}{Q_р^р} = \frac{14{,}0\cdot 0{,}3221 + 1{,}55\cdot 0{,}3617}{9801{,}6} = 0{,}5\cdot 10^{-3};$$

$$\frac{\partial q_2}{\partial V_0} = \frac{\alpha_{ух}\,C_{хв}\,t_{хв}}{Q_р^р} = \frac{1{,}537\cdot 0{,}3153\cdot 25}{9801{,}6} = 1{,}1\cdot 10^{-3};$$

$$\frac{\partial q_2}{\partial \alpha_{ух}} = \frac{V_0\,C_{хв}\,t_{хв}}{Q_р^р} = \frac{10{,}73\cdot 0{,}3153\cdot 25}{9801{,}6} = 8{,}6\cdot 10^{-3};$$

$$\frac{\partial q_2}{\partial C_{хв}} = \frac{V_0\,\alpha_{ух}\,t_{хв}}{Q_р^р} = \frac{10{,}73\cdot 1{,}357\cdot 25}{9801{,}6} = 37{,}1\cdot 10^{-3};$$

$$\frac{\partial q_2}{\partial t_{хв}} = \frac{V_0\,\alpha_{ух}\,C_{хв}}{Q_р^р} = \frac{10{,}73\cdot 1{,}357\cdot 0{,}3153}{9801{,}6} = 0{,}5\cdot 10^{-3};$$

$$\frac{\partial q_2}{\partial Q_р^р} = \frac{q_2}{Q_р^р}\cdot 10^{-2} = \frac{6{,}83}{9801{,}6} = 0{,}7\cdot 10^{-5}.$$

Погрешность определения потерь тепла с уходящими газами равна:

$$\Delta q_2 = \sqrt{(5{,}07\cdot 10^{-3}\cdot 0{,}64)^2+(220{,}4\cdot 10^{-3}\cdot 0{,}002)^2+(5{,}69\cdot 10^{-3}\cdot 0{,}06)^2+ \dots}$$

$$\dots +(24{,}4\cdot 10^{-3}\cdot 0{,}001)^2+(0{,}5\cdot 10^{-3}\cdot 5)^2+(1{,}1\cdot 10^{-3}\cdot 0{,}16)^2+(8{,}6\cdot 10^{-3}\times$$

$$\dots \times 0{,}05)^2+(37{,}1\cdot 10^{-3}\cdot 0{,}001)^2+(0{,}5\cdot 10^{-3}\cdot 3)^2+(0{,}7\cdot 10^{-5}\cdot 100)^2}\cdot 100 =$$

$$= 100\ \sqrt{10{,}5\cdot 10^{-6}+ 0{,}2\cdot 10^{-6}+ 0{,}1\cdot 10^{-6} + 0{,}6\cdot 10^{-9}+ 5{,}06\cdot 10^{-3} + \dots}$$

$$\dots + 0{,}03\cdot 10^{-6} + 0{,}2\cdot 10^{-6} + 1{,}4\cdot 10^{-9}+ 2{,}25\cdot 10^{-6} +$$

$$\dots + 0{,}5\cdot 10^{-6}} = 4{,}3\cdot 10^{-1} = 0{,}43\%;$$

$$\Delta q_2 \simeq 0{,}43\ \text{абс.}$$

Учитывая значения погрешности отдельных параметров, входящих в вышеприведенную расчетную формулу, с достаточной точностью можно записать:

$$\Delta q_2 = 100\ \sqrt{\left(\frac{\partial q_2}{\partial V_{c.г}}\Delta V_{c.г}\right)^2+\left(\frac{\partial q_2}{\partial T_{ух}}\Delta T_{ух}\right)^2+\left(\frac{\partial q_2}{\partial t_{хв}}\Delta t_{хв}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{C_{c.г}\,T_{ух}}{Q_p^2}\Delta V_{c.г}\right)^2+\left(\frac{V_{c.г}\,C_{c.г}+V_{H_2O}\,C_{H_2O}}{Q_p^2}\Delta T_{ух}\right)^2+ \dots}$$

$$\dots + \left(\frac{V_0\,\alpha_{ух}\,C_{хв}}{Q_p^2}\Delta t_{хв}\right)^2}\cdot 100,\ \%\ \text{абс}.$$

Погрешность определения КПД брутто котла будет практически равна погрешности определения потерь тепла с уходящими газами:

$$\Delta\eta_к^{бр} \simeq \Delta q_2 \simeq 0{,}43\%.$$

О Г Л А В Л Е Н И Е

1. Общие положения 3
2. Нормы и показатели точности определяемых характеристик 7
3. Средства измерений 9
4. Последовательность испытаний I6
5. Условия испытаний 26
6. Обработка результатов измерений 29
7. Форма представления результатов испытаний и требования к составлению технического отчета (заключения) 32
8. Правила принятия решений по результатам испытаний 34
9. Требования техники безопасности 34
I0. Особенности проведения испытаний при совместном сжигании природного газа и мазута 35

П р и л о ж е н и е I. Временная режимная карта котла ТГМП-204 № 5 Запорожской ГРЭС при сжигании мазута 4I

П р и л о ж е н и е 2. Расчетные формулы определяемых характеристик 44

П р и л о ж е н и е 3. Пример расчета погрешности определения КПД брутто котла 62

Ответственный редактор Т.П.Леонова
Литературный редактор Ф.С.Кузьминская
Технический редактор Т.Ю.Савина
Корректор Н.В.Зорина

Подписано к печати 31.10.88

Уч.-изд.л.3,6 Тираж 50 экз.

Заказ № Издат.№ 88613

Производственная служба передового опыта эксплуатации
энергопредприятий Союзтехэнерго
105023, Москва, Семеновский пер., д. 15

gost.e-ecolog.ru