

Министерство образования и науки Российской Федерации
Вологодский государственный технический университет

Кафедра теплогазоснабжения и вентиляции

КОТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И ПАРОГЕНЕРАТОРЫ

**Методические указания к курсовому и
дипломному проектированию**

Часть 1

Факультет инженерно-строительный

Специальности: 140104 «Промышленная теплоэнергетика»
270109 «Теплогазоснабжение и вентиляция»
Направления: 140100.62 «Теплоэнергетика» (бакалавриат)
270800.62 «Строительство» (бакалавриат)

Вологда

2011

УДК 621.182:658.26(075.8)

Котельные установки и парогенераторы: методические указания к курсовому и дипломному проектированию: в 2-х частях. Ч. 1. – Вологда: ВоГТУ, 2011. – 36 с.

Методические указания предназначены для курсового и дипломного проектирования студентами очной формы обучения по специальности 140104 «Промышленная теплоэнергетика» и 270109 «Теплогазоснабжение и вентиляция», заочной формы обучения по специальности 270109 «Теплогазоснабжение и вентиляция», а также направления 140100.62 «Теплоэнергетика» (бакалавриат) и 270800.62 «Строительство» (бакалавриат). В методических указаниях излагается методика поверочного теплового расчета котельного агрегата. В первой части приводится методика расчета процесса горения топлива, теплового баланса и топки котельного агрегата. Задачи непосредственно связаны с лекционным материалом и являются базовыми при изучении дисциплины.

Утверждено редакционно-издательским советом ВоГТУ

Составители: Синицын А.А., канд. техн. наук, доцент
Суханов И.А., аспирант

Рецензент: Игонин В.И., д-р техн. наук, профессор

ВВЕДЕНИЕ

Работа отечественных систем теплоснабжения сопряжена с рядом проблем, обусловленных ослаблением государственного влияния на энергетику, повышением стоимости топливно-энергетических ресурсов, изношенностью тепловых сетей и оборудования, отсутствием инвестиций на техническое перевооружение и несоответствием традиционно применяемых технологий теплоснабжения современным научно-техническим и экономическим требованиям. Нерешенность этих технических и экономических проблем негативно сказывается на качестве и энергетической эффективности теплоснабжения.

Одним из вариантов повышения эффективности работы системы теплоснабжения является модернизация источника тепловой энергии – котельных. Техничко-экономические расчеты показывают высокую эффективность перевода котлов с мазута на газ, на водогрейный режим работы и др. Выбор варианта модернизации в каждом конкретном случае должен определяться исходя из реальных условий эксплуатации и обеспечения экономической эффективности проекта. Такой выбор должен основываться на результатах теплового расчета котлоагрегата в соответствии с методикой [1] и технико-экономическим расчетом предлагаемого мероприятия.

Выполнение курсового или дипломного проекта позволяет закрепить знания, полученные при изучении теоретической части курса, по вопросам теплообмена, топочно-котельной техники; получить навыки по отысканию возможных путей усовершенствования работы котла, пользования нормативными материалами, ГОСТами, справочниками и другой литературой. Такой проект готовит студента к дипломному проектированию и имеет большое значение в его подготовке как высококвалифицированного специалиста. При самостоятельном, творческом подходе к выполнению проекта проверяются способности студента, его знания, эрудиция и умение принимать технически грамотные решения по вопросам своей специальности или направления обучения [2].

1. ТЕМАТИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ

1.1. Обоснование выбора темы проектирования

Современные промышленные предприятия и ТЭС имеют сложную и многообразную энергетическую систему, состоящую из установок и устройств, предназначенных для производства, трансформации, передачи, распределения и потребления топлива, электроэнергии, теплоты, сжатого воздуха, газа, кислорода. В качестве основного теплоносителя в промышленности и в быту используются пар и горячая вода, вырабатываемые в котельных установках. Технологическая схема котельной установки видоизменяется в зависимости от ее назначения, производительности, параметров пара, вида топлива, способа его сжигания и местных условий [2].

В качестве источника теплоты для котельных установок и парогенераторов используют продукты сжигания различных природных и искусственных топлив (твердых, жидких и газообразных), а также теплоту, выделяющуюся при экзотермических реакциях технологических процессов, теплоту отходящих газов промышленных печей и металлургического производства, теплоту охлаждения технологического продукта, теплоту теплоносителя первичного (вторичного) контура АЭС и т.п. [2].

Тематика работ, предлагаемых студентам для курсового или дипломного проектирования, очень широка: это паровые и водогрейные котлы различных типов и производительности, работающие на твердом, жидком и газообразном топливе природного и искусственного происхождения.

В качестве задания на проект может быть принят для реконструкции любой котел промышленного предприятия или тепловых электростанций. Удовлетворение запросов предприятия по месту работы студента имеет определяющее значение при самостоятельном выборе темы курсового проекта. Целевое направление такого проекта - решение реальных актуальных задач по совершенствованию работы действующих котельных установок промпредприятия и тепловых электростанций [2].

Анализ работы действующего оборудования, принятие конкретных решений по реконструкции его для повышения технико-экономических показателей, проведение необходимых расчетов на уровне курсового или дипломного проекта и защита принятых решений способствуют более глубокому развитию навыков самостоятельного творческого мышления студента. При этом логическим завершением подобного курсового проекта является внедрение результатов его конструкторско-технологических разработок в производство. В такой постановке выбора темы проекта должны быть заинтересованы и студент, и пред-

приятие; выполнение проекта гарантирует надежную обратную связь учебного процесса с производством: предприятие, имея заинтересованность в учебно - исследовательских разработках, является в то же время естественным соучастником подготовки инженерных кадров. Такие темы курсовых или дипломных проектов могут быть приняты студентом в порядке личной инициативы или по заказу предприятия, а проекты будут защищаться их авторами как студенческие научно- или учебно-исследовательские работы [2].

1.2. Сущность теплового расчета котла

Тепловой расчет котлоагрегата может быть конструкторским или поверочным. Конструкторский тепловой расчет проводится при создании новой конструкции котлоагрегата. Поверочный тепловой расчет выполняется при переводе котлоагрегата на другое топливо, изменении его теплопроизводительности или параметров вырабатываемого теплоносителя.

При конструкторском тепловом расчете по заданным теплопроизводительности котлоагрегата, температурам газа на выходе из газоходов и теплонапряжениям топочного пространства q_v и зеркала горения q_R при принятых диаметрах и шагах труб поверхностей нагрева определяются объем и поверхность стен топки, лучевоспринимающая поверхность топки, а также величина поверхности нагрева для каждого газохода.

Поверочный тепловой расчет производится для существующего котлоагрегата. В этом случае все конструктивные характеристики известны. Целью расчета является определение температур газов по газоходам и величины теплонапряжения топочного пространства q_v и зеркала горения q_R , причем значения q_v и q_R не должны выходить за допустимые для данного котлоагрегата значения, приведенные в [1, 3, 4, и др.].

Тепловой расчет котлоагрегата может быть комбинированным, когда для одних газоходов выполняется поверочный, а для других - конструкторский расчет. Например, если котлоагрегат, вырабатывавший насыщенный пар, оборудуется пароперегревателем, то в этом случае необходимо выполнить конструкторский расчет пароперегревателя, а для остальных газоходов производится поверочный расчет. И при конструкторском, и при поверочном расчетах надо знать объем воздуха, расходуемого на сжигание топлива, объем продуктов горения, расход топлива и к.п.д. котлоагрегата брутто. Данные теплового расчета являются основой для выполнения аэродинамического и гидродинамического расчетов котлоагрегата, а также для расчета его элементов на прочность [3].

1.3. Дополнительные сведения

Настоящие методические указания включают две части. В первой части рассматриваются вопросы, связанные с расчетом процесса горения топлива, энтальпии продуктов горения, теплового баланса котлоагрегата и поверочным тепловым расчетом топки. Во второй части приводится методика расчета фестона, конвективного пароперегревателя, котельных пучков, водяных экономайзеров и воздухоподогревателя.

Методические указания составлены на основании нормативного метода теплового расчета котлоагрегатов [1], и все ссылки на таблицы, номограммы относятся к работе [1].

Поскольку этот метод расчета использует систему единиц, основанную на калории и килограмм-силе, в методических указаниях также использована эта система единиц. Для перехода к системе единиц СИ приводится табл. 1.

Таблица 1

**Перевод единиц измерения из системы единиц,
основанной на калории и килограмм-силе, в единицы СИ**

Наименование величин	Обозн.	Значение в единицах, основанных на кгс и кал	Значение в единицах СИ
Давление	P	1 кгс/см ²	0,0981 МПа
Энтальпия (удельная)	h, Н	1 ккал/кг	4,1868 кДж/кг
Теплоемкость (удельная)	c	1 ккал/(кг·град) 1 ккал/(м ³ ·град)	4,1868 кДж/(кг·К) 4,1868 кДж/(м ³ ·К)
Коэффициент динамической вязкости	μ	1 кгс/(сек/м ²)	9,81 Па·с
Коэффициент теплопроводности	λ	1 ккал/(м·ч·°С)	1,163 Вт/(м·К)
Коэффициент теплоотдачи, теплопередачи	α, k	1 ккал/(м ² ·ч·°С)	1,163 Вт/(м ² ·К)
Тепловое напряжение объема топки	q _v	1 ккал/(м ³ ·ч)	1,163 Вт/м ³
Тепловое напряжение зеркала горения	q _R	1 ккал/(м ² ·ч)	1,163 Вт/м ²

1.4. Требования к пояснительной записке

Студенту выдается бланк задания со следующими исходными данными: паропроизводительность котельной установки; давление перегретого (насыщенного) пара; температура перегретого пара; температура питательной воды; температура холодного воздуха, марка топлива или процентное содержание его элементов, если оно отличается от табличных значений. После получения задания студент должен ознакомиться с прототипом проектируемой котельной установки и материалами, которые могут быть использованы при выполнении проекта, изучить литературу по теме проекта, рассмотреть возможные (конструктивные) варианты решения поставленной перед ним задачи, принять

обоснованное решение. После согласования принятого решения с руководителем студент приступает к расчетной части проекта.

Пояснительная записка оформляется студентом в соответствии со стандартом [7]. Графический материал (схемы, рисунки, графики и т.д.) выполняется с применением современных графических программ. Во всех случаях использования литературных источников в тексте должна быть сделана ссылка на них (порядковый номер источника по приведенному перечню использованной литературы, взятый в квадратные скобки). Если в расчетах использованы численные значения параметров, найденные по графикам или таблицам, то делается ссылка на источник с указанием номера рисунка. В пояснительной записке не должно быть цифр, происхождение которых неизвестно и не может быть установлено. Все расчеты должны быть сведены в таблицы по установленной форме, приведенной далее по тексту методических указаний. Численные значения параметров приводятся в единицах СИ.

Все расчеты рекомендуется помещать в приложении к пояснительной записке. В приложении приведен образец оформления титульного листа. За титульным листом помещается бланк задания на курсовой проект, затем «Содержание», далее пояснительная записка, библиографический список использованных источников и после него помещаются приложения с таблицами расчетов. Запись использованных источников производится по ГОСТ Р 7.0.5 - 2008, как это сделано, например, в настоящих указаниях.

При тепловом расчете парового или водогрейного котла используется много буквенных обозначений и индексов, встречающихся в расчете. Все условные обозначения следует давать в соответствии с принятыми в Нормативном методе [2]. Наименования разделов и подразделов должны быть краткими, соответствовать содержанию, их записывают в виде заголовков буквами более крупного шрифта.

Условные обозначения теплотехнических, химических и других величин должны быть одинаковыми во всех разделах записки. Расшифровка обозначений символов и численных коэффициентов, входящих в формулу, должна быть приведена непосредственно под формулой. При использовании дипломником справочных материалов, нормативных методов расчета, СНиП, прейскурантов, литературных данных и других материалов необходимо делать ссылки на использованную литературу. Приводить полное название использованной справочной и технической литературы в записке не обязательно, достаточно в квадратных скобках указать порядковый номер книги, под которым в конце записки она помещена в перечне использованной литературы.

Если в тексте в пределах одной фразы приводится ряд численных значений физической величины, единица указывается только после последнего числа, например 10, 20, 30, 40 мм.

Листы пояснительной записки нумеруют, начиная с титульного листа. На второй странице приводится задание на курсовое или дипломное проектирование, и далее идут листы записки в порядке, указанном в оглавлении. В конце записки помещается перечень использованной литературы. Пояснительная записка к проекту должна содержать следующие разделы.

Введение. Здесь необходимо указать основные направления развития современной теплоэнергетики России, перечислить типы котлов-аналогов, заводы-изготовители, затем обосновать, исходя из вышеизложенного, выбор темы курсового проекта.

Описание котла. В этом разделе следует описать конструкцию котла, составить таблицу основных конструктивных размеров прототипа, необходимых для теплового расчета, привести принципиальную схему котла, схемы испарения и циркуляции, схемы газового и воздушного трактов. При описании конструкции следует привести характеристику внутрибарабанных устройств, горелочных устройств, вентиляторов и дымососов прототипа. Здесь же привести описание реконструкции котла.

Пояснительная записка к расчетам проектируемого котла. В пояснительной записке к тепловому расчету указываются цели и задачи теплового расчета (поверочного или конструктивного), обосновывается выбор метода расчета.

Часть исходных данных, необходимых для расчета котла, известна из задания на проектирование - это конкретные исходные данные. Недостающие исходные данные находятся расчетным путем. В пояснительной записке следует указать, какие исходные данные - конкретные и расчетные - необходимы для теплового расчета проектируемого котла.

Далее поясняется порядок теплового расчета: какие параметры являются исходными и что определяется в результате расчета каждого из рассматриваемых элементов; дается объяснение, как проверяется правильность расчета при расчетах топочной камеры, фестона и далее последовательно всех поверхностей нагрева; поясняется, каким образом и для чего производится уточнение баланса котла. Необходимо также сделать вывод, на основании каких данных тепловой расчет сделан правильно и считается законченным.

Расчетная часть. Этот раздел является основой для анализа работы котла после реконструкции. Общие выводы по проекту, отражающие оптимальность принятых решений по реконструкции котла, могут быть сделаны только после выполнения расчетной части. В пояснительной записке эти выводы помещают-

ся перед списком литературы. Все расчеты производятся по методике, приведенной ниже, а результаты расчетов оформляются в порядке, рассмотренном ранее.

1.5. Требования к чертежу

Графическая часть проекта включает в себя чертеж котлоагрегата, который в зависимости от сложности конструкции котла может включать продольный и поперечный разрезы, план котлоагрегата совместно с хвостовыми поверхностями нагрева. Графическая часть проекта выполняется на листе чертежной бумаги размером 594x841 мм в соответствии с действующими стандартами ЕСКД. Лист графической части проекта должен иметь угловой штамп с указанием номера листа и общего числа листов, входящих в проект, а при необходимости – спецификацию. В строчке КП.ХХХХХХ - УУ.ЗЗ требуется указать: КП - курсовой проект, ХХХХХХ - номер своей специальности (направления), УУ - свой шифр в соответствии с номером по журналу, ЗЗ – год выполнения проекта.

1.6. График выполнения разделов проекта

В процессе работы над курсовым проектом следует контролировать выполнение отдельных разделов проекта. Примерное распределение материала по отдельным разделам проекта приведено в табл.2. В соответствии с данными, приведенными в этой таблице, в зависимости от времени, отводимого на проектирование, необходимо придерживаться указанного графика выполнения отдельных разделов проекта.

Таблица 2

Объем отдельных разделов курсового проекта

Раздел проекта	Объем, %
Краткое описание котлоагрегата и принятых к установке горелок	3
Выбор и описание принятых к установке хвостовых поверхностей нагрева	3
Разработка и описание реконструктивных мероприятий проекта	5
Определение конструктивных характеристик котлоагрегата	4
Расчет объемов и энтальпий воздуха и продуктов сгорания	7
Составление теплового баланса и расчет топки	7
Расчет пароперегревателя и конвективных поверхностей нагрева	10
Расчет хвостовых поверхностей нагрева	6
Планирование и подготовка чертежей в тонких линиях	30
Оформление чертежей	20
Оформление пояснительной записки	5

2. ОБЪЕМЫ И ЭНТАЛЬПИИ ВОЗДУХА И ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ

2.1. Расчет объемов воздуха и продуктов горения

Все объемы и энтальпии воздуха и продуктов горения рассчитываются на 1кг твердого, жидкого или на 1м³ сухого газообразного топлива при нормальных условиях. Полученные значения объемов воздуха и газов относятся также к нормальным условиям, т.е. температуре 0°C и давлению 760 мм.рт.ст.

В качестве исходных данных при расчетах используется состав топлива, выраженный в процентах по массе для твердых и жидких топлив (C^p , H^p , S^p , N^p , O^p , W^p , A^p , %) и в объемных процентах для газообразных топлив (CH_4 , C_mH_n , CO , CO_2 , H_2 , H_2S , O_2 , N_2 , %).

Теоретически необходимое количество воздуха определяется по формуле (1) для твердых и жидких и по формуле (2) для газообразных топлив:

$$V^0 = 0,0889(C^p + 0,375S^p) + 0,265H^p - 0,0333O^p, \text{ м}^3/\text{кг}; \quad (1)$$

$$V^0 = 0,0476 \left[0,5CO + 0,5H_2 + 1,5H_2S + \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) C_mH_n - O_2 \right], \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (2)$$

Теоретические объемы продуктов горения для твердых и жидких топлив находятся по формулам (3), (4), (5):

теоретический объем азота

$$V_{N_2}^0 = 0,79V^0 + 0,008N^p, \text{ м}^3/\text{кг}; \quad (3)$$

объем трехатомных газов

$$V_{RO_2} = 0,01866(C^p + 0,375S^p), \text{ м}^3/\text{кг}; \quad (4)$$

теоретический объем водяных паров

$$V_{H_2O}^0 = 0,111H^p + 0,0124W^p + 0,0161V^0 + 1,240G_{\phi}, \text{ м}^3/\text{кг}, \quad (5)$$

где G_{ϕ} – расход пара на распыливание мазута, кг/кг.

Для газообразных топлив

$$V_{N_2}^0 = 0,79V^0 + 0,01N_2, \text{ м}^3/\text{м}^3; \quad (6)$$

$$V_{RO_2} = 0,01(CO_2 + CO + H_2S + \sum mC_mH_n), \text{ м}^3/\text{м}^3; \quad (7)$$

$$V_{H_2O}^0 = 0,01(H_2S + H_2 + \sum \frac{n}{2} C_mH_n + 0,124d_{г.т.л.}) + 0,0161V^0, \text{ м}^3/\text{м}^3, \quad (8)$$

где $d_{г.т.л.}$ – влагосодержание газообразного топлива в г/м³ сухого газа.

Действительный объем водяных паров (при коэффициенте избытка воздуха, $\alpha > 1$) определяется как

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + 0,0161(\alpha - 1)V^0, \text{ м}^3/\text{кг} \text{ или } \text{м}^3/\text{м}^3.$$

Объем дымовых газов при $\alpha > 1$ рассчитывается по формуле

$$V_{\Gamma} = V_{N_2}^0 + V_{RO_2} + V_{H_2O} + (\alpha - 1)V^0, \text{ м}^3/\text{кг} \text{ или } \text{м}^3/\text{м}^3. \quad (9)$$

Объемная доля трехатомных газов в продуктах горения равна

$$r_{RO_2} = \frac{V_{RO_2}}{V_{\Gamma}}; \quad (10)$$

объемная доля водяных паров составляет величину

$$r_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_{\Gamma}}; \quad (11)$$

суммарная доля трехатомных газов и водяных паров находится как

$$r_a = r_{RO_2} + r_{H_2O}; \quad (12)$$

безразмерная концентрация золы в дымовых газах

$$\mu_{зл} = \frac{0,01A^p a_{yn}}{G_{\Gamma}}, \quad (13)$$

где a_{yn} - доля золы топлива, уносимой из топки газами, определяется по табл. XVI – XIX, XXI [1]. Поскольку в табл. XXI величина a_{yn} дана в % это значение надо поделить на 100;

G_{Γ} - масса дымовых газов, кг/кг.

$$G_{\Gamma} = 1 - 0,01A^p + 1,306\alpha V^0, \text{ кг/кг.} \quad (14)$$

Значения величин $V_{\Gamma}, r_{RO_2}, r_{H_2O}, r_a, \mu_{зл}$ используются при расчете теплообмена в газоходах котлоагрегата. Поскольку в котлоагрегатах, работающих с уравновешенной тягой, коэффициент избытка воздуха по газоходам увеличивается по мере движения дымовых газов, значения этих величин также меняются. Для расчета объемов газов, объемных долей газов и концентрации золы по газоходам используется табл.3.

Коэффициент избытка воздуха за газоходом определяется как сумма коэффициента избытка воздуха в конце предыдущего газохода и присоса воздуха $\Delta\alpha$ в данном газоходе. Так, если на выходе из топки коэффициент избытка воздуха $\alpha_T = 1,1$, а в следующем газоходе присос воздуха составил величину $\Delta\alpha = 0,05$, то на выходе из этого газохода $\alpha = \alpha_T + \Delta\alpha = 1,1 + 0,05 = 1,15$.

Значения присосов воздуха по газоходам в соответствии с [1] приведены в табл.4.

Среднее значение коэффициента избытка воздуха в газоходе α_{cp} для всех газоходов, кроме топки, рассчитывается как среднеарифметическое значение α двух величин: α на выходе из предыдущего газохода и α за данным газоходом. Для топки $\alpha_{cp} = \alpha_T$.

При слоевом сжигании каменных и бурых углей $\alpha_T = 1,3 - 1,4$. При камерном сжигании твердых топлив, кроме углей марок Т, АШ и ПА, $\alpha_T = 1,2$. Для

углей марок Т, а также ПА и АШ $\alpha_T = 1,2 - 1,25$. При сжигании мазута и газа $\alpha_T = 1,1$ [1]. Эти значения коэффициента избытка воздуха в топках принимаются при производительностях:

100 – 70% - при сжигании твердого топлива;

100 – 50% - при сжигании газа и мазута.

Таблица 3

Объемы газов, объемные доли трехатомных газов, концентрация золы

Величины	Раз- мерность	$V_0 = \text{м}^3/\text{кг}; \quad V_{\text{RO}_2} = \text{м}^3/\text{кг};$ $V_{\text{N}_2}^0 = \text{м}^3/\text{кг}; \quad V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = \text{м}^3/\text{кг};$					
1. Коэффициент избытка воздуха в конце газохода α	-						
2. То же средний α_{cp}	-						
3. $(\alpha - 1)V^0$	$\text{м}^3/\text{кг}$						
4. $V_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{H}_2\text{O}}^0 (\alpha - 1) 0,0161 V^0$	-//-						
5. $V_{\Gamma} = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2}^0 + V_{\text{H}_2\text{O}} + (\alpha - 1)V^0$	-//-						
6. $r_{\text{RO}_2} = \frac{V_{\text{RO}_2}}{V_{\Gamma}}$	-						
7. $r_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{V_{\text{H}_2\text{O}}}{V_{\Gamma}}$	-						
8. $r_a = r_{\text{RO}_2} + r_{\text{H}_2\text{O}}$	-						
9. $\mu_{\text{зл}} = \frac{0,01 A^P a_{\text{yh}}}{G_{\Gamma}}$	-						

При снижении производительности при работе на твердом топливе от 70 до 50% коэффициент избытка воздуха повышается, и его определяют по формуле

$$\alpha_{\text{тд}} = \alpha_T + \left(0,7 - \frac{D_{\phi}}{D_n} \right),$$

где D_{ϕ} – фактическая паропроизводительность, т/ч;

D_n - номинальная паропроизводительность, т/ч.

При снижении паропроизводительности при работе на газе и мазуте от 50 до 30%

$$\alpha_{\text{тд}} = \alpha_T + 0,5 \left(0,5 - \frac{D_{\phi}}{D_n} \right).$$

Присосы воздуха в газоходах также меняются в сторону увеличения при снижении нагрузки:

для топки

$$\Delta \alpha_n = \Delta \alpha_T \frac{D_n}{D_{\phi}};$$

для других газоходов
$$\Delta\alpha_{\text{л}} = \Delta\alpha \left(\frac{D_{\text{н}}}{D_{\text{ф}}} \right)^{0,5}.$$

2.2. Расчет энтальпии воздуха в продуктах горения

Энтальпия теоретического необходимого количества воздуха находится как

$$H_{\text{в}}^0 = V^0 (c\vartheta)_{\text{в}}, \text{ ккал/кг или ккал/м}^3,$$

где $(c\vartheta)_{\text{в}}$ - произведение теплоемкости воздуха c , ккал/(м³·град) и его температуры ϑ , °C.

Таблица 4

А. Присосы воздуха $\Delta\alpha$ в газоходах котлоагрегатов при номинальных нагрузках [1]

Газоходы	$\Delta\alpha$
1	2
Пылеугольные топki с твердым шлакоудалением при наличии обмуровки и обшивки	0,07
То же без металлической обшивки	0,1
Газомазутные топki с металлической обшивкой	0,05
То же без металлической обшивки	0,08
Слоевые топki механические и полумеханические	0,1
Ручные слоевые топki	0,3
Фестон, первый котельный пучок $D > 50$ т/ч	0
Первый котельный пучок $D \leq 50$ т/ч	0,05
Второй котельный пучок $D \leq 50$ т/ч	0,1
Первичный пароперегреватель	0,03
Чугунный экономайзер с обшивкой	0,1
Стальной экономайзер котла $D \leq 50$ т/ч	0,08
Экономайзер котла $D > 50$ т/ч, для каждой ступени	0,02
Трубчатый воздухоподогреватель котла $D \leq 50$ т/ч, на каждую ступень	0,06
То же $D > 50$ т/ч, на каждую ступень	0,03

Б. Средние значения присосов воздуха $\Delta\alpha_{\text{пл}}$ в системах пылеприготовления [1]

Характеристика пылесистемы	$\Delta\alpha_{\text{пл}}$
Шаровые барабанные мельницы с промбункером при сушке горячим воздухом	0,1
То же с прямым вдуванием	0,04
Молотковые мельницы при работе под давлением горячего воздуха	0
Среднеходные валковые мельницы при работе под разрежением.	0,04

Энтальпия дымовых газов, приходящихся на 1 кг или 1 м³ топлива, рассчитывается по формуле

$$H_{\text{г}} = H_{\text{г}}^0 + (\alpha - 1)H_{\text{в}}^0 + H_{\text{зл}}, \text{ ккал/кг или ккал/м}^3. \quad (15)$$

Энтальпия газов при $\alpha = 1$ и температуре ϑ равна

$$\dot{I}_{\text{а}}^0 = V_{\text{RO}_2} (c\vartheta)_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2} (c\vartheta)_{\text{N}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} (c\vartheta)_{\text{H}_2\text{O}}, \text{ ккал/кг или ккал/м}^3.$$

Значения энтальпий воздуха $(c\vartheta)_\theta$ трехатомных газов $(c\vartheta)_{RO_2}$, азота $(c\vartheta)_{N_2}$ и водяных паров $(c\vartheta)_{H_2O}$ приведены в табл. XIII [1].

Для топлив, состав которых приведен в [1], в табл. XIV, XV [1] указаны значения H^0_v и H^0_Γ

Таблица 5

Значения энтальпий компонентов дымовых газов

$\vartheta, ^\circ\text{C}$	$(c\vartheta)_{RO_2},$ ккал/м ³	$(c\vartheta)_{N_2},$ ккал/м ³	$(c\vartheta)_{O_2},$ ккал/м ³	$(c\vartheta)_{H_2O},$ ккал/м ³	$(c\vartheta)_\theta,$ ккал/м ³	$(c\vartheta)_\zeta,$ ккал/м ³
100	40,6	31,0	31,5	36,0	31,6	19,3
200	85,4	62,1	63,8	72,6	63,6	40,4
300	133,5	93,6	97,2	110,5	96,2	63,0
400	184,4	125,8	131,6	149,6	129,4	86,0
500	238	158,6	167	189,8	163,4	109,5
600	292	192	203	231	198	134
700	349	226	240	274	234	158
800	407	261	277	319	270	183
900	466	297	315	364	306	209
1000	526	333	353	412	343	235
1100	587	369	391	460	381	262
1200	649	405	430	509	419	288
1300	711	442	469	560	457	325
1400	774	480	508	611	496	378
1500	837	517	548	664	535	420
1600	900	555	588	717	574	448
1700	964	593	628	771	613	493
1800	1028	631	668	826	652	522
1900	1092	670	709	881	692	570
2000	1157	708	750	938	732	600
2100	1222	747	790	994	772	—
2200	1287	786	832	1051	812	—

Для твердых топлив при расчете энтальпии дымовых газов по формуле (15) учитывается энтальпия золовых частиц, содержащихся в дымовых газах $H_{\text{зл}}$, если выдерживается соотношение

$$\frac{(10^3 a_{\text{ун}} A^P)}{Q_H^P} > 6.$$

$$H = 0,01(c\vartheta)_{\text{зл}} A^P a_{\text{ун}}, \text{ ккал/кг.}$$

Значения энтальпий золы $(c\vartheta)_{\text{зл}}$ также приводятся в табл. XIII [1].

Энтальпия дымовых газов, также как и их объем, изменяется по мере движения газов внутри котлоагрегата. Поэтому энтальпия газов рассчитывается для каждого газохода. Расчет ведется в форме табл.6.

Энтальпия продуктов сгорания (Н-9-таблица)

$\vartheta, ^\circ\text{C}$	$H^\circ_{\text{г}},$ ккал/кг	$H^\circ_{\text{в}},$ ккал/кг	$H_{\text{зл}},$ ккал/кг	$H_{\text{г}} = H^\circ_{\text{г}} + (\alpha - 1)H^\circ_{\text{в}} + H_{\text{зл}}, \text{ ккал/кг}$							
				топка $\alpha =$		фестон $\alpha =$		паропере- греватель $\alpha =$		котельный пучок $\alpha =$	
				Н	ΔH	Н	ΔH	Н	ΔH	Н	ΔH
100											
200											
300											
400											
500											
...											
2200											

Табл.6 как и табл.3 является вспомогательной при расчете теплообмена в топке и последующих газоходах. При расчете энтальпий вторая, третья и четвертая колонки табл.6. заполняются для температур 100 - 2200°C. Расчет энтальпий $H_{\text{г}}$ ведётся для значений α на выходе из соответствующего газохода. Приращение энтальпии ΔH определяется как разность двух соседних по вертикали значений H при одном значении α .

3. ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА

Тепловой баланс котлоагрегата составляется и рассчитывается для определения к.п.д. котлоагрегата брутто $\eta_{\text{к.а.}}$ и расхода топлива B .

К.п.д. котлоагрегата брутто находится методом обратного теплового баланса из выражения

$$\eta_{\text{к.а.}} = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6), \% \quad (16)$$

где q_2 - потеря теплоты с уходящими газами, %;

q_3 - потеря теплоты от химической неполноты сгорания топлива, %;

q_4 - потеря теплоты от механической неполноты сгорания топлива, %;

q_5 - потеря теплоты от наружного охлаждения, %;

q_6 - потеря теплоты с физической теплотой шлака $q_{6\text{шл}}$ и с охлаждающей водой не включенных в циркуляционную схему котла панелей и балок топки $q_{6\text{охл}}$, %.

$$q_6 = q_{6\text{шл}} + q_{6\text{охл}}, \%$$

Потеря теплоты с уходящими газами находится по формуле

$$q_2 = \frac{(H_{\text{yx}} - \alpha_{\text{yx}} H_{\text{х.с.}}^0)(100 - q_4)}{Q_{\text{P}}^{\text{P}}}, \%$$

где H_{yx} - энтальпия уходящих газов при коэффициенте избытка воздуха α_{yx} и температуре ϑ_{yx} , ккал/кг или ккал/м³, найденная из табл.5;

$H_{x.в.}^0$ - энтальпия, холодного воздуха при $\alpha=1$ и температуре холодного воздуха $t_{x.в.}$, ккал/кг или ккал/м³; $H_{x.в.}^0 = 0,32t_{x.в.} V^0$;

Q_p^p - располагаемая теплота рабочего топлива ккал/кг или ккал/м³.

При сжигании природного газа и отсутствии подогрева дутьевого воздуха вне данного котлоагрегата $Q_p^p = Q_H^C$. При сжигании углей, торфа и древесины в случае, если используется несмерзшееся топливо и отсутствует подогрев воздуха вне данного котлоагрегата, $Q_p^p = Q_n^p$. При сжигании мазута в случае отсутствия подогрева воздуха вне данного котлоагрегата:

$$Q_p^p = Q_H^p + Q_{ф.т.} + Q_{ф.}, \text{ ккал/кг},$$

где Q_n^p - низшая теплота сгорания рабочей массы топлива, ккал/кг;

$Q_{ф.т.}$ - физическая теплота топлива, ккал/кг;

$Q_{ф.}$ - теплота, вносимая с форсуночным паром, ккал/кг.

Величина $Q_{ф.т.}$ зависит от теплоемкости мазута c_m и температуры t_m :

$$Q_{ф.т.} = c_m t_m = (0,415 + 0,0006t_m)t_m, \text{ ккал/кг}.$$

Теплота, вносимая с паром, подаваемым в мазутные форсунки, находится из выражения

$$Q_{ф.} = G_{ф.}(h_{ф.} - 600), \text{ ккал/кг},$$

где $G_{ф.}$ и $h_{ф.}$ - расход и энтальпия пара, кг/кг и ккал/кг.

Если воздух, подаваемый в котлоагрегат, нагревается паром или горячей водой вне данного котлоагрегата, то располагаемая теплота Q_p^p увеличивается на

$$Q_{в.вн.} = \beta' [H_B^{0'} - H_{x.в.}^0], \text{ ккал/кг},$$

где β' - отношение расхода воздуха на входе в воздухоподогреватель к теоретически необходимому;

$H_B^{0'}$ - энтальпия теоретически необходимого количества воздуха, поступающего в котлоагрегат (воздухоподогреватель), ккал/кг;

При расчете теплового баланса величина потери теплоты от химической неполноты сгорания топлива определяется в соответствии с данными [1]:

при сжигании твердых топлив в камерных топках котлов при $D \geq 75$ т/ч $q_3 = 0\%$; при $D \leq 75$ т/ч $q_3 = 0,5\%$;

при сжигании твердых топлив в слоевых механических и полумеханических топках $q_3 = 0,5-1\%$;

при сжигании газа и мазута $q_3 = 0,5\%$.

Потеря теплоты от механической неполноты сгорания при слоевом сжигании топлив зависит от вида топлива и типа топки и находится по табл. XXI [1]. При камерном сжигании топлив q_4 находится по табл. XVII, XVIII.

Потеря теплоты от наружного охлаждения q_5 определяется в зависимости от паропроизводительности котлоагрегата по рис.5-1 [1]. Если фактическая нагрузка D_ϕ отличается от номинальной D_H более чем на 25%, величина q_5 пересчитывается:

$$q_5 = q_{5ном} \left(\frac{D_H}{D_\phi} \right), \%$$

Потеря теплоты с физической теплотой шлака находится по формуле

$$q_{6шл} = (1 - a_{yn})(c\mathcal{G})_{эл} \frac{A^P}{Q_P^P}, \%,$$

где энтальпия золы $(c\mathcal{G})_{эл}$, соответствующая температуре 600°C при твердом шлакоудалении и температуре жидкоплавкого состояния t_3 , увеличенной на 100°C, при жидком шлакоудалении. Значение величины t_3 может быть определено по табл.1 [1].

Найденное по формуле (16) значение к.п.д. котлоагрегата используется для нахождения расхода топлива из теплового баланса котлоагрегата:

$$\frac{Q_P^P B \eta_{к.а.}}{100} = Q_{пол}, \text{ ккал/ч}, \quad (17)$$

где $Q_{пол}$ - количество теплоты, полезно использованной в котлоагрегате, ккал/ч;
 B - расход топлива, кг/ч или м³/ч.

Из выражения (17):

$$B = \frac{Q_{пол} 100}{Q_P^P \eta_{к.а.}}, \text{ кг/ч, м}^3/\text{ч}. \quad (18)$$

Для парового котлоагрегата

$$Q_{пол} = 10^3 D(h_n - h_{н.в.}) + 10 D \Pi (h_{к.в.} - h_{н.в.}), \text{ ккал/ч},$$

где h_n - энтальпия вырабатываемого пара, ккал/кг;

$h_{н.в.}$ - энтальпия питательной воды, ккал/кг;

$h_{к.в.}$ - энтальпия котловой воды, ккал/кг;

Π - процент непрерывной продувки, %;

D - паропроизводительность котлоагрегата, т/ч.

Значение h_n находится для насыщенного пара по табл. XXIII [1], для перегретого по табл. XXV [1]. Энтальпия питательной воды определяется по табл. XXIV, а котловой воды (т.е. воды, находящейся в состоянии кипения при давлении в барабане котла) - по табл. XXIII.

Для водогрейного котла количество полезно использованной теплоты $Q_{пол}$ равно его теплопроизводительности, выраженной в ккал/ч.

Найденное по формуле (18) значение B является полным расходом топлива, подаваемого в топку. Расчетный расход топлива находится как

$$B_p = \frac{B(100 - q_4)}{100}, \text{ кг/ч.}$$

В данном разделе следует определить также коэффициент сохранения теплоты φ , который характеризует долю теплоты, теряемой от наружного охлаждения каждым газоходом котлоагрегата:

$$\varphi = 1 - \frac{q_5}{\eta_{к.а.} + q_5}.$$

Расчет следует вести в форме табл.7.

Таблица 7

Тепловой баланс котлоагрегата

Рассчитываемая величина	Обозн.	Размерность	Формула или обоснование	Расчет
1. Располагаемая теплота топлива	Q_P	ккал/кг, ккал/м ³		
2. Температура уходящих газов	ϑ_{yx}	°С	принимается	
3. Энтальпия уходящих газов	H_{yx}	ккал/кг, ккал/м ³		
4. Температура холодного воздуха	$t_{х.в.}$	°С	задана	
5. Энтальпия холодного воздуха	$H_{х.в.}^0$	ккал/кг, ккал/м ³		
6. Потеря теплоты от химической неполноты сгорания	q_3	%		
7. Потеря теплоты от механической неполноты сгорания	q_4	%		
8. Потеря теплоты с уходящими газами	q_2	%		
9. Потеря теплоты от наружного охлаждения	q_5	%		
10. Потеря теплоты с физической теплотой шлака	$q_{6шл}$	%		
11. К.п.д. котлоагрегата брутто	$\eta_{к.а.}$	%		
12. Энтальпия вырабатываемого пара	h_n	ккал/кг		
13. Температура питательной воды	$t_{н.в.}$	°С	задана	
14. Энтальпия питательной воды.	$h_{н.в.}$	ккал/кг		
15. Энтальпия котловой воды	$h_{к.в.}$	ккал/кг		
16. Процент непрерывной продувки	Π	%		
17. Паропроизводительность котлоагрегата	D	т/ч		
18. Теплота, полезно использованная в котлоагрегате	$Q_{пол}$	ккал/ч		
19. Полный расход топлива	B	кг/ч, м ³ /ч		
20. Расчетный расход топлива	B_p	кг/ч, м ³ /ч.		
21. Коэффициент сохранения теплоты	φ	-		

4. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ТОПКИ

Поверочный тепловой расчет топки котельного агрегата производится для определения температуры газов на выходе из топки ϑ''_T , а также теплонапряжения топочного объема q_V , и зеркала горения q_R . Расчет ведется методом последовательных приближений: вначале температурой ϑ''_T задаются, а затем ее определяют. Если расхождение не превышает $\pm 100^\circ\text{C}$, расчет считается верным, если расхождение больше допустимого, задаются новым значением ϑ''_T , равным полученному, и расчет повторяют. Полученные в результате расчета значения q_V и q_R не должны превышать допустимых, указанных в табл. XVII - XXI [1].

$$q_V = \frac{B_P Q_P^P}{V_T}, \text{ ккал}/(\text{м}^3 \text{ ч});$$

$$q_R = \frac{B_P Q_P^P}{R}, \text{ ккал}/(\text{м}^2 \text{ ч});$$

где V_T - объем топки, м^3 ;

R - площадь зеркала горения, м^2 .

B_P - расчетный расход топлива, кг/ч или $\text{м}^3/\text{ч}$.

Если q_V и q_R превышают допустимые значения, то следует уменьшить температуру горячего дутья или расход сжигаемого топлива B_P , а, следовательно, и производительность котлоагрегата.

Температура газов на выходе из топки находится по номограмме 7 [1], построенной на основании формулы:

$$\vartheta''_T = \frac{T_a}{M \left(\frac{4,9 \psi_{cp} F_{ct} a_T T_a^3}{10^3 \phi B_P (VC)_{cp}} \right)^{0,6} + 1} - 273, ^\circ\text{C} \quad (19)$$

где T_a - адиабатическая температура горения топлива, K ;

M - параметр, зависящий от местоположения максимума температур в топке;

ψ_{cp} - среднее значение коэффициента тепловой эффективности экранов;

F_{CT} - полная поверхность стен топки, м^2 ;

a_T - степень черноты топки;

ϕ - коэффициент сохранения теплоты;

$(VC)_{cp}$ - средняя суммарная теплоемкость продуктов сгорания 1 кг (1 м^3) топлива в интервале температур $\vartheta_a - \vartheta''_T$, $\text{ккал}/(\text{кг} \cdot \text{град})$.

4.1. Адиабатическая температура горения

Адиабатическая температура горения ϑ_a , находится по полезному тепловыделению в топке $Q_{\text{пол}}^T$, равному энтальпии продуктов сгорания H_r при $\alpha = \alpha_T$, с помощью $H - \vartheta$ таблицы (табл.5 данных методических указаний).

Полезное тепловыделение в топке

$$Q_{\text{пол}}^T = \frac{Q_P^P (100 - q_3 - q_4 - q_6)}{100 - q_4} + Q_{\text{в}} - Q_{\text{вн.}} + r_z H_r, \text{ ккал/кг},$$

где $Q_{\text{в}}$ – теплота, вносимая воздухом в топку, ккал/кг или ккал/м³;

$Q_{\text{вн.}}$ – теплота, вносимая воздухом при подогреве его вне агрегата, ккал/кг или ккал/м³;

r_z – доля рециркуляции газов в топочное пространство;

H_r – энтальпия газов, поступающих в топку при рециркуляции дымовых газов, ккал/кг или ккал/м³.

$$Q_B = (\alpha_T - \Delta\alpha_T - \Delta\alpha_{\text{пл}})H_B^0 + (\Delta\alpha_T + \Delta\alpha_{\text{пл}})H_{\text{х.в.}}^0, \text{ ккал/кг, ккал/м}^3,$$

где $\Delta\alpha_T$ и $\Delta\alpha_{\text{пл}}$ – величины присосов воздуха в топке и системе пылеприготовления (находятся по табл.3);

H_B^0 – энтальпия воздуха при температуре за воздухоподогревателем и $\alpha = 1$, ккал/кг, ккал/м³;

$H_{\text{х.в.}}^0$ – энтальпия холодного воздуха при $\alpha = 1$.

4.2. Параметр М

Параметр М определяется в зависимости от положения максимума температур в топке по следующим формулам: при сжигании газа и мазута

$$M = 0,54 - 0,2x_T;$$

при камерном сжигании высокореакционных и слоевом сжигании всех топлив

$$M = 0,59 - 0,5x_T; \quad (20)$$

при камерном сжигании малореакционных топлив (Т, Па, АШ), а также каменных углей с повышенной зольностью (типа экибастузского)

$$M = 0,56 - 0,5x_T. \quad (21)$$

Независимо от величины x_T , в формулах (20) и (21) значение М для камерных топок должно быть не выше 0,5.

Относительное положение максимума температуры пламени по высоте топки x_T определяется как

$$x_T = \frac{x_1}{x_2},$$

где x_1 – расстояние от пода топки или середины холодной воронки до оси горелки, м;

x_2 – расстояние от пода топки или середины холодной воронки до середины выходного окна из топки, м.

При горизонтальном развитии факела (например, в топках котлов ДЕ) x_2 обозначает расстояние от фронтальной стены до выходного окна топки.

В слоевых топках $x_T = 0$.

В шахтно-мельничных топках с открытыми или эжекционными амбразурами $x_T = x_1$.

4.3. Средний коэффициент тепловой эффективности экранов

Средний коэффициент тепловой эффективности экранов ψ_{cp} находится из выражения:

$$\psi_{cp} = \frac{\sum \psi_i F_{ст.i}}{F_{ст}},$$

где $F_{ст.i}$ – поверхность i -й стены, занятая экраном, м²;

$F_{ст}$ – суммарная поверхность стен топки, м²;

ψ_i – коэффициент тепловой эффективности экрана i -й стены.

Полная поверхность стен топочной камеры $F_{ст}$ вычисляется по размерам поверхностей, ограничивающих объём топочной камеры. При наличии топочных экранов ограничивающие топочный объём поверхности проходят по осям экранных труб. Величина $F_{ст}$ включает, кроме стен (фронтальной, задней, боковых, пода, потолка), также площадь газывыводящего окна топки. При наличии холодной воронки за границу объёма топки условно принимают горизонтальную плоскость, проходящую посередине воронки.

Коэффициент тепловой эффективности есть произведение углового коэффициента экрана χ на коэффициент ξ , учитывающий загрязнение экранов:

$$\psi_i = \chi_i \cdot \xi_i.$$

Величина χ зависит от диаметра d , шага S экранных труб и конструкции экранов и находится по номограмме 1 [1].

Значение коэффициента ξ определяется видом топлива и способом его сжигания, а также конструкцией топочных экранов [1]:

- открытые гладкотрубные и плавниковые: $\xi = 0,65$ для газообразного топлива; $\xi = 0,55$ для мазута; $\xi = 0,45$ для каменных и бурых углей, АШ и ПА при камерном сжигании; $\xi = 0,6$ при слоевом сжигании топлив;
- ошипованные экраны в толках с твердым шлакоудалением $\xi = 0,2$ для всех топлив;
- экраны, закрытые шамотным кирпичом $\xi = 0,1$ для всех топлив.

4.4. Степень черноты топки

Степень черноты топки a_T зависит от степени черноты факела a_ϕ , среднего коэффициента тепловой эффективности экранов ψ_{cp} , а для слоевых топок и от отношения площади зеркала горения к суммарной поверхности стен топки ρ .

Для камерных газомазутных и пылеугольных топок

$$a_T = \frac{a_\phi}{a_\phi + (1 - a_\phi)\psi_{cp}};$$

для слоевых топок

$$a_T = \frac{a_\phi + (1 - a_\phi)\rho}{1 - (1 - a_\phi)(1 - \psi_{cp})(1 - \rho)};$$

$$\rho = \frac{R}{F_{CT}}.$$

4.4.1. Твердое топливо

При сжигании твердого топлива степень черноты факела определяется по формуле

$$a_\phi = 1 - e^{-k_o p s}, \quad (22)$$

где e – основание натуральных логарифмов;

k_o – коэффициент ослабления лучей топочной средой, $1/(\text{м} \cdot \text{кгс}/\text{см}^2)$;

p – давление в топке; для котлов, работающих без наддува, $p = 1 \text{ кгс}/\text{см}^2$;

s – эффективная толщина излучающего слоя, м.

$$s = \frac{3,6V_T}{F_{CT}}, \text{ м.}$$

Коэффициент ослабления лучей топочной средой k находится по формуле

$$k = k_r r_a + k_{zl} \mu_{zl} + k_{кккс} \chi_1 \chi_2, \text{ } 1/(\text{м} \cdot \text{кгс}/\text{см}^2),$$

где k_r – коэффициент ослабления лучей трёхатомными газами, определяемый по номограмме 3 [1], $1/(\text{м} \cdot \text{кгс}/\text{см}^2)$;

r_a - суммарная доля водяных паров и трехатомных газов в продуктах сгорания, найденная ранее (табл.2);

$k_{зл}$ - коэффициент ослабления лучей золовыми частицами, $1/(м \cdot кгс/см^2)$;

$\mu_{зл}$ - безразмерная концентрация золы в дымовых газах, найденная ранее (табл.3);

$k_{кокс}$ - коэффициент ослабления лучей коксовыми частицами, $1/(м \cdot кгс/см^2)$;

χ_1, χ_2 - безразмерные величины, учитывающие влияние концентрации коксовых частиц в факеле, зависящие от рода топлива и способа его сжигания.

Для определения k_r используется номограмма 3[1]. Величина k_r зависит от $r_{H_2O} \cdot p_a S = r_a S$ и от температуры газов на выходе из топки. Поскольку значение ϑ_t'' неизвестно, этой температурой задаются. При сжигании газа и мазута рекомендуемые значения ϑ_t'' составляют 1000 - 1100°C. При сжигании твердого топлива следует задаться $\vartheta_t'' = 900^0 C$. Если найденное по формуле (19) значение ϑ_t'' отличается от принятого не более чем на $\pm 100^0 C$, то предварительно принятая температура ϑ_t'' считается верной, а расчет законченным. Если расхождение больше допустимого, задаются новым значением ϑ_t'' , близким к найденному по формуле (19), и расчет повторяют.

Для нахождения величины $k_{зл}$ используется выражение

$$k_{зл} = \frac{4300 \rho_r}{\sqrt[3]{(T_t'')^2 d_{зл}^2}}, 1/(м \cdot кгс/см^2),$$

где $\rho_r = 1,3 \text{ кг/м}^3$ – плотность дымовых газов;

T_t'' - абсолютная температура газов на выходе из топки, К ($T_t'' = \vartheta_t'' + 273$);

$d_{зл}$ - средний диаметр золовых частиц, мкм.

Значения $d_{зл}$ приводятся в табл.8.

Таблица 8

Средний диаметр золовых частиц

Топочное устройство	Топливо	$d_{зл}$, мкм
Камерные топки; шаровые барабанные мельницы	Все топлива	13
Камерные топки; среднеходные и молотковые мельницы	Все топлива, кроме торфа	16
Камерные топки	Торф	24
Слоевые топки	Все топлива	20

Значение $k_{\text{кокс}}$ принимается равным 1. Для низкорекреационных топлив (Т, ПА, АШ) $\chi_1 = 1$; для высокорекреационных – $\chi_1 = 0,5$. При камерном сжигании топлив $\chi_2 = 0,1$; при слоевом – $\chi_2 = 0,03$. После нахождения произведения $k_{\text{окс}}ps$ степень черноты факела может быть найдена по формуле (22) или по номограмме 2 [1].

4.4.2. Газообразное топливо и мазут

При сжигании газообразного и жидкого топлива степень черноты факела определяется по формуле

$$a_{\phi} = m_V \cdot a_{\text{св}} + (1 - m_V) \cdot a_{\Gamma}, \quad (23)$$

где $a_{\text{св}}$ - степень черноты светящейся части пламени;

a_{Γ} - степень черноты несветящейся части пламени, обусловленная несветящимися трехатомными газами;

m_V - коэффициент усреднения.

$$a_{\text{св}} = 1 - e^{-kps}, \quad (24)$$

где $k = k_{\Gamma}r_a + k_C$;

$$a_{\Gamma} = 1 - e^{-kps}, \quad (25)$$

где $k = k_{\Gamma}r_a$.

Значения k_{Γ}, r_a, p, s – те же, что и в п.3.4.1. при расчете теплообмена в топках, работающих на нетвердых топливах. Коэффициент ослабления лучей сажистыми частицами k_C рассчитывается как

$$k_C = 0,03(2 - \alpha_{\Gamma}) \left(1,6 \frac{T_{\Gamma}''}{1000} - 0,5 \right) \frac{C^P}{H^P}, 1/(\text{м кгс/см}^2),$$

где α_{Γ} - коэффициент избытка воздуха на выходе из топки;

T_{Γ}'' - абсолютная температура газов на выходе из топки, которой задаются, К;

$\frac{C^P}{H^P}$ - отношение содержания углерода и водорода в рабочей массе топлива;

для газообразного топлива: $\frac{C^P}{H^P} = 0,12 \Sigma \frac{m}{n} C_m H_n$.

Значение $a_{\text{св}}$ может быть найдено также с помощью номограммы 2 [1] в зависимости от произведения $kps = (k_{\Gamma}r_a + k_C)ps$. Величина a_{Γ} также может быть найдена с помощью номограммы 2 [1] при $kps = k_{\Gamma}r_a ps$.

Коэффициент усреднения m зависит от теплонапряжения топочного объема q_v : при $q_v \leq 350 \cdot 10^3$ ккал/(м³·ч) независимо от нагрузки $m_v = 0,1$ для газа и $m_v = 0,55$ для жидкого топлива. При $q_v \geq 10^6$ ккал/(м³·ч) $m_v = 0,6$ для газа и $m_v = 1$ для мазута. При $350 \cdot 10^3 \leq q_v \leq 10^6$ ккал/(м³·ч) значение m_v определяется методом линейных интерполяций.

4.5. Средняя суммарная теплоемкость продуктов сгорания

Средняя суммарная теплоемкость продуктов сгорания находится по формуле:

$$(VC)_{cp} = \frac{(Q_t - H_t'')}{(g_a - g_t'')}, \text{ ккал/(кг·град) или ккал/(м}^3\text{·град)},$$

где H_t'' - энтальпия газов при α_t и g_t'' , найденная из табл.6, ккал/кг или ккал/м³.

Поскольку расчет теплообмена в топочном пространстве, на основании которого определяется температура газов на выходе из топки, является сложным, рекомендуется вести его в последовательности, изложенной в табл.9.

Таблица 9

Поверочный тепловой расчет топки

Расчётная величина	Обозн.	Размерность	Формула или обоснование	Расчет
1	2	3	4	5
1. Коэффициент избытка воздуха в топке	α_t	-		
2. Температура воздуха, подаваемого в топку	$t_{\text{в}}$	°С	Принимается	
3. Энтальпия воздуха, подаваемого в топку	H_B^0	ккал/кг, ккал/м ³	Н - g - табл.	
4. Присос воздуха в топке	$\Delta \alpha_t$	-		
5. Присос воздуха в системе пылеприготовления	$\Delta \alpha_{\text{пл}}$	-		
6. Энтальпия холодного воздуха	$H_{\text{х.в.}}^0$	ккал/кг, ккал/м ³		
7. Теплота, вносимая воздухом в топку	$Q_{\text{в}}$	- // -		
8. Теплота, вносимая в топку воздухом, подогретым вне данного котлоагрегата	$Q_{\text{в.вн}}$	- // -		
9. Полезное тепловыделение в топке	$Q_{\text{пол}}^{\text{т}}$	- // -		
10. Теоретическая температура горения	g_a	°С		

1	2	3	4	5
11. Расстояние по вертикали от пода топки до оси горелки	x_1	м		
12. Расстояние по вертикали от пода топки до середины газывыводящего окна	x_2	– // –		
13. Относительное положение максимума температур по высоте топки	x_T	– // –		
14. Параметр	M	–		
15. Температура газов на выходе из топки	ϑ_T''	°С	Принимается	
16. Энтальпия газов на выходе из топки.	H_T''	ккал/кг, ккал/м ³		
17. Суммарная теплоемкость продуктов сгорания	$(VC)_{cp}$	ккал/кг·град		
18. Объем топочной камеры	V_T	м ³	Из конструктивных характеристик	
19. Полная поверхность стен топки	F_{CT}	м ²	– // –	
20. Эффективная толщина излучающего слоя	s	м		
21. Объемная доля водяных паров в продуктах сгорания	r_{H_2O}	–		
22. Объемная доля трехатомных газов и водяных паров в продуктах сгорания	r_a	–		
23. Произведение	$p_a s$	м·кгс/см ²		
24. Коэффициент ослабления лучей 3-атомными газами	k_Γ	см ² /(м·кгс)		
Расчет выполняется для газообразного и жидкого топлива				
25. Коэффициент ослабления лучей для несветящейся части пламени	k_n	см ² /(м·кгс)	$k_\Gamma r_a$	
26. Отношение	$\frac{C^p}{H^p}$	–		
27. Коэффициент ослабления лучей сажистыми частицами	k_c	см ² /(м·кгс)		
28. Суммарная оптическая толщина среды для несветящейся части пламени	kps	–	$k_n ps$ ($p = 1 \text{ кгс} / \text{см}^2$)	
29. Степень черноты несветящейся части пламени	a_Γ	–		
30. Суммарная оптическая толщина среды для светящейся части пламени	kps	–	$(k_n + k_c) ps$ ($p = 1 \text{ кгс} / \text{см}^2$)	
31. Степень черноты светящейся части пламени	a_{ce}	–		
32. Коэффициент усреднения	m_V	–		
33. Эффективная степень черноты факела	a_ϕ	–		

Расчет выполняется для твёрдого топлива				
25. Безразмерная концентрация золы в дымовых газах	$\mu_{зл}$	-		
26. Абсолютная температура газов на выходе из топки	$T_{г}''$	К		
27. Плотность газов	$\rho_{г}$	кг/м ³		
28. Средний диаметр золовых частиц	$d_{зл}$	мкм		
29. Коэффициент ослабления лучей золовыми частицами	$k_{зл}$	см ² /(м·кгс)		
30. Коэффициент ослабления лучей коксовыми частицами	$k_{кккс}$	-//-		
31. Безразмерная величина	χ_1	-		
32. Безразмерная величина	χ_2	-		
33. Коэффициент ослабления лучей топочной средой	k_o	см ² /(м·кгс)		
34. Суммарная оптическая толщина	kps	-	при $p = 1 \text{ кгс} / \text{см}^2$	
35. Степень черноты факела	a_{ϕ}	-		
36. Площадь зеркала горения (для слоевых топок)	R	м ²		
37. Отношение	ρ	-		
Далее расчет выполняется для всех видов топлива				
34/38. Средний коэффициент тепловой эффективности экранов	ψ_{cp}	-		
35/39. Степень черноты топки	a_t	-		
36/40. Теплонапряжение стен топочной камеры	$\frac{B_p Q}{F_{CT}}$	ккал/(м ² ч)		
37/41. Температура газов на выходе из топки	ϑ_t''	°C		
38/42. Энтальпия газов на выходе из топки	H_t''	ккал/кг, ккал/м ³		
39/43. Теплонапряжение топочного объема	q_v	ккал/(м ³ ч)		
40/44. Теплонапряжение зеркала горения	q_R	ккал/(м ² ч)		
41/45. Количество теплоты, воспринятой лучеиспусканием в топке	$Q_{л}^{\tau}$	ккал/кг, ккал/м ³		

По результатам расчета делается вывод о соответствии значений q_v и q_R допустимым, о температуре газов на выходе из топки, полученной по результатам расчета и о расхождении ее с принятой. При расчете топок, работающих на твердых топливах, проверяется соотношение

$$\vartheta_t'' < t_1,$$

где t_1 – температура начала деформации золы (табл.1[1]).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Блинов, Е.А. Котельные установки и парогенераторы: методические указания к выполнению курсового проекта / Е.А. Блинов. - СПб.: СЗТУ, 2004. - 35 с.
2. Кузнецов, Н.В. Тепловой расчет котельных агрегатов / Н.В. Кузнецов, В.М. Гурвич. - М.: Госэнергоиздат, 1973. - 465 с.
3. Теплогенерирующие установки промышленных предприятий : метод. указания к курсовому проекту "Тепловой расчет котельного агрегата" для студентов заоч. формы обучения: ИСФ: спец.: 100700; 290700: в 2 ч. Ч. I / сост.: Е. И. Соколова. - Вологда : ВоПИ , 1999 . - 26 с.
4. Энергетическое топливо СССР: ископаемые угли, горючие сланцы, торф, мазут и горючий газ: справочник / И.И. Матвеева, Н.В. Новицкий, В.С. Вдовченко и др. – М.: Энергия, 1979. – 129 с.: ил.
5. Стаскевич, Н.Л. Справочник по газоснабжению и использованию газа / Н.Л. Стаскевич, Г.Н. Северинец, Д.Я. Вигдорчик. – Л.: Недра, 1990. – 762 с.: ил.
6. Котельные установки и парогенераторы : метод. указания по изучению дисциплины и для самостоят. работы студентов: ИСФ: специальность 140104 / сост. Сеницын А. А. - Вологда: ВоГТУ, 2010 . - 39 с.
7. СТО ВоГТУ 2.7-2006. Стандарт организации : проекты дипломные и курсовые: общие требования и правила оформления расчетно-пояснительной записки. - Взамен СТП ВПИ 2.7-87 : введ. 01.03.2006 . - Вологда : ВоГТУ , 2006. - 30 с.

Приложение А
(обязательное)

**ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДЛЯ СПЕЦИАЛЬНОСТИ
270109 «ТЕПЛОГАЗОСНАБЖЕНИЕ И ВЕНТИЛЯЦИЯ»**

Вариант 1 – 10

Параметр	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Марка котла	ДЕ	ДЕ	ДЕ	ДЕ	ДЕ	ДЕ	ДЕ	ДЕ	ДЕ	ДЕ
Расчетная паропроизводительность котла, т/ч	4	6,5	10	16	25	4	6,5	10	16	25
Месторождение: - твердого топлива	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
- жидкого топлива	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
- газообразного топлива	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Давление вырабатываемого пара, МПа	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
Температура перегретого пара, °С	194	194	194	194	194	194	194	194	194	194
Температура питательной воды, °С	100	110	120	100	110	120	100	110	120	100
Процент непрерывной продувки, %	2	3	4	5	2	3	4	5	2	3

Продолжение приложения А
(обязательное)

Вариант 11 – 20

Параметр	Номер варианта									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Марка котла	ДЕ	ДЕ	ДЕ	ДЕ	ДЕ	ДЕ	ДЕ	ДЕ	ДЕ	ДЕ
Расчетная паропроизводительность котла, т/ч	4	6,5	10	16	25	4	6,5	10	16	25
Месторождение: - твердого топлива	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
- жидкого топлива	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
- газообразного топлива	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Давление вырабатываемого пара, МПа	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
Температура перегретого пара, °С	194	194	194	194	194	194	194	194	194	194
Температура питательной воды, °С	100	110	120	100	110	120	100	110	120	100
Процент непрерывной продувки, %	2	3	4	5	2	3	4	5	2	3

Окончание приложения А
(обязательное)

Вариант 21 – 30

Параметр	Номер варианта									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Марка котла	ДЕ	ДЕ	ДЕ	ДЕ	ДЕ	ДЕ	ДЕ	ДЕ	ДЕ	ДЕ
Расчетная паропроизводительность котла, т/ч	4	6,5	10	16	25	4	6,5	10	16	25
Месторождение: - твердого топлива	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
- жидкого топлива	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
- газообразного топлива	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Давление вырабатываемого пара, МПа	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
Температура перегретого пара, °С	194	194	194	194	194	194	194	194	194	194
Температура питательной воды, °С	100	110	120	100	110	120	100	110	120	100
Процент непрерывной продувки, %	2	3	4	5	2	3	4	5	2	3

Приложение Б
(обязательное)

**ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДЛЯ СПЕЦИАЛЬНОСТИ
140104 «ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА»**

Вариант 1 – 10

Параметр	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Марка котла	БКЗ	БКЗ	БКЗ	БКЗ	БКЗ	БКЗ	БКЗ	БКЗ	БКЗ	БКЗ
Расчетная паропроизводительность котла, т/ч	35	75	210	420	500	35	75	210	420	500
Месторождение: - твердого топлива	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
- жидкого топлива	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
- газообразного топлива	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Давление вырабатываемого пара, МПа	1,8	4	13,8	13,8	13,8	1,8	4	13,8	13,8	13,8
Температура пара, °С	170	440	560	560	560	170	440	560	560	560
Температура питательной воды, °С	100	120	100	110	120	100	120	100	110	120
Процент непрерывной продувки, %	2	3	4	5	6	2	3	4	5	6

Продолжение приложения Б
(обязательное)

Вариант 11 – 20

Параметр	Номер варианта									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Марка котла	БКЗ	БКЗ	БКЗ	БКЗ	БКЗ	БКЗ	БКЗ	БКЗ	БКЗ	БКЗ
Расчетная паропроизводительность котла, т/ч	35	75	210	420	500	35	75	210	420	500
Месторождение: - твердого топлива	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
- жидкого топлива	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
- газообразного топлива	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Давление вырабатываемого пара, МПа	1,8	4	13,8	13,8	13,8	1,8	4	13,8	13,8	13,8
Температура пара, °С	170	440	560	560	560	170	440	560	560	560
Температура питательной воды, °С	100	120	100	110	120	100	120	100	110	120
Процент непрерывной продувки, %	2	3	4	5	6	2	3	4	5	6

Продолжение приложения Б
(обязательное)

Вариант 21 – 30

Параметр	Номер варианта									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Марка котла	БКЗ	БКЗ	БКЗ	БКЗ	БКЗ	БКЗ	БКЗ	БКЗ	БКЗ	БКЗ
Расчетная паропроизводительность котла, т/ч	35	75	210	420	500	35	75	210	420	500
Месторождение: - твердого топлива	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
- жидкого топлива	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
- газообразного топлива	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Давление вырабатываемого пара, МПа	1,8	4	13,8	13,8	13,8	1,8	4	13,8	13,8	13,8
Температура пара, °С	170	440	560	560	560	170	440	560	560	560
Температура питательной воды, °С	100	120	100	110	120	100	120	100	110	120
Процент непрерывной продувки, %	2	3	4	5	6	2	3	4	5	6

Приложение В
(обязательное)

ЗАДАНИЕ
для курсового проектирования

по дисциплине _____
(наименование дисциплины)
специальности _____ Вологодского государственного технического университета
(номер специальности)
студента группы _____
(номер группы) (фамилия, имя, отчество полностью)

Тема задания: Поверочный тепловой расчет котлоагрегата _____
(марка котлоагрегата)

Исходные данные для расчета

1. Расчетная паропроизводительность котла $D =$ _____ кг/с,
2. Основное топливо – _____.
3. Резервное топливо – _____.
4. Абсолютное давление/ пара на выходе из пароперегревателя $p =$ _____ МПа.
5. Температура перегретого пара $t_{п.п} =$ _____ °С.
6. Температура питательной воды $t_{п.в} =$ _____ °С.
7. Величина непрерывной продувки котла _____ %.

Курсовой проект выполняется в следующем объеме:

- а) краткое описание котлоагрегата и принятых к установке горелок;
- б) выбор и описание принятых к установке хвостовых поверхностей нагрева;
- в) описание реконструктивных мероприятий;
- г) определение конструктивных характеристик котлоагрегата;
- д) расчет объемов воздуха и продуктов сгорания;
- е) расчет энтальпий воздуха и продуктов сгорания;
- ж) расчет топки;
- з) расчет пароперегревателя;
- и) расчет конвективных газоходов;
- к) расчет хвостовых поверхностей нагрева.

Графическая часть проекта выполняется на листе чертежной бумаги размером 594x841 мм в соответствии с действующими стандартами ЕСКД.

Дата выдачи _____ Срок окончания _____
(формат дд.мм.гг.) (формат дд.мм.гг.)

Задание выдал преподаватель _____ (_____) .
(подпись) (Фамилия, И.О.)

С заданием ознакомлен _____ (_____) .
(подпись) (Фамилия, И.О.)

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ТЕМАТИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ.....	4
1.1. Обоснование выбора темы проектирования.....	4
1.2. Сущность теплового расчета котла	5
1.3. Дополнительные сведения	6
1.4. Требования к пояснительной записке	6
1.5. Требования к чертежу	9
1.6. График выполнения разделов проекта	9
2. ОБЪЕМЫ И ЭНТАЛЬПИИ ВОЗДУХА И ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ	10
2.1. Расчет объемов воздуха и продуктов горения.....	10
2.2. Расчет энтальпии воздуха в продуктах горения	13
3. ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА.....	15
4. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ТОПКИ.....	19
4.1. Адиабатическая температура горения	20
4.2. Параметр М.....	20
4.3. Средний коэффициент тепловой эффективности экранов	21
4.4. Степень черноты топки	22
4.4.1. Твердое топливо	22
4.4.2. Газообразное топливо и мазут	24
4.5. Средняя суммарная теплоемкость продуктов сгорания.....	25
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	28
Приложение А	29
Приложение Б.....	32
Приложение В	35

Подписано в печать 20.06.2011.

Усл. печ. л. 2,25

Тираж экз.

Печать офсетная.

Бумага писчая.

Заказ № ____.

Отпечатано: РИО ВоГТУ, г. Вологда, ул. Ленина, 15