

КОТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ. ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ



Тамбов
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
2026

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тамбовский государственный технический университет»**

КОТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ. ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ

Утверждено Ученым советом
ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»
в качестве методических указаний для студентов
энергетических специальностей, изучающих дисциплину
«Котельные установки и парогенераторы»,
очной и заочной форм обучения

Учебное электронное издание



Тамбов
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
2026

УДК 614.841.11
ББК 24.54
К73

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Материалы и технология» ФГБОУ ВО «ТГТУ»
М. В. Макарчук

К73 Котельные установки. Теория горения [Электронный ресурс] : методические указания / сост. О. Н. Попов. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2026. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Системные требования : ПК не ниже класса Pentium IV ; RAM 512 Mb ; необходимое место на HDD 1,0 Mb ; Windows 7/8/10/11 ; дисковод CD-ROM ; мышь. – Загл. с экрана.

Сформулированы цели лабораторных работ по определению качественных и количественных характеристик твердого топлива, приведены теоретические предпосылки и краткое описание методик проведения экспериментов и обработки опытных данных.

Соответствуют актуальным требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки «Теплоэнергетика и теплотехника» (профиль «Энергообеспечение и инженерные системы зданий и сооружений») и рабочей программы дисциплины «Котельные установки и парогенераторы».

Предназначены для студентов энергетических специальностей, изучающих дисциплину «Котельные установки и парогенераторы», очной и заочной форм обучения.

УДК 614.841.11
ББК 24.54

*Все права на размножение и распространение в любой форме остаются за разработчиком.
Нелегальное копирование и использование данного продукта запрещено.*

© Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тамбовский государственный технический
университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»), 2026

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

Цель работы: экспериментальное определение гранулометрического состава твердого топлива ситовым методом.

Методические указания

Для оценки пригодности топлива в различных типах топок и процессах горения важно знать его гранулометрический состав – количественную характеристику, описывающую распределение частиц по размеру. На тепловых электростанциях для определения размера фракций применяют метод ситового анализа: пробу разделяют в грохотах, затем взвешивают каждую фракцию и рассчитывают процентное содержание каждого класса крупности (рис. 1.1).

Основными результатами ситового анализа служат остатки на ситах. Полный остаток на сите с размером ячейки x обозначается R_x и показывает, какая часть топлива не проходит через данное сито. Та часть топлива, которая проходит через сито, называется проходом (D). Величины R_x и D_x обычно выражают в процентах

$$R_x + D_x = 100\%. \quad (1.1)$$

Рассев топлива производят одновременно на нескольких ситах, расположенных друг под другом с убывающими сверху вниз размерами ячеек (рис. 1.1). При таком расसेве на всех ситах, кроме верхнего, получают остатки $F_{x_i/x_{i+1}}$, которые называют фракционными.

Полный остаток на каком-либо сите равен сумме фракционных остатков, полученных на данном сите и всех ситах, расположенных над ним, плюс полный остаток на самом верхнем сите. Например, для сита с размером ячеек x (рис. 1.2) полный остаток

$$R_{x_1} = F_{x_1/x_2} + F_{x_2/x_3} + R_{x_3}, \quad (1.2)$$

где F_{x_1/x_2} – фракционный остаток на сите с размером ячейки x_1 ; F_{x_2/x_3} – фракционный остаток на сите с размером ячейки x_2 ; R_{x_3} – полный остаток на сите с размером ячейки x_3 (верхнем сите).

Из выражения (1.2) фракционный остаток

$$F_{x_i/x_{i+1}} = R_{x_i} - R_{x_{i+1}}. \quad (1.3)$$

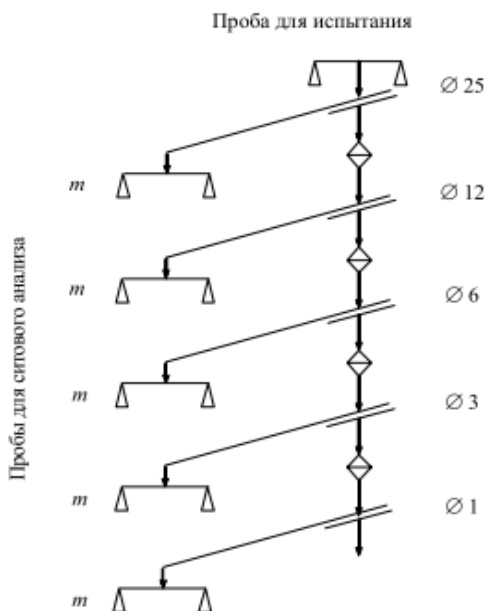
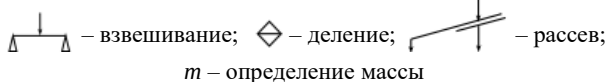


Рис. 1.1. Схема ситового анализа:



Результаты ситового анализа обычно представляют графически в виде кривой полных остатков $R_x = f(x)$ или кривой фракционных остатков $F_{x/x+\Delta x} = \varphi(x)$. Эти кривые называют ситовыми или зерновыми характеристиками топлива. Кривая полных остатков отражает интегральную, а кривая фракционных остатков – дифференциальную функции распределения массы топлива по размерам его частиц (рис. 1.3).

Интегральной кривой (кривой полных остатков) пользуются, если требуется определить долю топлива, которую составляют частицы с размерами большими (меньшими) определенного значения, или когда нужно найти долю топлива, приходящуюся на частицы с определенным интервалом размеров, например от x_1 до x_2 . Определение этой доли сводится к нахождению разности двух остатков: $F_{x_1/x_2} = R_{x_1} - R_{x_2}$.

Дифференциальная кривая наглядно показывает качественный характер распределения массы топлива по размерам его частиц. Положение максимума дифференциальной кривой относительно оси абсцисс определяет наиболее характерное значение размера (рис. 1.3).

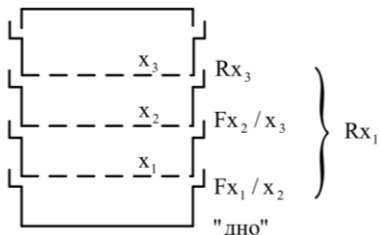


Рис. 1.2. Определение фракционных и полных остатков на ситах

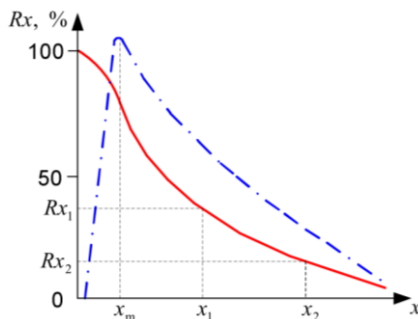


Рис. 1.3. Кривые прямых и фракционных остатков

Кривая полных остатков может быть описана уравнением

$$\frac{R_x}{100} = e^{-bx^n}, \quad (1.4)$$

где b и n – параметры, определяемые опытным путем; e – основание натурального логарифма.

Дифференциальное уравнения (1.4) дает математическое выражение для кривой фракционных остатков

$$-\frac{dR_x}{dx} = 100bnx^{n-1}e^{-bx^n}. \quad (1.5)$$

Для построения кривой $R_x = f(x)$ достаточно знать два полных остатка R_{x_1} и R_{x_2} на ситах с ячейками двух размеров x_1 и x_2 . Воспользовавшись для каждого остатка уравнением (1.5) и дважды прологарифмировав это уравнение, получим

$$\lg\left(-\ln \frac{R_{x_1}}{100}\right) = \lg b + n \lg x_1; \quad (1.6)$$

$$\lg\left(-\ln \frac{R_{x_2}}{100}\right) = \lg b + n \lg x_2. \quad (1.7)$$

Почленно вычитая выражение (1.7) из (1.6) и решая уравнение относительно n , получаем

$$n = \frac{\lg\left(-\ln \frac{100}{R_{x_1}}\right) - \lg\left(-\ln \frac{100}{R_{x_2}}\right)}{\lg x_1 - \lg x_2}. \quad (1.8)$$

Подставив значение n в формулу (1.6), получаем второй параметр ситовой характеристики b , показывающей степень общей измельченности.

Параметр n , называемый коэффициентом полидисперсности, отражает степень неоднородности кусков топлива: чем он больше, тем менее отличаются своим размером куски друг от друга. Высокое значение коэффициента полидисперсности показывает меньшую удельную затрату энергии на размол и меньшую потерю тепла от механического недожога.

Описание экспериментальной установки

Просеивание пробы производят механически на приборе «Грохот Гр30» (рис. 1.4). «Грохот Гр30» предназначен для сухого отсева в непрерывном режиме сыпучего материала на ряд классов крупности. Он состоит из вибропривода ВП-30Т с таймером, устройства крепления сит, поддона, крышки, сит 300×50 мм с ячейками 1, 3, 6, 12, 25 мм.

Привод прибора осуществляется от электродвигателя, включение в работу и экстренный останов – кнопками управления «Пуск» и «Стоп». Программное реле автоматически отключает прибор в заданное время.

Технические характеристики

Диаметр просеивающих поверхностей, мм	300
Количество просеивающих элементов, шт.	не более 5
Амплитуда колебаний, мм	0,25...1,50
Частота колебаний, кол./мин	1500
Мощность электродвигателя, кВт	2×0,025
Напряжение питания	50 Гц, 220 В



Рис. 1.4. Прибор «Грохот Гр30»

Порядок выполнения работы

Перед рассевом топливо выдерживают на воздухе до достижения воздушно-сухого состояния.

Измеряют штангенциркулем максимальный размер куска твердого топлива. В соответствии с табл. 1.1 отбирают пробу для ситового анализа. Взвешивают пробу на технических весах. Подбирают размеры отверстий сит. Под нижнее сито устанавливают поддон. На верхнее сито высыпают взвешенное топливо. Собранную стопку сит с помещенной в нее навеской устанавливают на прибор, накрывают верхней крышкой с обратными пазами и закрепляют гайками.

1.1. Масса порций и пробы для ситового анализа

Максимальный размер кусков, мм	Минимальная масса порции, кг	Минимальная масса пробы, кг
Более 200	60	1800
До 200	40	1200
150	30	900
100	20	600
50	10	300
25	5	150
13	2,6	78
6	1,2	36
Менее 3	0,6	18

Нажатием на кнопку «Пуск» включают прибор. Рассев считают законченным, когда в течение одной минуты через сито проходит менее 1% массы топлива. После просева пробы взвешивают подрешетный продукт на технических весах. Результаты испытаний заносят в табл. 1.2.

По результатам отсева определяют n и b , строят интегральную и дифференциальные кривые распределения массы топлива по размерам частиц и определяют средний размер куска топлива.

Потерю материала в процессе опыта определяют как разность между массой пробы, поступившей на испытание, и полученной суммой классов, она должна быть не более 2% массы пробы. При потере материала в пределах указанной нормы ее прибавляют к самому мелкому из полученных классов крупности.

Обработка экспериментальных данных

Средний размер куска топлива

$$d_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^m \frac{A_i \gamma_i}{100},$$

где A_i – среднее арифметическое значение размера отверстий сит, мм;
 γ_i – выход класса крупности, %; m – число классов крупности.

1.2. Сводная таблица результатов взвешивания

Класс крупности, мм	Масса классов, кг	Выход классов, %	Суммарный выход надрешетного продукта, %
25			
12			
6			
3			
1			
Поддон			
Итого			

Содержание отчета

1. Краткое описание целей и задач исследования.
2. Краткое описание опытной установки и методики эксперимента.
3. Таблица результатов опыта и исходных данных для расчетов.
4. Обработка экспериментальных данных в соответствии с приведенной выше методикой.
5. Анализ результатов испытания и выводы.

Контрольные вопросы

1. Какое значение имеет гранулометрический состав топлива в практике его использования?
2. Назовите количественные показатели ситового анализа.
3. Что характеризуют параметр n и b ?
4. Чем характеризуется степень измельчения топливной пыли на электростанциях?
5. Как выполнить работу и обработать полученные результаты?
6. Как определяется средний размер куска топлива?

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ВЛАГИ В ТВЕРДОМ ТОПЛИВЕ

Цель работы: экспериментальное определение содержания влаги в твердом топливе.

Методические указания

Состав топлива определяется не только его химическим составом и возрастом, но и факторами, связанными с условиями залегания, добычи, транспортировки и хранения. Из-за этого даже топливо, полученное из одного месторождения, может существенно отличаться от среднего состава, что требует учета таких вариаций при его подготовке к сжиганию и при выборе режимов сгорания. Эти обстоятельства подчеркивают важность правильного и частого проведения технического анализа топлива.

При исследовании топлива принято выделять внешнюю (механическую) влажность ($W^{\text{вн}}$), внутреннюю (гигроскопическую) влажность ($W^{\text{в}}$) и общую влажность, измеряемую по рабочей массе ($W^{\text{р}}$).

Под гигроскопической влагой понимают влагу, находящуюся в воз-
духосухом топливе при температуре окружающей среды 20 °С и относительной влажности воздуха 65%. Практически это та влага, которая содержится в топливе, полностью высушенном в комнатных условиях, при этом размер кусков топлива не должен превышать 13 мм. Если же топливо измельчено до частиц размером 0,2 мм, такая влага называется аналитической ($W^{\text{а}}$). Избыточная влага, содержащаяся в топливе сверх указанной, называется внешней ($W^{\text{вн}}$).

Современные методы определения влажности подразделяются на нормальный стандартный, стандартный ускоренный и нестандартный ускоренный варианты. Все методы базируются на процессе высушивания определенной пробы топлива при заданных условиях и определении потери массы пробы в результате этого процесса.

Описание экспериментальной установки

Для проведения испытаний по определению влажности в твердом топливе необходимы следующие инструменты и оборудование: сушильный шкаф с терморегулятором; весы; стеклянные бюксы с притертой крышкой; эксикатор с осушающим веществом; щипцы тигельные; ложечка-шпатель; часы.

Подготовка проб

Отбор проб подразделяется на два этапа взятия первичной и лабораторной проб. Первичная проба снимается с штабелей. Вес пробы и число точек отбора порций зависят от ряда факторов, среди которых общий объем топлива, размер фракций и условия его хранения. При этом первичная проба обязана отражать средний уровень качества конкретной партии топлива. После предварительного дробления, повторного взвешивания и уменьшения объема первичной пробы из нее выделяются лабораторные пробы. Уменьшение проб сразу производится после их отбора, обычно в несколько этапов с постепенным снижением максимального размера кусков до 13 мм. В процессе используются различные методы, такие как перемешивание с формированием конусообразной горки и разделение пробы на сегменты – «квартование». При «квартовании» пробу раскладывают тонким слоем в квадратной форме и делят на четыре части посредством диагоналей. Лабораторные пробы массой до 1000 г помещают в банки с притертыми крышками и отправляют в лабораторию для проведения анализа.

Часть лабораторной пробы обычно предназначается для определения общей влажности топлива, а оставшаяся часть служит для подготовки аналитических проб. Приготовление аналитических проб для измерения влажности состоит в следующем: содержимое лабораторной пробы измельчают в ступке до фракций размером около 3 мм, далее путем последовательного квартования отбирают пробы массой до 200 г для проведения параллельных анализов. Эти пробы доводят до воздушно-сухого состояния путем сушки на воздухе либо в сушильном шкафу. Подсушенный материал измельчают таким образом, чтобы он полностью проходил через контрольное сито. Полученную мелкодробленную пробу тщательно перемешивают и уменьшают путем деления до массы 150 г. Из этой пробы затем отбираются навески для проведения параллельных опытов. Для определения общей влажности навески выбирают из неподсушенного дробленного материала с размером частиц до 3 мм.

Определение общей влаги топлива

Для оценки достоверности результата анализа общего содержания влаги в топливе необходимо, чтобы лабораторный образец был подготовлен не позднее чем за 12 ч до проведения исследования, а его масса изменилась не более чем на 0,5% от исходного значения. Топливо, измельченное до размера частиц 3 мм, аккуратно перемешивают в герметичной

емкости, затем отбирают для анализа порции топлива массой 10 ± 1 г из различных участков с разными уровнями погружения.

Полученную навеску, включая тару, взвешивают на аналитических весах и помещают в сушильный шкаф, предварительно разогретый до температуры $105 \dots 110$ °С (рис. 2.1). Высушивание образца проводят при постоянной температуре 105 ± 5 °С в течение указанного времени: 1 ч – для каменных углей и сланцев, 1,5 ч – для бурых углей и продуктов их мокрого обогащения и 2 ч – для антрацита.

В сушильный шкаф одновременно ставят не более двадцати навесок. После высушивания тару с навесками закрывают крышкой, вынимают из сушильного шкафа и охлаждают на воздухе в течение 180 с, а затем помещают в эксикатор, где охлаждают до комнатной температуры. Взвешиванием остывшей тары с навеской определяют убыль массы и по ней рассчитывают общую влажность (W^p).

$$W^p = \frac{m_{н1} - m_{н2}}{m_{н1}} \cdot 100, \quad (2.1)$$

где $m_{н1}$ – масса навески перед подсушиванием, г; $m_{н2}$ – масса навески после сушки, г.

Масса навески перед подсушиванием

$$m_{н1} = m_1 - m_t, \quad (2.2)$$

где m_1 – масса тары с навеской топлива перед сушкой, г; m_t – масса пустой тары, г.

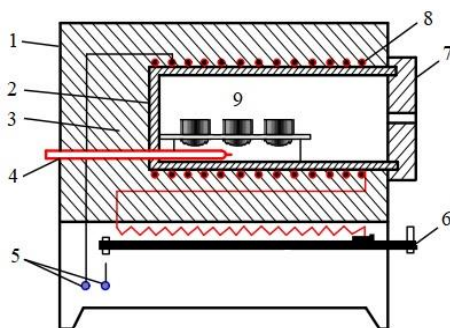


Рис. 2.1. Схема проведения испытаний по определению влажности:

- 1 – корпус; 2 – внутренняя стенка; 3 – тепловая изоляция;
- 4 – термоэлектрический преобразователь; 5 – клеммы; 6 – реостат;
- 7 – дверца; 8 – нагреватель; 9 – тара с навеской топлива

Масса навески после сушки

$$m_{н2} = m_2 - m_T, \quad (2.3)$$

где m_2 – масса тары с навеской топлива после сушки, г; m_T – масса пустой бюксы, г.

Стандартный ускоренный метод предусматривает сокращение продолжительности сушки топлива за счет увеличения температуры в сушильном шкафу до 140 ± 5 °С. Продолжительность сушки: 20 мин – каменные угли, антрацит; 40...70 мин – бурые угли.

Ускоренный нестандартный метод предусматривает еще большее сокращение продолжительности сушки топлива за счет большего увеличения температуры относительно стандартного ускоренного метода. Так, например, для донецкого угля при температуре 155 °С продолжительность сушки составляет 10 мин.

Ускоренные методы определения влажности твердого топлива применяют, когда их результаты с точностью до 0,3% совпадают с результатами нормального стандартного метода.

Контрольные сушки производят в том случае, если результаты параллельных опытов различаются более чем на 0,3%.

Определение влажности аналитической пробы

Сведения о влажности аналитической пробы необходимы для расчетов процентного содержания золы и летучих веществ по сухой массе. Определение W^a производится так же, как и W^P , но для навесок используется измельченное топливо в воздушно-сухом состоянии, полученное из аналитической пробы:

$$W^a = \frac{m_{н1} - m_{н2}}{m_{н1}} \cdot 100, \quad (2.4)$$

где $m_{н1}$ – масса навески перед подсушиванием, г; $m_{н2}$ – масса навески после сушки, г.

Порядок выполнения работы

Отбор, разделка и подготовка проб для проведения лабораторных работ производятся преподавателем кафедры во внеучебное время, поэтому студенты получают подготовленное для анализа твердое топливо.

2.1. Определение влажности по рабочей массе

№ п/п	Наименование	Размерность	Обозначение	Параллельные опыты					
				Стандартный метод		Ускоренный метод		Ускоренный нестандартный метод	
				1-й	2-й	1-й	2-й	1-й	2-й
1	Номер бюксы		№						
2	Масса пустой бюксы	г	m_T						
3	Масса бюксы с навеской	г	m_1						
4	Масса навески	г							
5	Температура сушки	°C	m_{H1}						
6	Время посадки навесок в сушильный шкаф	час:мин	t						
7	Время выгрузки навесок из сушильного шкафа	час:мин	τ_1						
8	Продолжительность сушки	мин	Δt						
9	Масса бюксы с навеской после сушки	г	m_2						
10	Масса навески после сушки	г	m_{H2}						
11	Влажность топлива по рабочей массе	%	W^P						

2.2. Определение влажности в аналитической пробе

№ п/п	Наименование	Размерность	Обозначение	Параллельные опыты					
				Стандартный метод		Ускоренный метод		Ускоренный нестандартный метод	
				1-й	2-й	1-й	2-й	1-й	2-й
1	Номер бюксы		№						
2	Масса пустой бюксы	г	m_T						
3	Масса бюксы с навеской	г	m_1						
4	Масса навески	г	$m_{н1}$						
5	Температура сушки	°C	t						
6	Время посадки навесок в сушильный шкаф	час:мин	τ_1						
7	Время выгрузки навесок из сушильного шкафа	час:мин	τ_2						
8	Продолжительность сушки	мин	Δt						
9	Масса бюксы с навеской после сушки	г	m_2						
10	Масса навески после сушки	г	$m_{н2}$						
11	Влажность топлива по аналитической массе	%	W^a						

В начале занятия приготавливают навески для определения влажности. В это же время устанавливается и контролируется начальная температура в сушильном шкафу. Загрузка сушильного шкафа производится по мере готовности навесок.

Контрольные и окончательные взвешивания проводятся по мере готовности навесок. Все исходные данные и результаты взвешиваний записываются в протокол испытаний, составленный в форме табл. 2.1, 2.2). Обработка опытных данных производится во внеучебное время в соответствии с расчетными формулами.

Содержание отчета

1. Краткое описание целей и задач исследования.
2. Краткое описание опытной установки и методики эксперимента.
3. Таблица результатов опыта и исходных данных для расчетов.
4. Обработка экспериментальных данных в соответствии с приведенной выше методикой.
5. Анализ результатов испытания и выводы.

Контрольные вопросы

1. Перечислите источники влаги в топливе.
2. Какие виды влажности Вы знаете?
3. Что такое приведенная влажность?
4. Чем определяется выбор температуры и времени сушки топлива при определении влаги?
5. Что такое рабочая, лабораторная и аналитическая пробы топлива? Порядок их приготовления.
6. Порядок определения влаги в топливе ускоренным методом сушки.
7. Порядок определения влаги в топливе основным методом сушки.
8. Как влияет влажность на экономические показатели работы тепловых электростанций?
9. К какому виду топлива относится исследуемый уголь?
10. Какие виды общей влаги определялись в работе?

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОЛЬНОСТИ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

Цель работы: освоение методики экспериментального определения зольности твердого топлива.

Методические указания

Во время сжигания топлива в топочных установках минеральные включения проходят в основном те же трансформации, что и в муфельной печи, но изменение ряда параметров накладывает свой отпечаток на химический состав и количество образующейся золы. Несгоревшие элементы топлива в топке обычно формируют локализованные остатки, которые представляют собой смесь шлака (минеральные компоненты топлива, превратившиеся в прочные сплавленные конгломераты), золы (порошковидный остаток) и продуктов неполного сгорания топлива.

Негорючие минеральные вещества, переходящие в золу после сжигания топлива, поступают в него разными способами. Часть из них представляет собой минеральные примеси, которые попали в топливо в процессе его формирования. Другая часть оказывается в топливе во время добычи вместе с горными породами и, если необходимо, может быть снижена путем обогащения топлива, при этом содержание таких примесей способно значительно варьироваться даже в пределах одного вида топлива.

Современные методики определения зольности делят на три группы: обычные стандартные методы, ускоренные стандартные и ускоренные нестандартные. Процесс измерения зольности состоит в термическом озолении взвешенной пробы топлива при высоких температурах с последующим расчетом массы полученной золы.

Описание экспериментальной установки

Для проведения испытаний по определению зольности твердого топлива необходимы следующие инструменты и оборудование: муфельная печь с терморегулятором; весы; тигли фарфоровые с крышками; эксикатор с осушающим веществом; щипцы тигельные; ложечка-шпатель; часы.

Подготовка проб

Из части лабораторной пробы приготавливают аналитическую пробу. Как готовится проба, подробно описано в лабораторной работе

«Определение содержания влаги в твердом топливе». Приготовление аналитических проб для определения зольности осуществляется следующим образом: содержимое лабораторной пробы измельчается в ступе до 3 мм, после чего последовательным квартованием отбираются пробы массой до 200 г для параллельных анализов. Эти пробы доводятся до воздушно-сухого состояния. Подсушенная проба измельчается. Измельченную пробу перемешивают и сокращают делением до 150 г. Из полученной аналитической пробы выбирают навески для параллельных опытов.

Определение зольности топлива

Из аналитической пробы после ее тщательного перемешивания ложечкой-шпателем, из разных мест с разной глубины, отбирают порции по 1 г. Суммарная масса навески при этом должна составлять 3 г. Тигли с навесками ставят на под холодной или разогретой ($t < 300\text{ }^{\circ}\text{C}$) муфельной печи, закрывают дверцу и постепенно, в течение 1,5 ч, разогревают печь до температуры $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 3.1).

После достижения необходимой температуры проводят прокаливание сформировавшегося зольного остатка на протяжении 2 ч. Далее тигли извлекаются из печи, охлаждаются около 5 мин на воздухе, затем помещаются в эксикатор и взвешиваются. После этого проводят контрольное прокаливание в течение получаса. Если изменения массы окажутся менее 0,001 г, тесты завершают, в противном случае контрольные прокаливания повторяют снова.

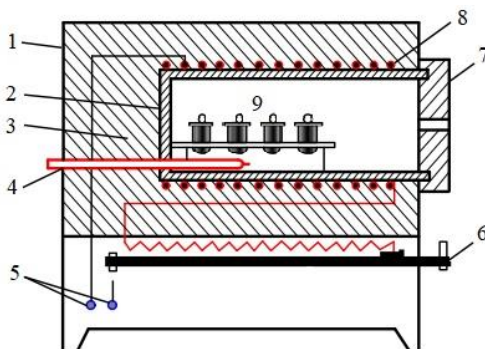


Рис. 3.1. Схема проведения испытаний по определению зольности:

- 1 – корпус; 2 – внутренняя стенка; 3 – тепловая изоляция;
- 4 – термоэлектрический преобразователь; 5 – клеммы; 6 – реостат;
- 7 – дверца; 8 – нагреватель; 9 – тара с навеской топлива

При использовании ускоренного стандартного метода печь доводят до 850 °С, открывают дверцу, затем устанавливают пластину с тиглями на край пода. Через 3 мин пластину аккуратно вводят в зону полного нагрева, дверцу закрывают, и пробу прокаливают при температуре 800 °С в течение 25 мин.

Ускоренный нестандартный способ предусматривает нагрев печи до 900 °С, выдержку пластины с тиглями у входа в муфель в течение 10 мин и более медленное продвижение в полностью разогретую зону. После закрытия дверцы прокаливание продолжают при 800 °С в течение 20 мин. Использовать ускоренные методы разрешается только после сравнения их результатов с данными обычного стандартного метода, при этом допустимое отклонение составляет не более 0,3%.

Порядок выполнения работы

Отбор, разделка и подготовка проб для проведения лабораторных работ производятся преподавателем кафедры во внеучебное время, поэтому студенты получают подготовленное для анализа твердое топливо.

В начале занятия приготавливают навески для определения зольности топлива. В это же время устанавливается и контролируется начальная температура в муфельной печи. Загрузка печи производится по мере готовности навесок.

Контрольные и окончательные взвешивания проводятся по мере готовности навесок. Все исходные данные и результаты взвешиваний записываются в протокол испытаний, составленный в форме табл. 3.1. Обработка опытных данных производится во внеучебное время в соответствии с расчетными формулами.

Обработка результатов испытаний

Зольность аналитической пробы испытуемого топлива

$$A^a = \frac{m_{н2}}{m_{н1}} \cdot 100 = \frac{m_2 - m_t}{m_1 - m_t} \cdot 100, \quad (3.1)$$

где m_t – масса пустого тигля, г; m_1 – масса тары с навеской, г; $m_{н1}$ – масса навески, г; m_2 – масса тары с навеской после прокаливания, г; $m_{н2}$ – масса навески после прокаливания, г.

3.1. Определение зольности

№ п/п	Наименование	Размерность	Обозначение	Параллельные опыты					
				Стандартный метод		Ускоренный метод		Ускоренный нестандартный метод	
				1-й	2-й	1-й	2-й	1-й	2-й
1	Номер тигля		№						
2	Масса пустого тигля	г	$m_{\text{т}}$						
3	Масса тигля с навеской	г	m_1						
4	Масса навески	г	$m_{\text{н1}}$						
5	Температура в печи	°C	t						
6	Продолжительность прокаливания	мин	$\Delta\tau$						
7	Масса тигля с навеской после прокаливания	г	m_2						
8	Масса навески после прокаливания	г	$m_{\text{н2}}$						
9	Зольность аналитической пробы	%	A^a						
10	Зольность по сухой массе	%	A^c						

Определение зольности по каждой пробе производят параллельно. За окончательный результат принимают среднее арифметическое результатов параллельных определений.

Пересчет зольности аналитической пробы топлива на сухую массу

$$A^c = A^a \frac{100}{100 - W^a} . \quad (3.2)$$

Пересчет зольности аналитической пробы топлива на рабочую массу

$$A^p = A^a \frac{100 - W^p}{100 - W^a} . \quad (3.3)$$

Вычисление результатов анализа выполняют с точностью до 0,01%.

Содержание отчета

1. Краткое описание целей и задач исследования.
2. Краткое описание опытной установки и методики эксперимента.
3. Таблица результатов опыта и исходных данных для расчетов.
4. Обработка экспериментальных данных в соответствии с приведенной выше методикой.
5. Анализ результатов испытания и выводы.

Контрольные вопросы

1. Что образуют негорючие минеральные примеси после сгорания топлива?
2. Что такое зола?
3. Какие виды золы различают?
4. Что такое шлак?
5. Происхождение минеральных примесей топлива и их состав.
6. Как влияют минеральные примеси топлива на работу котельного агрегата?
7. Какие изменения происходят в минеральной части топлива при его горении?
8. Порядок определения зольности.
9. Преимущества и недостатки методов определения зольности топлива.
10. Как влияют минеральные примеси топлива на экономические показатели электростанций?

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫХОДА ЛЕТУЧИХ ВЕЩЕСТВ

Цель работы: освоение методики экспериментального определения выхода летучих веществ из твердого топлива.

Методические указания

Ключевыми теплотехническими параметрами твердого топлива выступают выход летучих соединений и характеристики оставшегося нелетучего остатка – кокса. Эти показатели считаются важнейшими для выбора оптимальных вариантов его применения.

При нагревании твердого топлива в условиях отсутствия воздуха происходит частичное разложение органической и минеральной составляющих, в результате чего выделяются паровые и газообразные продукты, именуемые летучими веществами (V^r).

Большинство летучих веществ возникает при разложении органической части топлива, поэтому их количество принято рассматривать относительно органической (горючей) массы. Образование и состав летучих компонентов у конкретного вида топлива в основном зависят от максимальной температуры и скорости процесса нагрева.

Основное выделение летучих веществ завершается спустя 7 мин нагрева при 850 °С. Продление выдержки при этой температуре лишь немного увеличивает выход летучих соединений. При этом возрастает риск выгорания углерода кокса из-за диффузии кислорода к топливу, интенсивность которой возрастает при уменьшении выхода летучих веществ.

Описание экспериментальной установки

Для проведения испытаний по определению зольности твердого топлива необходимы следующие инструменты и оборудование: муфельная печь с терморегулятором; весы; тигли фарфоровые с крышками; эксикатор с осушающим веществом; щипцы тигельные; ложечка-шпатель; часы.

Определение выхода летучих веществ твердого топлива

Чтобы установить содержание легколетучих компонентов, пробы, подготовленные аналогично образцам для анализа зольности, помещают в керамические тигли с плотно закрывающейся крышкой и нагревают

в муфельной печи до 850 °С в течение 7 мин. Важно отметить, что при проведении этих испытаний, в сравнении с оценкой содержания влаги и золы в твердом топливе, тигли необходимо как можно быстрее размещать в камере, стремясь избежать температурных скачков более чем на 20 °С. По завершении прокаливания емкости извлекают, удаляют пробки, дают остыть на открытом воздухе, а затем в сушильном шкафу и проводят взвешивание. Разница в весе указывает на количество выделенных летучих соединений.

Порядок выполнения работы

Отбор, разделка и подготовка проб для проведения лабораторных работ производятся преподавателем кафедры во внеучебное время, поэтому студенты получают подготовленное для анализа твердое топливо.

В начале занятия приготавливают навески для определения выхода летучих веществ. В это же время устанавливается и контролируется начальная температура в муфельной печи. Загрузка печи производится по мере готовности навесок.

Контрольные и окончательные взвешивания проводятся по мере готовности навесок. Все исходные данные и результаты взвешиваний записываются в протокол испытаний, составленный в форме табл. 4.1. Обработка опытных данных производится во внеучебное время в соответствии с расчетными формулами.

Обработка результатов

Выход летучих веществ в аналитической пробе

$$V^a = \frac{m_{n1} - m_{n2}}{m_{n1}} \cdot 100 = \frac{(m_1 - m_t) - (m_2 - m_t)}{(m_1 - m_t)} \cdot 100, \quad (4.1)$$

где m_t – масса пустого тигля, г; m_1 – масса тигля с навеской, г; m_{n1} – масса навески, г; m_2 – масса тигля с навеской после прокаливания, г; m_{n2} – масса навески после прокаливания, г.

Выход летучих веществ в пересчете на сухую массу

$$V^r = \frac{100}{100 - W^a - A^a} \cdot V^a, \quad (4.2)$$

где A^a – зольность аналитической пробы исследуемого топлива, %.

Выход нелетучего остатка

$$(NV)^a = 100 - W^a - A^a. \quad (4.3)$$

4.1. Определение выхода летучих веществ

№ п/п	Наименование	Размерность	Обозначение	Параллельные опыты	
				Выход летучих	
				1-й	2-й
1	Номер тигля		№		
2	Масса пустого тигля	г	m_T		
3	Масса тигля с навеской	г	m_1		
4	Масса навески	г	$m_{н1}$		
5	Температура в печи	°C	t		
6	Продолжительность прокаливания	мин	$\Delta\tau$		
7	Масса тигля с навеской после прокаливания	г	m_2		
8	Масса навески после прокаливания	г	$m_{н2}$		
9	Выход летучих аналитической пробы	%	V^a		
10	Выход летучих по сухой массе	%	V^c		

Результаты определений вычисляют с точностью до 0,01%. Расхождение между результатами двух параллельных определений выхода летучих веществ V^a по одной аналитической пробе не должно превышать: от 0,3 до 1,0% в зависимости от выхода летучих веществ.

Содержание отчета

1. Краткое описание целей и задач исследования.
2. Краткое описание опытной установки и методики эксперимента.
3. Таблица результатов опыта и исходных данных для расчетов.
4. Обработка экспериментальных данных в соответствии с приведенной выше методикой.
5. Анализ результатов испытания и выводы.

Контрольные вопросы

1. Что такое летучие вещества и коксовый остаток, из каких элементов они состоят и какую роль играют при сжигании топлива?
2. Влияние выхода летучих веществ на работу котельного агрегата и его конструкцию.
3. Связь между величиной выхода летучих веществ и реакционной способностью коксового остатка.
4. Спекаемость твердого топлива и ее практическое значение.
5. По величине выхода летучих веществ, характеру коксового остатка определить, к какому виду относится исследуемое топливо?
6. Основные стадии термического разложения твердого топлива и их характеристика.
7. Чем основан выбор температуры и времени, при которых определяется выход летучих веществ?
8. Почему при определении выхода летучих веществ тигель закрывают крышкой?

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОТЫ СГОРАНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

Цель работы: освоение методики экспериментального определения теплоты сгорания твердого топлива.

Методические указания

Удельной теплотой сгорания твердого топлива называют количество тепла, выделяющееся при полном сгорании единицы массы топлива. Различают высшую и низшую теплоты сгорания, отличающиеся численно на величину теплоты парообразования влаги.

При сжигании топлива в реальных топочных устройствах газообразные продукты сгорания никогда не охлаждаются ниже температуры конденсации водяных паров, и, следовательно, теплота сгорания не включает в себя дополнительных слагаемых, отражающих теплоты парообразования и растворения кислот.

Определение низшей теплоты сгорания топлива может быть проведено или по формулам Д. И. Менделеева на базе данных об элементарном составе топлива, или (более точно) опытным путем, заключающимся в измерении количества тепла, которое выделяется при сжигании средней пробы топлива в калориметрической бомбе. Методика опытного исследования хорошо отработана и четко регламентирована.

Описание экспериментальной установки

Теплотворную способность топлива определяют экспериментально с использованием калориметрической установки (рис. 5.1), которая включает в себя: калориметрическую бомбу 1, емкость для проведения измерений – калориметрический сосуд 2, систему поддержания постоянной температуры – термостат 10, а также дополнительное оборудование и инструменты для контроля параметров процесса. Емкость 2 располагается внутри термостата 10 на изолирующей опоре 11 и перекрывается крышкой 5, содержащей отверстия для вала мешалки 8, термометра 3 и кабелей электропитания. Показатель температуры окружающей воды контролируется с помощью термометра 7. Вода постоянно перемешивается мешалкой 8, приводящейся в действие электродвигателем 6 со скоростью примерно 500 об/мин. Термометр 3 предназначен для фиксации температуры жидкости в калориметрическом сосуде, а для удобства наблюдения за значениями используется визуальная трубка 4.

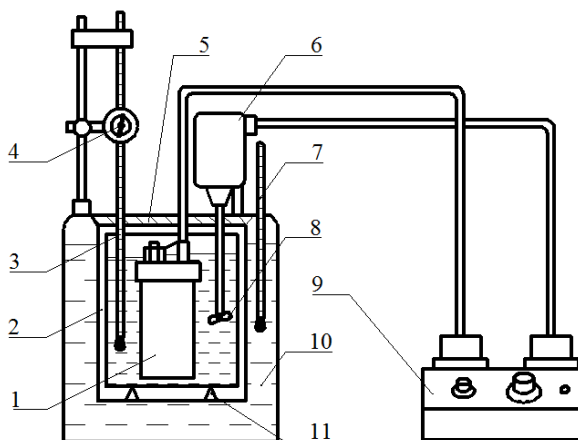


Рис. 5.1. Экспериментальная установка

Панель управления 9 содержит специальный источник питания, оснащенный регулятором напряжения, позволяющим плавно регулировать скорость вращения мешалки 8. Кнопка «Запал» используется для подключения источника к электросети. О включении сетевого питания свидетельствует световой индикатор.

Калориметрическая бомба (рис. 5.2) состоит из массивного цилиндрического сосуда – стакана 1 объемом 280 см³, выполненного из кислотоустойчивой нержавеющей стали. Поверхность стенок стакана отполирована.

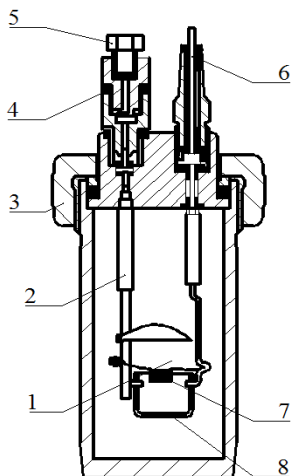


Рис. 5.2. Калориметрическая бомба

Поверхность стенок стакана отполирована. Стакан плотно закрывается крышкой 4 с помощью гайки 3, обеспечивающей герметичность. В крышке предусмотрены штуцеры для подачи сжатого кислорода 5 и удаления продуктов горения. Также здесь расположен электрически изолированный металлический штырь 6, выполняющий роль одного из электродов для подачи напряжения на искровую проволоку 7, предназначенную для воспламенения образца. Второй электрод представлен стержнем 2, который электрически соединен с крышкой 4. Для обеспечения зажигания небольшой

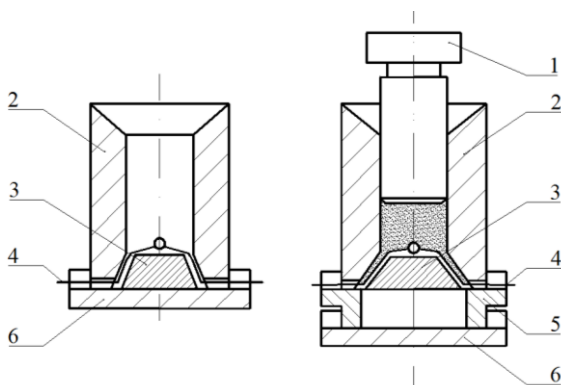


Рис. 5.3. Принцип работы пресса:

1 – пуансон; 2 – матрица; 3 – наковальня; 4 – провод зажигания;
5 – промежуточное кольцо; 6 – подставка

порции топлива используют мягкую проволоку толщиной до 0,2 мм, которую разрезают на отрезки длиной примерно 100 мм, скручивают в спираль, а ее центр помещают внутрь брикета или насыпной пробы, располагаемой в чашечке 8.

Для приготовления брикетов используется специальный пресс (рис. 5.3).

Порядок выполнения работы

1. Нарезают проволоку для запала, готовят от 10 до 15 спиралей, определяют массу каждой спирали.

2. Из аналитической пробы топлива берут навеску топлива общей массой около 1 г. Топлива с зольностью до 35% сжигают в виде брикета.

3. Определяют массу чашечки.

4. Определяют общую массу, состоящую из массы брикета с запальной спиралью и чашечки.

5. Чашечку с навеской устанавливают на штифты токоведущих стержней, запальную проволоку плотно присоединяют к токоведущей арматуре.

6. На дно бомбы наливают 5 см³ дистиллированной воды.

7. Устанавливают крышку с прокладками в стакан бомбы.

8. Завинчивают до упора гайку 3 (рис. 5.2).

9. Бомбу устанавливают у кислородного баллона и, присоединяя трубку от редуктора к открытому впускному вентилю бомбы, медленно наполняют бомбу кислородом до давления 25 кг/см². При достижении

указанного давления закрывают сначала впускной клапан бомбы, затем клапан кислородного редуктора.

10. Отсоединяют калориметрическую бомбу от кислородного баллона, закрывают впускные и выпускные штуцеры навинчивающимися пробками и переносят бомбу к установке.

11. В предварительно взвешенный калориметрический сосуд наливают дистиллированную воду и взвешивают сосуд. Доливают воду, доводят массу воды в сосуде до 2343 г. Начальная температура воды должна быть на 1,5 °С ниже температуры воды в термостате.

12. Калориметрический сосуд с водой устанавливается на теплоизоляционную подставку внутри термостата, в него помещается бомба. Устанавливаются термометр и мешалка, подключаются токоведущие провода от пульта управления.

13. Калориметр закрывают крышкой и запускают мешалку. После 10 мин переходят к проведению испытания, испытание разделяется на три периода: начальный, главный и конечный.

В начальном периоде, выполнив нулевой отсчет температуры воды в калориметре, делают 5 замеров через 60 с. В момент последнего отсчета температуры замыкают цепь электрического тока зажигания нажатием на пульте управления кнопки «Запал». В результате проволока и навеска топлива сгорают, выделившаяся теплота передается калориметру, и начинается выравнивание температуры.

После замыкания электрического тока на зажигание отсчеты температуры ведут через каждые 30 с. Главный период считается оконченным при прекращении повышения температуры калориметра.

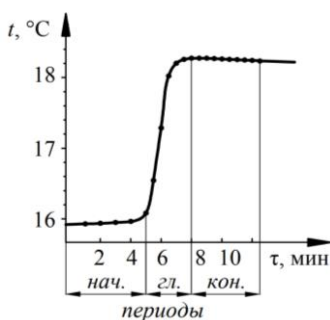


Рис. 5.4. Типовой график зависимости температуры калориметра от времени

Конечный период начинается с момента прекращения повышения температуры калориметра и начала ее медленного уменьшения. Отсчеты здесь ведутся так же через каждые 30 с и прекращаются после 15 отсчетов.

На рисунке 5.4 приведен график зависимости температуры в калориметре от времени с указанием периодов испытания. Во время испытания ведется специальный протокол, куда заносятся все показания термометра (табл. 5.1).

5.1. Протокол проведения испытания

Запись отсчетов по термометру		Периоды	Исходные данные для расчета Q_n^p
номера полуминутных отсчетов	показания по шкале, дел.		
0	$t_0 =$ $t_a =$ $t_n =$ m Z	начальный	Температура помещения $t_b = \text{_____}^\circ\text{C}$
1			$k = \text{_____} \text{ кДж/К}$
2			$H = \text{_____} \text{ град/дел.}$
3			$t_0 = \text{_____} \text{ дел.}$
4			$h_0 = \text{_____} \text{ дел.}$
5			$t_n = \text{_____} \text{ дел.}$
6			$h_n = \text{_____} \text{ дел.}$
7			
8			
9			
10 (запал)		главный	$q = \text{_____} \text{ кДж/кг}$
11			$G_1 = \text{_____} \text{ кг}$
12			$G = \text{_____} \text{ кг}$
13			$m = \text{_____}$
14			$r = \text{_____}$
15			$W^a = \text{_____} \%$
16			$A^a = \text{_____} \%$
17			$S_6^a = \text{_____} \%$
18			$\alpha = \text{_____}$
19			$\beta = \text{_____} \text{ кДж/\%}$
20		конечный	$W^p = \text{_____} \%$
21			$V^a = \text{_____} \%$
22			$V^r = \text{_____} \%$
23			$H^r = \text{_____} \%$
24			$H^p = \text{_____} \%$
25			
26			
27			
28			
29			
30			
31			

По окончании опыта бомбу вынимают из калориметра, снимают пробку выпускного вентиля, осторожно открывают выпускной вентиль и медленно, в течение 5...10 мин выпускают газы. Гайку отвинчивают лишь

после полного выравнивания давлений в бомбе и помещении. Снимают крышку бомбы и тщательно осматривают внутренние поверхности. При наличии сажистого налета или несгоревших частиц топлива опыт бракуется и должен быть повторен заново. Если же опыт можно признать удовлетворительным, то осторожно снимают остатки запальной проволоки и взвешивают их. Вычисляют массу сгоревшей проволоки.

Для подготовки к повторному или следующему опыту бомба тщательно промывается горячей дистиллированной водой, которую затем собирают и используют обычно для анализа на содержание серы в газообразных продуктах сгорания.

Обработка экспериментальных данных

Теплота сгорания пробы топлива в бомбе

$$Q_6^a = \frac{kH[(t_n + h_n) - (t_0 + h_0) + \Delta t] - qG_1}{G}, \quad (5.1)$$

где k – теплоемкость калориметра, заполненного водой, 10,27 кДж/К; t_0 – начальная температура главного периода, дел.; t_n – конечная температура главного периода, дел.; h_n – поправка к показаниям термометра при температуре t_n , дел.; h_0 – то же при t_0 ; Δt – поправка на теплообмен калориметра с окружающей средой, дел.; q – удельная теплота сгорания проволоки, 6690 кДж/кг; G_1 – масса сгоревшей проволоки, кг; G – масса навески испытуемого топлива, кг; H – значение деления шкалы термометра, град/дел.

Для упрощения расчетов величины h_n и h_0 принимаем равными 0.

Поправка на теплообмен калориметра с окружающей средой

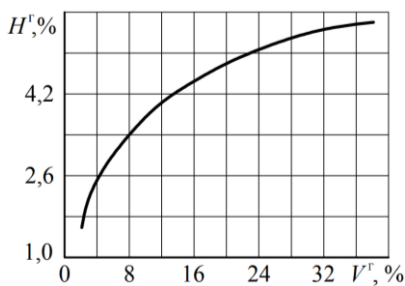
$$\Delta t = \frac{V_1 + V_2}{2} m + V_2 \tau, \quad (5.2)$$

где V_1 – среднее изменение температуры за полуминутный промежуток времени в начальном периоде, дел.; V_2 – среднее изменение температуры за полуминутный промежуток в конечном периоде, дел.; m – число полуминутных промежутков главного периода с быстрым подъемом температуры, $m = 3 - 9$; τ – число полуминутных промежутков главного периода, не отнесенных к числу m .

Высшая теплота сгорания определяется введением поправки на кислотообразование:

$$Q_b^a = Q_6^a - (\beta S_6^a + \alpha Q_6^a), \quad (5.3)$$

где β – коэффициент, учитывающий теплоту образования и растворения в воде серной кислоты, $\beta = 94$ кДж на 1% серы; S_6^a – процентное содержание серы, 2,5 ... 3,0%; α – коэффициент, учитывающий теплоту образования и растворения в воде азотной кислоты, 0,001 ... 0,0015.



**Рис. 5.5. Содержание водорода
в зависимости от выхода летучих веществ**

Высшая теплота сгорания по рабочей массе топлива

$$Q_B^p = Q_B^a \frac{100 - W^p}{100 - W^a}, \quad (5.4)$$

где W^p – содержание влаги в рабочем топливе, %; W^a – влажность аналитической пробы, %.

Низшая теплота сгорания по рабочей массе

$$Q_H^p = Q_B^p - 25 \cdot (9H^p + W^p), \quad (5.5)$$

где H^p – содержание водорода в топливе, %.

Содержание водорода в топливе

$$H^p = H^r \frac{100 - (W^p + A^p)}{100}, \quad (5.6)$$

где A^p – зольность топлива, %; H^r – содержание водорода по горючей массе, определяется по рис. 5.5.

Выход летучих

$$V^r = V^a \frac{100}{100 - (A^a + W^a)}, \quad (5.7)$$

где V^a – выход летучих аналитической пробы топлива, %.

Содержание отчета

1. Краткое описание целей и задач исследования.
2. Краткое описание опытной установки и методики эксперимента.
3. Таблица результатов опыта и исходных данных для расчетов.
4. Обработка опытных данных в соответствии с приведенной выше методикой.
5. Анализ результатов испытания и выводы.

Контрольные вопросы

1. Что такое теплота сгорания топлива?
2. Что называется высшей и низшей теплотой сгорания топлива?
3. Перечислите способы определения теплоты сгорания топлива.
4. Сущность определения теплоты сгорания топлива в калориметрической установке.
5. Устройство калориметрической установки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Майникова, Н. Ф. Котельные установки и парогенераторы : учебное пособие / Н. Ф. Майникова, О. Н. Попов, А. Н. Грибков. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2019 – Ч. 1. – 80 с.

2. Определение гранулометрического состава твердых топлив ситовым методом : лабор. работа по курсу «Котельные установки и парогенераторы» для студ. днев. и заоч. обучения спец. 140106 / Н. П. Жуков, А. С. Чех, Е. В. Кариб, И. В. Рогов. – Тамбов : ТГТУ, 2007. – 12 с.

3. ГОСТ Р 59248–2020. Угли бурые, каменные, антрацит, горючие сланцы и угольные брикеты». Методы отбора и подготовки проб для лабораторных испытаний: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2021-04-01 / Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС». – Изд. официальное. – М. : Стандартинформ, 2001. – 23 с.

4. Бойко, Е. А. Котельные установки и парогенераторы : лабораторный практикум / Е. А. Бойко, Т. И. Охорзина, П. В. Шишмарев / Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2008. – 80 с.

5. Ляшков В. И. Технический анализ твердого топлива : метод. указ. к лаб. работам по теплотехнике / В. И. Ляшков. – Тамбов : ТИХМ, 1977. – 24 с.

Учебное электронное издание

КОТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ. ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ

Методические указания

Составитель

ПОПОВ Олег Николаевич

Редактор Л. В. Комбарова

Графический и мультимедийный дизайнер Т. Ю. Зотова

Обложка, упаковка, тиражирование Л. В. Комбарово й

Подписано к использованию 31.03.2026.

Тираж 50 шт. Заказ № 41

Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»

392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106/5, помещение 2, к. 14.

Тел./факс (4752) 63-81-08.

E-mail: izdatelstvo@tstu.ru