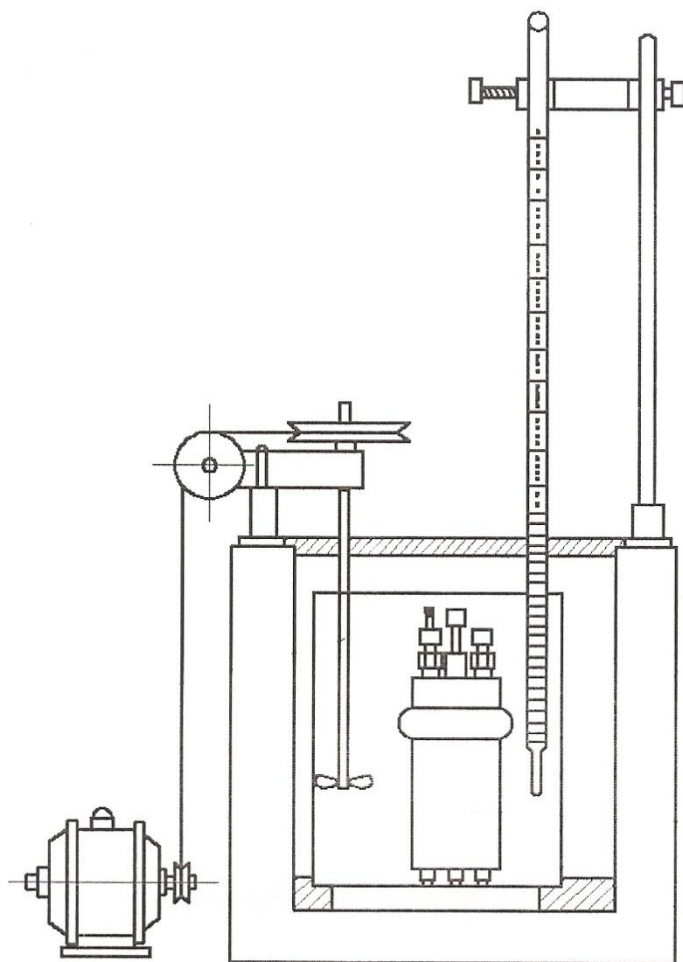


В.Н.Белоусов, О.С.Смирнова, С.Н.Сморозин

Топливо и теория горения

**Учебно-методическое пособие
для выполнения лабораторных работ**



Санкт-Петербург

2016

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ДИЗАЙНА»**

ВЫСШАЯ ШКОЛА ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГЕТИКИ

Кафедра промышленной теплоэнергетики

В.Н.Белоусов, О.С.Смирнова, С.Н.Сморозин

Топливо и теория горения

Учебно-методическое пособие
для выполнения лабораторных работ

Для студентов, обучающихся по направлениям
13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»,
15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств»

Санкт-Петербург

2016

УДК 621.184(07)

ББК 31.31р

Б 438

Белоусов В.Н., Смирнова О.С., Смородин С.Н. Топливо и теория горения: учебно-методическое пособие для выполнения лабораторных работ / ВШТЭ СПбГУПТД. - СПб., 2016 - 58 с.

В настоящем учебно-методическом пособии рассматриваются методы исследования характеристик органического топлива и топочных процессов. Приводятся теоретические основы, схемы лабораторных установок, порядок проведения опытов и обработки экспериментальных данных.

Предназначено для студентов энергетических, политехнических и технологических вузов, обучающихся по направлениям 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств».

Рецензенты: доктор технических наук, заведующий кафедрой «Атомная и тепловая энергетика» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого проф. В.В.Сергеев;
главный технолог АО «Лонас технология» В.В.Викторовский.

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД в качестве учебно-методического пособия.

© Белоусов В.Н., Смирнова О.С.,
Смородин С.Н., 2016

© Высшая школа технологии
и энергетики СПбГУПТД,
2016

Введение

Курс «Топливо и теория горения» является базовой дисциплиной для студентов, обучающихся по специальностям «Промышленная теплоэнергетика», «Энергетика теплотехнологий» и ряда других. Полученные знания помогают при изучении специальных курсов, таких как «Котельные установки промышленных предприятий» и «Высокотемпературные теплотехнические процессы и установки».

Помимо лекционного материала и курсовой работы, он включает в себя и лабораторный практикум.

Основная цель лабораторного практикума заключается в закреплении теоретических знаний, полученных в лекционном курсе, а также в получении практических навыков по определению основных теплотехнических характеристик топлив и особенностей эксплуатации котельных установок.

Методические указания составлены в соответствии с программой курса «Топливо и теория горения»

Перед выполнением лабораторных работ необходимо изучить основные теоретические положения, ознакомиться с установками, измерительным оборудованием, порядком проведения лабораторных работ, техникой безопасности, подготовить таблицы для записи экспериментальных результатов и расчётных данных.

После выполнения лабораторных работ студент должен составить отчёт, представляемый преподавателю при сдаче зачёта по данной дисциплине.

Полученные навыки исследовательской работы должны помочь студентам в их будущей производственной, конструкторской или научно-исследовательской деятельности.

Технический анализ твёрдого и жидкого топлива

Энергетическим топливом называют горючие вещества, которые экономически целесообразно использовать для получения в промышленных целях больших количеств энергии. Более 2/3 всей вырабатываемой в России электроэнергии приходится на долю тепловых электростанций, работающих на органических топливах. Кроме того, топливо используется на транспорте и в технологических процессах (например, для выплавки чугуна, для варки стали, в машиностроении, в химической технологии и т. д.).

По способу получения различают *природные* (натуральные) и *искусственные* виды топлива (табл. 1).

Таблица 1

Классификация органических топлив по агрегатному состоянию

Топливо	Агрегатное состояние		
	твёрдое	жидкое	газообразное
Природное	Дрова, торф, бурые и каменные угли, антрацит, горючие сланцы	Нефть	Природный газ
Искусственное	Древесный уголь, полукокс, кокс, угольные и торфяные брикеты	Мазут, керосин, бензин, соляровое масло, газойль, печное топливо	Газы нефтяной, коксовый, генераторный, доменный, газ подземной газификации

Искусственное топливо получают из природного топлива в процессе переработки.

По агрегатному состоянию различают твёрдые, жидкие и газообразные виды топлива.

Твёрдые топлива используются в основном на ТЭС для получения электрической энергии, отопления, технологических нужд промышленности.

Энергетическим жидким топливом является мазут – остаточный продукт нефтепереработки.

Состав и качество топлива определяются в специально оборудованных лабораториях химическим и механическим анализами средней пробы партии топлива.

Все вещества в составе твердого и жидкого топлива находятся в нём в виде сложных высокомолекулярных органических соединений. Качественный и, особенно, количественный анализы этих соединений требуют проведения сложных и трудоёмких лабораторных исследований. Поэтому состав топлива принято выражать не в виде соединений, а содержанием (в процентах к массе топлива) отдельных химических элементов: углерода (C), водорода (H), серы летучей ($S_{\text{л}}$), кислорода (O), азота (N), а также золы (A) и влаги (W).

Горючими элементами твёрдого и жидкого топлива являются углерод, водород и сера (органическая и пиритная). В связанном с ними состоянии находятся кислород и азот, которые образуют *внутренний балласт* топлива. Зола и влага составляет *внешний балласт* топлива.

Основным горючим элементом твёрдого и жидкого топлива, содержание которого обуславливает выделение основного количества теплоты, является углерод, имеющий сравнительно высокую удельную теплоту сгорания (34,1 МДж/кг).

Вторым по значимости элементом в составе твёрдого и жидкого топлива является водород, который имеет более высокую удельную теплоту сгорания (120,5 МДж/кг), однако его содержание в топливе сравнительно мало, поэтому доля водорода в суммарном тепловыделении при горении топлива значительно меньше, чем углерода.

Сера имеет невысокую теплоту сгорания (9,3 МДж/кг), содержится в топливе в небольших количествах, при горении образует токсичные газы SO_2 и SO_3 , а также вызывает сернокислотную (низкотемпературную)

коррозию. Поэтому сера не представляет ценности как горючий элемент, более того, является *вредным* и *нежелательным* элементом в топливе.

Балласт (внутренний и внешний) значительно снижает ценность топлива, уменьшая его теплоту сгорания.

Влага в топливе уменьшает относительное количество горючих веществ, а на её испарение при горении расходуется теплота. Наличие золы не только снижает теплоту сгорания, но значительно затрудняет процесс горения и эксплуатацию топочных устройств.

Кислород и азот, связанные (в виде органических соединений) с горючими элементами топлива, также снижают удельную теплоту его сгорания, а азот, являясь инертным газом, тем не менее, при высоких температурах образует в соединении с кислородом высокотоксичные оксиды NO_x .

Массу вещества топлива принято условно характеризовать как рабочую, сухую, беззольную, горючую, органическую и аналитическую.

Топливо в том виде, в котором оно поступает к потребителю, называется *рабочим*, а составляющее его вещество — *рабочей массой*. Все компоненты рабочей массы обозначаются индексом **r** (от *англ.* «raw» — *сырой, необработанный*):

$$\text{C}^{\text{r}} + \text{H}^{\text{r}} + \text{S}_{\text{o+p}}^{\text{r}} + \text{O}^{\text{r}} + \text{N}^{\text{r}} + \text{A}^{\text{r}} + \text{W}^{\text{r}} = 100 \% .$$

Влажность и зольность твердого топлива, даже в пределах одного сорта и одного месторождения, могут значительно колебаться, а также изменяться в процессе транспортировки и хранения. Поэтому элементный состав рабочей массы топлива является *неустойчивой* характеристикой топлива.

Более устойчивой характеристикой является элементный состав *сухой массы топлива* (индекс **d** — от *англ.* «dry» — *сухой*):

$$\text{C}^{\text{d}} + \text{H}^{\text{d}} + \text{S}_{\text{o+p}}^{\text{d}} + \text{O}^{\text{d}} + \text{N}^{\text{d}} + \text{A}^{\text{d}} = 100 \% .$$

Устойчивой (неизменяемой) характеристикой любого твёрдого топлива является *сухая беззольная (горючая) масса*. Сухая беззольная масса представляет собой *сумму горючих элементов* (C, H, $\text{S}_{\text{o+p}}$) и *химически*

связанного с ними внутреннего балласта (индекс **daf** – от англ. «dry ash free» – сухой беззольный):

$$C^{daf} + H^{daf} + S_{o+p}^{daf} + O^{daf} + N^{daf} = 100 \% .$$

Название «горючая масса» носит условный характер, так как действительно горючими её элементами являются только углерод, водород и сера.

По аналогии вводится понятие *беззольной массы* (индекс **af** – от англ. «ash free» – беззольный), которое фигурирует в классификации топлива.

Для проведения лабораторных исследований твёрдого топлива пользуются отобранной пробой рабочего топлива, измельченной и подсушенной до такой влажности, которая при хранении топлива в лабораторных условиях не изменяется, — воздушно-сухая, или *аналитическая проба* (индекс **a**):

$$C^a + H^a + S_{o+p}^a + O^a + N^a + A^a + W^a = 100 \% .$$

Состав твердого и жидкого топлива можно представить в виде графического отображения (рис. 1).

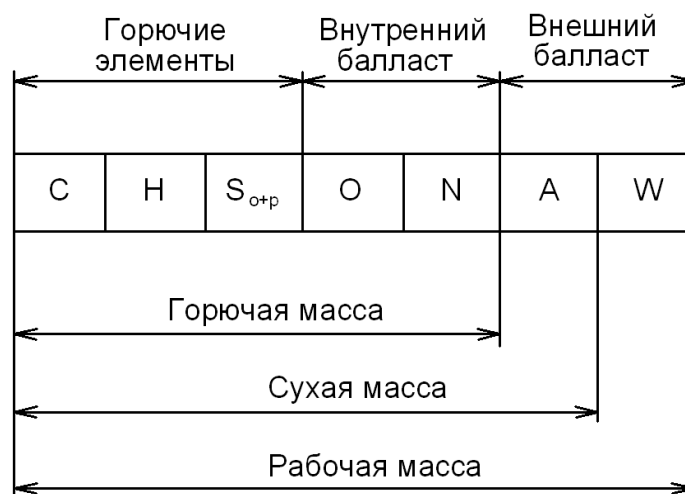


Рис. 1. Элементный состав топлива

Состав топлива различных видов и месторождений приводится в таблицах технических характеристик топлива.

Пересчёт элементного состава топлива с одной массы на другую осуществляется с помощью соответствующих формул (табл. 2).

Таблица 2

Коэффициенты пересчёта состава топлива

Заданная масса топлива	Искомая масса топлива		
	рабочая	сухая	горючая
Рабочая	1	$\frac{100}{100 - W^r}$	$\frac{100}{100 - (W^r + A^r)}$
Сухая	$\frac{100 - W^r}{100}$	1	$\frac{100}{100 - A^d}$
Горючая	$\frac{100 - (W^r + A^r)}{100}$	$\frac{100 - A^d}{100}$	1

В табл. 3 приведены элементный состав и основные теплотехнические характеристики различных видов топлива.

Таблица 3

Топливо	Выход летучих веществ в V^{daf} , %	Теплота сгорания Q_i^r , МДж/кг	A^r , %	W^r , %	Состав горючей массы, %				
					C^{daf}	H^{daf}	O^{daf}	N^{daf}	S^{daf}
Древесина	80-90	8-10	< 1	30-60	49-51	5-7	38-42	0,5-2,3	-
Торф	65-75	8,1-10,5	4-8	40-55	50-60	5-7	28-33	1,5-2,5	0,2-0,3
Бурый уголь	40-60	7,8-19	7-45	0-55	64-78	4-6	15-26	0,6-1,6	0,3-6,0
Каменный уголь	20-44	16-25	10-40	4-15	75-85	4-6	2-13	1,0-2,7	0,5-6,0
Антрацит	2-9	23-25	15-20	5-8,5	89-94	2-3	1-2	0,5-1,5	2-3
Горючие сланцы	80-90	4,6-9	45-60	11-35	60-75	7-10	12-17	0,3-1,2	4-13
Нефть	-	40-46	0,8	1-1,5	83-87	11-14	0,1-2	0,1-1,2	0,1-8

Лабораторная работа № 1.

Определение влажности топлива

Цель работы: определение содержания влаги в аналитической пробе топлива и анализ влияния влажности топлива на процесс воспламенения и горения при эксплуатации котельных установок.

Основные теоретические положения

Влага является внешним балластом топлива, снижает содержание горючих компонентов, требует затраты теплоты на испарение. Испарившаяся влага отбирает часть теплоты дымовых газов, в результате чего снижается их температура и количество теплоты, передаваемой поверхностям нагрева. Влага топлива увеличивает объём дымовых газов, что требует дополнительных затрат энергии на их удаление.

При изменении влажности с W_1^r на W_2^r пересчёт теплоты сгорания рабочей массы топлива производится по формуле:

$$Q_{i2}^r = (Q_{i1}^r + 25W_1^r) \cdot \frac{100 - W_2^r}{100 - W_1^r} - 25W_2^r, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Изменение теплоты сгорания топлива приводит к соответствующему изменению адиабатической температуры горения, энтальпии продуктов сгорания в зоне максимального тепловыделения и средней температуры факела.

Технической характеристикой, отражающей содержание в топливе влаги, является *влажность* W_t^r . Она определяется по изменению массы топлива в результате его сушки при температуре 105...110 °С в стандартных условиях и выражается в процентах от начальной навески топлива.

Влага топлива подразделяется на *внешнюю* (свободную) W_{ex} и *внутреннюю* (связанную), или *гигроскопическую* W_h , т.е. $W_t^r = W_{ex} + W_h$.

К внешней относится *поверхностная* влага, попадающая в топливо при его добыче, транспортировке и хранении, а также *капиллярная*, заполняющая многочисленные поры топлива.

Если пробу угля высушить до постоянной массы при комнатной температуре, внешняя влага выделяется, а проба приводится к *воздушно-сыхому* состоянию (*аналитическая масса*), т.е. $W^a = W_h$.

К внутренней (*гигроскопической*) относят коллоидную и гидратную влагу.

Коллоидная и гидратная влажность топлива зависят от его структуры и связаны, соответственно, с органическими веществами топлива и его минеральными примесями.

Содержание влаги в твёрдом топливе зависит от его химической природы и геологического возраста, условий залегания пластов и способа добычи, условий транспортировки и хранения. Примерный диапазон влажности рабочей массы топлива от $W^r = 5 \%$ (антрацит) до $W^r = 70 \%$ (древесина).

В жидком топливе содержится только внешняя влага в капельно-жидком состоянии в виде эмульсии.

Применительно к твердому топливу в топочной технике используют понятие приведенной влажности ($\% \cdot \text{кг/МДж}$), под которой понимают отношение влажности топлива к количеству низшей теплоты сгорания топлива:

$$W_{\text{пр}} = \frac{W^r}{Q_i^r}.$$

Если $W_{\text{пр}} < 0,7 \frac{\% \cdot \text{кг}}{\text{МДж}}$, то топливо считается маловлажным (антрацит, каменные угли). Если $W_{\text{пр}} = 1,9 \div 6 \frac{\% \cdot \text{кг}}{\text{МДж}}$, топливо считается высоковлажным (торф, лигниты, бурые угли); топлива с промежуточными значениями W^r составляют группу топлив средней влажности.

Сущность метода определения влажности твёрдого топлива заключается в высушивании до воздушно-сухого состояния навески аналитической пробы топлива в сушильном шкафу при температуре 105...110 °С и вычислении массовой доли влаги по потере в массе.

Бюкс с навеской топлива массой около 1 г помещают в сушильный шкаф, предварительно нагретый до температуры 105...110 °С, и при этой температуре сушат не менее:

30 мин – каменные угли, антрацит и горючие сланцы;

60 мин – бурые угли и лигниты.

Аналитическая влажность

$$W^a = \frac{\Delta m}{m} \cdot 100 \%,$$

где m – масса навески топлива; Δm – убыль влаги.

В случае необходимости определения рабочей влажности топлива, она рассчитывается по формуле:

$$W^r = W_{ex} + W^a \frac{100 - W_{ex}}{100},$$

где W_{ex} – внешняя влажность, определяемая следующим образом.

Поступившую в лабораторию исходную пробу топлива (масса не менее 0,5 кг) высыпают в заранее взвешенный противень так, чтобы на 1 дм² поверхности приходилось не более 100 г пробы. Противень с пробой взвешивают с точностью до 0,05 % массы навески и ставят для свободной сушки в помещении с хорошей вентиляцией или в сушильный шкаф. Длительность сушки в сушильном шкафу не должна превышать 8 ч. Исключение составляют высоковлажные топлива (некоторые бурые угли, лигниты), для которых время сушки может быть увеличено. По окончании сушки в сушильном шкафу противень с пробой вынимают и оставляют для свободной сушки при комнатной температуре. Каждый час производят контрольное взвешивание до тех пор, пока разность масс за последний час между двумя последними взвешиваниями не будет превышать 0,3 %

первичной массы навески для бурых углей и 0,1 % – для каменных углей и горючих сланцев.

Внешняя влажность рассчитывается аналогично аналитической:

$$W_{ex} = \frac{\Delta m}{m} \cdot 100 \%.$$

Описание лабораторной установки

Установка состоит из электрического сушильного шкафа с терморегулятором, стеклянного бюкса с навеской топлива и крышкой, эксикатора с химическим реактивом, поглощающим влагу, и электронных весов (рис. 2).

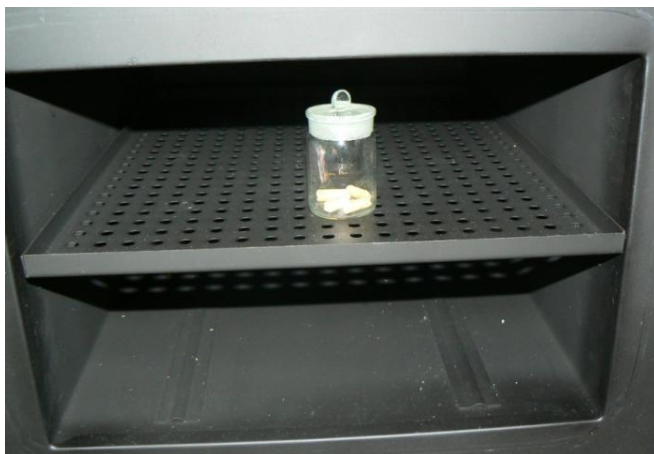


Рис. 2. Сушильный шкаф

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с лабораторной установкой, правилами включения сушильного шкафа и работы с весами.
2. Взвесить на электронных весах пустой бюкс вместе с крышкой.
3. Насыпать в бюкс уголь (в измельченном состоянии) или древесные опилки в количестве 1...2 г и снова взвесить.
4. Поместить бюкс с навеской топлива и приоткрытой крышкой в предварительно нагретый до 105...110 °С сушильный шкаф и

выдержать при этой температуре в течение 30...40 мин (уголь) или 50...60 мин (опилки).

5. По истечении времени сушки осторожно извлечь щипцами бюкс из сушильной камеры, закрыть крышкой и охладить на воздухе в течение 2 мин, а затем в эксикаторе до комнатной температуры.
6. Взвесить бюкс с навеской.
7. Произвести контрольное подсушивание и взвешивание через 30 мин. Контрольное подсушивание производится до тех пор, пока разность в весе при двух последовательных взвешиваниях не станет $\leq 0,001$ г.
8. Все полученные данные занести в табл. 4.

Таблица 4

Пустой бюкс с крышкой	Бюкс с навеской	Бюкс с навеской после сушки			
		первая сушка	контрольная сушка		
			№2	№3	№4
<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i> ₁	<i>c</i> ₂	<i>c</i> ₃	<i>c</i> ₄

Обработка результатов

1. Содержание влаги в аналитической пробе топлива, %

$$W^a = \frac{M_{\text{вл}}}{M_m} \cdot 100 ,$$

где $M_{\text{вл}} = (b - c_i)$ – убыль влаги топлива, г;

$M_m = (b - a)$ – навеска топлива, г.

2. Содержание влаги в рабочей пробе топлива, %

$$W^{af} = W^r \frac{100}{100 - A^r} ,$$

где A^r – зольность рабочей массы топлива (по результатам лабораторной работы № 2).

3. Приведённая влажность топлива, (кг·%)/МДж

$$W_{np} = \frac{W^r}{Q_i^r},$$

где Q_i^r – низшая теплота сгорания исследуемого топлива на рабочую массу, МДж/кг (по результатам лабораторной работы № 4).

4. Окончательные результаты расчётов округляются с точностью до 0,1 %.
5. Производится сравнительный анализ полученных результатов с данными, приведёнными в справочной литературе.

Содержание отчёта

1. Краткое описание лабораторной установки.
2. Результаты опытов и расчётов.
3. Выводы (с указанием влияния влажности на условия воспламенения и горения топлива).

Лабораторная работа №2.

Определение зольности твёрдого топлива

Цель работы: определение зольности аналитической пробы топлива, овладение методикой пересчёта зольности на сухую и рабочую массы, анализ влияния зольности на процесс горения топлива и условия эксплуатации котлоагрегата.

Основные теоретические положения

Зола – это твердый негорючий порошкообразный остаток, получившийся после завершения преобразований в минеральной части топлива в процессе его горения. Различают *летучую золу* – пылевидные фракции, уносимые уходящими газами, и *провал* – более крупные фракции золы и шлак, покидающие зону горения через холодную воронку.

Минеральные примеси, в зависимости от их происхождения, подразделяются на *внутренние* (первичные и вторичные) и *внешние* (третичные).

Внутренние примеси, внесенные в топливо с исходным органическим углеобразующим материалом, а также попадающие в топливо в процессе углеобразования, равномерно распределены в топливе, и их механическое отделение практически неосуществимо.

Внешние минеральные примеси попадают в топливо в процессе разработки месторождения, добычи топлива, его транспортировки и хранения (пустая порода, земля, песок). Третичные примеси обычно неравномерно распределены в топливе и могут быть частично удалены из топлива (например, в процессе его обогащения).

Основными минеральными примесями твёрдых топлив являются: кремнезем SiO_2 , глинозем Al_2O_3 , оксиды CaO , MgO , FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , Na_2O , K_2O , V_2O_5 , TiO_2 , сульфаты CaSO_4 , MgSO_4 , карбонаты CaCO_3 , MgCO_3 , FeCO_3 , сульфиды (преимущественно FeS_2), фосфаты, хлориды, соли щелочных металлов.

В процессе горения многие компоненты минеральных примесей подвергаются химическим преобразованиям, в результате которых масса и состав образующейся золы всегда *отличаются* от массы и состава исходных минеральных примесей топлива.

Зольность, как техническая характеристика, представляет собой массу золы, отнесённую, как правило, к сухой массе топлива и выраженную в процентах A^d .

Минеральные примеси уменьшают содержание горючих веществ в единице массы топлива и снижают удельную теплоту его сгорания.

Однако зольность не является достаточно объективным показателем энергетической ценности топлива, так как топлива с одинаковой зольностью могут существенно отличаться по величине теплоты сгорания. Для

сравнительной оценки топлив используется *приведённая зольность* (по аналогии с приведённой влажностью), кг·%/МДж

$$A_{\text{пр}} = \frac{A^r}{Q_i^r},$$

где A^r – зольность на рабочую массу, %.

При изменении зольности с A_1^r на A_2^r пересчёт теплоты сгорания рабочей массы топлива производится по формуле:

$$Q_{i2}^r = (Q_{i1}^r + 25W^r) \cdot \frac{100 - A_2^r}{100 - A_1^r} - 25W^r, \quad \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Снижение теплоты сгорания приводит к увеличению расхода топлива и затрат на его перевозку. Кроме того, снижается адиабатическая температура горения, энтальпия продуктов сгорания в зоне максимального тепловыделения и средняя температура факела.

Зола оказывает отрицательное воздействие на работу котлоагрегата и системы пылеприготовления. Оседая на поверхностях нагрева, зола снижает интенсивность теплопередачи от горячих дымовых газов к теплоносителю, создавая дополнительное термическое сопротивление, что ведёт к снижению КПД котла. Кроме того, вследствие своей абразивности зола уменьшает срок службы технологического оборудования.

При сжигании многозольного топлива возникают затруднения, обусловленные плавлением золы и образованием шлака, обладающего определённой плавкостью и вязкостью, в зависимости от состава золы и температурных условий. В состав минеральных примесей твёрдого топлива входят вещества, имеющие как сравнительно низкую температуру плавления 800...1000 °С (оксиды натрия и калия), так и очень высокую — 1600...2500 °С (оксиды кальция, магния и алюминия).

Важное практическое значение имеет плавкость золы, характеризующаяся температурами: t_A – начало деформации, t_B – начало размягчения, t_C – начало жидкоплавкого состояния.

В зависимости от температуры начала жидкоплавкого состояния t_c , все твердые топлива разделяются на три группы:

- с легкоплавкой золой ($t_c < 1350\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- с золой средней плавкости ($t_c = 1350 \dots 1450\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- с тугоплавкой золой ($t_c > 1450\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Температурные характеристики плавления золы необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации топочных устройств, в которых можно организовать сжигание топлива с *твёрдым* или *жидким* шлакоудалением.

Сущность метода определения зольности топлива заключается в медленном озолении аналитической пробы в муфельной печи и прокаливании зольного остатка в условиях свободного доступа воздуха при температуре $(815 \pm 10)\text{ }^{\circ}\text{C}$ до постоянной массы.

Зольность топлива в аналитической пробе рассчитывается по формуле:

$$A^a = \frac{m_{\text{зол}}}{m_m} \cdot 100\text{ } \%,$$

где $m_{\text{зол}}$ – масса зольного остатка, г; m_m – масса навески топлива, г.

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из муфельной печи с терморегулятором, фарфорового тигля с навеской топлива, эксикатора и электронных весов (рис. 3).



Рис. 3. Муфельная печь

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с лабораторной установкой, правилами включения муфельной печи, установки и выемки из печи тигля, работы с весами.
2. Взвесить на электронных весах пустой фарфоровый тигель.
3. Насыпать в тигель навеску воздушно-сухого топлива массой 1...2 г и снова взвесить.
4. Поместить тигель с навеской топлива с помощью специального держателя у передней кромки муфельной печи, предварительно нагретой до $(815 \pm 10)^\circ\text{C}$ и выдержать в таком положении в течение 3 мин. Это позволяет избежать бурного выделения летучих веществ и уноса из тигля мелких частиц топлива.
5. Затем передвигать тигель в зону постоянной температуры со скоростью 2 см/мин, закрыть дверцу печи. Во время продвижения тигля в печь необходимо следить, чтобы не было вспышек топлива. В случае вспышки, опыт следует повторить.
6. Продолжительность озоления: 20...25 мин – бурые угли, лигниты, горючие сланцы; 30...35 мин – каменные угли, антрациты.
7. По истечении установленного времени осторожно извлечь тигель из печи, охладить на воздухе до комнатной температуры.
8. Взвесить тигель с зольным остатком.
9. Провести контрольные прокаливания при $(815 \pm 10)^\circ\text{C}$ и взвешивания в течение нескольких 15-минутных периодов до тех пор, пока последующее изменение массы станет не более 1 мг.
10. Все полученные данные занести в табл. 5.

Таблица 5

Пустой тигель	Тигель с навеской	Тигель с навеской после прокаливания			
		первое прокаливание	контрольное прокаливание		
			№2	№3	№4
<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i> ₁	<i>c</i> ₂	<i>c</i> ₃	<i>c</i> ₄

Обработка результатов

1. Содержание золы в аналитической пробе топлива, %

$$A^a = \frac{M_{зл}}{M_m} \cdot 100 ,$$

где $M_{зл} = (c - a)$ – масса золы после прокаливания, г;

$M_m = (b - a)$ – навеска топлива, г.

2. Зольность сухой массы топлива, %

$$A^d = A^a \frac{100}{100 - W^a} ,$$

где W^a – содержание влаги в аналитической пробе, % (по результатам лабораторной работы № 1).

3. Зольность рабочей массы топлива, %

$$A^r = A^a \frac{100 - W^r}{100 - W^a} ,$$

где W^r – содержание влаги в рабочей массе топлива, % (по результатам лабораторной работы № 1).

4. Приведённая зольность топлива, (кг·%)/МДж

$$A_{np} = \frac{A^r}{Q_i^r} ,$$

где Q_i^r – низшая теплота сгорания исследуемого топлива на рабочую массу, МДж/кг (по результатам лабораторной работы № 4).

5. Производится сравнительный анализ полученных результатов с данными, приведёнными в справочной литературе.

Содержание отчёта

1. Краткое описание лабораторной установки.
2. Результаты опытов и расчётов.
3. Выводы по работе с пояснением влияния зольности на процесс горения топлива и условия эксплуатации котлоагрегата.

Лабораторная работа №3.

Определение выхода летучих веществ

Цель работы: Изучение методики определения выхода летучих веществ из аналитической пробы топлива и содержания кокса в ней, анализ влияния выхода летучих веществ и характера коксового остатка на организацию процесса воспламенения и горения топлива.

Основные теоретические положения

При нагревании твёрдого топлива происходит разложение термически нестойких молекул органических веществ горючей массы и углеводородистых соединений. Выделяющиеся при этом горючие (CH_4 , CO , H_2) и негорючие (CO_2 , O_2 , N_2 и др.) газы называются *летучими веществами*.

Выход летучих веществ V (от англ. «volatile» – летучий) является важнейшей характеристикой горючей массы топлива и уменьшается по мере увеличения его химического возраста (табл. 6).

Таблица 6

Выход и температура начала выхода летучих веществ

Вид топлива	Выход летучих, V^{daf} , %	Температура начала выхода летучих, °C
Торф	70–75	100–120
Бурые и молодые каменные угли	30–60	150–170
Старые каменные угли	10–15	380–400
Антрациты	2–9	400

Чем больше выход летучих веществ, т. е. чем больше топлива превращается при нагревании в горючий газ, тем проще зажечь это топливо и легче поддерживать устойчивое горение.

В процессе термического разложения не весь углерод топлива переходит в летучие вещества. Оставшийся после термического разложения

углерод вместе с минеральными примесями топлива образует твёрдый нелетучий остаток, называемый *коксом*. В зависимости от вида топлива коксовый остаток может быть порошкообразным, слипшимся, слабоспёкшимся, спёкшимся и сплавленным. Характер коксового остатка играет решающую роль при определении наиболее рационального пути использования топлива.

Топливо с высоким выходом летучих (торф, бурые угли, молодые каменные угли) при нагревании быстро выделяет значительное количество горючих газообразных веществ, которые легко воспламеняются и быстро сгорают. Оставшийся после выделения летучих кокс такого топлива содержит относительно малое количество углерода, поэтому горение его протекает также сравнительно быстро и с малыми потерями теплоты от недожога. Наоборот, топливо с малым выходом летучих (антрацит, тощие угли) воспламеняется значительно труднее, а горение его коксового остатка протекает более продолжительное время.

При определении выхода летучих веществ температурный режим, условия и продолжительность нагрева топлива строго регламентированы.

Сущность метода определения выхода летучих веществ заключается в прокаливании навески аналитической (воздушно-сухой) пробы топлива в муфельной печи *без доступа воздуха* при температуре $(900 \pm 5)^\circ\text{C}$ в течение 7 мин.

Выход летучих – уменьшение массы пробы топлива (за вычетом содержащейся в ней влаги) – принято относить к горючей массе топлива и обозначать V^{daf} , %.

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из муфельной печи с терморегулятором, фарфорового тигля с крышкой и навеской топлива, эксикатора и электронных весов (см. рис. 3).

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с лабораторной установкой, правилами включения муфельной печи, установки и выемки из печи тигля, работы с весами.
2. Просушить фарфоровый тигель с крышкой и взвесить их на электронных весах.
3. Насыпать в тигель навеску воздушно-сухого топлива массой $(1 \pm 0,1)$ г и взвесить тигель с крышкой и навеской топлива.
4. Поместить закрытый крышкой тигель с навеской топлива с помощью специального держателя в зону устойчивой температуры муфельной печи, предварительно нагретой до $(900 \pm 5) ^\circ\text{C}$.
5. В закрытой печи выдержать тигель в течение $7 \text{ мин} \pm 5 \text{ с}$. Температура, понизившаяся при установке тигля в печь, снова должна достичь $(900 \pm 5) ^\circ\text{C}$ не более чем за 4 мин. В противном случае испытание повторяют.
6. По истечении установленного времени осторожно извлечь тигель из печи, охладить сначала на воздухе в течение 5 мин, а затем в эксикаторе до комнатной температуры.
7. Взвесить тигель с нелетучим остатком (коксом), после чего произвести оценку коксового остатка в зависимости от внешнего вида и прочности следующим образом:
 - *порошкообразный*;
 - *слипшийся* – при лёгком нажиме пальцем рассыпается в порошок;
 - *слабоспёкшийся* – при лёгком нажиме пальцем раскалывается на отдельные кусочки;
 - *спёкшийся, несплавленный* – для раскалывания на отдельные кусочки необходимо приложить усилие;
 - *сплавленный, невспученный* – плоская лепёшка с серебристым металлическим блеском поверхности;
 - *сплавленный, вспученный* – вспученный нелетучий остаток с серебристым металлическим блеском поверхности;

8. Все взвешивания производятся с точностью до 1 мг и полученные данные заносятся в табл. 7.

Таблица 7

Пустой тигель с крышкой	Тигель с крышкой и навеской	Тигель (с крышкой) с коксовым остатком
a	b	c

Обработка результатов

1. Выход летучих веществ в аналитической пробе топлива, %

$$V^a = \frac{M_{лет}}{M_m} \cdot 100 - W^a,$$

где $M_{лет} = (c - b)$ – масса выделившихся летучих веществ, г;

$M_m = (b - a)$ – навеска топлива, г;

W^a – содержание влаги в аналитической пробе топлива, % (по результатам лабораторной работы № 1).

2. Выход летучих веществ на горючую массу топлива, %

$$V^{daf} = V^a \frac{100}{100 - W^a - A^a},$$

где A^a – содержание золы в аналитической пробе, % (по результатам лабораторной работы № 2).

3. Выход летучих веществ на рабочую массу топлива, %

$$V^r = V^a \frac{100 - W^r}{100 - W^a},$$

где W^r – содержание влаги в рабочей массе топлива, % (по результатам лабораторной работы № 1).

4. Выход нелетучего остатка (кокса) из аналитической пробы топлива, %

$$(NV)^a = 100 - V^r - W^r.$$

5. Производится сравнительный анализ полученных результатов с данными, приведёнными в справочной литературе.

Содержание отчёта

1. Краткое описание лабораторной установки.
2. Результаты опытов и расчётов.
3. Выводы по работе с пояснением влияния выхода летучих веществ и характера коксового остатка на организацию процесса воспламенения и горения топлива.

Лабораторная работа №4.

Определение теплоты сгорания топлива

Цель работы: экспериментальное определение теплоты сгорания твёрдого топлива по бомбе для аналитической пробы топлива, пересчёт на низшую теплоту сгорания; анализ влияния теплоты сгорания на процесс горения топлива.

Основные теоретические положения

Наиболее важной теплотехнической характеристикой топлива является *теплота сгорания* (теплотворная способность), т. е. количество теплоты, выделяющейся при *полном сгорании* единицы массы твердого или жидкого (кДж/кг) или единицы объема газообразного (кДж/м³) топлива.

В зависимости от того, в каком состоянии (жидком или газообразном) находятся в продуктах сгорания водяные пары, различают *высшую* (Q_s) и *низшую* (Q_i) теплоту сгорания (индексы s – от *англ.* «*superior*» – *высший*, i – «*inferior*» – *низший*).

В зарубежной литературе в настоящее время чаще всего применяются следующие обозначения:

- *высшая теплота сгорания* – Higher Heating Value **HHV** = Higher Calorific Value **HCV** = Gross Calorific Value = **GCV**);
- *низшая теплота сгорания* (Lower Heating Value **LHV** = Lower Calorific Value **LCV** = Net Calorific Value **NCV**).

Высшая теплота сгорания отличается от низшей на величину теплоты конденсации водяных паров, содержащихся в продуктах сгорания:

$$Q_i^r = Q_s^r - Q_{\text{квп}}.$$

С учётом скрытой теплоты конденсации водяных паров (примерно равной 2500 кДж/кг) и расхода водяных паров ($W^r + 9H^r$), образовавшихся в результате испарения влаги и горения водорода, входящего в состав высокомолекулярных органических соединений, соотношение (математическая связь) между низшей и высшей теплотой сгорания представляется следующим образом:

$$Q_i^r = Q_s^r - 25(W^r + 9H^r), \frac{\text{кДж}}{\text{кг}},$$

$$Q_i^d = Q_s^d - 225H^d, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}},$$

$$Q_i^{\text{daf}} = Q_s^{\text{daf}} - 225H^{\text{daf}}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

В практических расчётах в качестве показателя теплотворной способности топлива, как правило, применяют низшую теплоту сгорания Q_i , поскольку в реальных промышленных установках температура уходящих газов во избежание низкотемпературной коррозии должна превышать температуру конденсации водяного пара (точку росы), а, следовательно, теплота его конденсации не используется.

При отсутствии опытных данных теплота сгорания твёрдого и жидкого топлива при заданном элементном составе топлива может быть приближенно рассчитана по формуле Д. И. Менделеева:

$$Q_i^r = 339C^r + 1030H^r + 109S_{\text{o+p}}^r - 109O^r - 25W^r, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}},$$

где $C^r, H^r, S_{\text{o+p}}^r, O^r, W^r$ — соответственно, содержание углерода, водорода, летучей серы, кислорода и влаги в рабочей массе топлива, %.

Теплота сгорания газообразного топлива определяется как сумма произведений объёмных долей отдельных горючих газов на теплоту их сгорания (МДж/м³):

$$Q_i^d = 0,01 \cdot [\sum (Q_{C_m H_n} C_m H_n) + Q_{CO} CO + Q_{H_2} H_2 + Q_{H_2 S} H_2 S],$$

где $Q_{C_m H_n}$, Q_{CO} , Q_{H_2} , $Q_{H_2 S}$ — теплота сгорания отдельных газов, МДж/м³, $C_m H_n$, CO , H_2 , $H_2 S$ — объёмные доли соответствующих компонентов, %.

При подстановке значений теплоты сгорания отдельных компонентов можно получить универсальную формулу для расчёта теплоты сгорания газообразного топлива (МДж/м³):

$$Q_i^d = 0,01 \cdot [10,8 \cdot H_2 + 12,65 \cdot CO + 35,85 \cdot CH_4 + 63,8 \cdot C_2 H_6 + 91,3 \cdot C_3 H_8 + \dots + 23,4 \cdot H_2 S].$$

При сжигании смеси двух видов топлива теплота сгорания смеси определяется по формуле:

$$Q_{icm}^r = Q_{i1}^r m_1 + Q_{i2}^r (1 - m_1), \quad \frac{\text{кДж}}{\text{кг}},$$

где m_1 — массовая доля топлива с теплотворной способностью Q_{i1}^r .

Наиболее точно теплота сгорания твёрдого и жидкого топлива определяется экспериментально в специальном приборе — *калориметрической бомбе*.

Сущность калориметрического метода определения теплотворной способности топлива Q_b (по бомбе) заключается в сжигании навески топлива m_m в адиабатическом режиме в среде сжатого кислорода и расчёте теплового эффекта. Теплота, выделяющаяся при горении топлива, поглощается водой. Зная массу воды m_w , по изменению её температуры Δt вычисляют теплоту сгорания из уравнения теплового баланса, которое *в упрощённом виде* выглядит следующим образом:

$$Q_b \cdot m_m = m_w \cdot C_p \cdot \Delta t,$$

где C_p — изобарная теплоёмкость воды при средней температуре, кДж/(кг·°C).

Описание экспериментальной установки

Калориметр представляет собой сосуд с двумя оболочками: наружной и внутренней, – т.е. оболочка калориметра представляет собой закрытый двухстенный бак с крышкой (рис. 4).



Рис. 4. Калориметр, бомба и весы с навеской топлива

Внутренняя полость между оболочками заполняется водой, обеспечивая практически нулевой теплообмен с окружающей средой (адиабатический режим).

Калориметрическая бомба представляет собой стальной стакан, в крышке которого имеются два отверстия: одно для заполнения бомбы кислородом, другое – для выпуска продуктов сгорания. В центре бомбы расположены два электрода, на которые для воспламенения топлива подаётся напряжение 6...12 В (рис. 5).

Калориметрическая бомба помещается в калориметрический сосуд, заполненный водой. Для выравнивания температуры внутри сосуда предусматривается вертикальная мешалка, которая приводится в действие от электродвигателя.

Для определения изменения температуры воды в калориметре служит лабораторный метастатический термометр Бекмана, рассчитанный на измерение температуры в диапазоне от 0 °С до 5 °С и с ценой деления 0,01 °С.



Рис. 5. Калориметрическая бомба

В состав лабораторной установки также входят: винтовой пресс для приготовления брикета топлива, цифровые весы, баллон со сжатым кислородом и редуктором для подачи кислорода в бомбу (рис. 6).



Рис. 6. Пресс для приготовления брикета топлива и баллон со сжатым кислородом

Схема калориметрической установки представлена на рис. 7.

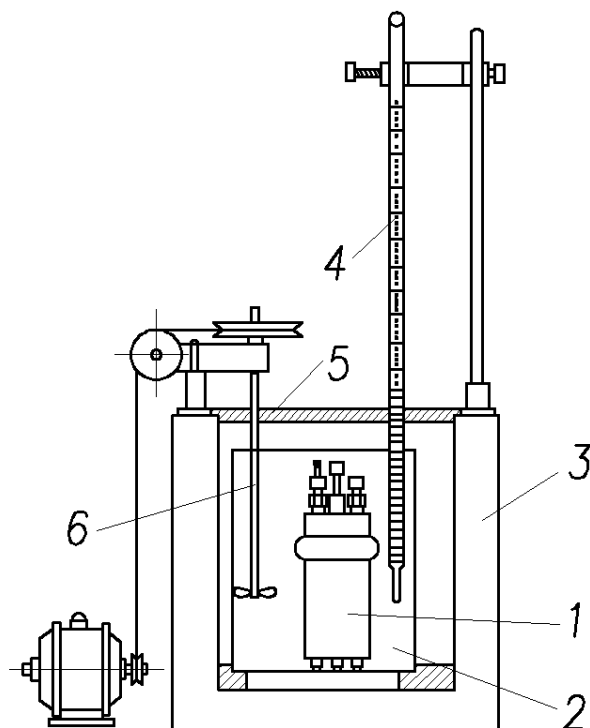


Рис. 7. Калориметрическая установка:

- 1 – калориметрическая бомба; 2 – калориметр; 3 – наружная оболочка;
4 – термометр; 5 – крышка; 6 – мешалка с приводом

В герметически закрытой калориметрической бомбе сжигают навеску аналитической пробы топлива в среде кислорода, подаваемого под давлением 2,5...3 МПа (см. рис. 5, 6).

Количество теплоты, выделяемой при сжигании топлива, определяется по повышению температуры воды в калориметре, в который помещена калориметрическая бомба, и частей самого калориметра с учётом их водяного эквивалента. Температура воды в калориметре близка к температуре окружающего воздуха (20 °C), поэтому водяной пар, образующийся в бомбе при сжигании топлива, практически полностью конденсируется. Следовательно, тепловой эффект, измеряемый с помощью калориметра, должен соответствовать высшей теплоте сгорания. Однако, определенная таким образом теплота сгорания в бомбе Q_6 превышает высшую теплоту сгорания Q_s , так как при сгорании топлива в бомбе в среде кислорода протекают экзотермические реакции образования серной и

азотной кислот, которые в топочных условиях не имеют места. Поэтому при расчёте теплоты сгорания следует ввести соответствующие поправки.

С учётом кислотообразования при сжигании навески аналитической пробы топлива:

$$Q_s^a = Q_0^a - (\beta \cdot S_t^a + \alpha \cdot Q_0^a), \frac{\text{кДж}}{\text{кг}},$$

где β – коэффициент, учитывающий теплоту образования серной кислоты при окислении продуктов сгоревшей в бомбе серы S_t^a , %, от SO_2 до SO_3 и растворении серного ангидрида в воде. Численно этот коэффициент равен 94 кДж на 1 % серы; α – коэффициент, учитывающий теплоту образования азотной кислоты, и равный: 0,001 для тощих углей, антрацита и жидкого топлива и 0,0015 – для других углей, сланцев и торфа.

Порядок выполнения работы

1. На электронных весах взвешивают запальную проволоку длиной 10...12 см. Теплота сгорания запальной проволоки, кДж/кг: никель – 3240, константан – 3140, медь – 2510, железо – 7500, сталь – 6690.

2. На винтовом прессе изготавливают брикет топлива. Среднюю часть запальной проволоки при приготовлении брикета из навески топлива можно впрессовать в брикет.

3. Взвешивают брикет топлива с запальной проволокой на электронных весах. Результаты взвешиваний заносят в табл. 8. Масса навески должна быть 0,8...1,5 г. Навески массой более 1 г рекомендуются при испытании топлива с низкой теплотой сгорания.

4. Полученный брикет, с пропущенной через него запальной проволокой, закрепляют на электродах калориметрической бомбы, плотно присоединяя один конец к кислородоподводящей трубке, а другой – к токоведущему штифту. После этого аккуратно производят сборку бомбы.

5. Снимают колпачки со штуцеров бомбы, заполняют её кислородом (давление кислорода после редуктора примерно 2 МПа) и надевают обратно колпачки.

6. Подготовленную к опыту бомбу помещают в калориметрический сосуд с водой и выдерживают 2 мин для проверки отсутствия утечки кислорода из бомбы.

7. Устанавливают термометр, мешалку и присоединяют к клеммам (колпачкам) провода для подачи напряжения 6...12 В. Закрывают сосуд составной крышкой.

8. Перед включением мешалки необходимо проверить, что:

- термометр и мешалка (при её движении), а также стакан бомбы и стенки калориметрического сосуда не касаются друг друга;

- середина ртутного резервуара термометра находится на уровне половины бомбы;

- уровень воды в сосуде чуть выше крышки бомбы, но не доходит до клемм бомбы (объём воды 1,9...2,0 л).

9. Включают мешалку. К испытанию приступают через 5...10 мин после начала перемешивания воды в калориметрическом сосуде. В течение этого времени выравнивается температура всех частей калориметрической системы.

10. Измерения температуры разбиваются на три периода:

- *начальный* – предшествует сжиганию навески топлива и служит для учёта теплообмена калориметрической системы с окружающей средой в условиях начальной температуры опыта;

- *главный* – сгорание навески, передача тепла калориметрической системе и выравнивание температуры всех её частей. Этот период начинается в момент зажигания топлива и продолжается до прекращения интенсивного подъёма температуры воды;

- *конечный* – служит для учёта теплообмена калориметра с окружающей средой в условиях конечной температуры опыта.

Значения температур во время опыта сводятся в табл. 9.

Таблица 8

Наименование величины	Обозначение	Значение
Масса проволоки, кг	m_{np}	
Масса брикета с проволокой, кг	$m_{бр}$	
Масса топлива, кг	$m_m = m_{бр} - m_{np}$	
Масса воды, кг	$m_в$	
Водяной эквивалент, кг	W	
Теплота сгорания проволоки, кДж/кг	q_{np}	

Таблица 9

Начальный период			Главный период			Конечный период		
мин	t	Δt	мин	t'	Δt	мин	t''	Δt
0	t_0		0	$t'_0 \approx t_5$	$\Delta t'_1$	0	$t''_0 \approx t'_n$	$\Delta t''_1$
1	t_1	Δt_1	0,5			1		
2	t_2	Δt_2	1,0			2		
3	t_3	Δt_3	1,5			3		
4	t_4	Δt_4	2,0			4		
5	t_5	$\Delta t_5 \approx \Delta t_4$	2,5		0	5	t''_5	$\Delta t''_5$
			n	t'_n	$\Delta t'_{n-1} \approx \Delta t'_{n-2}$			

Начальный период

Производят пять измерений температуры с минутным интервалом с точность до 0,01 °С. Температура в этом периоде должна расти медленно и равномерно.

Главный период

В момент последнего отсчёта температуры в начальном периоде нажимают кнопку зажигания и держат её до тех пор, пока не погаснет сигнальная лампочка. Навеска топлива сгорает, и выделившаяся теплота передаётся калориметрической системе. Отсчёты температуры производят после погасания сигнальной лампочки через каждые 30 с. Во время этого периода температура нарастает быстро и неравномерно. Основной период считается законченным при наступлении равномерного роста (или постоянства) температуры.

Конечный период

Производят пять измерений температуры с минутным интервалом.

11. По окончании опыта выключают мешалку, вынимают бомбу, открывают выпускной штуцер и сбрасывают давление в бомбе. Затем отвинчивают крышку бомбы и проверяют полноту сгорания топлива.

Характер изменения температуры правильно поставленного калориметрического опыта при измерении экзотермического эффекта в калориметрическом сосуде показан на рис. 8.

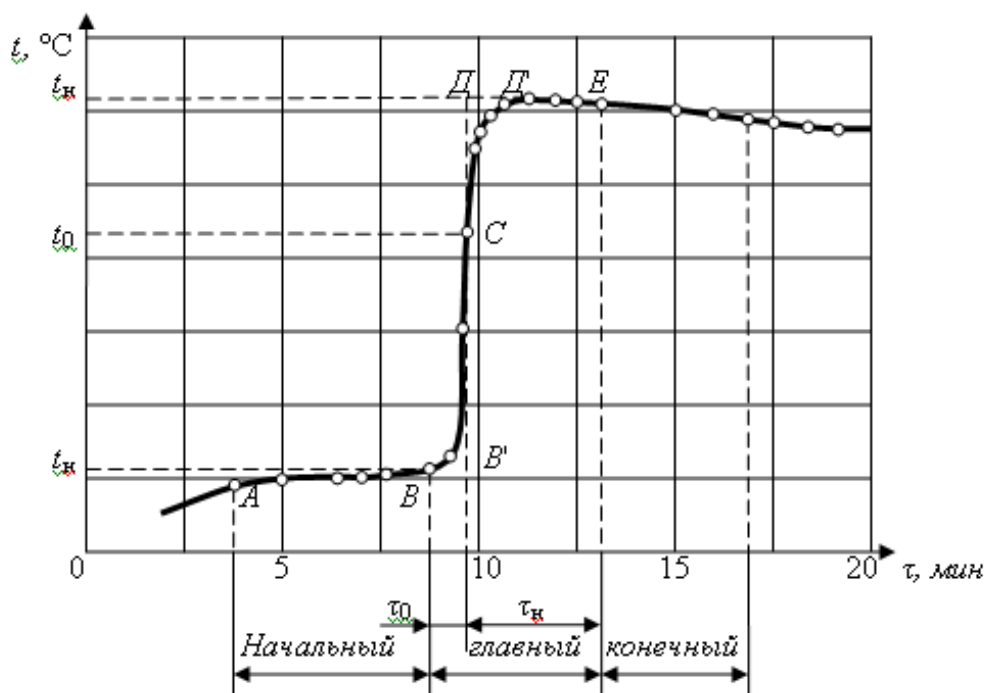


Рис. 8. Изменение температуры в процессе калориметрического опыта

Перпендикуляр, восстановленный к оси абсцисс через (·) С (последняя точка отсчёта с быстрым подъёмом температуры), делит площадь ВВ'СДД' на две равные: ВВ'С и СДД'. Эти площади показывают влияние на опыт нестационарности теплообмена бомбы с водой в калориметрическом сосуде. При правильно выбранной начальной температуре воды в калориметрическом сосуде t_0 погрешность, вследствие влияния этого теплообмена, сводится к минимуму.

Обработка результатов

1. Поправка на теплообмен калориметра с окружающей средой, °С

$$\Delta h = \frac{V' + V''}{2} n_6 + V'' \cdot n_m,$$

где $V' = \frac{t' - t_0}{n_{нач}}$; $V'' = \frac{t_n - t''}{n_{кон}}$ – средние скорости изменения температуры

(температурный ход) в начальном и конечном периодах, соответственно, °С;

n_6 – число полуминутных промежутков *главного* периода с быстрым (0,3 °С и более за 30 с) подъёмом температуры, т. е. от (·) В до (·) С (см. рис. 8);

$n_m = (n - n_6)$ – число полуминутных интервалов *главного* периода с медленным (менее 0,3 °С за 30 с) подъёмом или снижением температуры, т. е. от (·) С до (·) Е (см. рис. 8);

t' , t'' – *начальная* температура *начального* периода и *конечная* температура *конечного* периода, соответственно, °С;

t_0 , t_n – показания термометра, соответствующие температуре зажигания (*начальная температура главного периода*) и *конечной температуре главного периода*, соответственно, °С;

$n_{нач}$, $n_{кон}$ – число измерений в начальном и конечном периодах, соответственно.

Значение Δh может быть как *положительным* (калориметр отдаёт теплоту в окружающую среду), так и *отрицательным* (теплообмен направлен в противоположную сторону).

2. Теплота сгорания в бомбе аналитической пробы топлива с учётом поправки на теплообмен калориметра с окружающей средой, кДж/кг

$$Q_6^a = \frac{(m_6 + W)(t_n - t_o + \Delta h)C_p - m_{np}q_{np}}{m_m},$$

где m_6, m_{np}, m_m – масса воды в калориметре, запальной проволоки и навески топлива, соответственно, кг; $W = 0,3272$ кг – водяной эквивалент (постоянная) калориметра; q_{np} – теплота сгорания запальной проволоки, кДж/кг; C_p – теплоёмкость воды, кДж/(кг·°C).

3. Высшая теплота сгорания аналитической пробы топлива, кДж/кг

$$Q_s^a = (\alpha - 1)Q_6^a - 94 \cdot S_t^a,$$

где $\alpha = 0,001 \dots 0,0015$ – коэффициент, учитывающий теплоту образования азотной кислоты; S_t^a – содержание серы, % (по справочным данным или по заданию преподавателя).

4. Высшая теплота сгорания рабочей массы топлива, кДж/кг

$$Q_s^r = Q_s^a \frac{100 - W^r}{100 - W^a},$$

где W^r, W^a – влажность рабочей и аналитической массы топлива, соответственно, % (по результатам лабораторной работы № 1).

5. Низшая теплота сгорания рабочей массы топлива, кДж/кг

$$Q_i^r = Q_s^r - 25(W^r + 9H^r),$$

где H^r – содержание водорода, % (по справочным данным или по заданию преподавателя).

Содержание отчёта

1. Описание лабораторной установки.
2. Краткое описание методики проведения эксперимента по определению теплоты сгорания топлива.
3. Результаты опытов и расчётов.
4. Выводы по работе с пояснением влияния теплоты сгорания на процесс горения топлива.

Лабораторная работа №5.

Определение температуры вспышки жидкого топлива

Цель работы: ознакомление с основными теплотехническими характеристиками жидкого топлива и экспериментальное определение температуры вспышки мазута.

Основные теоретические положения

Температурой вспышки $t_{\text{вс}}$ называют температуру, при которой пары нагреваемого жидкого топлива образуют с окружающим воздухом горючую смесь, вспыхивающую при поднесении к ней открытого огня. Если же при поднесении к топливу пламени происходит вспышка паров и горение в течение не менее 5 с, то соответствующая температура топлива называется температурой воспламенения.

Определение температуры вспышки производится для установления максимально допустимой температуры подогрева топлива по условиям пожарной безопасности в открытых, не изолированных от воздуха ёмкостях. Температура подогрева топлива в них должна быть на 10 °С ниже температуры вспышки.

Суть метода заключается в следующем.

В испытательный тигель аппарата Пенски-Мартенса помещают испытуемый образец и подогревают таким образом, чтобы при непрерывном перемешивании происходило постоянное повышение температуры. Источник зажигания опускают через равномерные интервалы времени через отверстие в крышке тигля, одновременно с этим перемешивание прекращают. Самую низкую температуру, при которой источник зажигания вызывает возгорание паров испытуемого образца нефтепродукта, а пламя распространяется по поверхности жидкости, регистрируют как температуру вспышки при фактическом барометрическом давлении. Эту температуру приводят к

стандартному атмосферному давлению, используя уравнения.

Описание установка

Основные узлы установки: тигель 1, крышка тигля 6 и ванна 11 с электронагревом 2 (рис. 9).

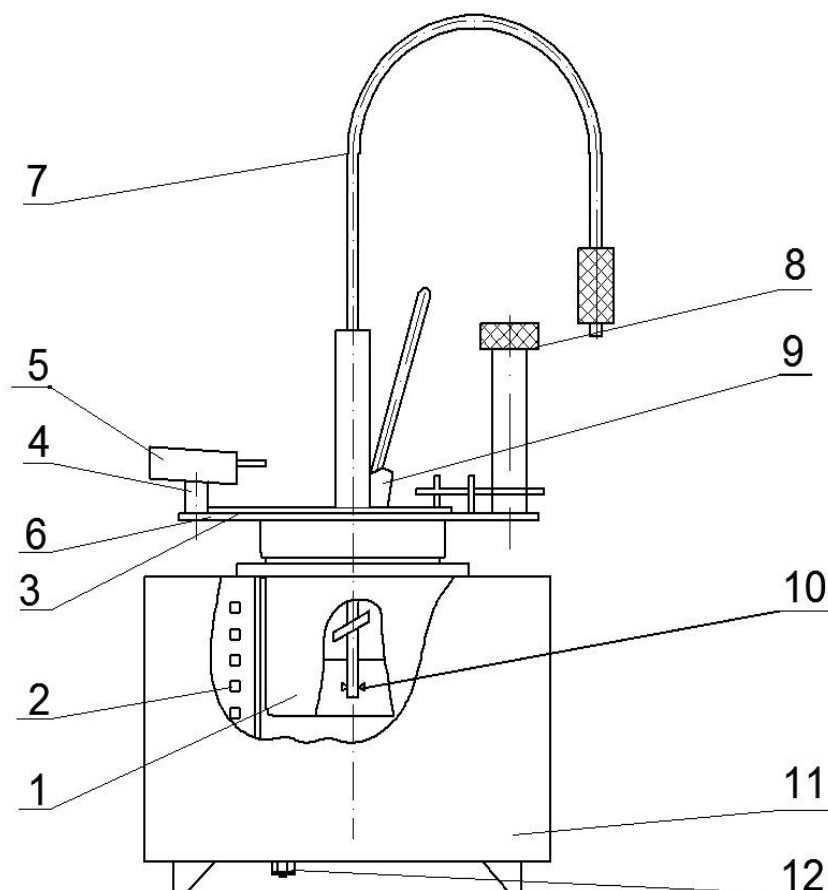


Рис. 9. Общий вид установки для определения температуры вспышки жидкого топлива:

1 – тигель; 2 – нагреватель; 3 – заслонка; 4 – зубец;

5 – лампочка зажигательная; 6 – крышка тигля; 7 – валик гибкий; 8 – рукоятка; 9 – патрубок; 10 – мешалка; 11 – ванна; 12 – клемма заземления

На крышке тигля расположены: заслонка 3 с механизмом её перемещения, лампочка зажигательная 5, патрубок 9 для термометра и мешалка 10 с гибким валиком 7. В крышке прорезаны три отверстия трапецеидальной формы. В нерабочем положении они закрываются заслонкой с двумя отверстиями, которые соответствуют среднему и

боковому отверстиям крышки. При вращении заслонки рукояткой 8 открываются боковые отверстия крышки, а зубец 4 упирается в нижнюю часть лампочки, наклоняя её к отверстию в крышке. Возвращение заслонки и лампочки в первоначальное положение происходит под действием пружины.

Тигель из гнезда ванны вынимают ухватом. На внутренней поверхности тигля имеется круговой уступ – указатель уровня нефтепродукта. Для перемешивания нефтепродукта и образующейся над его поверхностью смеси паров с воздухом служит мешалка 10. Верхний конец стержня мешалки прикреплен к гибкому валику с рукояткой для вращения вручную или при помощи электродвигателя, который должен обеспечить скорость вращения (60 ± 15) об./мин.

Порядок выполнения работы

1. Нефтепродукт наливают в тигель 1 до метки.
2. Включают нагревательную ванну и регулятором напряжения устанавливают скорость нагрева нефтепродукта: для продуктов с температурой вспышки до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 1 град/мин, свыше $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 5...6 град/мин.
3. После включения нагревательной ванны производят постоянное перемешивание нефтепродукта при помощи мешалки 10.
4. При температуре, близкой к предполагаемой температуре вспышки, перемешивание прекращают. Затем приводят в действие расположенный на крышке механизм, который открывает заслонку и опускает пламя. При этом пламя опускают в паровое пространство за 0,5 с, оставляют в самом нижнем положении в течение 1 с и поднимают в верхнее положение. Испытание на вспышку проводят при повышении температуры на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ для продуктов с температурой вспышки до $104\text{ }^{\circ}\text{C}$ и на каждые $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ для продуктов с температурой вспышки выше $104\text{ }^{\circ}\text{C}$.

5. За температуру вспышки принимают показания термометра в момент чёткого появления первого синего пламени над поверхностью продукта внутри прибора.

При появлении неясной вспышки она должна быть подтверждена последующей вспышкой при повышении температуры на 1 или 2 °С. Если при этом вспышки не произойдет, испытание повторяют вновь.

Обработка результатов

1. Поправка на барометрическое давление, °С

$$\Delta t = 0,0362(P_0 - P),$$

где P – барометрическое давление при проведении испытания, мм рт.ст.;

$$P_0 = 760 \text{ мм рт.ст.}$$

2. Температура вспышки с учетом поправки на барометрическое давление, °С

$$t_{всп} = t_{всп}^{изм} + \Delta t ,$$

где $t_{всп}^{изм}$ – полученная из опыта температура вспышки, °С.

Содержание отчёта

1. Описание лабораторной установки.
2. Краткое описание методики проведения эксперимента по определению температуры вспышки жидкого топлива.
3. Результаты опытов и расчётов.
4. Выводы по работе с пояснением влияния температуры вспышки жидкого топлива на организацию процесса горения.

Лабораторная работа №6.

Определение гранулометрического состава угольной пыли

Цель работы: изучение методики проведения ситового анализа угольной пыли и определение характеристик тонины помола.

Основные теоретические положения

На современных ТЭС твёрдое топливо, как правило, сжигается факельным способом, при этом топливо предварительно измельчается до пылевидного состояния. Для превращения крупных кусков угля в пригодную для сжигания угольную пыль топливо сначала проходит процесс подготовки в системе пылеприготовления (СПП). Процесс подготовки топлива заключается в его предварительном дроблении, подсушке и размоле до пылевидного состояния с размером частиц в несколько десятков или сотен микрометров.

Благодаря своей высокой удельной поверхности (от 200 до 1500...2000 м²/кг) пыль адсорбирует воздух и становится легкотекучей. Свежеперемолотое топливо представляет собой рыхлую, легкоподвижную массу с низкой насыпной плотностью, которая зависит от сорта угля, тонины помола и в среднем составляет 800...900 кг/м³. Поэтому запрещается спускаться в пылевой бункер без соблюдения специальных мер предосторожности.

Угольная пыль в вибрирующем или вращающемся сосудах под влиянием лёгких толчков ведёт себя как жидкость. В смеси с воздухом она образует подвижную эмульсию, легко перекачиваемую специальными насосами и вентиляторами. Это свойство используется как при пневмотранспорте на значительные расстояния, так и в системах приготовления.

Качество угольной пыли оценивается по размеру угольных частиц. Характеристика крупности топлива называется гранулометрическим составом.

Гранулометрический состав – это количественная характеристика, отражающая распределение топлива по размеру кусков. Для определения гранулометрического состава используется *метод ситового анализа*, суть которого заключается в расसेве пробы топлива на стандартных ситах (рис. 10).

Часть топлива, которая остается на сите в процессе рассева, называется *остатком* и выражается в процентах от взятой навески — R_i , %, (от *англ.* – «*Rest*»). Часть угольной пыли, которая проходит через сито, называется *проходом* или *просевом*.



Рис. 10. Устройство для проведения ситового анализа угольной пыли

Для рассева угольной пыли применяются сита с квадратными ячейками размером от 0,04 до 2,5 мм, которые принято нумеровать и называть по линейному размеру ячеек в микрометрах.

Обычно тонкость (тонина) помола характеризуется суммарными остатками на ситах с ячейками 90, 200 и 1000 мкм — соответственно, R_{90} , R_{200} и R_{1000} , %, при этом самая мелкая пыль с размером частиц $\delta_{\text{ч}} < 90$ мкм, пройдя через все сита, опускается на дно установки (рис. 11).

Содержание крупных частиц в пыли оказывает существенное влияние на величину потерь от механического недожога. Рекомендуемая тонкость помола, обеспечивающая минимальные потери с механическим недожогом, приведена в табл.10.

Порядок выполнения работы

Проба, отобранная для рассева, предварительно высушивается до воздушно-сухого состояния, чтобы влажная пыль не слипалась и не замазывала сита, а также чтобы при рассеве не происходила подсушка пыли, искажающая результаты анализа.

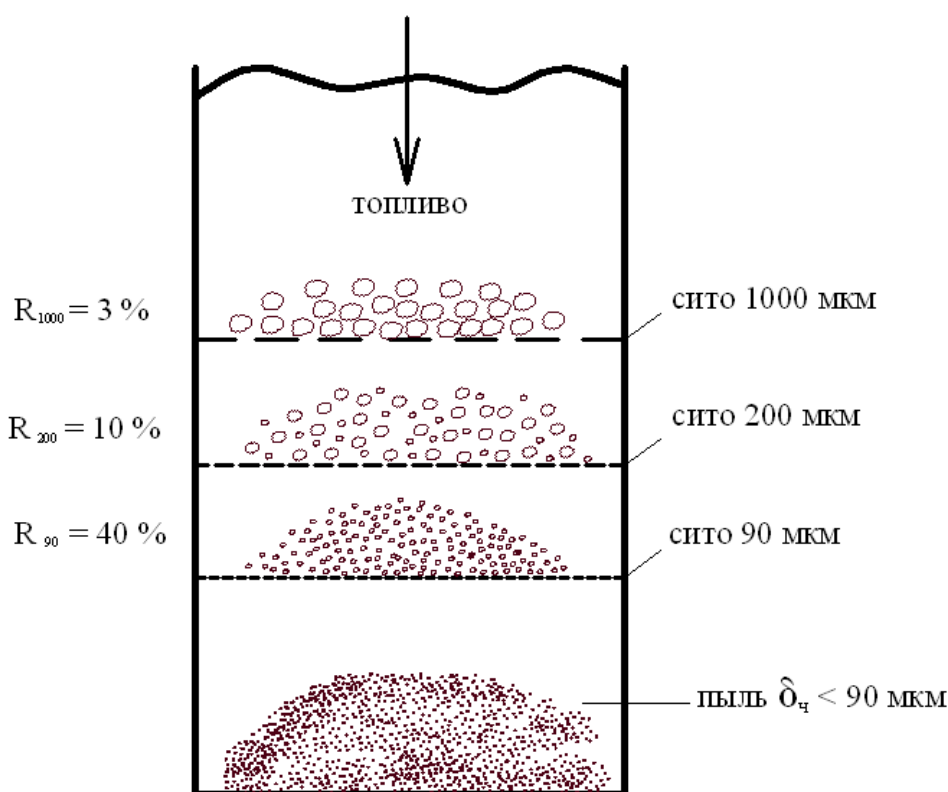


Рис. 11. Ситовый анализ пылеугольного топлива

Тонкость помола

Топливо	Выход суммарных надрешётных продуктов, %		
	R ₉₀	R ₂₀₀	R ₁₀₀₀
Бурый уголь и сланцы	30–60	–	0,5–3,0
Каменный уголь	10–40	1,3–13	–
АШ и тощий уголь	6–10	0,3–1,2	–

Сушка пыли осуществляется в сушильном шкафу при температуре 50...70 °С. После сушки угольная пыль взвешивается и остывает при комнатной температуре в течение 6 ч. Считается, что пыль доведена до воздушно-сухого состояния, если после остывания навеска не изменяет своего веса.

Для ситового анализа берется навеска весом 25 или 50 г. Рассев пыли осуществляется вручную или на специальной машине, представляющей собой механизм, в котором сита вращаются по эксцентрическим окружностям и встряхиваются кулачком, ударяющим сита сверху (рис. 12).



Рис. 12. Машина для отсева угольной пыли

При расसेве необходимо соблюдать следующий порядок:

- в машину устанавливаются стопкой сита, на которых желательно получить соответствующие остатки, при этом наверху помещают сито с ячейками максимального размера, внизу – с ячейками минимального размера;
- проба пыли помещается на верхнее сито, затем вся стопка закрывается сверху крышкой, а снизу – дном, закрепляется в машине, после чего машина включается в электрическую сеть;
- время рассева для получения удовлетворительного результата – 20 мин, затем машина выключается;
- по окончании рассева каждое сито обстукивают, и остатки пыли высыпают на чашку весов, тщательно протирая сито щёткой, после чего производится взвешивание.

В результате рассева на каждом из сит получают промежуточные (частные) остатки, называемые *фракциями*, которые обозначаются буквой F с соответствующими индексами. Например, проход через сито 200 мкм и остаток на сите 90 мкм дает фракцию, обозначаемую $F_{200/90}$.

Для получения полных остатков на ситах необходимо произвести следующие расчёты:

- для верхнего сита в стопке частный остаток (фракции) и полный остаток имеют одни и те же значения;
- для второго сверху сита полный остаток будет равняться остатку на верхнем сите, сложенному с частным остатком на втором сверху сите;
- для любого сита полный остаток может быть подсчитан как сумма частных остатков всех вышеустановленных сит, включая данное.

Проход через самое нижнее сито называется «ДНО».

Для машинного рассева можно записать:

$$F_{\text{верхнего}} + F_{\text{второго}} + F_{\text{третьего}} + \dots + F_{\text{нижнего}} + F_{\text{дно}} = 100 \text{ \%}.$$

В этом уравнении левая часть в идеальном случае будет равна 100 %. На практике же имеются потери пыли, поэтому проведенный ситовый анализ

считается удовлетворительным, если потери не превышают 2 % от взятой навески угольной пыли.

Результаты заносятся в табл. 11, где указаны номера и размеры отверстий сит при проведении ситового анализа.

По данным табл. 11 строят кривые гранулометрического состава.

При построении кривой гранулометрического состава в линейной системе координат (рис. 13) на оси абсцисс слева направо откладывают в масштабе размер отверстий (мм или мкм), а на оси ординат снизу вверх – суммарный выход надрешётных продуктов.

Таблица 11

№ сита	Размер отверстия, мм	Масса фракции, г	Масса полного остатка, г	Полный остаток на сите, %
6	3,3			
...	...			
50	0,39			
...	...			
270	0,053			
...	...			
Дно				

Соединяя экспериментальные точки плавной кривой, получают так называемую *ситовую*, или *зерновую характеристику пыли*.

Наиболее простым и надежным способом получения полных остатков R_{90} и R_{200} по имеющимся остаткам на двух нестандартных ситах является *графический способ*, который заключается в следующем.

В логарифмических координатах наносятся точки, соответствующие полным остаткам на имеющихся ситах, и соединяются прямой линией (рис. 14). Значения полных остатков на ситах, например, 90 и 200 мкм, находят как ординаты на пересечении полученной линии с линиями $x = 90$ мкм и $x = 200$ мкм.

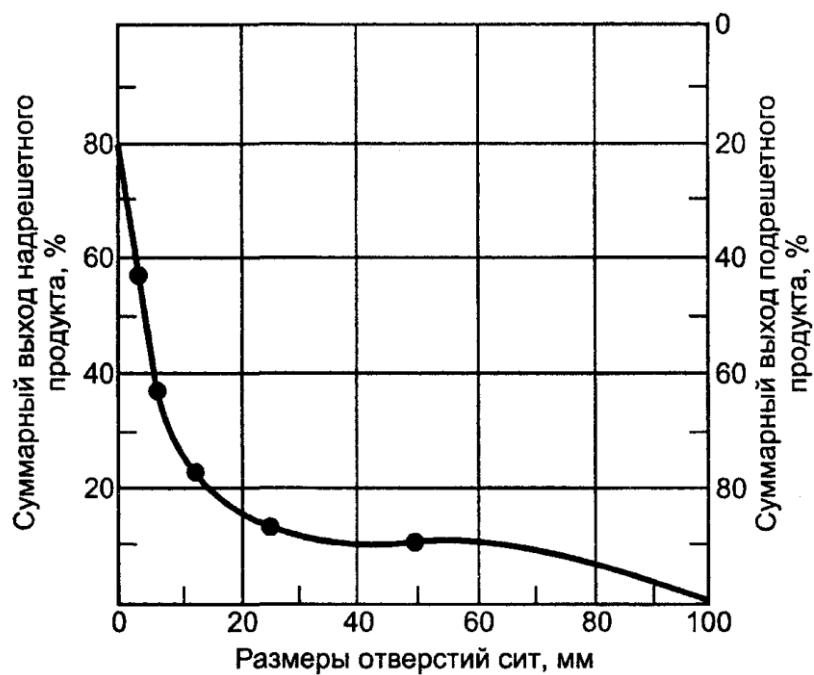


Рис. 13. Зерновая характеристика угольной пыли -
кривая гранулометрического состава в линейной системе координат

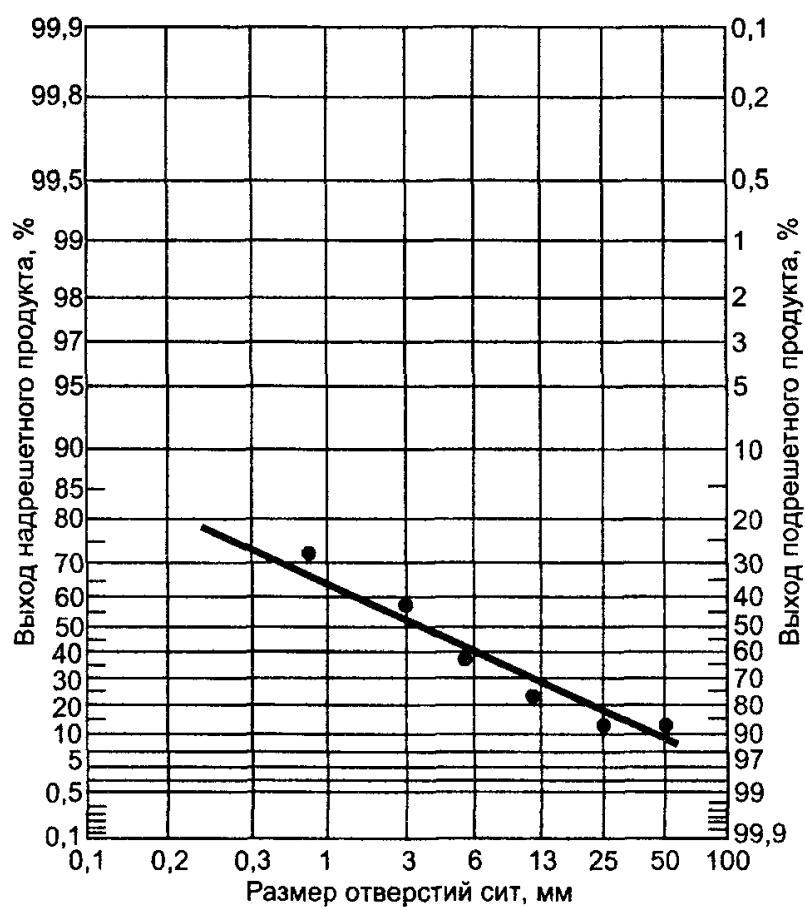


Рис. 14. Кривая гранулометрического состава
в логарифмической системе координат

Обработка результатов

При *аналитическом* расчёте применяется следующая методика.

Для получения R_{90} и R_{200} по имеющимся полным остаткам на двух других ситах можно воспользоваться уравнением Розина-Раммлера

$$R_d = 100 \cdot \exp(-b \cdot d^n), \quad (1)$$

где R_d – выход суммарного надreshётного продукта на сите с диаметром ячейки d , %; d – размер ячейки данного типа, мкм; b – показатель *тонины помола* (коэффициент, характеризующий тонкость помола); n – показатель *полидисперсности* (неоднородности) пыли.

Численные значения коэффициента $b = 0,025 \dots 0,1$. При $b \rightarrow 0$, $R_d \rightarrow 100$ % (грубый помол); при $b \rightarrow \infty$, $R_d \rightarrow 0$ % (тонкий помол).

Показатель полидисперсности $n = 0,6 \dots 1,8$ – коэффициент, характеризующий равномерность гранулометрического состава: чем выше значение n , тем меньше частицы отличаются по размерам друг от друга. При $n \rightarrow \infty$ пыль называется монодисперсной.

Чтобы найти показатели n и b , надо знать остаток на двух ситах d_1 и d_2 ($d_1 > d_2$). Тогда

$$n = \frac{\lg \left(\ln \frac{100}{R_{d_1}} \right) - \lg \left(\ln \frac{100}{R_{d_2}} \right)}{\lg d_1 - \lg d_2}. \quad (2)$$

Определив n , легко из уравнения (1) найти показатель b

$$b = \frac{\ln \frac{100}{R_d}}{d^n}. \quad (3)$$

Для диапазона частиц с постоянным показателем n , зная значение одного R_{d_1} , можно найти остаток на сите любого другого диаметра R_d по формуле:

$$R_d = 100 \left(\frac{R_{d_1}}{100} \right)^{\left(\frac{d}{d_1} \right)^n} . \quad (4)$$

Пример 1

Определить показатели ***n*** и ***b*** по результатам ситового анализа каменного угля, если $R_{90} = 20 \%$, $R_{200} = 5 \%$.

$$n = \frac{\lg \left(\ln \frac{100}{5} \right) - \lg \left(\ln \frac{100}{20} \right)}{\lg 200 - \lg 90} = \frac{0,477 - 0,207}{2,3 - 1,95} = 0,77 .$$

$$b = \frac{\ln \frac{100}{R_d}}{d^n} = \frac{\ln \frac{100}{20}}{90^{0,77}} = 0,05 , \text{ или } b = \frac{\ln \frac{100}{5}}{200^{0,77}} = 0,05 .$$

Пример 2

Найти полные остатки R_{90} и R_{200} по полученным из ситового анализа полным остаткам $R_{75} = 32 \%$ и $R_{150} = 12 \%$.

1. По принятым выше обозначениям можно записать:

$$d_1 = 75; d_2 = 150; R_{d_1} = R_{75} = 32 \%; R_{d_2} = R_{150} = 12 \% .$$

2. Определяем величину коэффициента полидисперсности ***n***.

Для этого запишем уравнения зерновых характеристик (1) для двух значений d_1 и d_2 :

$$\frac{100}{R_{d_1}} = e^{b \cdot d_1^n} ; \quad \frac{100}{R_{d_2}} = e^{b \cdot d_2^n} . \quad (5)$$

Дважды прологарифмируем выражения (5):

$$\lg \left(\ln \frac{100}{R_{d_1}} \right) = \lg b + n \cdot \lg d_1 ; \quad (6)$$

$$\lg \left(\ln \frac{100}{R_{d_2}} \right) = \lg b + n \cdot \lg d_2 . \quad (7)$$

Вычитая (6) из (7), получим:

$$n = \frac{\lg\left(\ln \frac{100}{R_{d_2}}\right) - \lg\left(\ln \frac{100}{R_{d_1}}\right)}{\lg d_2 - \lg d_1} = \frac{\lg\left(\ln \frac{100}{12}\right) - \lg\left(\ln \frac{100}{32}\right)}{\lg 150 - \lg 75} = 0,887.$$

3. Определяем значение R_{90} и R_{200} по формуле (4):

$$R_{90} = 100 \left(\frac{32}{100} \right)^{\left(\frac{90}{75} \right)^{0,887}} = 27 \%;$$

$$R_{200} = 100 \left(\frac{12}{100} \right)^{\left(\frac{200}{150} \right)^{0,887}} = 6,8 \%.$$

Содержание отчёта

1. Описание лабораторной установки.
2. Краткое описание методики проведения эксперимента по определению гранулометрического состава твёрдого топлива.
3. Результаты опытов и расчётов.
4. Выводы по работе с пояснением влияния тонины помола на эффективность процесса горения угольной пыли.

Лабораторная работа №7.

Анализ продуктов неполного горения методом газовой хроматографии

Цель работы: экспериментальное определение состава продуктов неполного сгорания топлива (CO , H_2 , CH_4) методом газовой хроматографии.

Основные теоретические положения

Метод газовой (газоадсорбционной) хроматографии состоит в разделении адсорбционным способом газовой смеси при пропускании её совместно с потоком газа-носителя через слой пористого адсорбента и последующим поочередным измерении содержания каждого выделившегося компонента электрическим методом.

Проба исследуемой смеси (для простоты считаем, что в пробе содержатся компоненты А, Б и В) через дозирующее устройство вводится в поток газа-носителя (рис. 15). Поток газа-носителя (*подвижная фаза*) непрерывно с постоянной скоростью пропускается через адсорбент (*неподвижную фазу*).

Различие в физико-химических свойствах отдельных газов, входящих в состав пробы, вызывает различие в скоростях их передвижения через *разделительную колонку*, заполненную адсорбентом.

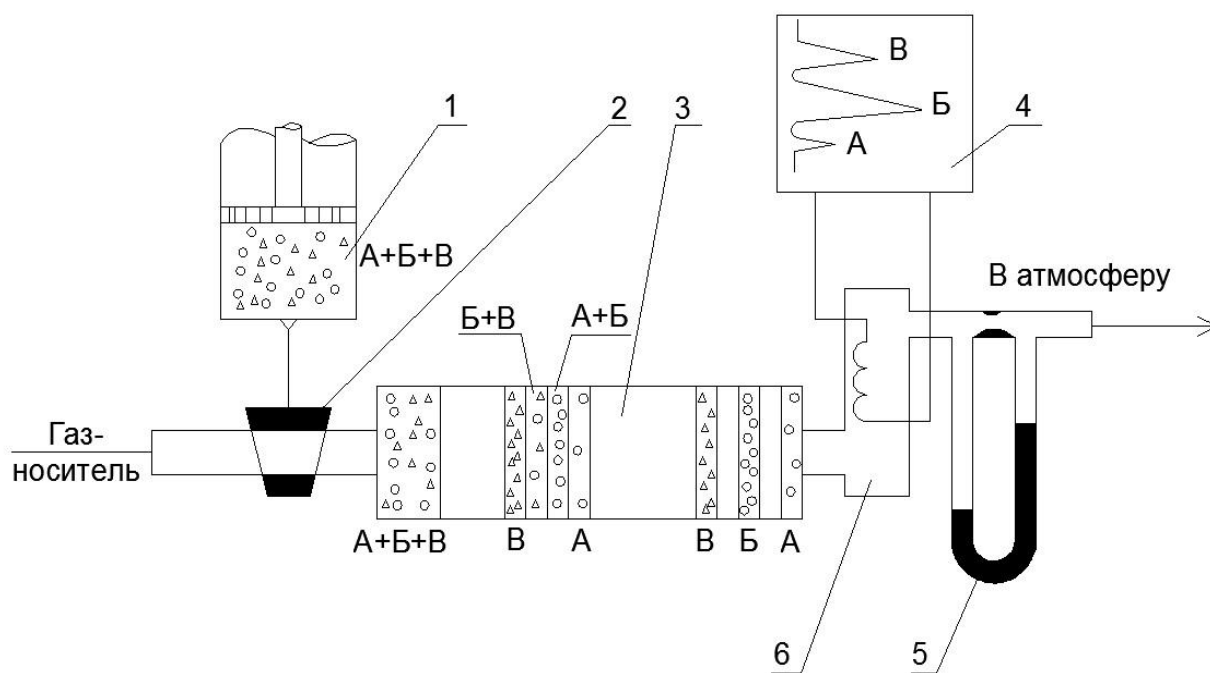


Рис. 15. Принципиальная схема хроматографического газоанализатора

Первоначально зоны, занятые компонентами А, Б и В, взаимно перекрываются, затем, по мере их продвижения вдоль разделительной

колонки, процесс завершается разделением компонентов на ряд отдельных полос, представляющих собой бинарные смеси каждого из компонентов с газом-носителем, разделенные между собой зонами чистого газа-носителя.

Первым покидает колонку газ, имеющий наименьшие сорбционные способности (В), в связи с чем он первым десорбируется с поверхности сорбента, последним – газ, наиболее хорошо сорбирующийся в данной неподвижной фазе (А).

Каждый движущийся компонент образует концентрационный профиль, который фиксируется *детектором* хроматографа в виде функции времени и представляет собой хроматографический пик. Кривая зависимости сигнала детектора от времени или от объёма газа-носителя, пропущенного через колонку, называется *хроматограммой* и изображается на регистрирующем приборе (рис. 16).

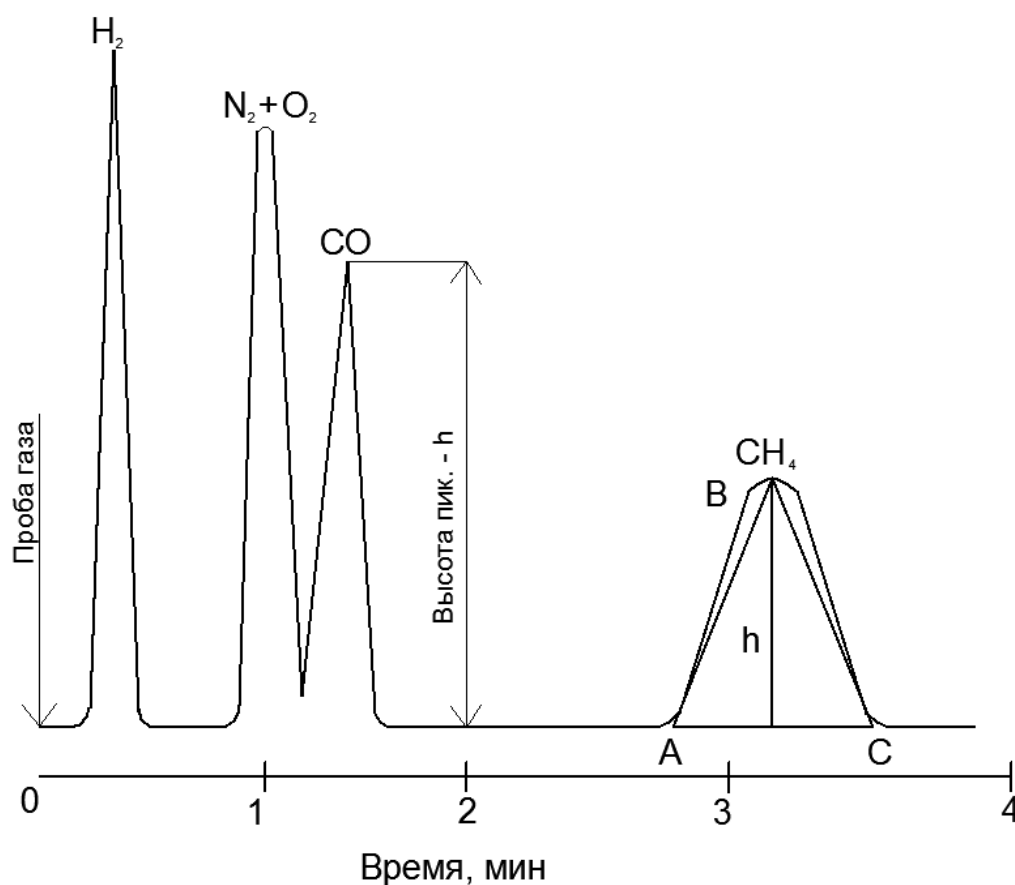


Рис. 16. Примерный вид хроматограммы при проведении анализа

Хроматограмма является источником качественной и количественной информации об анализируемой смеси.

Качественный анализ основан на постоянстве времени выхода каждого компонента из разделительной колонки. На хроматограмме время выхода – это расстояние от момента ввода пробы до максимума пика, выраженное в минутах (или секундах). При данных условиях анализа каждому компоненту смеси соответствует свое время удерживания. Отсутствие пика в соответствующий момент свидетельствует, что в смеси нет компонента, который должен был появиться на выходе из колонки в данное время.

Количественный анализ основан на измерении высоты (или площадей) пиков. Зависимость высоты (или площади) пика от концентрации измеряемого вещества, а также время выхода отдельных компонентов устанавливаются предварительной калибровкой хроматографа, проводимой по искусственно приготовленным контрольным смесям или чистым газам.

Хроматографические газоанализаторы служат для определения содержания в дымовых газах *горючих* (CO , CH_4 , H_2 и др.), характеризующих химическую неполноту сгорания, и *негорючих* (CO_2 , O_2 , NO , NO_2 и др.) компонентов.

Газоанализаторы также используются для автоматического регулирования соотношения «топливо-воздух» в котлах.

Описание установки

Хроматограф «Газохром-3101» является лабораторным переносным прибором и имеет следующие конструктивные особенности:

- комбинированный детектор имеет два рабочих элемента: первый – для определения горючих компонентов по тепловому эффекту сгорания, второй – для определения негорючих газов по эффекту теплопроводности;
- хроматограф может работать одновременно на двух различных газ-носителях;

- газовая схема выполнена двухпоточной с параллельным и последовательным включением разделительных колонок, заполненных различными сорбентами;
- ввод пробы осуществляется отдельно в каждую колонку, что обеспечивает возможность выбора оптимальной дозы при определении микроконцентраций одних и больших количеств других компонентов.

Принципиальная схема хроматографа «Газохром-3101» представлена на рис. 17.

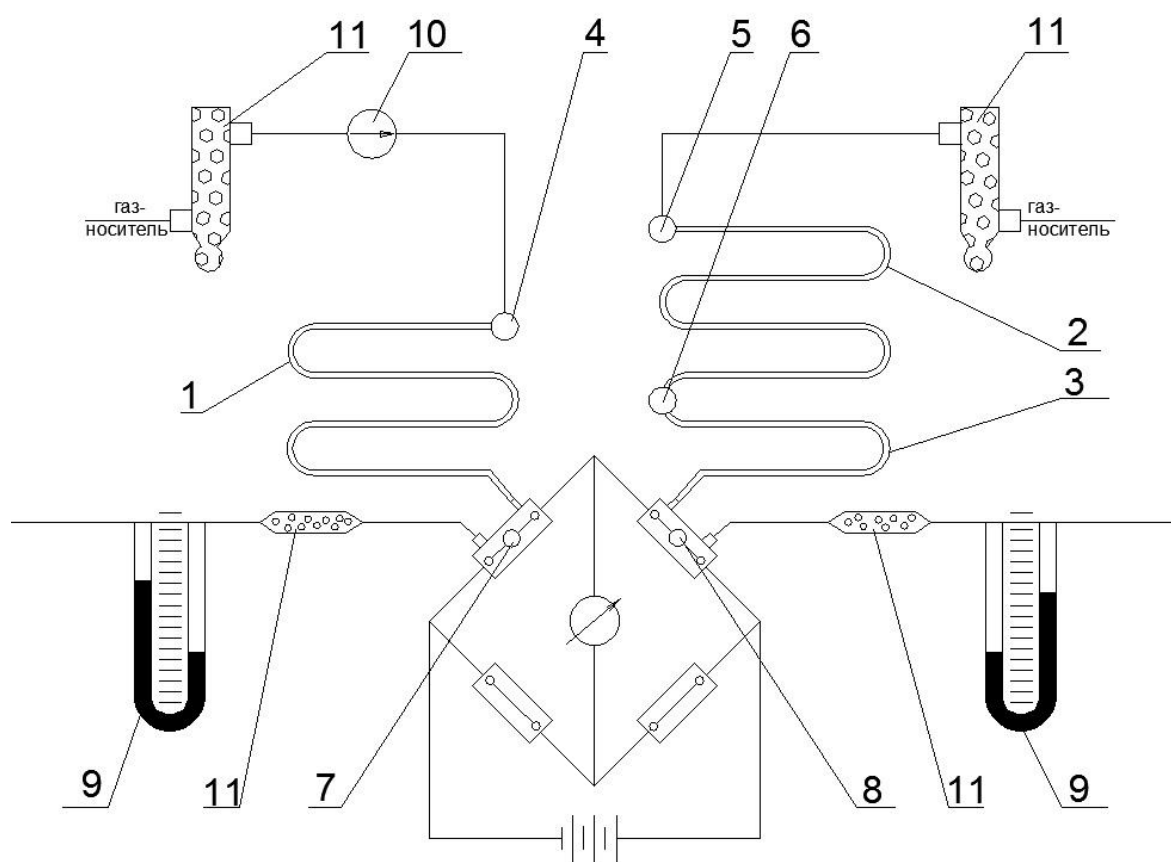


Рис. 17. Принципиальная схема хроматографа «Газохром-3101»:

1-3 – разделительные колонки; 4-6 – дозаторы; 7-8 – чувствительные элементы;
9 – реометры; 10 – микрокомпрессор; 11 – фильтры осушители

Газ-носитель (воздух) подаётся в прибор с помощью микропроцессора мембранного типа, проходит через разделительную колонку 1 и попадает в рабочую камеру детектора 7 с расположенным в ней чувствительным элементом. Другой газ-носитель (аргон) омывает соединенные

последовательно разделительные колонки 2 и 3 и попадает в рабочую камеру детектора 8, в которой также расположен чувствительный элемент. Расход газов-носителей, поступающих в прибор одновременно, контролируется с помощью реометров 9. Чувствительные элементы детектора включены в схему измерительного моста, питаемую от стабилизатора постоянного тока.

Хроматограф выполнен однокорпусным, но по функциональному назначению разделен на три секции: блок питания (задняя секция); газовоздушная (хроматографическая) секция, расположенная в передней части прибора слева; панель регулировки режима (правая передняя часть прибора). Реометры смонтированы на крышке хроматографа. Газовоздушная секция прикрыта легкой подвижной крышкой, что облегчает её периодический осмотр.

Технические характеристики хроматографа: определяемые компоненты – O_2 , CO_2 , N_2 , H_2 , CO , CH_4 и другие углеводороды до C_4H_{10} включительно; пороговая чувствительность (% об.): $5 \cdot 10^{-4}$ по H_2 , $1 \cdot 10^{-3}$ по CO и CH_4 , $2 \cdot 10^{-2}$ по O_2 и N_2 , $1 \cdot 10^{-1}$ по CO_2 ; относительная погрешность $\pm 5 \%$.

В качестве вторичного прибора используется самопишущий потенциометр типа КСП-4. Температурный режим колонок – комнатный. Хроматограф должен устанавливаться в помещениях с температурой воздуха от 5 до 50 °С при относительной влажности не более 80 %.

Порядок выполнения работы

1. Перед включением вилки прибора в сеть необходимо убедиться в том, что кнопки включения прибора и компрессора выключены, ручка «ток детектора» выведена в крайнее положение против часовой стрелки, переключатель рода работ стрелочного прибора – в положение «мА».
2. Включить прибор нажатием кнопки «Вкл.», при этом должна загореться сигнальная лампочка. Включить компрессор.
3. Установить необходимую скорость движения диаграммной ленты потенциометра КСП-4.

4. Поворачивая ручку «ток детектора», установить по стрелочному прибору ток 180 мА.
5. Включить прибор КСП, установив тумблер «прибор» в положение «Вкл.», и, пользуясь ручками установки нуля, установить стрелку КСП в нулевое положение, а затем включить тумблер «диаграмма».
6. В течение 60...90 мин необходимо убедиться, что на диаграммной ленте наблюдается стабильная нулевая линия, после чего можно приступать к проведению анализа.
7. Перед анализом газовой смеси необходимо провести калибровку прибора эталонной смесью газов, в результате которой определяются коэффициенты K_h и K_s для пересчета высоты (площади) пиков в концентрацию определяемых газов.
8. Из ёмкости с анализируемым газом при помощи шприца отбирается проба объёмом 1...5 см³, в зависимости от предполагаемой концентрации анализируемых газов и результатов калибровки прибора. Так как пробу, отобранную в полость шприца, необходимо привести к атмосферному давлению, то в шприц отбирают пробу объёмом, немного превышающим требуемый, и затем медленным продвижением поршня выталкивают избыток газа в атмосферу.
9. После этого пробу вводят в разделительную колонку хроматографа как можно быстрее для предупреждения ухудшения разделения смеси на компоненты за счёт разбавления её газом-носителем.
10. Результатом анализа является полученная хроматограмма.

Если пики какого-либо газа не вместились полностью (или наоборот, не проявились) на диаграмме, то анализ необходимо повторить с изменением масштаба (кнопки на приборе 1, 2, 5, 10, 50) или объёма вводимой пробы газа от 1 до 5 см³ до появления чёткого пика каждого анализируемого газа.

Обработка полученных хроматограмм

Обработка результатов ведётся методом сравнения хроматограмм эталонной и анализируемой смесей.

1. Вначале проводится качественный анализ газовой смеси. По времени появления конкретного пика определяются наличие CO, H₂ и CH₄ в анализируемой смеси.
2. Для выполнения количественного анализа необходимо измерить высоты пиков или вычислить их площади и занести в табл. 12.

Таблица 12

Анализируемые газы	CO	H ₂	CH ₄
Скорость диаграммы, мм/ч			
Масштаб			
Объём пробы, см ³			
Высота пика, h, мм			
Площадь пика, S, мм ²			
Коэффициент пересчёта по h, %/мм			
Коэффициент пересчёта по S, %/мм ²			
Концентрация, %			

3. Подсчитать процентное содержание каждого компонента, %

$$C_i = K_h \cdot h; \quad C_i = K_S \cdot S,$$

где C_i – концентрация компонента в газовой смеси, %;

K_h , K_S – коэффициенты пересчёта по высоте h или площади S пиков.

Содержание отчета

1. Описание метода газовой хроматографии.
2. Краткое описание методики проведения эксперимента по определению состава продуктов сгорания.
3. Результаты опытов и расчётов.
4. Выводы по работе с пояснением влияния режимных параметров на полноту сгорания топлива.

Библиографический список

ГОСТ 33623-2015. Топливо твердое минеральное. Метод определения равновесной влажности.

ГОСТ 33511-2015. Топливо твердое из бытовых отходов. Определение зольности.

ГОСТ Р 55958-2014. Уголь активированный. Стандартный метод определения выхода летучих веществ.

ГОСТ 147-2013 (ISO 1928-2009). Топливо твердое минеральное. Определение высшей теплоты сгорания и расчет низшей теплоты сгорания.

ГОСТ Р ЕН ИСО 2719-2008. Нефтепродукты. Методы определения температуры вспышки в закрытом тигле Пенски-Мартенса. Национальный стандарт РФ. М., 2008.

ГОСТ 26378.4-2015. Нефтепродукты отработанные. Метод определения температуры вспышки в открытом тигле.

ГОСТ 2093-82. Топливо твердое. Ситовый метод определения гранулометрического состава. Межгосударственный стандарт. М., 1982.

Тепловой расчет котлов (нормативный метод). - СПб: НПО ЦКТИ, 1998.

Белоусов В.Н., Сергеев В.В. Топливо и теория горения: учебное пособие / СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014.

Белоусов В.Н., Смородин С.Н., Смирнова О.С. Топливо и теория горения. Ч.І. Топливо: учебное пособие / СПбГТУРП. – СПб., 2011.

Белоусов В.Н., Смородин С.Н., Смирнова О.С. Топливо и теория горения. Ч.ІІ. Теория горения: учебное пособие / СПбГТУРП. – СПб., 2011.

Смородин С.Н., Иванов А.Н., Белоусов В.Н., Лакомкин В.Ю. Тепловой и аэродинамический расчеты котельных установок: учебное пособие / СПбГТУРП. – СПб., 2013.

Содержание

Введение	3
Технический анализ твёрдого и жидкого топлива	4
Лабораторная работа №1. Определение влажности топлива	9
Лабораторная работа №2. Определение зольности твёрдого топлива.....	14
Лабораторная работа №3. Определение выхода летучих веществ	20
Лабораторная работа №4. Определение теплоты сгорания топлива	24
Лабораторная работа №5. Определение температуры вспышки жидкого топлива.....	36
Лабораторная работа №6. Определение гранулометрического состава угольной пыли	40
Лабораторная работа №7. Анализ продуктов неполного горения методом газовой хроматографии	49
Библиографический список	57

Редактор и корректор Н.П.Новикова

Техн.редактор Л.Я.Титова

Темплан 2016, поз.22

Подп. к печати 04.04.16. Формат 60x84/16. Бумага тип.№1. Печать офсетная.

Уч.-изд.л. 3,75. Усл.печ.л. 3,75. Тираж 100 экз. Изд.№ 22. Цена «С».

Заказ №

Ризограф Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД, 198095,
Санкт-Петербург, ул.Ивана Черных, д.4.