

Министерство образования Республики Беларусь  
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

---

Кафедра «Тепловые электрические станции»

ТОПЛИВО И ГАЗОВЫЙ АНАЛИЗ

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ (ПРАКТИКУМ)

по дисциплинам  
«Парогенераторы ТЭС»,  
«Котельные установки промышленных предприятий»,  
«Теплогенерирующие установки»

для студентов специальностей:  
1-43 01 04 «Тепловые электрические станции»,  
1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика»,  
1-53 01 04 «Автоматизация и управление  
энергетическими процессами»,  
1-70 04 02 «Теплогазоснабжение, вентиляция и  
охрана воздушного бассейна».

М и н с к 2 0 0 5

УДК 521.181

Лабораторный практикум составлен применительно ко всем формам обучения в соответствии с требованиями учебных планов.

В практикуме анализируются основные характеристики твёрдого и жидкого топлива, а также состав продуктов сгорания с помощью газоанализаторов.

Составители:

Н.Б. Карницкий, Б.М. Руденков, Г.И. Жихар, Е.Г. Веремейчик

Рецензенты:

Е.Г. Мигуцкий, А.В. Кочетков

ISBN 985-479-176-9

© Карницкий Н.Б., Руденков Б.М.,  
Жихар Г.И., Веремейчик Е.Г.,  
составление, 2005

© БНТУ, 2005

## СОДЕРЖАНИЕ

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ И ПРОТИВОПОЖАРНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ.....	3
<b>Т о п л и в о</b> .....	4
Лабораторная работа № 1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТВЁРДОГО ТОПЛИВА.	4
Лабораторная работа № 2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ЛАБОРАТОРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА РАЗМОЛОСПОСОБНОСТИ ТВЁРДОГО ТОПЛИВА.....	18
Лабораторная работа № 3 ПОСТРОЕНИЕ ЗЕРНОВЫХ (СИТОВЫХ) ХАРАКТЕРИСТИК ПЫЛЕЙ ТВЁРДЫХ ТОПЛИВ.....	24
Лабораторная работа № 4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЖИДКОГО ТОПЛИВА..	29
<b>Г а з о в ы й а н а л и з</b> .....	39
Лабораторная работа № 5 АНАЛИЗ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ГАЗОАНАЛИЗАТОРА ГХП (КГА-1).....	39
Лабораторная работа № 6 АНАЛИЗ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ГАЗОАНАЛИЗАТОРА TESTO 300XL.....	47

## **ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ И ПРОТИВОПОЖАРНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

Прежде чем приступить к работе, необходимо внимательно ознакомиться с заданием, правилами техники безопасности и противопожарными требованиями, а также проверить исправность приборов и инструмента. О замеченных неисправностях следует немедленно сообщить руководителю работ.

При выполнении лабораторных работ по исследованию топлива используются электронагревательные приборы и устройства.

**З а п р е щ а е т с я** включать и выключать электрические приборы и установки без разрешения руководителя.

Некоторые лабораторные работы проводятся с использованием химических реактивов. При проведении таких работ на столах должны находиться только те приборы, которые необходимы для выполнения указанного преподавателем задания.

Кислоты, используемые в некоторых аппаратах газового анализа, вызывают ожоги кожи и слизистых оболочек, поэтому при работе с кислотой или щелочью, особенно при их разбавлении и переливании, необходимо пользоваться резиновыми перчатками и защитными очками. В случае попадания на кожу кислоты нужно немедленно снять ее сухой тряпкой или ватой, а затем промыть поражённое место водой, слабым раствором соды или нашатырного спирта. Непосредственно после ожога целесообразно применять концентрированный раствор марганцовокислого калия.

При несчастном случае нужно оказать пострадавшему первую помощь. Для этого в лаборатории должна быть аптечка, укомплектованная необходимыми лекарствами. Во всех случаях пострадавшего следует отправить в ближайший пункт для оказания квалифицированной медицинской помощи.

При возникновении пожара нужно прекратить доступ воздуха к горящему предмету и локализовать очаг пожара. Для этого, если можно, закрыть горящее место кошмой, асбестом, одеялом, засыпать песком. При сильном пламени необходимо применять огнетушители и вызвать пожарную охрану.

# ТОПЛИВО

## Лабораторная работа № 1

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

#### 1.1. Определение содержания влаги твердого топлива

##### *1.1.1. Общие сведения*

Одной из важнейших характеристик топлива является наличие влаги, которая может составлять от 3-5 до 60-70 %. Содержание влаги определяется геологическим возрастом, условиями залегания, добычи, транспортирования и хранения топлива. Различают влагу внешнюю, внутреннюю (коллоидную) и гидратную (кристаллическую).

Внешнюю влагу часто подразделяют на капиллярную и поверхностную. Капиллярной называют ту влагу, которая содержится в порах (капиллярах) топлива и обычно составляет основную часть влаги топлива, находящегося в естественных условиях.

Так как с возрастом топливо уплотняется и пористость его уменьшается, то уменьшается и содержание капиллярной влаги. Так, для торфа максимальное значение капиллярной влаги доходит до 40-50 %, для каменных углей – не превышает 5-12 %.

Поверхностной называют влагу, которая осаждается на поверхности топлива, количество её невелико (3-5 % массы топлива) и в общем мало зависит от химического возраста топлива.

Внутренняя влага связана с органической частью топлива, физико-химически входя в состав того сложного коллоида, каким является твердое топливо, почему она и называется коллоидной. С увеличением возраста топлива содержание внутренней влаги в нем падает. Это объясняется тем, что в процессе преобразования органической массы топлива происходит “старение” коллоидных веществ. Так, в торфе и в бурых углях её содержание 10-15 %, в геологически молодых каменных углях – 3-6 %, а в геологически старых каменных углях и антраците – 0,5-1,0 %.

Гидратная влага входит в состав некоторых минеральных примесей топлива (например,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Содержание её в топливе обычно невелико и в величину общей влаги не включается. Заметное количество её бывает лишь в многозольных топливах и выделяется при дегидратизации молекулы минерала при температуре выше  $500\text{ }^\circ\text{C}$ .

Внешняя и внутренняя влага составляют общую или рабочую влагу топлива, величина которой для различных топлив показана на рис. 1.1.

Помимо рабочей влажности топлива  $W^P$  важной характеристикой является его гигроскопическая влажность  $W^{\text{ГИ}}$ , т.е. влажность пробы топлива, доведённого до равновесного состояния в воздушной среде с относительной влажностью  $60 \pm 2\%$  и температурой  $20 \pm 5\text{ }^\circ\text{C}$ , и называется аналитической пробой топлива. В лабораторной практике влажность аналитической пробы топлива обозначают через  $W^a$ .

Влага является балластом топлива, так как увеличивает расходы на транспортировку и погрузочно-разгрузочные работы, при перевозке и хранении высоковлажные топлива смерзаются. Содержание влаги в топливе снижает его теплоту сгорания, уменьшает температуру в топочной камере, увеличивает объём продуктов сгорания и, следовательно, увеличивает потери тепла с уходящими газами, снижая КПД парогенератора. Сущность метода определения содержания влаги в твердом топливе заключается в высушивании навески топлива в электрическом сушильном шкафу при температурах  $105\text{--}110\text{ }^\circ\text{C}$  и  $140 \pm 5\text{ }^\circ\text{C}$  и вычислении потери в весе взятой навески.

### ***1.1.2. Необходимая аппаратура и материалы***

При определении содержания влаги применяются следующая аппаратура и материалы:

1. Шкаф сушильный с электрическим обогревом.
2. Стаканчики (бюксы) стеклянные или алюминиевые с крышкой. Бюксы с крышкой должны быть пронумерованы, высушены, взвешены и должны храниться в эксикаторах с влагопоглощающими веществами. Перед взятием навесок вес бюксов проверяют.
3. Термометр.
4. Весы аналитические с разновесами.

5. Эксикатор с серной кислотой или гранулированным хлористым кальцием.

6. Совки, ложечки или шпатели для перемещения пробы и взятия навески, щипцы тигельные.

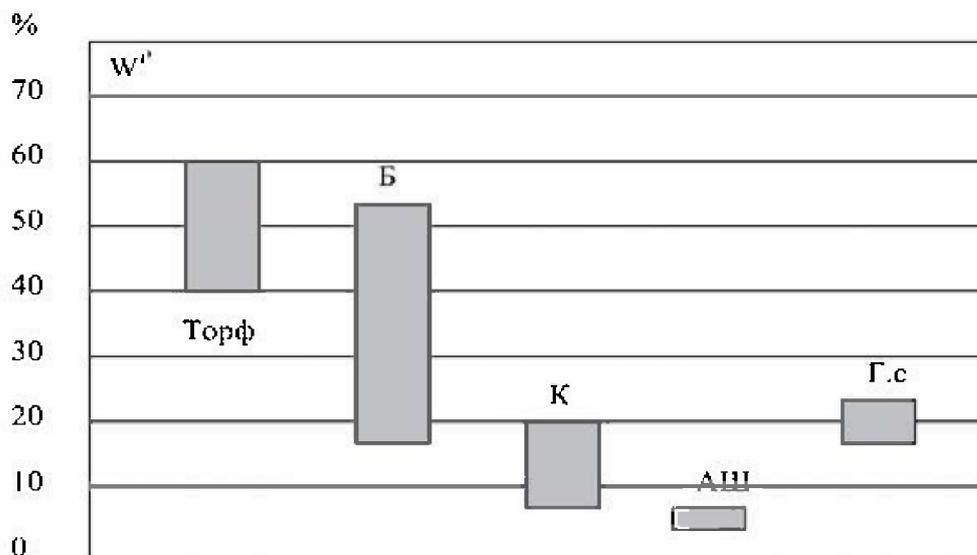


Рис. 1.1. Содержание влаги в различных видах твердого топлива.

На рисунке обозначено: Б - бурый уголь; К - каменный уголь;

АШ - антрацитовый штыб; ГС - горючие сланцы

### 1.1.3. Выполнение работы

Для определения содержания влаги ( $W^a$ ) в аналитической пробе топлива с размерами частиц 0 - 0,2 мм пробу перемешивают в открытой банке шпателем или ложечкой и с разной глубины из двух-трех мест берут в предварительно взвешенные бюксы навески топлива, равные 1 г. Определение содержания влаги производят параллельно в двух навесках.

**1. Метод высушивания при температуре 105 -110°C.** Бюксы с навесками топлива помещают в предварительно нагретый до 105 - 110 °С сушильный шкаф (рис 1.2) и сушат при этой температуре:

каменные угли, антрациты и горючие сланцы - 30 мин;

бурый уголь, торф - 40-60 мин.

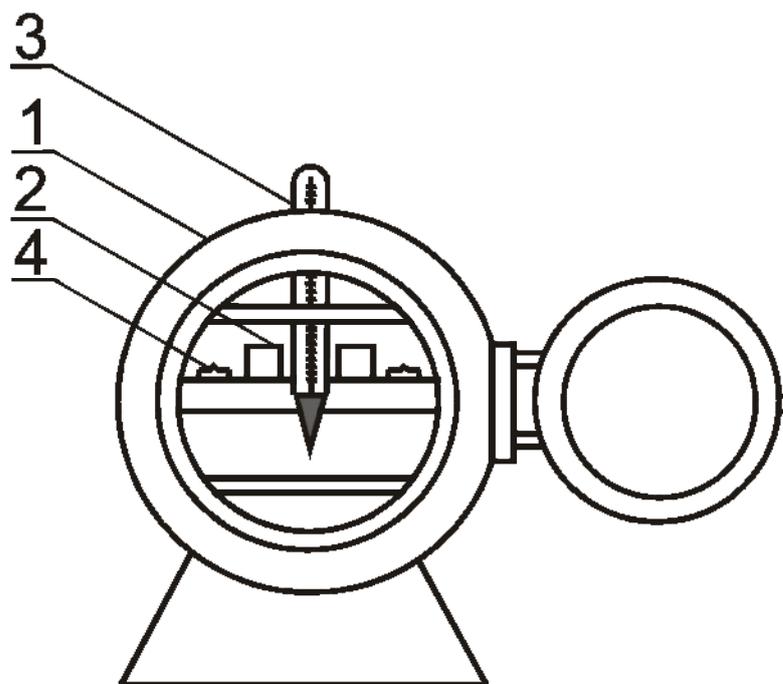


Рис. 1.2. Шкаф сушильный с электрическим нагревателем:  
1 - сушильный шкаф; 2,4 - бюксы с крышками; 3 - термометр

Бюксы ставят открытыми, крышки кладут рядом. После сушки бюксы с топливом вынимают из шкафа, закрывают крышками, охлаждают сначала на воздухе в течение 2-3 мин., а затем в эксикаторе до комнатной температуры в течение 15 мин при этом же температурном режиме. Контрольные сушки повторяются до тех пор, пока разность в весе при двух последовательных взвешиваниях будет менее 0,01 г.

**2. Метод высушивания при температуре  $140 \pm 5$  °С.** Нагревают шкаф до температуры 160-165 °С. Бюксы с навесками топлива ставят на полку шкафа открытыми, крышки кладут рядом с бюксами.

Высушивание проб производят при температуре  $140 \pm 5$  °С. Отсчет времени начинают с момента достижения температуры в условиях предела. При этой температуре высушивают навески:

- каменные угли и антрациты - 5 мин.;
- горючие сланцы - 8 мин.;
- бурые угли - 20 мин.

В остальном определение производят в соответствии с предыдущим методом, описанным в п. 1.

Результаты взвешивания записывают в табл. 1.1.

Т а б л и ц а 1.1

Номер бюкса	Навеска топлива  G, г	Вес бюкса, г			
		пустого  G <sub>1</sub>	с навеской топлива  G <sub>2</sub>	после 1-го просушива- ния  G <sub>3</sub>	после 2-го просуши- вания  G <sub>4</sub>

#### 1.1.4. Вычисление результатов работы

Содержание влаги в аналитической пробе топлива ( $W^a$ ) в процентах вычисляют по формуле

$$W^a = \frac{G_2 - G_4}{G} \cdot 100\%. \quad (1.1)$$

Определяют влагу для каждой из двух параллельных навесок топлива ( $W_1^a$  и  $W_2^a$ ), а затем находят среднее значение влаги ( $W_{cp}^a$ ):

$$W_{cp}^a = \frac{W_1^a + W_2^a}{2}, \%. \quad (1.2)$$

Допустимое расхождение между результатами двух параллельных определений не должно превышать 0,3 %.

Результаты работы записывают в табл. 1.2.

Т а б л и ц а 1.2

Влага аналитической пробы испытуемого топлива, %		
$W_1^a$	$W_2^a$	$W_{cp}^a$

## Контрольные вопросы

1. Влага топлива, виды влаги.
2. Содержание влаги у различных топлив и влияние ее на экономичность работы парогенератора.
3. Порядок определения влаги твердого топлива.

### 1.2. Определение зольности твердого топлива

#### 1.2.1. Общие сведения

Негорючие минеральные примеси являются балластом топлива. Они уменьшают содержание горючей массы в рабочем топливе, вследствие чего уменьшается теплота сгорания топлива, усложняется процесс сжигания, снижается экономичность парогенераторной установки.

В твердых топливах (за исключением сланцев) примеси состоят главным образом из глины  $Al_2O_3 \cdot 2Si_2 \cdot 2H_2O$ , свободного кремнезема  $SiO_2$ , железного колчедана  $FeS$ . В небольших количествах в них содержатся также закись железа  $FeO$ , сульфаты, карбонаты, силикаты кальция, магния, щелочи, хлориды и т.д.

Значительную часть минеральных примесей горючих сланцев составляют карбонаты, содержание которых доходит до 70 % от веса негорючих веществ.

Минеральные примеси попадают в топливо несколькими путями, вследствие чего различают следующие виды примесей: первичные (переходят в топливо из веществ-углеобразователей), вторичные (вносятся в топливо в процессе преобразования его исходной массы извне), третичные (попадают в топливо при добыче, погрузке, транспортировке и хранении).

При горении топлива в условиях высоких температур минеральные примеси претерпевают большие изменения. При относительно низких температурах теряют кристаллизационную влагу сернокислые соединения; при более высоких температурах происходит разложение карбонатов с выделением углекислоты, испарение щелочей и хлоридов. Одновременно имеют место реакции окисления железного колчедана и закиси железа, повышающие первоначальный вес негорючих веществ.

Твердый негорючий остаток, получающийся после всех преобразований минеральной части в процессе горения топлива, называют

золой. Состав и вес золы не идентичны составу и весу минеральных примесей топлива.

На рис. 1.3 приведены средние пределы зольности различных видов топлива.

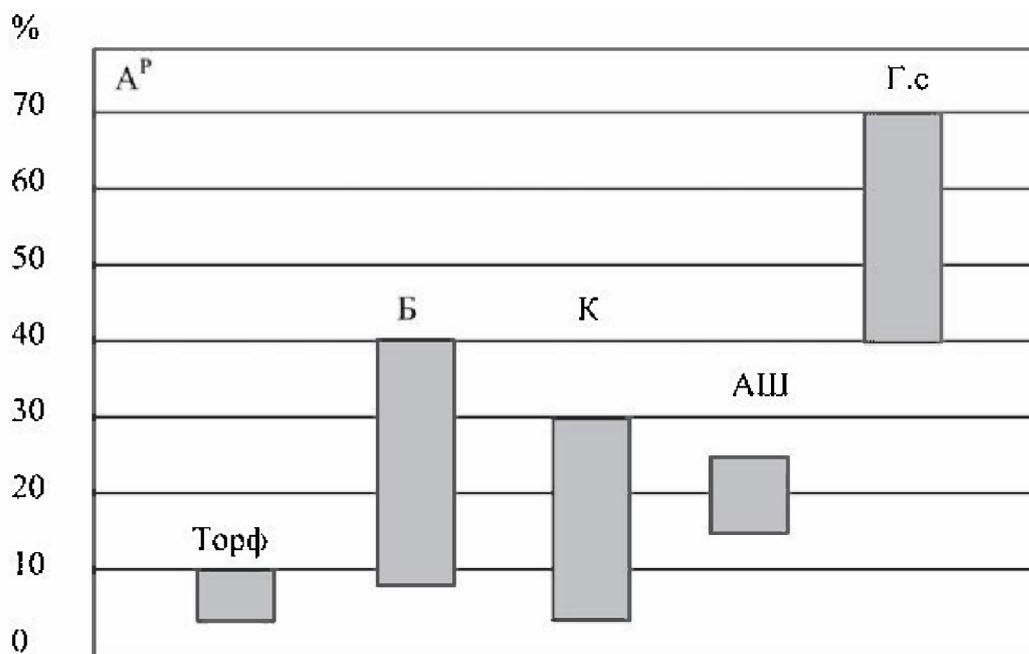


Рис. 1.3. Содержание золы в различных видах твердых топлив:  
Б - бурые угли; К - каменные угли;  
АШ - антрацитовый штыб; ГС - горючие сланцы

Сущность метода определения зольности заключается в озоле-нии навески топлива в муфельной печи и прокаливании зольного остатка при температуре  $800 \pm 25$  °С, а для ускоренного озоления горючих сланцев - при температуре 850-870 °С.

### ***1.2.2. Необходимая аппаратура и материалы***

При определении зольности применяются следующая аппаратура и материалы:

1. Печь муфельная.
2. Лодочки фарфоровые прямоугольные № 1, 2 и 3. Лодочки, применяемые впервые, должны быть предварительно пронумерованы, прокалены до постоянного веса, взвешены и должны храниться в эксикаторах с осушенными веществами. Перед взятием навесок вес лодочек проверяют.

3. Пластинка толщиной до 5 мм керамическая или из жароупорного материала.

4. Шпатель или ложечка для перемешивания пробы и взятия навески.

5. Щипцы тигельные.

6. Весы аналитические с набором разновесов.

7. Эксикатор с осушающим веществом, которое должно периодически обновляться: серная кислота - один раз в месяц, а хлористый кальций – при начале расплывания.

### 1.2.3. Выполнение работы

Аналитическую пробу топлива перемешивают шпателем в открытой банке по возможности на полную глубину. На разной глубине из двух-трех мест ложечкой берут навески топлива по 1 г в предварительно взвешенные лодочки. Навески в лодочках размещают равномерным слоем. Определение зольности производится параллельно в двух навесках.

Муфельную печь нагревают до температуры 850-875 °С. Затем открывают дверцу муфеля и пластинку с лодочками устанавливают на уровне его пода (рис. 1.4). В таком положении пластинку выдерживают 3 мин при озолении углей и антрацитов и 5 мин при озолении сланцев.

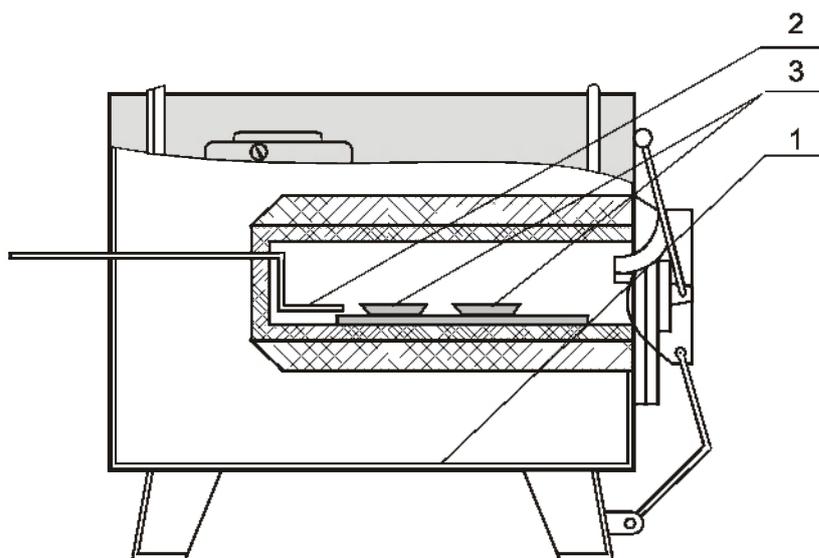


Рис 1.4. Электрическая муфельная печь  
1 – муфельная печь; 2 – термометр; 3 – лодочки

Затем пластинку с лодочками продвигают в муфель со скоростью 2 см/мин, закрывают дверцу муфеля и прокаливают навески при температуре 800-825 °С с продолжительностью 15 мин каждое до тех пор, пока разность в весе при двух последних взвешиваниях будет менее 0,001 г. Все взвешивания производят с точностью до 0,0002 г.

Результаты взвешивания заносят в табл. 1.3.

Т а б л и ц а 1.3

Номер лодочки	Навеска топлива G, г	Вес лодочки, г			
		пустой G <sub>1</sub>	с навеской топлива G <sub>2</sub>	с золой после прокаливания, G <sub>3</sub>	с золой после контр. прокаливания G <sub>3</sub> '

#### 1.2.4. Вычисление результатов работы

Зольность аналитической пробы твердого топлива ( $A^a$ ) в процентах вычисляют по формуле

$$A^a = \frac{G_3' - G_1}{G} \cdot 100, \% . \quad (1.3)$$

Определяют зольность каждой из двух навесок топлива ( $A_1^a$  и  $A_2^a$ ), а затем - среднее значение зольности:

$$A_{cp}^a = \frac{A_1^a + A_2^a}{2}, \% . \quad (1.4)$$

Допускаемые расхождения между результатами двух параллельных определений зольности одной аналитической пробы не должны превышать:

0,2 % - для топлива с зольностью до 12 %;

0,3 % - для топлива с зольностью от 12 до 25 %;  
 0,5 % - для топлива с зольностью более 25 %.

Зольность топлива на сухую массу ( $A^c$ ) вычисляют по формуле

$$A^c = A_{cp}^a \frac{100}{100 - W^a}, \% \quad (1.5)$$

где  $W^a$  - содержание аналитической влаги испытуемой пробы, %.  
 Зольность рабочего топлива в процентах ( $A^p$ ) вычисляют по формуле

$$A_p = A_{cp}^a \frac{100 - W^p}{100 - W^a}, \% \quad (1.6)$$

где  $W^p$  - содержание влаги в рабочем топливе по испытуемой пробе, %.

Результаты работы заносят в табл. 1.4.

Т а б л и ц а 1.4

Зольность испытуемой пробы, %				
$A_1^a$	$A_2^a$	$A_{cp}^a$	$A^c$	$A^p$

### Контрольные вопросы

1. Характеристика минеральных примесей топлива.
2. Преобразование минеральных примесей топлива в процессе горения. Зола топлива.
3. Высокосольные и низкосольные топлива.
4. Порядок определения зольности твердого топлива.

## 1.3. Определение выхода летучих веществ твердого топлива

### 1.3.1. Общие сведения

При нагревании твердого топлива без доступа воздуха, под действием высокой температуры (200-800 °С) начинается термическое разложение его на газообразную часть (летучие вещества) и твердый остаток (кокс). Если не учитывать водяных паров, которые образуются в результате испарения влаги нагреваемого топлива, летучие вещества содержат водород, тяжелые углеводороды, окись углерода, немного углекислоты и некоторые другие газы, т.е. в основном газообразные горючие вещества.

Температура начала выхода летучих веществ, количество и состав газообразных продуктов разложения зависят от химического состава топлива, что определяется геологическим возрастом топлива: чем топливо геологически старше, тем меньше выход летучих веществ и выше температура начала их выделения (рис. 1.5).

Выход летучих веществ в лабораторных условиях определяют путем прогрева без доступа воздуха навески аналитической пробы топлива при температуре  $850 \pm 10$  °С в течение 7 мин.

Выход летучих веществ для различных видов топлива представлен на рис. 1.6.

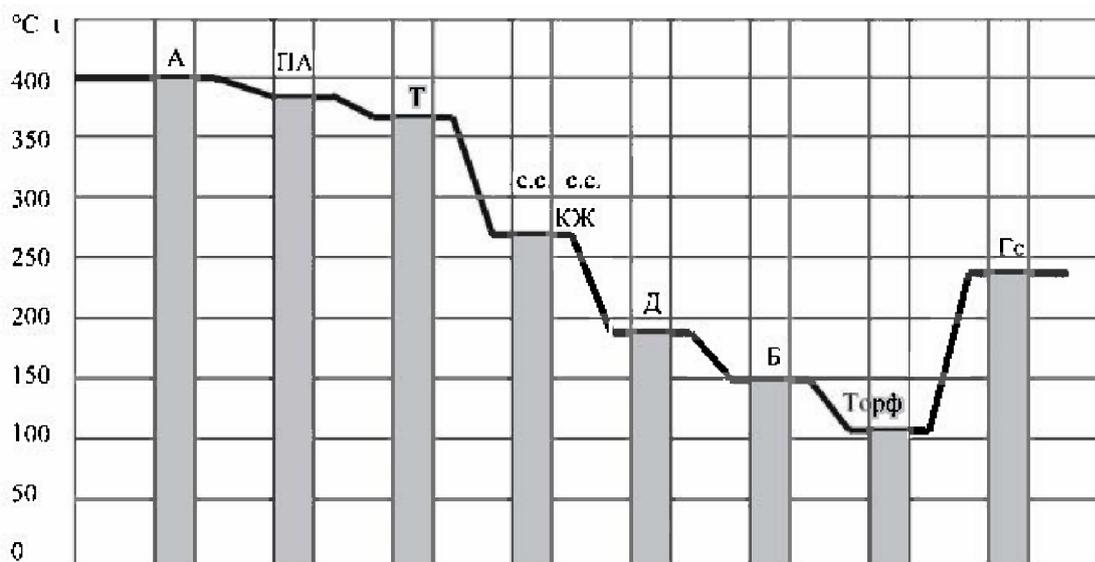


Рис. 1.5. Температура начала выхода летучих веществ у различных видов твердых топлив

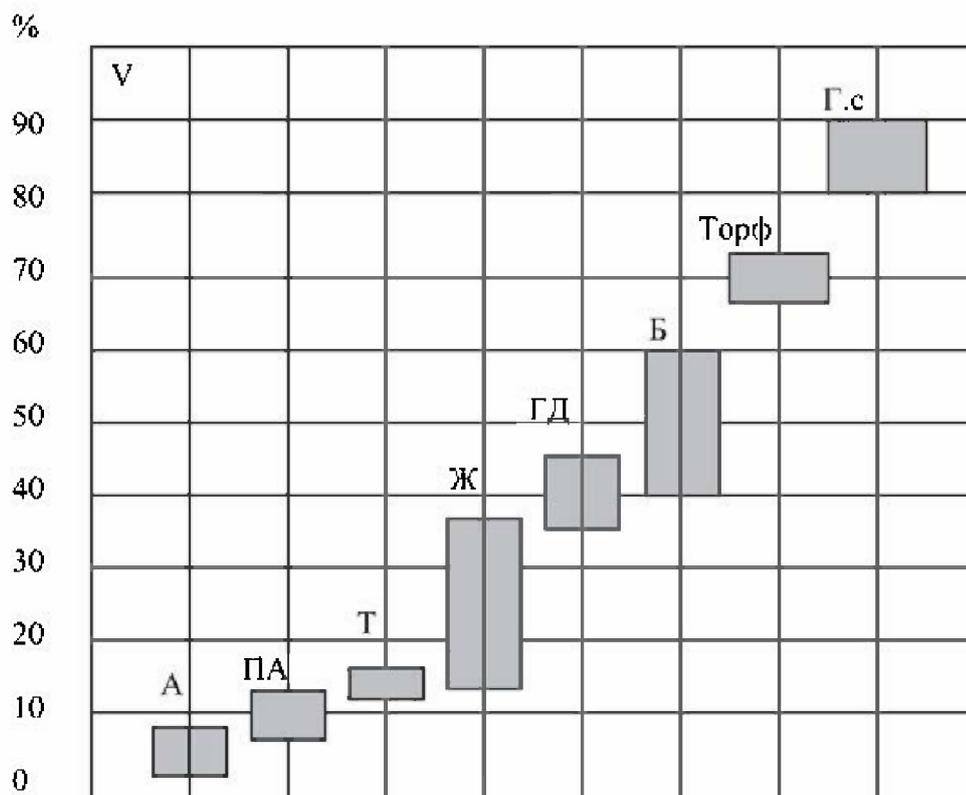


Рис. 1.6 Выход летучих веществ

Большой выход летучих веществ имеют горючие сланцы, торф, бурый уголь; наименьший выход летучих веществ - у антрацита (2-9 %). Летучие вещества оказывают большое влияние на процесс горения топлива. Кокс, оставшийся после полного выделения горючих веществ, состоит из углерода и минеральной части топлива. Кокс может быть порошкообразным, слипшимся, сплавленным.

Большинство каменных углей спекается, хотя не всегда сильно. Порошкообразный и спекшийся коксовый остаток дают топливо с очень большим выходом летучих веществ (торф, бурый уголь, молодые каменные угли). С малым выходом летучих веществ дают антрацит, полуантрацит, тощие угли и др.

Характер твердого горючего остатка играет решающую роль при определении наиболее рационального пути использования топлива.

### ***1.3.2. Необходимая аппаратура и материалы***

При определении выхода летучих веществ применяется следующая аппаратура:

1. Электрическая муфельная печь.
2. Тигли фарфоровые с притертыми крышками.
3. Подставка из нихромовой проволоки или листовой стали для установки тиглей в муфельную печь.
4. Весы аналитические с разновесами.
5. Эксикатор с осушающим веществом.
6. Шприцы тигельные, ложечка или шпатель.

### **1.3.3. Выполнение работы**

Аналитическую пробу топлива перемешивают в открытой банке шпателем или ложечкой и на разной глубине из двух-трех мест берут в предварительно взвешенные тигли с крышками навески топлива, равные 1 г. Тигли с навесками плотно закрывают крышками и устанавливают на подставку, которая необходима для равномерного обогрева тиглей в печи. Затем тигли с подставкой быстро помещают в разогретую до температуры 860 °С муфельную печь. Схема установки тиглей в печи указана на рис. 3.2. Дверцу муфеля закрывают и тигли выдерживают при температуре  $850 \pm 10$  °С в течение 7 мин.

По истечении 7 мин тигли вынимают из печи, охлаждают сначала на воздухе около 5 мин, не снимая крышек, затем в эксикаторе до комнатной температуры и взвешивают.

Для повышения точности и надежности результатов анализа параллельно испытываются две навески топлива.

Результаты взвешивания заносятся в табл. 1.5.

Т а б л и ц а 1.5

Номер тиглей	Навеска топлива,  G, г	Вес тигля, г		
		пустого  G <sub>1</sub>	с навеской топлива  G <sub>2</sub>	после выхода летучих  G <sub>3</sub>

### 1.3.3. Вычисление результатов работы

Выход летучих в аналитической пробе топлива ( $V^a$ ) вычисляют в процентах по формуле:

$$V^a = \frac{(G_2 - G_3) \cdot 100}{G} - W^a, \%, \quad (1.7)$$

где  $W^a$  - содержание влаги в испытываемой аналитической пробе; %.

Определяют выход летучих веществ для каждой из двух параллельных навесок топлива ( $V_1^a$  и  $V_2^a$ ), затем находят среднее ( $V_{cp}^a$ ):

$$V_{cp}^a = \frac{V_1^a + V_2^a}{2}, \%. \quad (1.8)$$

Расхождение между результатами двух параллельных определений выхода летучих веществ ( $V_1^a$  и  $V_2^a$ ) по одной аналитической пробе не должно превышать:

для топлива с выходом летучих веществ менее 9 % - 0,3 %;

для топлива с выходом летучих веществ от 9 до 45 % - 0,5 %;

для топлива с выходом летучих веществ 45 % и выше - 1,0 %.

Выход летучих веществ на условную горючую массу ( $V^{\Gamma}$ ) вычисляют в процентах по формуле

$$V^{\Gamma} = V_{cp}^a \frac{100}{100 - W^a - A^a}, \%, \quad (1.9)$$

где  $W^a$  и  $A^a$  - соответственно влага и зольность испытываемой аналитической пробы топлива, %.

Результаты работы заносятся в табл. 1.6.

Т а б л и ц а 1.6

Выход летучих веществ испытываемой аналитической пробы топлива, %			
$V_1^a$	$V_2^a$	$V_{cp}^a$	$V^{\Gamma}$

## Контрольные вопросы

1. Состав летучих веществ топлива.
2. Содержание летучих веществ у различных топлив и влияние их величины на процесс воспламенения топлива.
3. Характеристика нелетучих остатков.
4. Порядок определения летучих веществ в твердом топливе.

## Лабораторная работа № 2

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ЛАБОРАТОРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА РАЗМОЛОСПОСОБНОСТИ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

#### 2.1. Общие сведения

Коэффициент размолоспособности ( $K_{\text{ло}}$ ) отражает размольные свойства материала, которые можно оценить по удельному расходу энергии при его разрушении, т.е. он зависит от модуля упругости  $E$ , кг/см<sup>2</sup>, и от разрушающего напряжения  $\sigma_0$ , кг/см<sup>2</sup>. Однако величины  $E$  и  $\sigma_0$  для углей вследствие крайней их неоднородности резко различны. Поэтому коэффициент размолоспособности определяют путем сравнительного размола испытуемого и эталонного топлива в лабораторной мельнице.

Оба сорта топлива размалывают в воздушно-сухом состоянии до одинаковой крупности.

За эталонное топливо принимают наиболее твердое, близкое по свойствам к донецкому АШ, коэффициент размолоспособности которого  $K_{\text{ло}} = 1$ .

Существует несколько способов определения коэффициента размолоспособности, эквивалентных между собой.

**Первый способ.** Одинаковые по весу пробы размалывают при затрате одинакового количества энергии. Тонкость помола при этом различна. Относительный лабораторный коэффициент размолоспособности находят из выражения

$$K_{ло} = \left( \frac{1}{\ln \frac{100}{R_{эм}}} \right)^{\frac{1}{p}} \left( C_n \frac{100}{R_x} \right)^{\frac{1}{p}}, \quad (2.1)$$

где  $R_{эм}$ ,  $R$  – остатки на определенном сите при размоле испытуемого и эталонного топлива в течение определенного времени;

$p$  - показатель степени, зависящий от типа установки.

**Второй способ.** Одинаково приготовленные образцы углей размалывают до одинаковой тонкости помола. При этом разные топлива требуют разного количества энергии. Под относительным лабораторным коэффициентом размолоспособности  $K_{ло}$  понимают отношение расхода энергии при размоле эталонного и испытуемого топлива при воздушно-сухом их состоянии и измельчении от одинаковой крупности до одинаковой тонкости помола.

$$K_{ло} = \frac{\mathcal{E}_{эм}}{\mathcal{E}_x}. \quad (2.2)$$

А так как

$$\mathcal{E} = N \cdot t,$$

то

$$K_{ло} = \frac{t_{эм}}{t_x}. \quad (2.3)$$

**Третий способ.** Разное или одинаковое количество идентично приготовленных топлив размалывают в течение различного или одного и того же времени.

В этом случае относительный лабораторный коэффициент размолоспособности показывает, во сколько раз при размоле воздушно-сухих топлив производительность мельницы на испытуемом топливе больше, чем на эталонном (при одинаковых начальном составе и конечной тонкости помола):

$$K_{AO} = \frac{B_X}{B_{ЭТ}}. \quad (2.4)$$

Под производительностью лабораторной мельницы понимают количество пыли с размером зёрен ниже определённого размера ( $D$  – проход через сито с размерами отверстий 88 мкм), отнесённое к единице времени. Проход через сито выражается в процентах, а производительность лабораторной мельницы определяется по формуле

$$B = \frac{D \cdot b}{100 \cdot t} \quad \text{г/мин}, \quad (2.5)$$

где  $b$  – вес первоначально взятой пробы, г;

$t$  – время размолы, мин.

Значит,

$$K_{AO} = \frac{B_X}{B_{ЭТ}} = \frac{D_X b_X t_{ЭТ}}{D_{ЭТ} b_{ЭТ} t_X}. \quad (2.6)$$

Если взять одинаковое количество эталонного и испытуемого топлива ( $b_{ЭТ} = b_X$ ) и размалывать в течение одного и того же времени ( $t_{ЭТ} = t_X$ ), то

$$K_{AO} = \frac{D_X}{D_{ЭТ}}. \quad (2.7)$$

Если обозначить проход через сито с размерами отверстий 88 мкм в весовых единицах  $g_X$  и  $g_{ЭТ}$ , то можно записать:

$$K_{AO} = \frac{g_X}{g_{ЭТ}}. \quad (2.8)$$

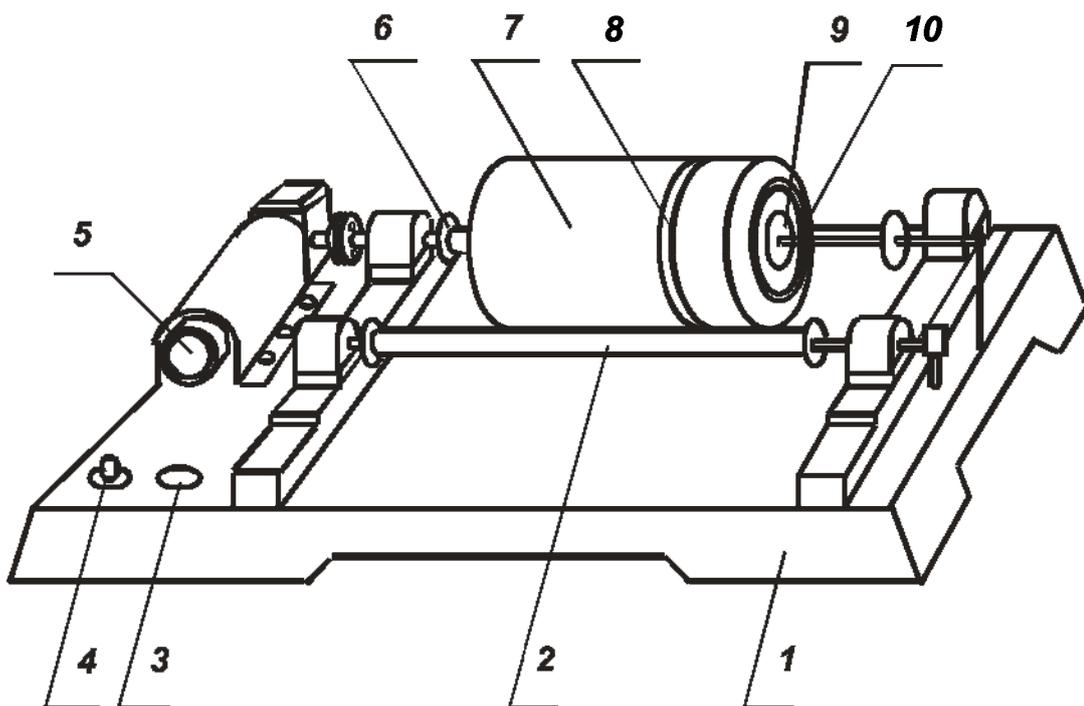
В эксплуатационных условиях размол топлива ведётся при иной влажности и другом начальном зерновом составе. Поэтому при переходе к рабочим условиям берут поправки на влажность и на зерновой состав рабочей массы топлива.

## 2.2. Необходимая аппаратура и материалы

1. Лабораторная шаровая мельница.
2. Машина для отсева пыли.
3. Набор сит с размерами отверстий 200 и 88 мкм.
4. Весы лабораторные технические.
5. Баночки для взвешивания проб.
6. Эталонное топливо – АШ.
7. Испытуемое топливо – угли марки Б, Д, Г и другие.

## 2.3. Описание установки

Для размола топлива применяют фарфоровую мельницу лабораторного типа (рис.2.1).



- Рис. 2.1. Лабораторная шаровая фарфоровая мельница:
- 1 – чугунное основание; 2 – резиновые ролики; 3 – реостат тонкой регулировки числа оборотов; 4 – переключатель грубой регулировки числа оборотов;
  - 5 – электродвигатель с червячной передачей; 6 – диски;
  - 7 – фарфоровый сосуд с фарфоровыми шарами; 8 – хомут для крепления крышки;
  - 9 – крышка; 10 – прижимная перемычка с винтом; 11 – ограничитель

На чугунном основании (1) находится электродвигатель с червячной передачей (5), два резиновых ролика (2), несущих и вращающих размалывающий сосуд ёмкостью 5 л, загруженный на 1/3 объёма фарфоровыми шарами диаметром 25 мм, а также переключатель грубой (4) и тонкой (3) регулировки скорости вращения роликов. Эту скорость можно изменять от 445 до 160 об/мин. Электродвигатель (5) вращает через червячную передачу лишь один (дальний) резиновый ролик. Его подшипниковая опора фиксирована. Второй ролик в зависимости от размеров размалывающего сосуда может быть закреплён винтами на необходимом расстоянии от ведущего ролика. Вулканизированное покрытие роликов (2) обеспечивает хорошее прилегание, отсутствие скольжения и относительную бесшумность работы.

Размалывающий сосуд удерживается от смещения никелированным ограничителем (11). Для этой же цели служат диски (6), схватывающие резиновое покрытие роликов. Размалывающий сосуд снабжён зажимающим блоком, состоящим из крышки (9), прижимной перемычки с винтом (10) и хомутов для крепления (8). Уплотнение обеспечивается резиновой прокладкой (на рисунке не показано).

#### **2.4. Выполнение работы**

На лабораторных весах взвешивают воздушно-сухое эталонное топливо – АШ с размером частиц менее 3 мм в количестве 100 г. Затем снимают с роликов фарфоровый сосуд. Вращением винта ослабляют прижимную перемычку и вынимают её из прорези в хомутах. Снимают крышку, прокладку, проверяют наличие шаров в мельнице и засыпают пробу топлива.

В обратном порядке закрывают сосуд, проверяют плотность и кладут так, чтобы ограничитель упирался в центр винта прижимной ручки.

Переключатель (4) ставят в положение III, что соответствует 160-270 об/мин. Реостат (3) устанавливают примерно на 1/3 шкалы.

Засекают время. Размол производят в течение 20 мин. По истечении времени переключатель (4) ставят на «0», снимают и открывают мельницу. Содержимое (шары и уголь) высыпают на лист и лёгким постукиванием стряхивают уголь с шаров. Шары аккуратно кладут в сосуд (не бросать). Уголь высыпают на верхнее сито с размерами отверстий 200 мкм. Сита ставят в просеивочную машину и

производят рассев в течение 15-20 мин. После этого взвешивают пыль, прошедшую через сито. Точно так же поступают с испытуемым топливом. Данные работы сводят в табл. 2.1.

Т а б л и ц а 2.1

Наименование топлива	Вес пробы до размола $b$ , г	Время размола $t$ , мин	Проход через сито с отверстиями 88 мм	$K_{AO}$	Примечание
Антрацит	$b_{ЭТ}=100$	$t_{ЭТ}=20$	$g_{ЭТ} =$	$K_{ЭТ} = 1$	
	$b_X=100$	$t_X=20$	$g_X =$	$K_X =$	

Вычисления результатов работы производятся в следующей очередности.

Относительный лабораторный коэффициент размолоспособности испытуемого угля определяется по формуле

$$K_{AO} = \frac{g_X}{g_{ЭТ}} . \quad (2.9)$$

**Примечание.** Для более точного определения относительного лабораторного коэффициента размолоспособности размолу подвергают от 5 до 8 % каждого вида топлива и определяют его среднее значение.

### Контрольные вопросы

1. Относительный лабораторный коэффициент размолоспособности.
2. Эталонное топливо.
3. Способы определения относительного лабораторного коэффициента размолоспособности топлива.
4. Размалывающие устройства для различных видов твёрдого топлива.

## Лабораторная работа № 3

### ПОСТРОЕНИЕ ЗЕРНОВЫХ (СИТОВЫХ) ХАРАКТЕРИСТИК ПЫЛЕЙ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ

#### 3.1. Общие сведения

Качество помола топлива влияет на экономичность работы парогенератора. Чем меньше размер частиц, тем больше поверхность соприкосновения их с воздухом. Следовательно, тем лучше горение и меньше потери с механическим недожогом  $q_4$ .

С другой стороны, весьма тонкий помол нежелателен, так как при этом увеличивается удельный расход электроэнергии намола. Это снижает экономичность работы котла. Поэтому устанавливается самый оптимальный размол топлива, при котором удельный расход электроэнергии на тонну помола невелик, а тонкость помола достаточная для ведения нормального процесса горения.

Оптимальная тонкость помола зависит от содержания летучих веществ в топливе. Чем больше это количество, тем лучше оно воспламеняется. Значит, тем грубее допускается помол (при всех других равных условиях).

Определение качества пыли по тонкости помола и его однородности производится с помощью сит. В практике пылеприготовления сито принято характеризовать размером отверстия сетки в микронах (мкм). Ситовой анализ пыли заключается в рассеве отобранной пробы через несколько сит, различных по размеру отверстий.

В практике энергетических установок чаще всего для ситового анализа используются два сита: с отверстиями 88 и 220 мкм. Для более полной характеристики пыли берутся пять сит с отверстиями 60, 75, 88, 120 и 220 мкм (или другие, близкие к этим размерам). Наиболее употребительные сита представлены в табл. 3.1 – 3.3

Т а б л и ц а 3.1.

Номер сетки	Размер отверстий, мкм	Число ячеек на 1см <sup>2</sup> сетки	Диаметр проволоки, мм	Живое сечение сетки, %
1	1000	54,9	0,35	55,0
08	800	82,6	0,30	53,0
0355	355	400,0	0,15	49,0
0,2	200	918,0	0,13	36,7
0125	125	2130,0	0,19	33,8
009	90	3900,0	0,07	31,6
0071	71	6400,0	0,055	31,4
0063	63	6270,0	0,045	34,9
004	40	20450,0	0,03	28,0

Т а б л и ц а 3.2

Размер отверстий, мкм	Число ячеек на 1см <sup>2</sup> сетки	Диаметр проволоки, мм	Живое сечение сетки, %
1200	25	0,80	36
-	-	-	-
385	256	0,24	36
200	900	0,13	36
120	2500	0,08	36
88	4900	0,055	36
75	6400	0,05	36
60	10000	0,04	36
46	16900	0,03	36

Т а б л и ц а 3.3

### Характеристика сита бюро стандартов США и фирмы Тайлор

Размер отверстий, мкм	Число меш (число отверстий на 1 дюйм)	Диаметр проволоки, мм
1170	14	0,635
830	20	0,437
351	42	0,254
208	65	0,183
124	115	0,097
88	170	0,061
74	200	0,053
61	250	0,091
43	325	0,036

При рассеве мелкие частицы проходят через отверстия сит, крупные остаются на нём. Часть навески, которая остаётся на сите, называется остатком. Остаток выражается в процентах от первоначального веса. Величина остатка является характеристикой тонкости помола и обозначается буквой  $R$ . Размер отверстий сита указывается в индексе. Например,  $R_{88}$  обозначает остаток на сите с отверстиями 88 мкм.

Часть пыли, которая прошла через сито, называется проходом и обозначается буквой  $D$ . Размеры отверстий сита указываются в индексе. Величина просева выражается в процентах к первоначальному весу. Поэтому для каждого сита справедливо уравнение

$$R_x + D_x = 100\% . \quad (3.1)$$

Проход через последнее сито называется “дном”.

Можно оценить качество пыли как по остатку, так и по величине прохода через сито. В энергетике принято характеризовать пыль полным остатком, который подсчитывается в процентах к полному весу первоначальной пробы при условии, что на каждом сите вся первичная проба (25 или 50 г) просеивается отдельно. Например, если мы имеем при машинном рассеве два сита: 200 и 88 мкм, то полный остаток на сите 200 мкм будет постоянным, равным промежуточному (частному). Полный остаток на сите 88 мкм будет равен сумме остатков на сите 200 мкм и на сите 88 мкм.

Данные подобного ситового анализа позволяют построить неполную зерновую характеристику. Она выражает зависимость величины полного остатка на сите как функцию размера отверстий или частиц (рис.3.1).

В этой характеристике отсутствуют данные фракционного состава пыли с размерами, меньшими 40 мкм, так как эта область недоступна ситовому анализу.

Полная зерновая характеристика (рис.3.2) строится для всех диапазонов частиц специальными лабораторными исследованиями.

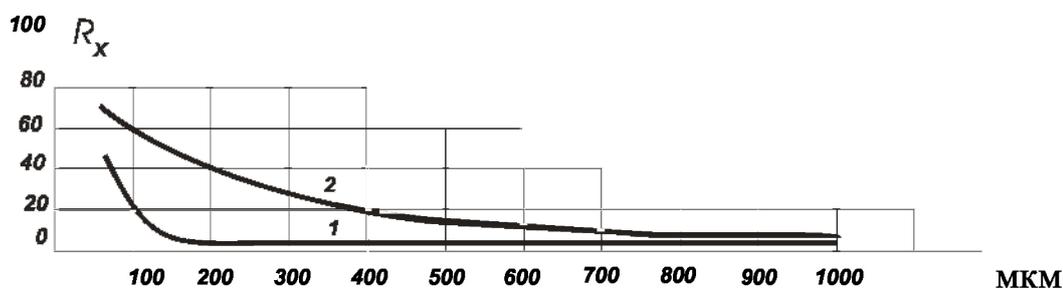


Рис. 3.1. Неполная зерновая характеристика угольной пыли:  
1—грубый помол; 2 – тонкий помол

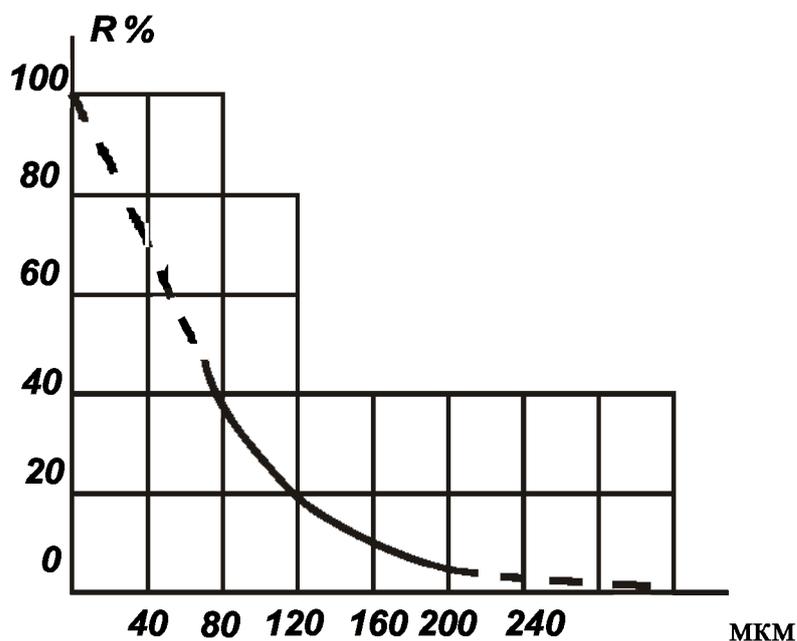


Рис. 3.2. Полная зерновая характеристика угольной пыли

Зерновые характеристики можно построить по величине остатка на каком-либо сите, например  $R_{88}$ , по уравнению

$$R_x = 100e^{-bx^n}, \quad (3.2)$$

где  $x$  – размер частиц (отверстий сита), мкм;

$b, n$  – постоянные коэффициенты:  $b$  отражает тонкость помола, а  $n$  – внутреннюю структуру пыли.

Рассев производится вручную или на рассевочных машинах.

### 3.2. Необходимые приборы и материалы

1. Машина для рассева пыли.
2. Набор сит с размером отверстий 200 и 88 мкм.
3. Весы лабораторные технические.
4. Баночки для взвешивания.
5. Угольная нить.

### 3.3. Описание установки

На рассевочной машине (рис. 3.3) сита вращаются по эксцентричной окружности и встряхиваются кулачками, бьющими по обечайкам сит. Имеется также ограничитель.

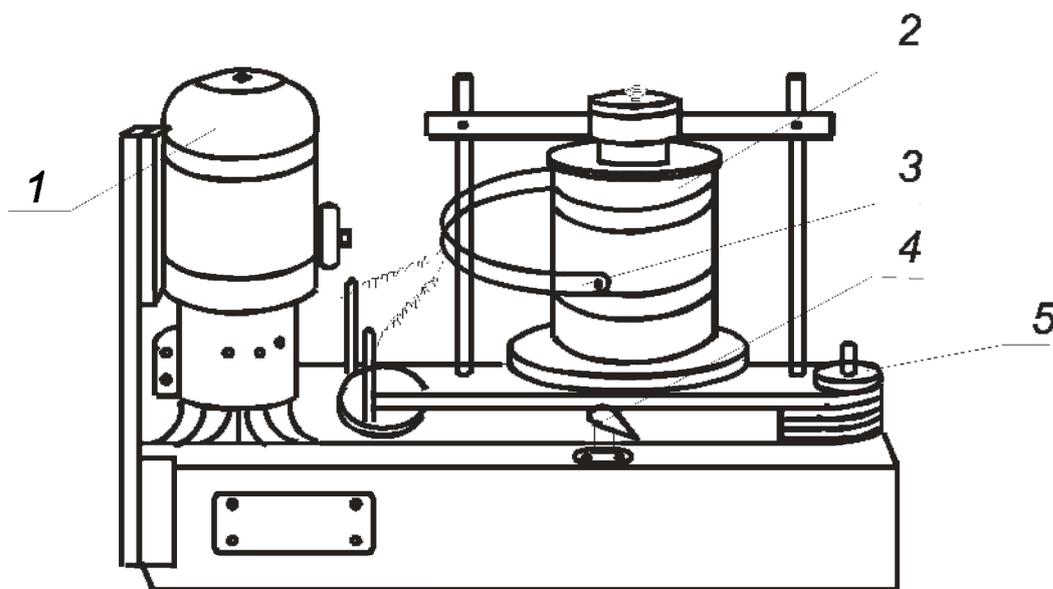


Рис. 3.3. Машина для рассева угольной пыли:

1 – электропривод; 2 – набор сит; 3 – кулачки; 4 – ограничитель; 5 – масленка

К машине прилагаются два сита (или большой набор) с размерами отверстий 200 мкм (верхнее) и 88 мкм (нижнее). Сита вставляются одно в другое. Сито 88 мкм замыкает "глухая" тара для сбора "дна".

### 3.4. Выполнение работы

На лабораторных технических весах взвешивают 50 г. воздушно-сухой угольной пыли. Вынимают набор сит из машины, высыпают угольную пыль на верхнее сито, закрывают крышкой и закрепляют

в машине. Включают машину и производят рассев в течение 15-20 мин. По истечении времени выключают машину и взвешивают остатки на ситах. Данные заносят в табл. 3.4.

Т а б л и ц а 3.4

Время рас- сева, мин	Полный остаток на сите 88 мкм		Полный остаток на сите 200 мкм	
	g <sub>88</sub> , Г	g <sub>88</sub> , %	g <sub>200</sub> , Г	R <sub>200</sub> , %

По вычисленным полным остаткам на ситах строят в первом приближении неполную зерновую характеристику. Полученные точки соединяют плавной кривой.

**Примечание.** Для большей точности производят две просевки: одна является основной, вторая – контрольной. Расхождение между ними не должно превышать 1 %.

### Контрольные вопросы

1. Чем обусловлена оптимальная тонкость помола различных видов твердого топлива?
2. Характеристика сит, применяемых в теплоэнергетике.
3. Определение полного остатка на сите и прошедшего через него топлива.
4. Неполная и полная зерновая характеристика.

## Лабораторная работа № 4

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЖИДКОГО ТОПЛИВА

#### 4.1. Определение содержания влаги жидкого топлива

##### 4.4.1. Общие сведения

Одной из физико-технических характеристик топочного мазута является содержание в нем влаги, которое должно быть не более 1,0 % для мазута марки М40 и не более 2,5 % для мазута М100 и М200. Однако топочный мазут может содержать и повышенное количество вла-

ги, достигающее до 6-8 %, из-за обводнения его при водных перевозках, а также при разогреве в цистерне паром. Сущность метода определения содержания влаги в жидком топливе заключается в выпаривании её из определённой навески топлива с последующей конденсацией.

#### **4.1.2. Необходимая аппаратура, реактивы, материалы**

При определении содержания влаги в топочном мазуте применяется следующая аппаратура, реактивы и материалы: весы лабораторные, аппарат для определения содержания влаги (рис. 4. 1), состоящий из колбы 1, приёмника-ловушки 2, холодильника 3, нагревателя 4; цилиндр измерительный, вместимостью 10 или 25 мл; палочка стеклянная с резиновым наконечником; растворитель- бензин марки БР-1; пемза или запаянные с одного конца стеклянные капилляры.

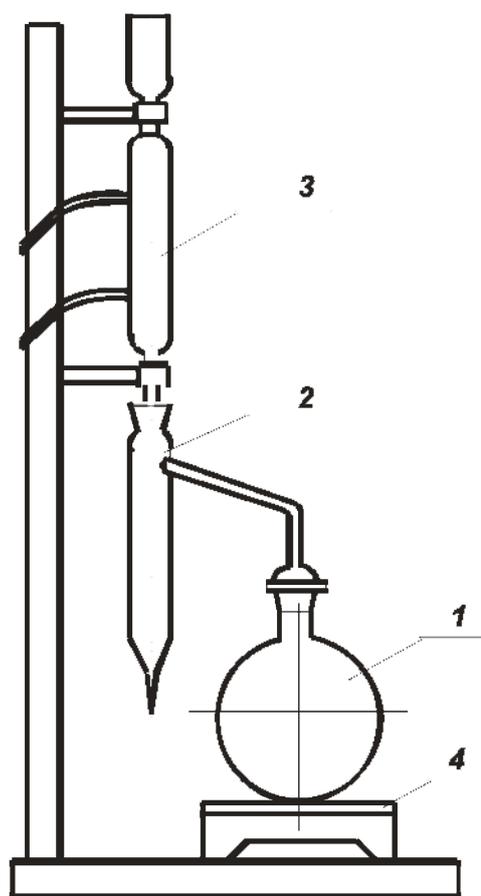


Рис. 4.1. Установка для определения содержания влаги:  
1 – колба; 2 – приёмник –ловушка; 3 –холодильник; 4 –нагреватель

### **4.1.3. Выполнение работы**

Пробу испытуемого мазута предварительно нагревают до 40-50°С, а затем перемешивают пятиминутным встряхиванием в склянке. В хорошо просушенную стеклянную колбу аппарата помещают навеску мазута, равную 250 г, затем цилиндром отмеривают 10 см<sup>3</sup> растворителя, наливают в колбу и тщательно перемешивают содержимое до полного растворения мазута, одновременно прибавляя в колбу несколько кусочков пемзы или несколько стеклянных капилляров. Растворитель добавляют для понижения температуры кипения, а кусочки пемзы или стеклянные капилляры – для того, чтобы избежать бурного кипения.

Колбу устанавливают на электроплитку 4 с закрытой спиралью, нагревают содержимое колбы до кипения и далее перегонку ведут так, чтобы из кососрезанного конца трубки холодильника 3 в приёмник-ловушку 2 падали 2-4 капли в секунду, что достигается изменением нагрева электрической плитки регулятором или кратковременным её отключением.

Перегонку прекращают, как только объём воды в приёмнике-ловушке не будет увеличиваться и верхний слой растворителя станет совершенно прозрачным. Время перегонки должно быть не менее 30 и не более 60 мин. Оставшиеся на стенках трубки холодильника капельки воды сталкивают в приёмник-ловушку стеклянной палочкой с резиновым наконечником.

После того как колба охладится, а растворитель и вода в приёмнике-ловушке примут комнатную температуру, аппарат разбирают и сталкивают стеклянной палочкой капельки воды со стенок приёмника-ловушки.

Если в приёмнике-ловушке собралось небольшое количество воды (до 0,3 см<sup>3</sup>) и растворитель мутен, то приёмник-ловушку помещают на 20-30 мин в горячую воду для осветления и снова охлаждают до комнатной температуры. Затем записывают объём воды, собравшейся в приёмнике-ловушке, с точностью до одного верхнего деления занимаемой водой части приёмника-ловушки. Результаты взвешиваний и замеров заносят в табл. 4.1.

Т а б л и ц а 4.1

Вес пустой колбы, G, г	Вес колбы с навеской мазута G <sub>1</sub> , г	Навеска мазута G <sub>2</sub> , г	Объём воды в приёмнике-ловушке, мл
------------------------	--	-----------------------------------	------------------------------------

#### 4.1.4. Вычисление результатов работы

Содержание влаги в весовых процентах ( $W_{\text{вес}}$ ) вычисляется по формуле

$$W_{\text{вес}} = \frac{\rho v 100}{G_2}, \%, \quad (4.1)$$

где  $v$  – объём воды в приёмнике-ловушке в мл;

$\rho$  – удельный вес воды, равный 1 г/мл;

$G_2$  – навеска мазута, взятая для опыта,  $G_2 = G_1 - G$ , г.

Количество воды в приёмнике-ловушке 0,03 мл и менее считается следами. Результаты работы заносят в табл. 4.2.

Т а б л и ц а 4.2

Влага испытуемого мазута, %	Влага мазута по справочным данным, %
$W_{\text{вес}}$	$W_{\text{сп}}$

### Контрольные вопросы

1. Влага топочного мазута.
2. Порядок определения влаги мазута.

## 4.2. Определение условной вязкости жидкого топлива

### 4.2.1. Общие сведения

Вязкость нефти и главным образом мазута определяет возможность транспортирования их по трубопроводам, а также распыления при сжигании: чем выше вязкость топлива, тем труднее перекачи-

вать и расплыть его. Вязкость нефти, нефтепродуктов и мазута выражают в единицах условной вязкости ВУ.

Условной вязкостью называют отношение времени истечения из вискозиметра типа ВУ 200 мл испытуемого нефтепродукта при температуре испытания ко времени истечения 200 мл дистиллированной воды при температуре 20°C, являющемуся постоянной (водным числом) прибора. Величина этого отношения выражается как число условных градусов. Условная вязкость при температуре  $t$  обозначается сокращённо  $VУ_t$ .

Определение условной вязкости нефтепродуктов осуществляется в вискозиметре типа ВУ.

#### 4.2.2. Необходимая аппаратура, реактивы и материалы

При проведении опыта по определению условной вязкости жидкого топлива необходимы следующие аппаратура, реактивы и материалы: вискозиметр типа ВУ по ГОСТ 1532-54 (рис.4.2), стеклянная палочка длиной 150-250 мм диаметром 3-5 мм с оплавленными концами, этиловый эфир, бензин легкий прямой перегонки Б-70, вода дистиллированная, бумага фильтровальная.

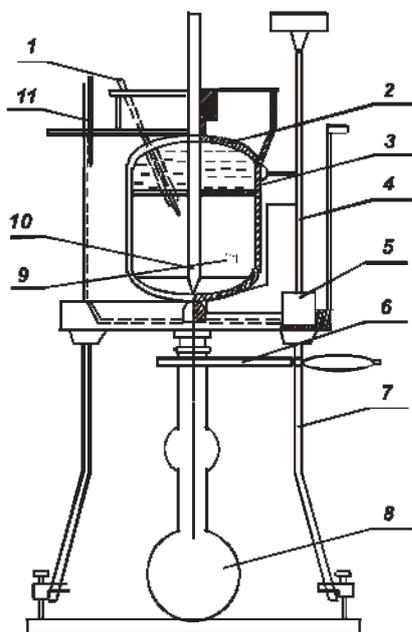


Рис. 4.2. Вискозиметр типа ВУ для определения условной вязкости:  
1, 11 – термометры; 2 – крышка; 3 – резервуар для испытуемого топлива;  
4 – резервуар внешний; 5 – мешалка; 6 – нагреватель; 7 – треножник; 8 – колба;  
9 – штифты-показатели уровня; 10 – запорный деревянный стержень.

### 4.2.3. Выполнение работы

**1. Определение постоянной (водного числа) вискозиметра.** Постоянной (водным числом) вискозиметра типа ВУ называют время истечения из него 200 мл дистиллированной воды при температуре 20 °С.

Перед определением водного числа внутренний резервуар вискозиметра промывают этиловым спиртом, дистиллированной водой и высушивают на воздухе. Затем вискозиметр вставляют ножками в прорези треножника и закрепляют зажимными винтами. В верхнее отверстие сточной трубки вставляют чистый сухой стержень.

Во внутренний резервуар вискозиметра наливают профильтрованную дистиллированную воду, имеющую температуру 20 °С, до уровня, при котором вершины трех штифтов едва лишь выдаются над зеркальной поверхностью воды.

Водой такой же температуры заполняют и ванну вискозиметра до расширенной верхней части внутреннего резервуара.

Положение вискозиметра, при котором все три штифта, указывающие высоту налива, находятся в одной горизонтальной плоскости, достигается вращением установочных винтов треножника.

Воду во внутреннем резервуаре перемешивают вращением вокруг стержня крышки с вставленным в нее термометром, а в водяной ванне - крыльчаткой мешалки.

Убедившись, что температура воды в обоих резервуарах равна 20 °С, а уровень воды во внутреннем резервуаре установлен строго горизонтально так, что вершины всех трех штифтов лишь едва заметно выделяются над его поверхностью, приподнимают коротким движением стержень, пуская одновременно в ход секундомер (стержень удерживается автоматически в приподнятом положении), и наблюдают вытекание воды из резервуара, улавливая момент, когда нижний край мениска достигнет кольцевой метки на колбе, соответствующей вместимости 200 мл. В этот момент останавливают секундомер.

Определение времени истечения 200 мл дистиллированной воды производят два раза. Среднее арифметическое двух результатов и выражает искомое водное число данного прибора, которое обозначается  $t_{20}^{H_2O}$ .

**2. Определение условной вязкости жидкого топлива.** Испытуемое жидкое топливо перед определением вязкости обезвоживают.

Обезвоживание топочного мазута производят следующим образом: сначала испытуемый мазут подогревают до  $50^{\circ}\text{C}$ , а затем фильтруют через слой крупнокристаллической свежeproкаленной поваренной соли. Для этого в обыкновенную воронку вкладывают проволочную сетку или немного ваты и сверху насыпают соль. Сильно обводненный мазут фильтруют последовательно через 2-3 воронки.

Перед каждым опытом внутренний резервуар вискозиметра и его сточную трубочку промывают чистым бензином и просушивают.

Сточное отверстие вискозиметра плотно закрывают стержнем и наполняют внутренний резервуар испытуемым топливом, предварительно подогретым несколько выше заданной температуры определения. Уровень налитого нефтепродукта должен быть немного выше штيفтов.

В ванну вискозиметра наливают воду, нагретую до температуры, несколько выше заданной температуры определения.

Для того чтобы во время опыта температура испытуемого жидкого топлива была одна и та же и соответствовала температуре определений, можно поступать следующим образом: температуру содержимого во внутреннем резервуаре доводят точно до заданной температуры, выдерживают ее в течение 5 мин с отклонением  $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ , замечают соответствующую температуру воды в ванне и поддерживают ее на этом уровне с точностью  $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$  во все время опыта, перемешивая содержимое ванны мешалкой и, если нужно, слегка подогревая горелкой или электрическим прибором.

Подняв немного стержень, дают стечь излишкам жидкости для того, чтобы все три штифта лишь едва заметно выдавались над ее уровнем. Затем вискозиметр закрывают крышкой и под сточное отверстие ставят сухую измерительную колбу. Жидкое топливо непрерывно перемешивают термометром, осторожно вращая вокруг стержня крышку прибора, в которую вставлен термометр. Когда термометр будет показывать точно заданную температуру определения, следует быстро вынуть стержень и одновременно включить секундомер. Когда испытуемое жидкое топливо в измерительной колбе дойдет точно до метки, соответствующей 200 мл (пена в расчет не принимается), секундомер останавливают и отсчитывают время истечения. Условную вязкость мазутов марок 40 и 100 определяют при температуре  $80^{\circ}\text{C}$ , а марки 200 - при  $100^{\circ}\text{C}$ .

#### 4.2.4. Вычисление результатов работы

Условную вязкость испытуемого жидкого топлива при температуре  $t$  ( $ВУ_t$ ) в условных градусах вычисляют по формуле

$$ВУ_t = \frac{\tau_t}{t_{20}^{H_2O}}, \quad (4.2)$$

где  $\tau_t$  - время истечения из вискозиметра 200 мл испытуемого жидкого топлива при температуре испытания в секундах;

$t_{20}^{H_2O}$  - водное число вискозиметра в секундах.

Результаты работ заносятся в табл. 4.3.

Т а б л и ц а 4.3

$t_{20}^{H_2O}$ , с	$\tau_t$ , с	$ВУ_t$ , условн. град.	Справочное значение условн. град. $ВУ_t^c$
---------------------	--------------	------------------------	--

#### Контрольные вопросы

1. Какая вязкость жидкого топлива называется условной?
2. Водное число вискозиметра, его определение.
3. Тип и устройство прибора для определения условной вязкости мазута.
4. Методика определения условной вязкости мазута.
5. Влияние вязкости мазута на процесс горения в топке котла.

#### 4.3. Определение температуры вспышки жидкого топлива

##### 4.3.1. Общие сведения

Температура вспышки определяет воспламеняемость жидкого топлива при сгорании его в топке котлоагрегата, а также пожарную опасность, которую оно представляет. Температурой вспышки называют такую температуру испытуемого топочного мазута, нагреваемого в определенных лабораторных условиях, при которой пары

его образуют с окружающим воздухом смесь, вспыхивающую при поднесении к ней пламени. Определение температуры вспышки мазута осуществляют в открытом тигле прибора, состоящего из песочной бани с электрическим или газовым обогревом, фарфорового тигля и термометра, закрепленного в держателе штатива.

#### 4.3.2. Необходимая аппаратура и материалы

При проведении опыта применяется следующая аппаратура: прибор для определения температуры вспышки нефтепродуктов (рис.4.3) , щит высотой 500 мм из листовой кровельной стали , окрашенный с внутренней стороны черной краской для защиты прибора от воздействия воздуха.

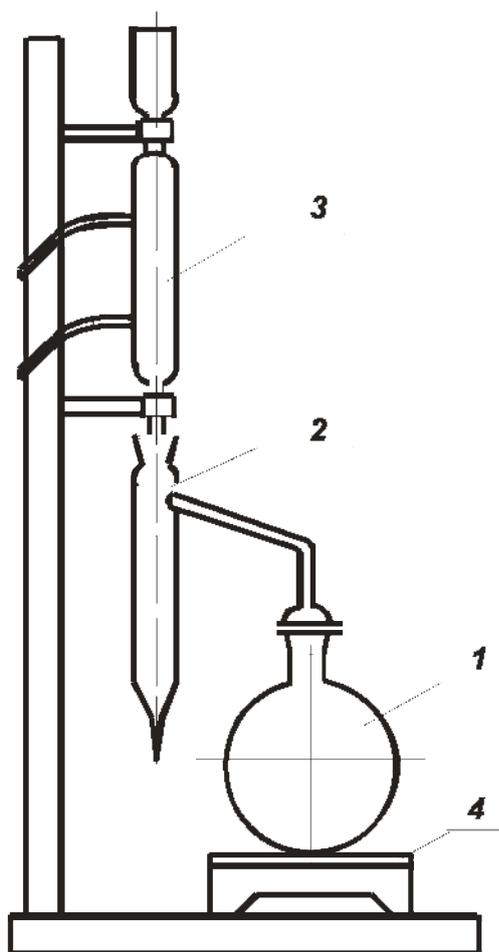


Рис. 4.3. Прибор для определения температуры вспышки:  
1 – термометр; 2 – песочная баня; 3 – нагреватель; 4 – тигель

### 4.3.2. Выполнение работы

Испытуемый мазут в случае содержания в нём воды более 0,1 % перед определением температуры вспышки обезвоживают.

После обезвоживания берут для испытания верхний слой мазута. Испытуемый мазут наливают в чистый сухой фарфоровый тигель 4 так, чтобы уровень жидкости отстоял от края тигля на 12 мм. Тигель с содержимым ставят в песочную баню, предварительно нагретую до температуры 150-170°C, при этом песок должен быть на высоте около 10 мм от края тигля. При налипании не допускается разбрызгивание мазута и смачивание стенок тигля выше уровня жидкости.

Замер температуры мазута производят термометром 1, установленным в строго вертикальном положении и закрепленным в держателе так, чтобы ртутный шарик находился в центре тигля приблизительно на одинаковом расстоянии от дна тигля и уровня топлива. Собранный прибор ограждают щитом.

За 10°C до ожидаемой температуры вспышки проводят медленно по краю тигля на расстоянии 10-14 мм от поверхности испытуемого мазута открытым пламенем. Время продвижения пламени от одной стороны тигля до другой 2-3 с.

Такое испытание повторяют через 2°C подъема температуры. За температуру вспышки принимают температуру, показываемую термометром при появлении первого синего пламени над частью или над всей поверхностью испытуемого мазута.

В случае появления неясной вспышки опыт должен быть подтвержден последующей вспышкой при повышении температуры мазута на 2°C. Для получения достоверных результатов рекомендуется проводить два опыта параллельно или последовательно.

Расхождение между двумя опытами при определении температуры вспышки не должно превышать следующих величин:

температура вспышки t в °C	допускаемое расхождение Δt в °C
до 150	4
свыше 150	6

Результаты работы заносятся в табл. 4.4.

№ опыта	Температура вспышки $t$ в °С	Температура вспышки по справочным данным °С

### Контрольные вопросы

1. Какая температура называется температурой вспышки мазута.
2. Порядок определения температуры вспышки мазута.
3. Значение величины вспышки мазута в условиях эксплуатации котлоагрегатов.

## ГАЗОВЫЙ АНАЛИЗ

### Лабораторная работа № 5

### АНАЛИЗ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ГАЗОАНАЛИЗАТОРА ГХП (КГА-1)

#### 5.1. Общие сведения

Действие химического переносного газоанализатора основано на принципе поглощения реактивами из продуктов сгорания искомого компонента количество которого определяется путем замера объемов пробы газа. Время анализа - 5...8 мин. Погрешность определения компонентов по объему составляет  $\pm 0,1$  %.

Для поглощения трехатомных газов ( $RO_2$ ) применяется 35-процентный водный раствор едкого кали (КОН). На одну заправку ГХП-3М (КГА-1) требуется  $200 \text{ см}^3$  раствора. Для этого 70 г едкого кали (КОН) засыпают в термостойкую посуду и доливают дистиллированную воду до  $200 \text{ см}^3$ . Так как реакция растворения щелочи экзотермическая, раствор непрерывно перемешивают. Хранить раствор едкого кали необходимо в плотно закрытой стеклянной посуде.  $1 \text{ см}^3$  раствора КОН поглощает  $94 \text{ см}^3$  углекислого газа  $CO_2$ . Этот реактив поглощает и другие трехатомные газы, такие как сероводород  $H_2 S$ , двуокись серы  $SO_2$  и т.п.

Поглощение  $\text{CO}_2$  и  $\text{SO}_2$  происходит по уравнениям



При насыщении раствора едкого кали углекислым газом из него выпадают кристаллы солей калия, что указывает на необходимость замены раствора  $\text{KOH}$  на свежий.

Для поглощения кислорода применяют щелочной раствор пирогаллоловой кислоты  $[\text{C}_6\text{H}_3(\text{OH})_3]$ ,  $1 \text{ см}^3$  которого поглощает  $8..12 \text{ см}^3$  кислорода ( $\text{O}_2$ ). Для приготовления раствора берут 22 г порошка пирогаллоловой кислоты, растворяют в  $3..5 \text{ см}^3$  дистиллированной воды и доливают до  $200 \text{ см}^3$  30-процентный водный раствор едкого кали ( $\text{KOH}$ ). Больше количество воды брать не следует, так как при этом из реактива будет более интенсивно выделяться  $\text{CO}$ .

Поскольку кислород при  $0^\circ\text{C}$  почти не поглощается, температуру реактива следует поддерживать не ниже  $15^\circ\text{C}$ . В связи с тем что щелочной раствор пирогаллоловой кислоты активно поглощает трехатомные газы с целью избежания погрешностей измерения, первоначально определяют содержание  $\text{RO}_2$ , а затем испытуемую пробу газов перемещают в сосуд для поглощения  $\text{O}_2$ .

Следует отметить, что состав и качество реактивов и материалов, применяемых для заправки химических газоанализаторов, оказывают существенное влияние на результаты анализа состава газов.

Третий сосуд для поглощения окиси углерода  $\text{CO}$  обычно не устанавливают, так как приготовление поглотителя окиси углерода – сернокислого раствора закиси меди с бета-нафтолом – трудоемко, а точность определения невелика.

Для осуществления манипуляций с испытуемой пробой газов ее перемещением, применяют запирающую жидкость, основным требованием к которой является как можно меньшая растворимость газов в ней. В качестве запирающей жидкости применяют насыщенный водный раствор хлористого натрия  $\text{NaCl}$ , подкисленного серной кислотой.

Для получения подкисленной воды добавляют к  $90 \text{ см}^3$  дистиллированной воды  $10 \text{ см}^3$  серной кислоты и затем  $5..8$  капель 1-процентного спиртового раствора фенолфталеина или раствора мети-

лоранжа (1 г на 1 л воды). Последние служат в качестве индикаторов кислотности раствора. В подкисленной воде фенолфталеин бесцветен, а метилоранж дает красную окраску. Если в воду попадает щёлочь (при неправильных действиях испытателя) в количестве, которое сообщает ей следы щелочной реакции, то фенолфталеин окрашивает воду в красный цвет, а метилоранж - в желтый. Испорченную запирающую жидкость при этом следует поменять.

Растворимость газов в запирающей жидкости не удастся полностью устранить даже в случае применения специальных растворов. Возможен и обратный процесс, т.е. выделение газов из запирающей жидкости в испытываемую пробу, если в ней содержание того или иного газа незначительно. Ошибки, зависящие от растворимости газов, могут быть устранены только при использовании в качестве запирающей жидкости ртути, что в лабораторных условиях неприемлемо, поскольку пары ртути ядовиты.

При работе с газоанализатором необходимо производить смазку пробковых кранов, которые "прикипают" из-за кристаллизации реактивов на их рабочей поверхности, и при повороте такого крана происходит поломка капиллярных трубок, отходящих от крана.

Смазку на сухую поверхность стеклянных кранов необходимо наносить легкими движениями по образующей.

В качестве смазки можно использовать вазелин, легкие масла или специально приготовленную смазку.

## **5.2. Устройство и порядок проведения опыта с помощью газоанализатора типа ГХП-3М (КГА-1)**

Газоанализатор (рис.5.1) состоит из двух поглотительных сосудов 7, 8; измерительной бюретки 4, соединительной гребенки 5, напорного сосуда 1, трехходового крана 6, резиновой груши-насоса 2 и фильтра 9.

Каждый поглотительный сосуд состоит из двух цилиндрических сосудов большего и меньшего диаметров. Меньший сосуд соединяется резиновой трубкой через кран с гребенкой, больший сосуд закрыт пробкой и резиновым мешочком для предохранения реактивов от соприкосновения с воздухом. Для увеличения поверхности соприкосновения с газом поглощающего реактива и ускорения процесса поглощения в меньший сосуд помещают также стеклянные трубочки.

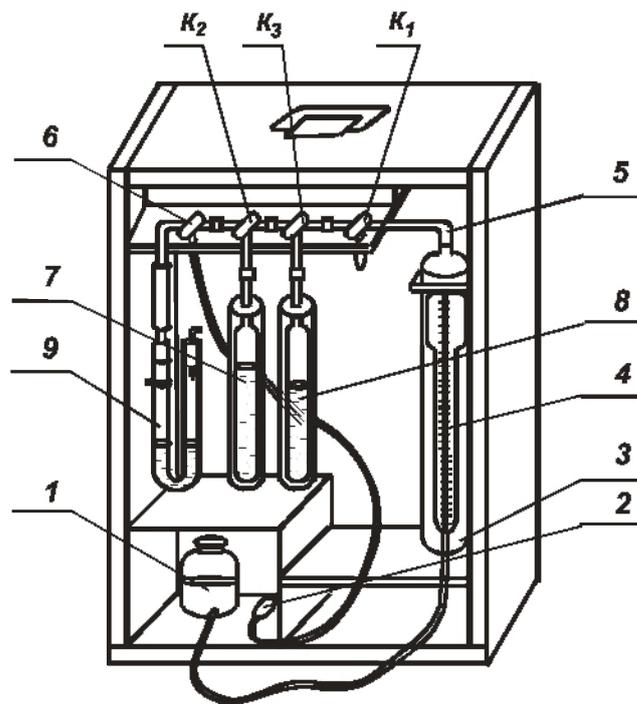


Рис. 5.1. Общий вид газоанализатора ГХП-3М

Гребенка правым концом присоединяется к измерительной бюретке 4, левым концом через фильтр 9 сообщается с газоотборной трубкой. К отростку от трехходового крана 6 (рис. 5.2) подключается для продувки газоотборной трубки и гребенки резиновая груша - насос 2 (см. рис. 5.1). Кранами  $K_1$ - $K_3$  гребенка соединяется с воздухом и поглотительными сосудами.

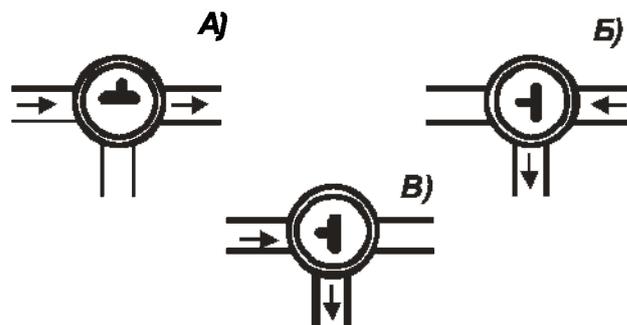


Рис. 5.2. Положение трехходового крана 6

Измерительная бюретка 4 емкостью  $100 \text{ см}^3$  помещена в стеклянный сосуд с водой 3, служащий для охлаждения пробы газа (водяная рубашка). В нижней части бюретки нанесены отметки "0" и "100", в верхней – "100" и "0".

### 5.3. Проведение анализа продуктов горения

Для получения правильных результатов необходимо обеспечить герметичность прибора и газоподводящей линии, плотно соединяя их части резиновыми трубками и смазывая краны прибора. Для проверки плотности производят следующее:

1. Краны  $K_2$  и  $K_3$  устанавливают в положение, аналогичное А (см. рис. 5.2).

2. Из напорного сосуда 1 заполняют бюретку 4 жидкостью до отметки "100" и устанавливают трехходовой кран 6 в положение В (см. рис. 5.2).

3. Опускают напорный сосуд и наблюдают за положением уровня в поглотительных сосудах и бюретке.

Если в течение 5-10 мин положение указанных уровней останется неизменным, то газоанализатор считается герметичным. Для проверки плотности газоподводящей линии последние отключают зажимом около установленной в газоходе парогенератора газоотборной трубки, соединяют прибор трехходовым краном (положение А) с газоподводящей линией и, опуская напорный сосуд, наблюдают за уровнем жидкости в бюретке, который должен в первый момент понизиться на 3-4 деления, а затем оставаться постоянным. Дальнейшее понижение уровня в бюретке свидетельствует о неплотности линии. Место повреждения находят посредством проверки отдельных ее участков.

Перед началом анализа газа необходимо поднять уровень реактивов в поглотительных сосудах до отметок на капиллярах под кранами. Для этого поглотительный сосуд, в котором производится поднятие уровня реактива, соединяют краном (при закрытых остальных кранах) с измерительной бюреткой, после чего медленным опусканием напорного сосуда создают в бюретке разрежение, под влиянием которого уровень реактива в поглотительном сосуде начинает подниматься. При подъеме уровня реактива до отметки на капилляре кран на поглотительном сосуде закрывают. После поднятия уровней в поглотительных сосудах сообщают измерительную бюретку краном  $K_1$  с атмосферой и поднимают напорный сосуд до тех пор, пока уровень воды в измерительной бюретке не достигнет верхней отметки 100. Кран  $K_1$  закрывают. Отключают прибор трехходовым краном 6 и производят продувку газоподводящей линии с помощью груши 2. После этого приступают к продувке соединительной гребенки 5, для чего ее подключают треххо-

довым краном 6 к газоподводящей линии и, опуская напорный сосуд, заполняют бюретку газом, который затем поднятием напорного сосуда 1 вытесняют через кран  $K_1$  в атмосферу.

Продувку гребенки повторяют 3-4 раза, после чего, поднимая напорный сосуд 1, заполняют измерительную бюретку 4 водой до верхней отметки «100» и, соединяя гребенку трехходовым краном 6 с газоподводящей линией, засасывают в бюретку пробу газа для анализа. При этом уровень жидкости в бюретке опускают немного ниже отметки «0» и отключают прибор трехходовым краном.

Пробу газа охлаждают в бюретке 0,5 - 1 мин., затем подъемом напорной склянки газ в бюретке сжимают настолько, чтобы жидкость установить на делении "0", быстро соединяют бюретку с атмосферой. После этого объем набранной пробы будет равен  $100 \text{ см}^3$ , что проверяется совмещением уровней жидкости в измерительной бюретке и напорном сосуде.

Анализ газа начинают с поглощения  $\text{RO}_2$ , для чего открывают кран  $K_2$  сосуда 7 и медленно перегоняют напорным сосудом пробу газа из бюретки в поглотительный сосуд. Газ, вытесняя реактив из меньшего сосуда в больший, омывает смоченные реактивом стеклянные трубочки, уменьшаясь в объеме за счет поглощения  $\text{RO}_2$  реактивом. Затем газ снова возвращают в бюретку и повторяют цикл его перемещения (прокачивания) из бюретки в поглотительный сосуд и обратно 5-6 раз.

После окончания поглощения  $\text{RO}_2$  подтягивают уровень реактива в сосуде 7 до отметки на капилляре, закрывают кран  $K_2$  и, совмещая уровни воды в напорном сосуде и бюретке, определяют по ее шкале уменьшение объема газа за счет поглощения  $\text{RO}_2$ . Вслед за этим производят еще одно контрольное перемещение пробы газа в поглотительный сосуд и обратно и снова определяют содержание трехатомных газов  $\text{RO}_2$ . Если результаты отсчетов совпадают, то определение содержания  $\text{RO}_2$  на этом заканчивается.

Таким же образом определяют содержание в газовой смеси кислорода, перемещая остаток пробы в поглотительный сосуд 8 через кран  $K_3$ . Отсчет по шкале бюретки после поглощения кислорода дает суммарное содержание в газовой смеси трехатомных газов и кислорода ( $\text{RO}_2 + \text{O}_2$ ). Оставшийся объем пробы характеризует примерное содержание азота ( $\text{N}_2$ ) в газовой смеси. Ввиду медленного поглощения реактивом кислорода перемещение газа в поглотительный сосуд 8 повторяют 8-10 раз.

При необходимости определения содержания в дымовых газах водорода, окиси углерода, метана медицинским шприцем отбирают пробу газа после газоанализатора ГХП-3М на хроматограф. Остаток газа вытесняют в атмосферу. Данные анализа газа заносят в табл. 5.1.

Т а б л и ц а 5.1

Количество газа, взятого на анализ, см <sup>3</sup>	Содержание трёхатомных газов RO <sub>2</sub> , %	Содержание кислорода O <sub>2</sub> , %	Коэффициент избытка воздуха
100			
100			
100			

#### 5.4. Вычисление результатов работы

По данным определения содержания компонентов в сухих продуктах горения производят проверку правильности газового анализа.

Количество кислорода, которое содержится в сухих продуктах горения, можно определить по формуле

$$O_2' = \frac{100 \cdot (RO_2^{max} - RO_2)}{4,76 \cdot RO_2^{max}} \quad ,\% \quad (5.3)$$

где 4,76 - объем воздуха, содержащий 1 нм<sup>3</sup> кислорода;

RO<sub>2</sub><sup>max</sup> - максимально возможное содержание трехатомных газов в сухих продуктах горения (табл.5.2)

Т а б л и ц а 5.2

Вид топлива	RO <sub>2</sub> <sup>max</sup> , %
Природный газ (тюменский)	11,8
Природный газ других месторождений	11,8±0,2
Мазут	15,9
Торф	19,6
Сланцы	18
Бурые угли	19,4...19,1
Каменные угли:	
Д, Г	18,7...18,6
Ж, ПЖ	18,6...18,8
Т	18,8...19,0
Полуантрацит	19,4...19,2
Антрацит	19,5...20,1

Полученное по газовому анализу содержание кислорода, значительно большее расчетного ( $O_2 \gg O_2'$ ), свидетельствует о неточности анализа.

Если полученная по анализу величина содержания кислорода значительно меньше расчетной ( $O_2 \ll O_2'$ ), то это свидетельствует о наличии химической неполноты горения.

Для топлив с незначительным содержанием водорода, для которых в продуктах неполного горения содержится из горючих компонентов практически только окись углерода (CO), количество последнего можно определить по формуле

$$CO = \frac{100 \cdot (RO_2^{max} - RO_2) - 4,76 \cdot RO_2^{max} \cdot O_2}{100 - 4,76 \cdot 0,4 \cdot RO_2^{max}}, \% \quad (5.4)$$

где  $RO_2$ ,  $O_2$  - содержание трехатомных газов и кислорода в сухих продуктах горения, %;

4,76 - объем воздуха, содержащий 1 нм<sup>3</sup> кислорода;

0,4 - объем кислорода, необходимый для полного сгорания 1 нм<sup>3</sup> окиси углерода (с учётом дожигания окиси углерода продуктов горения).

Остальные горючие компоненты продуктов горения (водород, метан) определяют только на других видах газоанализаторов.

Совершенство процесса горения характеризует коэффициент избытка воздуха  $\alpha$ , который можно вычислить следующими способами:

1. По «азотной» формуле:

$$\alpha = \frac{N_2}{N_2 - 3,76 \cdot O_2}, \quad (5.5)$$

где  $N_2, O_2$  - содержание азота и кислорода в сухих продуктах горения, %;

$3,76 \approx \frac{79}{21}$  - отношение процентного содержания азота и кислорода в воздухе (по объёму), %.

2. По «углекислотной» формуле:

$$\alpha = \frac{RO_2^{\max}}{RO_2}. \quad (5.6)$$

3. По «кислородной» формуле:

$$\alpha = \frac{21}{21 - O_2}. \quad (5.7)$$

Содержание кислорода в продуктах горения является наиболее стабильной величиной, почти не зависящей от состава и вида сжигаемого топлива. Поэтому при сжигании твердого топлива рекомендуют контролировать величину избытка воздуха по "кислородной" формуле.

В случае сжигания топлив со значительным содержанием газового балласта и "кислородная" формула не дает достаточно точных результатов.

Относительная погрешность определения избытка воздуха по данным газового анализа оценивается в среднем  $\delta_\alpha = \pm 3,5\%$ .

### **Контрольные вопросы**

1. Цель определения состава продуктов горения.
2. Приборы для анализа продуктов горения.
3. Устройство газоанализатора типа ГХП-3М (КГА-1) и рабочие химические реактивы.
4. Проверка газоздушная линия и прибора на плотность.
5. Проведение анализа продуктов горения на ГХП-3М (КГА-1)
6. Определение коэффициента избытка воздуха.

### **Лабораторная работа № 6**

#### **АНАЛИЗ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ГАЗОАНАЛИЗАТОРА TESTO 300XL**

Действие газоанализатора основано на способности измерительных ячеек прибора преобразовать концентрацию входящих в дымовые газы составляющих в электрический сигнал.

## 6.1. Технические данные прибора

1. Измерение температуры	
– диапазон измерения, °С	-40...+1200
– погрешность, %	±0,5
– разрешающая способность, °С	0,1
2. Измерение O <sub>2</sub>	
– диапазон измерения, %	0...21
– погрешность, %	±0,2
– разрешающая способность, °С	0,1
3. Измерение CO <sub>2</sub>	
– диапазон измерения, %	0 – CO <sub>2</sub> <sup>max</sup>
– погрешность, %	±0,2
– разрешающая способность, °С	0,01
4. Измерение CO	
– диапазон измерения, ППМ	0 – 8000
– погрешность, ППМ	±20
5. Расчет КПД установки	
– диапазон измерения, %	0...120
– разрешающая способность, %	0,1
6. Потери тепла	
– диапазон измерения, %	0...99,9
– разрешающая способность, %	0,1
7. Рабочая температура прибора, °С +4...45	

В комплект прибора входят

- прибор Testo300XL
- компактный зонд с термопарой, длиной 300 мм
- блок питания
- зарядное устройство
- блок осушки
- инфракрасный принтер

Внешний вид прибора показан на рис. 6.1.

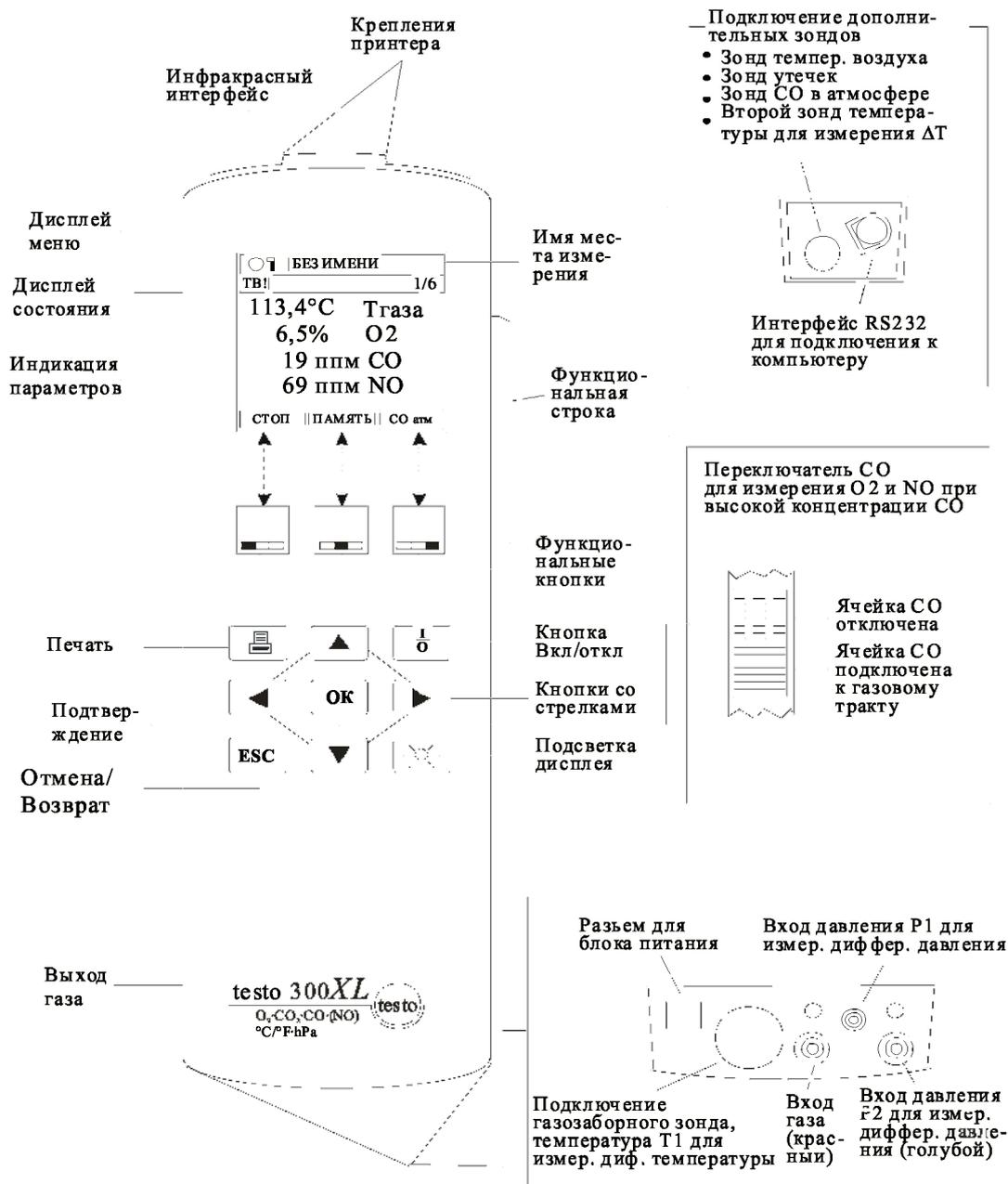


Рис. 6.1. Внешний вид прибора

## 6.2. Проведение анализа с помощью прибора

1. Извлечь прибор, зонд и блок осушителя из чехла.
2. Подключить зонд к прибору в соответствии с маркировкой зонда и прибора.

### 3. Включить питание прибора.

Далее действовать в соответствии с рис. 6.2, причем после пункта 4 необходимо ввести зонд в газоход котла. После выполнения анализа зонд извлечь из газохода. Но включить питание можно только после продувки прибора чистым воздухом, т.е. пока на табло прибора не установится  $O_2 = 21\%$ .

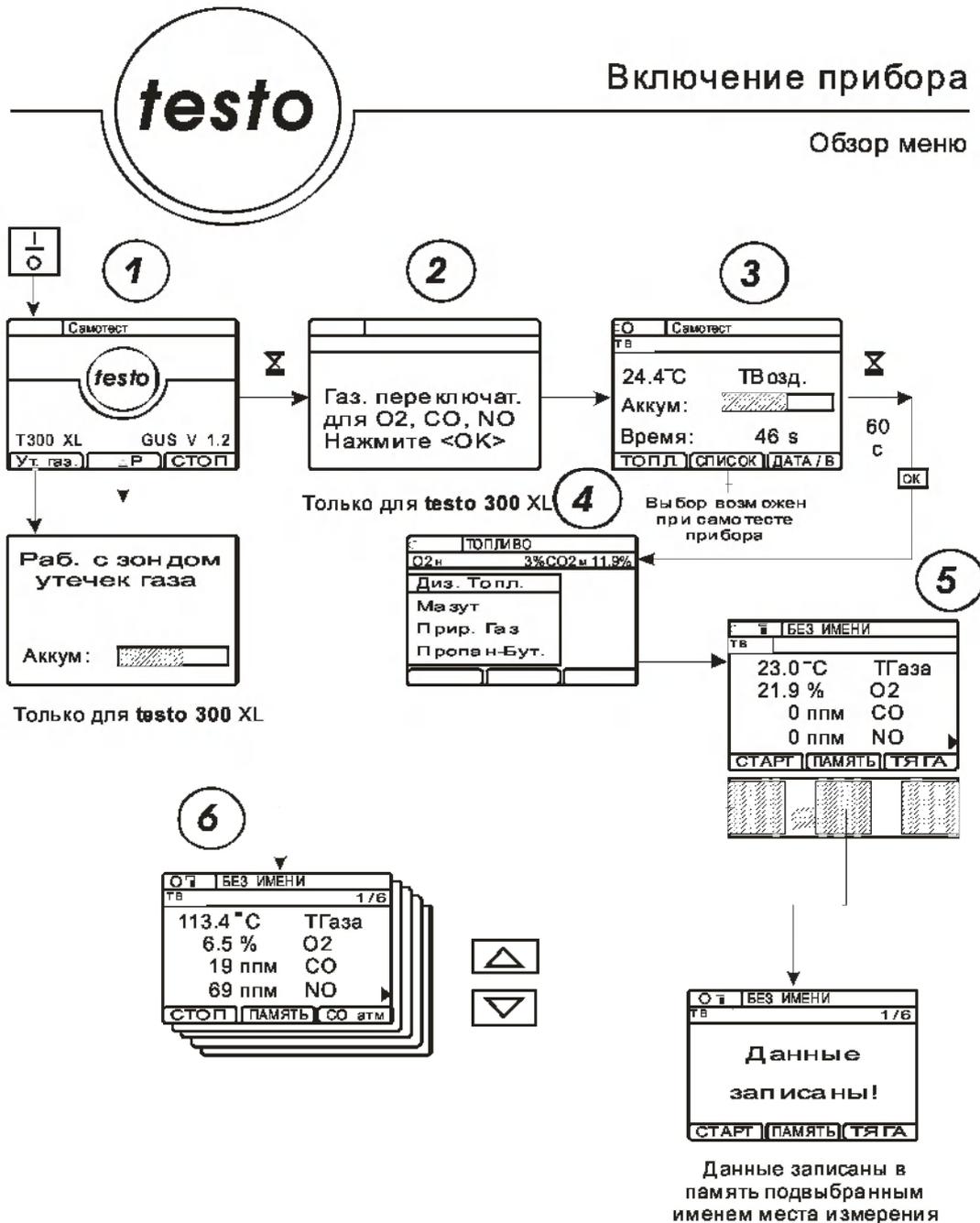


Рис 6.2. Включение прибора

Прибор имеет много дополнительных функций, освоить которые можно после внимательного изучения инструкции по эксплуатации.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие компоненты определяются с помощью прибора?
2. Принцип действия газоанализатора.

Учебное издание

**ТОПЛИВО И ГАЗОВЫЙ АНАЛИЗ**

**ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ (ПРАКТИКУМ)**

по дисциплинам  
«Парогенераторы ТЭС»,  
«Котельные установки промышленных предприятий»,  
«Теплогенерирующие установки»

для студентов специальностей:

1-43 01 04 «Тепловые электрические станции»,

1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика»,

1-53 01 04 «Автоматизация и управление  
энергетическими процессами»,

1-70 04 02 «Теплогазоснабжение, вентиляция и  
охрана воздушного бассейна».

Составители: **КАРНИЦКИЙ Николай Борисович**  
**РУДЕНКОВ Борис Максимович**  
**ЖИХАР Георгий Иосифович**  
**ВЕРЕМЕЙЧИК Елена Григорьевна**

Редактор **Е.И. Кортель**. Корректор **М.П. Антонова**  
**Компьютерная верстка Е.А. Занкевич**

---

Подписано в печать .0.2005.

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 3,1. Уч.-изд. л. 2,4. Тираж 200. Заказ 585.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

ЛИ № 02330/0056957 от 01.04.2004.

220013, Минск, проспект Ф.Скорины, 65.