

Департамент внутренней и кадровой политики Белгородской области  
Областное государственное автономное профессиональное образовательное учреждение  
«Белгородский индустриальный колледж»

Рассмотрено цикловой комиссией  
«Теплотехники и сварочного производства»  
ОГАПОУ «Белгородский индустриальный колледж»  
Протокол заседания № 2 от «12» сентября 2020 г.  
Председатель цикловой комиссии

 / Кобченко А.В. /

**Учебно-методическое пособие  
для выполнения лабораторных работ  
по профессиональному модулю**

**ПМ.01 Эксплуатация теплотехнического оборудования и систем  
тепло- и топливоснабжения**

**МДК 01.01 Эксплуатация, расчет и выбор теплотехнического  
оборудования и оборудования систем тепло- и топливоснабжения**

**Раздел 1. Котельные установки**

**Тема 1. Тепловой баланс котельной установки**

**по специальности СПО**

**13.02.02 Теплоснабжение и теплотехническое оборудование**

Разработчики: Кобченко А.В., Топоркова А.А.  
Преподаватели специальных дисциплин  
ОГАПОУ «Белгородский индустриальный колледж»

## СОДЕРЖАНИЕ

Пояснительная записка.....	3
Лабораторная работа № 1. Определение элементарного состава топлива.....	5
Лабораторная работа № 2. Определение теплоты сгорания и приведенных характеристик топлива.....	10
Лабораторная работа № 3. Определение объемов воздуха и продуктов сгорания при сжигании топлив.....	13
Лабораторная работа № 4. Определение энтальпии уходящих дымовых газов..	19
Лабораторная работа № 5. Определение тепловых потерь и КПД котла.....	23
Лабораторная работа № 6. Единицы измерения. Линейная интерполяция.....	25
Лабораторная работа № 7. Изучение конструкций слоевых топок по чертежам.	32
Лабораторная работа № 8. Изучение конструкций камерных топок по чертежам.....	42
Лабораторная работа № 9. Изучение конструкций пылеугольных горелок.....	49
Лабораторная работа № 10. Изучение конструкций мазутных форсунок.....	58
Лабораторная работа № 11. Изучение конструкций газовых горелок.....	66
Список используемых источников.....	78

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Практикум по профессиональному модулю ПМ.01 «Эксплуатация теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения» междисциплинарного курса МДК 01.01 «Эксплуатация, расчет и выбор теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения» раздела 1 «Котельные установки» предназначен для обучающихся по специальности СПО 13.02.02 «Теплоснабжение и теплотехническое оборудование» базовой подготовки.

При проведении лабораторных занятий преследуются три основные цели: возможность на практике убедиться в теоретических положениях; развитие творческого мышления (критическое осмысление результатов эксперимента); пробудить любознательность и воображение студента.

Основная цель методических указаний состоит в обеспечении студентов необходимыми сведениями, методиками и алгоритмами для успешного выполнения лабораторных работ, в формировании устойчивых навыков и умений по разным аспектам обучения, позволяющих решать учебные задачи, выполнять разнообразные задания, преодолевать наиболее трудные моменты в отдельных видах работ.

В результате выполнения лабораторных работ обучающиеся изучат классификацию, технические характеристики, особенности сжигания и эффективного использования органического энергетического топлива; технические характеристики, компоновки и конструкции современных паровых и водогрейных котлов, и их вспомогательного оборудования; сущность происходящих в них технологических процессов; смогут производить технологические расчеты паровых котлов и их вспомогательного оборудования, подбирать оборудование котельных установок.

Подготовке, выполнению и защите лабораторных работ, обработке и анализу полученных результатов студенты должны уделять самое серьезное внимание. Все этапы работы, связанные с лабораторными занятиями, отвечают определенным требованиям.

Подготовка к выполнению лабораторной работы должна включать в себя следующее:

- повторение соответствующего теоретического раздела курса по учебнику и конспекту лекций;
- тщательное изучение содержания работы по руководству и усвоение ее целевого назначения и программы;
- наличие журнала отчетов по лабораторным работам у каждого студента отдельно.

К выполнению лабораторных работ могут быть допущены студенты, прошедшие инструктаж по ТБ. Инструктаж проводится в учебной группе в начале семестра на первом лабораторном занятии. На этом же занятии студентов знакомят с основными требованиями, предъявляемыми к выполнению лабораторных работ и оформлению отчетов по ним. На последующих занятиях студенты обязаны придерживаться указаний преподавателя в отношении мер предосторожности.

Студенты допускаются к лабораторным занятиям, во-первых, только после представления преподавателю отчета по лабораторной работе, выполненной на предыдущем занятии, во-вторых, после того, как представлен каждым студентом журнал нового отчета. При этом студенты должны показать удовлетворительные знания при ответах на контрольные вопросы на допуск, составленные к данной лабораторной работе, знать порядок выполнения работы.

Лабораторная работа проводится в том порядке, какой изложен в методических указаниях. При выполнении работы результаты исследований записываются в заготовки отчета. Записи следует делать карандашом, так как при проведении эксперимента возможны неверные отсчеты, которые следует уточнить при повторном выполнении эксперимента или его части.

Содержание отчета должно включать в себя: цель работы, порядок выполнения, схемы, основные расчетные соотношения, таблицы данных наблюдений и расчетов, диаграммы и кривые, выводы по работе, представленные в виде письменных ответов на вопросы. Все таблицы, графики и диаграммы должны иметь заголовки, поясняющие зависимость, которую они характеризуют.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

«*Определение элементарного состава топлива*»

**Цель работы:** Научиться использовать коэффициенты пересчета масс топлива; по составу топлива делать вывод о качестве и типе топлива.

**Содержание отчета:**

1. Конспект по общим сведениям данной работы.
2. Выполненные общие и индивидуальные задания.
3. Вывод о типе и качестве топлива.

**Общие сведения:**

Органическая часть твердых и жидких топлив состоит из большого количества сложных химических соединений, в состав которых в основном входят пять химических элементов: углерод С, водород Н, кислород О, сера S и азот N. Кроме того, топливо содержит минеральные примеси А, попавшие в исходную залежь в основном извне, и влагу W.



Рисунок 1.1 – Схема классификации состава твердого топлива

Поэтому химический состав твердых и жидких топлив определяют не по количеству соединений, а по суммарной массе химических элементов в топливе в процентах от 1 кг, т.е. устанавливают элементарный состав топлива. Состав твердого и жидкого топлива выражают в % по массе, а газообразного в % по объему.

В топливе различают органическую, сухую, рабочую, аналитическую массу.

1. *Органическая масса* – та часть топлива, которая произошла от органических веществ. Она включает в себя:

$$H^O + O^O + C^O + S^O + N^O = 100\%$$

2. *Горючая масса* близка по составу к органической, но отличается наличием колчеданной (пиритной) серы, входящей в состав сернистого колчедана ( $FeS_2$ ).

$$H^G + O^G + C^G + S_{O+K}^G + N^G = 100\%$$

3. *Сухая масса* состоит из горючих компонентов и минеральных веществ, образующих при сгорании золу.

$$H^C + O^C + C^C + S_{O+K}^C + N^C + A^C = 100\%$$

4. *Рабочая масса* состоит из сухой массы и влаги.

$$H^P + O^P + C^P + S_{O+K}^P + N^P + A^P + W^P = 100\%$$

Состав топлива в том виде, в каком оно поступает на ТЭС, выраженной совокупностью отдельных элементов и компонент (по массе твердого и жидкого топлива), называют рабочей массой.

5. Аналитическая масса состоит из сухой массы и влаги, соответствующей подсушиваемому топливу, сжигаемому в лаборатории.

Пересчет состава топлива с одной массы на другую производят с помощью коэффициентов (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Коэффициенты пересчета состава топлива

Заданная масса топлива	Искомая масса топлива		
	рабочая	сухая	горючая
Рабочая	1	$\frac{100}{100 - W^P}$	$\frac{100}{100 - W^P - A^P}$
Сухая	$\frac{100 - W^P}{100}$	1	$\frac{100}{100 - A^C}$
Горючая	$\frac{100 - W^P - A^P}{100}$	$\frac{100 - A^C}{100}$	1

Органическая масса отличается от горючей только отсутствием колчеданной серы. Кроме указанных двух видов серы, существует еще сульфатная сера  $S_c$ , которая входит в состав высших окислов (например,  $CaSO_4$ ) и дальнейшему окислению не подвергается. В составе топлива различают внешний балласт, состоящий из влаги и минеральной части, и внутренний балласт, входящий в исходное органическое вещество топлива. К нему относятся кислород и азот.

Топливо	$C^r, \%$	$O^r, \%$	$H^r, \%$	$V^r, \%$	$Q_{н}^r, \text{кДж/кг топлива}$	$Q_{л}^r, \text{кДж/кг летучих}$
	50	42	6	85	19000	17000
Древесина						
Торф						
Бурый уголь						
Каменный уголь						
Антрацит						
	93	2	2	4	34000	67000

Рисунок 1.2 – Изменение элементарного состава горючей массы и теплоты сгорания основных видов твердого топлива

Углерод и водород – самые ценные части топлива.

Углерод содержится в значительном количестве в топливе всех видов: древесине и торфе 50-58%, в бурых и каменных угля 65-80%, в тощих углях и антрацитах 90-95%, в сланцах 61-73% в мазуте 84-87% (цифры даны в процентах на горючую массу топлива). Чем больше углерода в топливе, тем больше топливо выделяет тепла при сгорании.

Состав рабочей массы топлива значительно зависит от величины балласта, поэтому чаще всего приводятся данные по составу горючей массы топлива, которая более стабильна для топлива каждого вида и месторождения.

*Водород* является второй важнейшей частью каждого топлива. В топливе водород частично находится в связанном с кислородом виде, составляя внутреннюю влагу топлива, вследствие чего понижается тепловая ценность топлива. Водород играет большую роль в образовании летучих веществ, выделяющихся при нагревании топлива без доступа воздуха. В состав летучих водород входит в чистом виде и в виде углеводородных и других органических соединений.

Содержание водорода в процентах от горючей массы топлива составляет: в дровах и торфе до 6, бурых каменных углях 3,8-5,8, горючих сланцах до 9,5, в антраците 2 и в мазуте 10,6-11,1.

*Кислород*, содержащийся в твердом топливе, является балластом. Не будучи теплообразующим элементом и связывая водород топлива, кислород снижает теплоту его сгорания. Содержание кислорода в органической массе топлива с его возрастом снижается с 41% для древесины до 2,2% для антрацита.

*Азот* также является балластной инертной составляющей твердого топлива, снижающей процентное содержание в нем горючих элементов. При сгорании топлива азот в продуктах сгорания содержится как в свободном виде, так и в виде окислов азота  $\text{NO}_x$ . Окислы азота относятся к вредным составляющим продуктов сгорания, количество которых должно быть лимитировано.

*Сера* содержится в твердом топливе в виде органических соединений  $S_0$  и колчедана  $S_k$ , объединяемых в летучую серу  $S_l$ . Кроме того, сера входит в состав топлива в виде сернистых солей – сульфатов (например, гипса  $\text{CaSO}_2$ ), не способных гореть. Сульфатную серу  $S_a$  принято относить к золе топлива.

Присутствие серы значительно снижает теплоту сгорания топлива, особенно высококалорийного, так как при сгорании 1 кг серы выделяется в среднем только 2600 калорий. Высокое содержание серы приводит к сильному загрязнению продуктов сгорания топлива сернистым ангидридом  $\text{SO}_2$ .

*Зола* топлива представляет собой балластную смесь различных минеральных веществ, остающихся после полного сгорания всей горючей части топлива. Зола топлива влияет на качество сгорания топлива отрицательно.

Различают три разновидности золы по ее происхождению: первичная – внутренняя, вторичная и третичная зола. Первичная зола образуется из минеральных веществ, содержащихся в растениях. Содержание ее в топливе незначительно и распределение равномерно. Вторичная зола получается вследствие заноса растительных остатков землей и песком в период пластообразования. Третичная зола попадает в топливо во время его добычи, хранения или транспортировки.

Зола является нежелательным балластом топлива, снижающим содержание в нем других горючих элементов. При этом, чем больше зольность топлива, тем значительней потери от механической неполноты сгорания топлива. С увеличением количества золы в топливе повышается и потеря с физическим теплом очаговых остатков.

Содержание золы в процентах от рабочей массы топлива составляет: в дровах 0,6, торфе 5-7, в бурых и каменных углях от 4 до 25, в мазуте 0,3.

*Влага топлива* складывается из внешней, или механической, вызванной поверхностным увлажнением кусков топлива и заполнением влагой пор и капилляров, и равновесной, называемой гигроскопической, которая устанавливается в материале при длительном соприкосновении с окружающим воздухом.

При влажности твердого топлива выше 60% сжигание его в большинстве случаев становится невозможным, так как количество выделенного топливом тепла не может нагреть продукты горения даже до температуры 900 °С, при которой еще возможен устойчивый топочный процесс. С увеличением влажности топлива уменьшается теплота сгорания рабочего топлива.

С увеличением влажности топлива объем водяных паров возрастает, а следовательно возрастает и объем газов, приходящихся на 1000 кал теплоты сгорания топлива. Увеличенный объем продуктов сгорания, проходящих по газоходам, вызывает увеличение температуры уходящих газов, а следовательно и большие потери с ними. Одновременно повышается и расход электрической энергии на тягу как в связи с возросшим объемом газов, так и в связи с ростом сопротивлений из-за увеличения скоростей в газоходах.

Кроме того, затрата тепла на испарение влаги топлива и увеличенный объем продуктов сгорания (при повышенной влажности) являются причиной снижения температуры в топке,

замедленного выделения летучих, весь топочный процесс ухудшается, и поэтому увеличиваются потери от химической неполноты сгорания.

Для оценки качества топлива и условий горения большое значение имеет выход летучих веществ. Если нагревать топливо без доступа воздуха, то под воздействием высокой температуры (от 200 до 800 °С) происходит разложение его на газообразную часть – летучие вещества (водород, метан, тяжелые углеводороды, окись углерода, немного двуокиси углерода и некоторые другие газы, т. е. в основном газообразные горючие вещества) и твердый остаток – кокс.

Выход летучих веществ, их состав, а также температура, при которой они начинают выделяться, определяются химическим возрастом топлива: чем топливо старше по возрасту, тем меньше выход летучих и выше температура начала их выделения. Например, выход летучих торфа составляет приблизительно 70% общей массы горючей части топлива, они начинают выделяться при 120- 150 °С; выход летучих бурых и молодых каменных углей уменьшается приблизительно от 13 до 58,5%, они начинают выделяться при 170- 250°С, а антрацита – до 4% при температуре начала выделения газов около 400 °С.

Летучие вещества оказывают большое влияние на процесс горения топлива: чем больше выход летучих, тем ниже температура воспламенения и легче зажигание топлива и тем больше поверхность фронта пламени. Топливо с большим выходом летучих легко загорается и сгорает быстро с малой потерей тепла. Топливо с малым выходом летучих загорается значительно труднее, горит медленнее и сгорает не полностью.

Газообразное топливо представляет собой простую механическую смесь горючих и негорючих газов. В горючую часть могут входить окись углерода (CO), водород (H<sub>2</sub>), метан (CH<sub>4</sub>), тяжелые углеводороды (C<sub>m</sub>H<sub>n</sub>), и иногда сероводород (H<sub>2</sub>S).

В негорючую часть могут входить кислород (O<sub>2</sub>), азот (N<sub>2</sub>) и двуокись углерода (CO<sub>2</sub>). В состав газообразного топлива, кроме того, входят и примеси – водяные пары, смолы, пыль и т.п.

Газообразное топливо принято характеризовать составом сухой газообразной части в % по объему. Содержание влаги определяет масса воды в единице объема сухого газа (W, г/м<sup>3</sup>). При анализе газообразного топлива влага не учитывается, поэтому сухое топливо пересчитывают на влажное

### Задание:

1. В соответствии с заданием таблицы 1.2 пересчитать массу топлива. По заданной массе топлива сделать вывод о качестве и типе топлива.

2. Известен состав топлива на горючую массу:  $C^G = 80,2\%$ ;  $H^G = 3,3\%$ ;  $S^G = 0,4\%$ ;  $N^G = 2,1\%$ ;  $O^G = 14\%$ . Зольность топлива на сухую массу  $A^C = 27,6\%$ . Определить элементарный состав на рабочую массу при влажности  $W^P = 8,0\%$ .

3. Уголь рабочей массы состава:  $C^P = 44,3\%$ ;  $H^P = 3,0\%$ ;  $S^P = 0,2\%$ ;  $N^P = 0,4\%$ ;  $O^P = 14,4\%$ ;  $A^P = 4,7\%$ ;  $W^P = 33\%$  подсушивают до влажности 10 %. Определить состав подсушенного топлива рабочей массы.

4. Определить состав горючей массы угля, если известен состав рабочей массы:  $C^P = 66,1\%$ ;  $H^P = 3,3\%$ ;  $S^P = 0,2\%$ ;  $N^P = 0,7\%$ ;  $O^P = 7,5\%$ ;  $A^P = 12,7\%$ ;  $W^P = 9,5\%$ .

Таблица 1.2 – Индивидуальные задания

№ варианта	Заданная масса топлива	Состав топлива							Искомая масса топлива
		C	H	S	N	O	A	W	
1	Рабочая	24,7	2,6	0,1	1,1	15,2	6,3	50	Горючая
2	Горючая	78,5	5,6	0,4	2,3	13,2	$A^c=9,5$	10,5	Сухая
3	Сухая	49,4	5,3	0,3	2,1	30,4	12,5	$W^P=48,5$	Рабочая
4	Рабочая	55,2	3,8	3,2	1,0	5,8	23	8	Сухая
5	Горючая	90,5	4,2	0,4	2	2,9	$A^c=16,5$	5,5	Рабочая
6	Сухая	87,6	11	0,4	0,85	-	0,15	$W^P=2$	Горючая
7	Рабочая	83	10,4	2,8	-	0,7	0,1	3	Горючая

<b>8</b>	Горючая	67	5,2	6,1	1,3	20,4	$A^c=34$	33	Сухая
<b>9</b>	Сухая	54	3,4	3	1,45	10,15	28	$W^p=11$	Рабочая
<b>10</b>	Рабочая	43,7	3	0,2	0,6	13,5	6	33	Сухая
<b>11</b>	Горючая	87,7	11,1	0,2	1	1	$A^c=0,15$	2	Рабочая
<b>12</b>	Сухая	57,5	3,8	0,5	0,4	7,3	30,5	$W^p=5,5$	Горючая
<b>13</b>	Рабочая	30,3	3,6	-	0,4	25,1	0,6	40	Горючая

**Контрольные вопросы:**

1. Что такое топливо?
2. По каким критериям классифицируется топливо?
3. Каков состав различных видов топлива?
4. Что подразумевают под горячей и негорючей частью топлива?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

«*Определение теплоты сгорания и приведенных характеристик топлива*»

**Цель работы:** Изучить особенности определения теплоты сгорания различных видов топлива; научиться оценивать массовые расходы влаги, золы и серы.

**Содержание отчета:**

1. Конспект по общим сведениям данной работы.
2. Выполненные задания.
3. Ответы на контрольные вопросы.

**Общие сведения:**

*Теплота сгорания топлива* – это то количество теплоты  $Q$  (кДж), которое выделяется при полном сгорании 1 кг жидкого или 1 м<sup>3</sup> газообразного топлива.

Теплота сгорания, отнесённая к единице массы или объёма топлива, называется *удельной теплотой сгорания*.

В зависимости от агрегатного состояния влаги в продуктах сгорания имеет место разделение на *высшую* и *низшую* теплоту сгорания.

Влага в продуктах сгорания жидкого топлива образуется при горении горючей массы водорода  $H$ , а также при испарении начальной влаги топлива  $W$ . В продукты сгорания попадает также и влага воздуха, использованного для горения. Однако ее обычно не учитывают. При содержании в топливе водорода с горючей массой  $H^p$  кг при горении образуется  $9H^p$  кг влаги. При этом в продуктах сгорания содержится  $(9H^p + W^p)$  кг влаги. На превращение 1 кг влаги в парообразное состояние затрачивается около 2500 кДж теплоты. Теплота, затраченная на испарение влаги, не будет использована, если конденсации паров воды не произойдет. В этом случае получим низшую теплоту сгорания.

То есть, *низшая теплота сгорания* соответствует тому количеству теплоты, которое выделяется при полном сгорании, без учёта теплоты конденсации водяного пара. Теплоту конденсации водяных паров также называют *скрытой теплотой парообразования (конденсации)*.

Под *высшей теплотой сгорания* понимают то количество теплоты, которое выделяется при полном сгорании вещества, включая теплоту конденсации водяных паров при охлаждении продуктов сгорания.

Низшая и высшая теплота сгорания связаны соотношением:

$$Q_H^p = Q_B^p - 25(9H^p + W^p), \text{ кДж/кг.} \quad (2.1)$$

или

$$Q_B^p = Q_H^p + 25(9H^p + W^p), \text{ кДж/кг.}$$

Разница между высшей и низшей теплотой сгорания равна теплоте конденсации водяных паров содержащихся в продуктах сгорания.

$$Q_B = Q_H + r_n \cdot G_{H_2O} \quad (2.2)$$

где  $r_n$  – теплота конденсации водяного пара (2,15 МДж/кг);  $G_{H_2O}$  – масса влаги, содержащаяся в продуктах сгорания жидкого или твердого топлива (1 кг или 1 м<sup>3</sup>).

Теплоту сгорания определяют двумя методами: *экспериментальным* и *расчетным*.

При экспериментальном определении теплоты сгорания применяют калориметры.

*Методика определения:* навеску топлива сжигают в приборе (калориметре), теплота, выделяющаяся при горении топлива, поглощается водой. Зная массу воды, по изменению ее температуры можно вычислить теплоту сгорания. Этот метод хорош тем, что прост. Для определения теплоты сгорания достаточно иметь данные технического анализа.

*Расчетный метод.* Низшая теплота сгорания определяется экспериментально для каждого вещества и является справочной величиной. Также её можно определить для твердых и жидких

материалов, при известном элементарном составе, расчётным способом в соответствии с формулой Д. И. Менделеева:

$$Q_{H^p}^p = 339C^p + 1256H^p - 109(O^p - S^p) - 25(9H^p + W^p), \text{ кДж/кг}, \quad (2.3)$$

где  $C^p$ ,  $H^p$ ,  $O^p$ ,  $S^p$  и  $W^p$  соответствуют содержанию углерода, водорода, кислорода, серы и влаги в рабочем топливе, %.

Низшая теплота сгорания сухого газообразного топлива определяется:

$$Q_H^c = 0,01(Q_{CH_4} \cdot CH_4 + Q_{CO} \cdot CO + Q_{H_2} \cdot H_2 + \sum Q_{C_m H_n} \cdot C_m H_n + Q_{H_2S} \cdot H_2S) \quad (2.4)$$

Теплота сгорания газообразного топлива равна сумме теплот горения газообразных горючих составляющих (кДж/м<sup>3</sup>):

$$Q_{H^p}^p = 127,7CO + 108H_2 + 356CH_4 + 590C_2H_4 + 636C_2H_6 + 918C_3H_8 + 1185C_4H_{10} + 234H_2S \quad (2.5)$$

Определение низшей теплоты сгорания (ккал/кг) топлива при отсутствии экспериментальных данных:

$$Q_H^p = 81C^p + 246H^p - 26(O^p - S^p) - 6W^p \quad (2.6)$$

Расход топлива зависит от его теплоты сгорания, которая для различных топлив изменяется в больших пределах. *Условное топливо* – это понятие, которое используют для нормирования и учета расхода топлива. *Условным топливом* принято называть топливо с низшей теплотой сгорания (29,33 МДж/кг или 7000 ккал/кг). Для перевода любого топлива в условное, следует разделить его теплоту сгорания на 29330 кДж/кг, т. е. найти *эквивалент* данного топлива: для мазута он равен 1,37-1,43, для природных газов – 1,2-1,4.

*Топливный эквивалент* – это отношение теплоты сгорания натурального топлива к теплоте сгорания условного топлива:

$$\mathcal{E} = Q_H^p / Q_{усл} \quad (2.7)$$

Чтобы перевести расход натурального топлива в расход условного необходимо расход натурального топлива  $V_{НАТ}$  умножить на топливный эквивалент:

$$V_{усл} = V_{НАТ} \cdot \mathcal{E} \text{ [т.у.т.; кг.у.т.]} \quad (2.8)$$

Сама по себе теплота сгорания топлива не влияет на экономичность процесса горения, однако величина теплоты сгорания в значительной степени зависит от содержания в топливе балласта (влаги, золы). По этим причинам теплота сгорания топлива и рассматривается как один из факторов, определяющих экономичность горения.

Путем смешивания топлив разных марок можно значительно повысить экономичность процесса горения.

Характеристика газообразного топлива приведена в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Характеристика газообразного топлива

Газ	Обозначение	Теплота сгорания $Q_H^c$	
		кДж/м <sup>3</sup>	ккал/м <sup>3</sup>
Водород	H <sub>2</sub>	10820	2579
Окись углерода	CO	12640	3018
Сероводород	H <sub>2</sub> S	23450	5585
Метан	CH <sub>4</sub>	35850	8555
Этан	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	63850	15226
Пропан	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	91300	21795
Бутан	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	118700	22338
Пентан	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	146200	34890
Этилен	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	59200	14107
Пропилен	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	85980	20541
Бутилен	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	113400	27111
Бензол	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	140400	33528

Для оценки массовых расходов влаги, золы и серы существуют *приведенные характеристики*.

*Приведенные характеристики топлива* характеризуют количество влаги, золы или их суммы (балласта), приходящееся на одно и то же количество энергии, выделяемой топливом при его сжигании.

Приведенные влажность, зольность и сернистость (%кг/МДж) определяют соответственно по формулам:

$$W^{\Pi} = \frac{W^P}{Q_H^P} \quad A^{\Pi} = \frac{A^P}{Q_H^P} \quad S^{\Pi} = \frac{S^P}{Q_H^P} \quad (2.9)$$

Если  $W^{\Pi} < 0,75\%$  кг/МДж топливо считается маловлажным (антрацит и каменные угли); если  $W^{\Pi} > 1,89$  – высоковлажное (бурые угли, фрезерный торф).

Если  $A^{\Pi} < 1$ , то топливо малозольное (антрацит, большинство каменных и некоторые бурые угли), а если  $A^{\Pi} > 4$  – высокозольное (большая часть бурых углей имеет  $A^{\Pi} = 1,89-2,4\%$  кг/МДж, у горючих сланцев  $A^{\Pi} = 5-10\%$  кг/МДж).

Если  $S^{\Pi} > 0,05$  – мазут высокосернистый, если  $S^{\Pi} > 0,2$  – высокосернистый уголь.

### Задание:

1. Определить низшую  $Q_H^P$  и высшую  $Q_B^P$  теплоту сгорания рабочей массы каменного угля состава на горючую массу:  $C^T = 72,4\%$ ;  $H^T = 5,6\%$ ;  $S^T = 0,4\%$ ;  $N^T = 2,6\%$ ;  $O^T = 13,0\%$ ; зольность топлива на сухую массу  $A^C = 12,2\%$ ; влажность на рабочую массу  $W^P = 10,0\%$ .

2. Определить высшую теплоту сгорания рабочей массы  $Q_B^P$ , приведенную влажность  $W^{\Pi}$ , приведенную зольность  $A^{\Pi}$ , приведенную сернистость  $S^{\Pi}$  и топливный эквивалент  $\mathcal{E}$  угля состава:  $C^P = 28,7\%$ ;  $H^P = 2,2\%$ ;  $S^P = 2,7\%$ ;  $N^P = 0,6\%$ ;  $O^P = 8,6\%$ ;  $A^P = 25,2\%$ ;  $W^P = 32,0\%$ .

3. Определить элементный состав топлива в рабочем состоянии, если задано условное сухое беззольное (горючее) состояние  $C^T = 85\%$ ;  $H^T = 6\%$ ;  $S^T = 4\%$ ;  $O^T = 4\%$ ;  $N^T = 1\%$ . И известно, что влажность в рабочем состоянии составляет  $W^P = 23,1\%$ , а зольность в сухом состоянии топлива  $A^C = 14,5\%$ . Определить теплоту сгорания топлива.

4. Теплота сгорания топлива  $Q_1^P = 14,5$  МДж/кг при влажности  $W_1^P = 8,2\%$ . Определить теплоту сгорания при влажности  $W_2^P = 18,2\%$ .

5. Задан состав топлива:  $C^c = 54,5\%$ ;  $H^c = 1,8\%$ ;  $S^c = 1,45\%$ ;  $N^c = 1\%$ ;  $O^c = 5,45\%$ ; остальное  $A^c$ ;  $W^P = 9\%$ . Определить низшую теплоту сгорания в рабочей массы топлива.

### Контрольные вопросы:

1. Что такое теплота сгорания топлива?
2. Как зольность и влажность влияют на теплотехнические свойства топлива?
3. Чем отличается высшая теплота сгорания топлива от низшей?
4. Что такое условное топливо?
5. Что такое топливных эквивалент?
6. Как определяются приведенные характеристики топлива?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

**«Определение объемов воздуха и продуктов сгорания  
при сжигании топлив»**

**Цель работы:** Изучить порядок определения объемов продуктов сгорания при сжигании различных видов топлива, а также объема воздуха, необходимого на горение.

**Содержание отчета:**

1. Конспект по общим сведениям данной работы.
2. Выполненные задания.
3. Ответы на контрольные вопросы.

**Общие сведения:**

*Горением* называется химический процесс соединения топлива с окислителем, сопровождающийся выделением большого количества теплоты и резким повышением температуры реагирующих веществ. В процессе горения горючие элементы топлива углерод С, водород Н и сера S соединяются с окислителем, то есть окисляются. Окислителем служит кислород воздуха О. В процессе окисления образуются конечные газообразные продукты окисления CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O и SO<sub>2</sub>. При этом химически связанная энергия переходит в тепловую.

Горение может быть *полным*, когда горючие элементы топлива окисляются полностью до конечных продуктов окисления, и *неполным*, когда часть углерода топлива окисляется не полностью, и в продуктах сгорания дополнительно появляется продукт неполного окисления углерода – окись углерода СО. Явление химической неполноты горения топлива называется *химическим недожогом*.

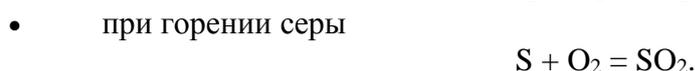
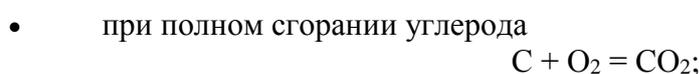
Расчет процесса горения сводится к определению объема воздуха, необходимого для окисления горючих элементов топлива, и образующихся объемов газообразных продуктов сгорания – дымовых газов.

Таблица 3.1 – Характеристики топлива различных месторождений

Район добычи, месторождение	Состав рабочей массы топлива, %							Теплота сгорания Q <sup>p</sup> <sub>н</sub> , МДж/кг	Выход летучих веществ, %
	W <sub>p</sub>	A <sub>p</sub>	S <sub>p</sub>	C <sub>p</sub>	H <sub>p</sub>	N <sub>p</sub>	O <sub>p</sub>		
Канско-ачинский Б2	33.0	4.7	0.2	44.2	3.1	0.4	14.4	15.66	48
Подмосковный Б2	32.0	28.6	2.7	26.0	2.1	0.4	8.2	9.34	50
Печорский ЖР Воркутинское	5.5	23.6	0.8	59.6	3.8	1.3	5.4	23.2	33
Донецкий АШ	8.5	22.9	1.7	63.8	1.2	0.6	1.3	22.6	3.5
Горючие сланцы	13.0	40.0	1.6	24.1	3.1	0.1	3.7	10.9	90
Фрезервный торф	50.0	6.3	0.1	24.7	2.6	1.1	15.2	8.1	70
Мазут высокосернистый	3.0	0.1	2.8	83.0	10.4	0.7		38.9	-
Древесина	40.0	0.6	-	30.3	3.6	0.4	25.1	10.2	85

Под *материальным балансом* горения понимают равенство между массой участвующих в процессе горючих элементов топлива и окислителя и массой образовавшихся продуктов сгорания. При составлении материального баланса горения твердого, жидкого и газообразного топлива используют элементарные реакции окисления горючих элементов и газов, предполагая, что входящие в состав топлива горючие элементы полностью окисляются, превращаясь в инертные газы.

При сжигании твердого и жидкого топлива схемы реакций горения элементов могут быть представлены:

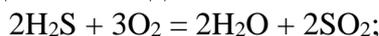


Из уравнений материального баланса приведенных элементарных реакций определяются массовые расходы кислорода и продуктов сгорания на 1 кг горючего элемента. Зная плотность кислорода и продуктов сгорания, можно определить их объем при нормальных условиях (давление 101,08 кПа, температура 0 °С).

При сжигании газообразного топлива протекают реакции горения водорода, оксида углерода, сернистого газа, углеводородов. Реакция горения оксида углерода такова:



Реакция горения сероводорода имеет вид:



Горение углеводородов  $C_mH_n$  ( $m$  – число атомов углерода,  $n$  – число атомов водорода) может быть представлено уравнением:



Материальный баланс приведенных элементарных реакций при горении горючих газов, входящих в состав газообразного топлива, позволяет определить массовый расход кислорода и количество продуктов реакции, приходящееся на 1 кг газа. Расчеты, связанные с горением газа, ведутся на 1 м<sup>3</sup> горючего газа при нормальных условиях. Зная плотность кислорода, продуктов реакции и горючего газа, можно определить их объем при нормальных условиях.

*Определение объемов воздуха и продуктов сгорания при сжигании топлив производят в следующей последовательности.*

Для *твердых и жидких топлив* теоретические объемы (м<sup>3</sup>/кг) продуктов полного сгорания определяются по формулам:

Полный объем продуктов сгорания (м<sup>3</sup>/кг)

$$V_{\Gamma} = V_{C,\Gamma} + V_{H_2O} \quad (3.1)$$

Объем сухих газов

$$V_{C,\Gamma} = V_{RO_2} + V_{N_2} \quad (3.2)$$

или

$$V_{C,\Gamma} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} \quad (3.3)$$

При полном сжигании топлива в теоретических условиях образуются продукты сгорания, представляющие собой газовую смесь, состоящую из CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O. Диоксид углерода и сернистый ангидрид принято объединять и называть «сухие трехатомные газы», обозначая через RO<sub>2</sub>, т.е.



Расход кислорода на горение углерода и серы иногда рассчитывают суммарно, исходя из содержания (условного) углерода:

$$V_{CO_2} = 0,0187 \cdot C^P \quad (3.5)$$

$$V_{SO_2} = 0,007 \cdot S^P$$

(3.5)

$$V_{RO_2} = 0,0187 \cdot K^P \quad (3.7)$$

$$K^P = C^P + 0,375 \cdot S^P \quad (3.8)$$

Объем трехатомных газов:

$$V_{RO_2} = 0,0187 \cdot (C^P + 0,375 \cdot S^P) \quad (3.9)$$

Теоретический объем азота в продуктах сгорания:

$$V_{N_2}^O = 0,79 \cdot V_B^O + \frac{0,8 \cdot N^P}{100} \quad (3.10)$$

Наличие водяных паров в продуктах сгорания обусловлено горением водорода и испарением влаги, содержащейся в топливе, а также влаги, поступающей вместе с воздухом. Теоретический объем водяных паров определяется по формуле:

$$V_{H_2O}^O = 0,0124 \cdot (9 \cdot H^P + W^P) + 0,0161 \cdot V_B^O \quad (3.11)$$

При сжигании топлива в топках паровых и водогрейных котлоагрегатов в качестве окислителя используется воздух. Зная количество воздуха, необходимое для горения 1 кг каждого горючего элемента твердого и жидкого топлива, можно определить теоретическое общее количество воздуха, необходимое для горения всех горючих элементов. Так как в 1 кг рабочей массы топлива содержится  $C^P/100$ , кг углерода,  $H^P/100$ , кг водорода,  $S^P/100$ , кг серы (летучей) и  $O^P/100$ , кг кислорода, то для сжигания твердого и жидкого топлива теоретическое количество воздуха, необходимое для полного сгорания ( $m^3$  воздуха/кг топлива), определяется по формуле:

$$V_B^O = \frac{1}{\underbrace{23 \cdot 1,293}_{29,87}} (2,67 \cdot C^P + S^P + 8 \cdot H^P - O^P) \quad (3.12)$$

или

$$V_B^O = \frac{1}{30} (2,67 \cdot K^P + 8 \cdot H^P - O^P) \quad , \quad m^3 \text{ воздуха/кг топлива}$$

Для **газообразного** топлива теоретические объемы продуктов сгорания ( $m^3/m^3$ ) определяются по формулам:

Полный объем продуктов сгорания ( $m^3/m^3$ ) и объем сухих ( $m^3/m^3$ ) газов определяются по формулам:

$$V_{\Gamma} = V_{C,\Gamma} + V_{H_2O} \quad (3.13)$$

Объем сухих газов:

$$V_{C,\Gamma} = V_{RO_2} + V_{N_2} \quad (3.14)$$

Объем двухатомных газов:

$$V_{N_2}^O = 0,79 \cdot V_B^O + \frac{N_2}{100} \quad (3.15)$$

Объем трехатомных газов:

$$V_{RO_2} = 0,01 \cdot \left[ \underbrace{CO + CH_4 + 2C_2H_6 + 3C_3H_8 + 4C_4H_{10} + 5C_5H_{12} + CO_2}_{V_{CO_2}} + \frac{H_2S}{V_{SO_2}} \right] \quad (3.16)$$

Объем водяных паров:

$$V_{H_2O}^O = 0,01 \cdot [H_2 + H_2S + 2CH_4 + 3C_2H_6 + 4C_3H_8 + 5C_4H_{10} + 6C_5H_{12}] + 0,0161 V_B^O \quad (3.17)$$

Для действительного объема  $0,0161 V_B^O \cdot \alpha$ , где  $\alpha$  - коэффициент избытка воздуха. Количество кислорода, теоретически необходимое для сжигания  $1 m^3$  топлива:

$$V_{O_2}^O = 0,01 \cdot (0,5 \cdot CO + 0,5 \cdot H_2 + 2 \cdot CH_4 + 3,5 \cdot C_2H_6 + 5 \cdot C_3H_8 + 6,5 \cdot C_4H_{10} + 8 \cdot C_5H_{12} - O_2) \quad (3.18)$$

Теоретически необходимый объем воздуха для сжигания  $1\text{ м}^3$  газа, состав которого задан процентным содержанием отдельных горючих газов, определяется по формуле 3.19 ( $\text{м}^3$  воздуха/ $\text{м}^3$  газа):

$$V_B^O = \frac{100}{21} V_{O_2} = 0,0476(0,5 \cdot CO + 0,5 \cdot H_2 + 2 \cdot CH_4 + 3,5 \cdot C_2H_6 + 5 \cdot C_3H_8 + 6,5 \cdot C_4H_{10} + 8 \cdot C_5H_{12} - O_2)$$

### Задание:

1. Определить объем кислорода и воздуха теоретически необходимый на горение, а также суммарный объем продуктов сгорания

а) природного газа состава:  $CH_4 = 94,0\%$ ;  $C_2H_6 = 2,8\%$ ;  $C_3H_8 = 0,4\%$ ;  $C_4H_{10} = 0,3\%$ ;  $C_5H_{12} = 0,1\%$ ;  $N_2 = 2,0\%$ ;

б) мазута состава:  $C^P = 80,5\%$ ;  $H^P = 10,0\%$ ;  $S^P = 2,8\%$ ;  $N^P = 0,4\%$ ;  $O^P = 0,2\%$ ;  $A^P = 0,1\%$ ;  $W^P = 6,0\%$ .

2. Определить теоретически необходимый объем воздуха, суммарный объем продуктов сгорания и низшую теплоту сгорания газа месторождения, в соответствии с вариантом таблицы 3.2 и 3.4.

Таблица 3.2 – Индивидуальные задания

№ варианта	Газопровод	№ варианта	Газопровод
1	Каменный Лог-Пермь	11	Оренбург-Александров Гай
2	Кулешовка-Самара	12	Уренгой-Новопсковск
3	Уренгой-Ужгород	13	Туймазы-Уфа
4	Бухара-Урал	14	Уренгой-Сургут-Челябинск
5	Саратов-Москва	15	Шкапово-Туймазы
6	Тэбук-Сосновка	16	Надым-Пунга-Челябинск
7	Ярино-Пермь	17	Казань-Альметьевск
8	Средняя Азия-Центр	18	Н.Новгород-Иваново-Череповец
9	Мострансгаз (кольцо)	19	Краснодар-Крымск-Новороссийск
10	Уренгой-Надым-Пунга-Ухта	20	Безенчук-Чапаевск

3. Определить суммарный объем продуктов сгорания, а также теоретически необходимый объем воздуха для сгорания 1 кг топлива, по заданию в соответствии с вариантом таблицы 3.3 и 3.5:

Таблица 3.3 – Индивидуальные задания

№ варианта	Вид топлива, марка	№ варианта	Вид топлива, марка
1	Кузнецкий уголь марки Г	11	Горючие сланцы
2	Карагандинский уголь	12	Кузнецкий уголь марки 1СС
3	Донецкий уголь марки А	13	Высокосернистый мазут
4	Кузнецкий уголь марки Д	14	Донецкий уголь марки Д
5	Подмосковный уголь	15	Кузнецкий уголь марки 2СС
6	Торф фрезерный	16	Уголь Экибастузского месторождения
7	Кузнецкий уголь марки Ж	17	Воркутинский уголь
8	Малосернистый мазут	18	Кузнецкий уголь марки Г
9	Донецкий уголь марки Т	19	Уголь Назаровского месторождения
10	Уголь Канско-Ачинский	20	Донецкий уголь марки ПА

Таблица 3.4 - Расчетные характеристики газообразных топлив

№ п/п	Газопровод	Состав газа по объему, %										
		$CH_4$	$C_2H_6$	$C_3H_8$	$C_4H_{10}$	$C_5H_{12}$	$C_6H_{14}$	$CO$	$CO_2$	$N_2$	$O_2$	$H_2S$
Природные газы												
1	Уренгой-Надым-Пунга-Ухта	98.72	0.12	0.01	<0.01	—	—	—	0.14	1.00	—	—
2	Уренгой-Ужгород	98.90	0.12	0.01	0.01	—	—	—	<0.06	0.90	—	—
3	Уренгой-Новоуральск	98.90	0.13	0.01	<0.01	—	—	—	0.08	0.87	—	—
4	Уренгой-Сургут-Челябинск	98.24	0.29	0.20	0.09	0.04	—	—	0.14	1.00	—	—
5	Надым-Пунга-Н.Тура-Свердловск-Челябинск	98.67	0.16	0.08	0.01	—	—	—	0.08	1.00	—	—
6	Н.Новгород-Иваново-Череповец	98.99	0.25	0.04	0.02	—	—	—	0.10	0.60	—	—
7	Бухара-Урал	94.24	3.00	0.89	0.39	0.17	0.13	—	0.28	0.90	—	—
8	Средняя Азия-Центр	94.08	2.80	0.73	0.30	0.07	0.02	—	1.00	1.00	—	—
9	Саратов-Москва	90.29	2.80	1.10	0.75	0.34	0.20	—	0.32	4.20	—	—
10	Мострансгаз (кольцо)	96.57	1.40	0.40	0.18	0.07	0.03	—	0.15	1.20	—	—
11	Оренбург-Александров Гай	86.43	3.90	1.72	0.87	0.30	0.07	—	0.01	6.70	—	—
Попутные газы												
12	Каменный Лог-Пермь	38.70	22.60	10.70	2.70	0.70 <sup>Д</sup>	—	—	—	23.80	—	0.80
13	Ярино-Пермь	38.00	25.10	12.50	3.30	1.30 <sup>Д</sup>	—	—	—	18.70	—	1.10
14	Кулешовка-Самара	58.00	17.20	7.40	2.00	0.50 <sup>Д</sup>	—	—	0.80	13.60	—	0.50
15	Безенчук-Чапаевск	42.70	19.60	12.60	5.10	1.30 <sup>Д</sup>	—	—	1.00	16.90	—	0.80
16	Барса-Гельмес-Вышка-Небит-Даг	93.90	3.40	1.30	0.70	0.20 <sup>Д</sup>	—	—	0.40	0.10	—	—
17	На входе в г.Краснодар, Крымск, Новороссийск	91.20	3.90	2.00	0.90	0.20 <sup>Д</sup>	—	—	1.80	—	—	—
18	Вознесенская-Грозный, Карабулак-Грозный	76.70	13.20	5.40	2.50	2.20 <sup>Д</sup>	—	—	—	—	—	—
19	Тэбук-Сосновка	48.20	18.20	11.90	3.30	1.00 <sup>Д</sup>	—	—	0.90	16.50	—	—
20	Туймазы-Уфа	50.00	22.00	9.80	1.20	0.40 <sup>Д</sup>	—	—	—	16.60	—	—
21	Шкапово-Туймазы	44.10	22.00	5.20	1.40	0.30 <sup>Д</sup>	—	—	—	27.00	—	—
22	Казань-Бугульма-Лениногорск-Альметьевск	53.60	22.80	6.10	0.90	0.20 <sup>Д</sup>	—	—	0.20	15.80	—	—

Таблица 3.5 – Технические характеристики топлив

Виды топлива и район месторождения	Марка	Классы	Горючая масса топлива, %					Выход летучих V <sub>г</sub> , %	Сухая масса топлива, %		Рабочий тон W <sub>p</sub> , %
			C <sup>г</sup>	H <sup>г</sup>	N <sup>г</sup>	O <sup>г</sup>	S <sup>г</sup>		A <sup>c</sup>	S <sup>c</sup> общ	
Уголь:											
Кузнецкий (Кемеровская обл.)	Д	ДР, ДК, ДМ, ДСШ	78,5	5,6	2,3	13,2	0,4	42,7	9,5	0,4	10,5
	Г	ГР, ГСШ	84,2	5,8	2,2	9	0,6	40	10	0,5	8,5
	Ж	ЖР	85,5	5,6	2,4	5,8	0,7	38	16,5	0,6	6
	1СС	1ССР, 1ССК	84,1	5,1	2,1	8,2	0,5	30,9	12,4	0,5	7,5
	2СС	2ССР, 2СССШ, 2ССМ	87,3	4,7	2,1	5,3	0,6	20,6	12	0,5	6
	ОС	ОСР	90,5	4,2	2	2,9	0,4	15	16,5	0,3	5,5
Донецкий	Т	ТР	89	4,4	2	3,8	0,8	13	19	0,6	7
	Д	ДО, ДМ, ДР	75,5	5,5	1,6	13,2	4,2	43	18	3,5	13
	Г	ГР, ГМ	81	5,4	1,5	7,8	4,3	40	19,5	3,5	7
	Т	ТР	89	4,2	1,5	2,2	3,1	12	17	2,6	4,5
Назаровское	ПА	ПАР	91	3,5	1,3	2,2	2	7,5	17	2,2	5
	А	АШ + АШС	92,5	2	0,8	2,6	2,1	3,5	20,5	1,7	7,5
Интинское	Б2	Б2Р	70	4,8	0,8	23,6	0,8	48	12	0,7	39
Воркутинское	Д	ДК, ДМ, ДР	75	5	2	14,1	3,9	39	28	3	11
Карагадинский	Ж	—	84,2	5,3	1,8	7,6	1,1	32,2	19	0,8	5
Подмосковный	К <sub>1</sub> , К <sub>2</sub>	КР, К <sub>2</sub> Р	85,6	5,2	1,3	6,9	1	28	26	0,9	5,5
Кизеловский	Б2	Б2К, Б20, Б2Р	67	5,2	1,3	20,4	6,1	47	34	4	33
Челябинский	Г <sub>6</sub>	Г <sub>6</sub> Р, Г <sub>6</sub> К, Г <sub>6</sub> М, отсеб	77	5,7	1,3	9,2	6,8	45	28	5	5
Экибастузское	Б3	Б3Р, Б3К, Б30, Б3М	71,5	5,2	1,7	18,9	2,7	44	34	1,8	17
Канско-Ачинский	СС	ССР	80	5,3	1,5	11,6	1,6	31	39	1	8
Торф фрезерный	Б2	Б2Р	70,0	4,8	0,8	23,6	0,8	48	12	0,7	39
Горючие сланцы (эстонские)	—	—	56,5	6	2,5	34,7	—	70	12,5	0,3	48,5
Мазут:	—	—	74	9,5	0,3	11,3	—	90	48+	1,8	13
малосернистый	—	—	87,7	11,1	1	1	0,2	—	0,15	0,4	2
высокосернистый	—	—	84,9	10,6	1	1	3,5	—	0,15	2,7	2,2

**Контрольные вопросы:**

1. Основные виды промышленного топлива.
2. В каком состоянии сжигают каменный уголь?
3. Какие продукты образуются при сгорании топлива?
4. Что называют внешним балластом топлива?
5. Что называют невязкой баланса?
6. От чего зависит теплотворная способность топлива?
7. Что называют внутренним балластом топлива?
8. От чего зависит влагосодержание топлива?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

«*Определение энтальпии уходящих дымовых газов*»

**Цель работы:** Изучить понятие энтальпии, научиться определять энтальпии продуктов сгорания, а также строить  $I\theta$ -диаграмму.

**Содержание отчета:**

1. Конспект по общим сведениям данной работы.
2. Выполненные задания.
3. Ответы на контрольные вопросы.

**Общие сведения:**

Под термином *энтальпия* понимается энергия, которая доступна для преобразования в теплоту при некотором постоянном давлении. Понятие энтальпия в переводе с греческого значит «нагреваю». То есть формулу, содержащую элементарную сумму внутренней энергии и произведенную работу, называют энтальпией. Эта величина обозначается буквой  $I$ .

Если записать вышесказанное физическими величинами, преобразовать и вывести формулу, то получится  $I = u + pv$  (где  $u$  – внутренняя энергия;  $p$ ,  $v$  – давление и удельный объем рабочего тела в том же состоянии, для которого взято значение внутренней энергии). Энтальпия — аддитивная функция, т.е. энтальпия всей системы равна сумме всех составляющих её частей.

В теплоэнергетике количество теплоты (кДж), содержащееся в воздухе или продуктах сгорания, называют *теплосодержанием* (энтальпией) воздуха и продуктов сгорания. При выполнении расчетов принято энтальпию воздуха и продуктов сгорания относить к 1 кг сжигаемого твердого и жидкого топлива и к 1 м<sup>3</sup> (при нормальных условиях) газообразного топлива.

*Энтальпия продуктов сгорания* (кДж/кг, кДж/м<sup>3</sup>) 1 кг твердого, жидкого или 1 м<sup>3</sup> газообразного топлива определяется как сумма энтальпий продуктов сгорания  $I_{\sigma}^o$  при  $\alpha_T = 1$ , избыточного воздуха  $I_B^o$  ( $\alpha_T - 1$ ) и золы  $I_3$ , т. е.

$$I_{\Gamma} = I_{\sigma}^o + (\alpha_T - 1)I_B^o + I_3 \quad (4.1)$$

*Энтальпия газообразных продуктов сгорания* (кДж/кг, кДж/м<sup>3</sup>) при  $\alpha_T = 1$  и температуре газов  $\theta$ , °C определяется по формуле

$$I_{\Gamma}^o = V_{RO_2}^o(c\theta)_{CO_2} + V_{N_2}^o(c\theta)_{N_2} + V_{H_2O}^o(c\theta)_{H_2O} \quad (4.2)$$

где  $V_{RO_2}^o$ ,  $V_{N_2}^o$ ,  $V_{H_2O}^o$  — теоретические объемы продуктов сгорания топлива, м<sup>3</sup>/кг (м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>);  $(c\theta)_{CO_2}$ ,  $(c\theta)_{N_2}$ ,  $(c\theta)_{H_2O}$  — энтальпия углекислоты, азота и водяных паров соответственно, кДж/м<sup>3</sup> (теплоемкость, умноженная на температуру).

*Энтальпия воздуха* (кДж/кг, кДж/м<sup>3</sup>) при  $\alpha_T = 1$  и температуре  $\theta$ , °C определяется по формуле

$$I_B^o = V_B^o(c\theta)_B \quad (4.3)$$

или

$$I_B^o = \alpha \cdot V_B^o \cdot C_B \cdot t_B$$

где  $V^o$  — теоретический объем воздуха, м<sup>3</sup>/кг (м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>);  $(c\theta)_B$  — энтальпия воздуха, кДж/м<sup>3</sup>;  $C_B$  — теплоемкость воздуха, м<sup>3</sup>·°C при его температуре  $t_B$ , °C.

*Энтальпия золы* (кДж/кг)

$$I_3 = \frac{A^p a_{yH}}{100} (c\theta)_3 \quad (4.4)$$

где  $A^p$  — зольность на рабочую массу;  $a_{yH}$  — доля золы топлива, уносимой продуктами сгорания;  $(c\theta)_3$  — энтальпия золы, кДж/кг.

Значения энтальпий продуктов полного сгорания топлива, воздуха и золы приведены в таблице 4.1.

$I\theta$ -диаграмму строят следующим образом:

Задают несколько значений температуры горения топлива и вычисляют для них энтальпии продуктов сгорания.

Затем, выбрав масштабы температур и энтальпий в прямоугольной системе координат, по точкам проводят прямую  $I=f(\theta)$ .

По  $I\theta$ -диаграмме находят теоретическую температуру горения топлива в топке котла.

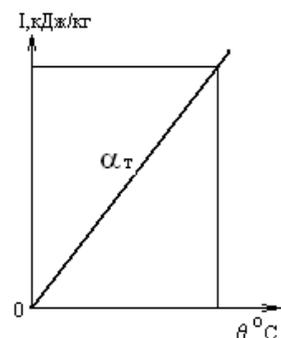


Рисунок 4.1 -  $I\theta$ -диаграмма

Таблица 4.1 – Энтальпия 1 м<sup>3</sup> газов в влажного воздуха (кДж/м<sup>3</sup>) в 1 кг золы (кДж/кг)

$\theta, ^\circ\text{C}$	$(c\theta)_{\text{CO}_2}$	$(c\theta)_{\text{N}_2}$	$(c\theta)_{\text{O}_2}$	$(c\theta)_{\text{H}_2\text{O}}$	$(c\theta)_{\text{B}}$	$(c\theta)_{\text{Z}}$
1	2	3	4	5	6	7
100	169	130	132	151	132	80,8
200	357	260	267	304	266	169,1
300	559	392	407	463	403	263,7
400	772	527	552	626	542	360,0
500	996	664	699	794	684	458,5
600	1222	804	850	967	830	560,6
700	1461	946	1005	1147	979	662,9
800	1704	1093	1160	1335	1130	767,6
900	1951	1243	1319	1524	1281	874,0
1000	2202	1394	1478	1725	1436	984,0
1100	2457	1545	1637	1926	1595	1096,0
1200	2717	1695	1800	2131	1754	1206,0
1300	2976	1850	1963	2344	1913	-
1400	3240	2009	2127	2558	2076	-
1500	3504	2164	2294	2779	2239	-
1600	3767	2323	2461	3001	2403	-
1700	4035	2482	2629	3227	2566	-
1800	4303	2642	2796	3458	2729	-
1900	4571	2805	2968	3688	2897	-
2000	4843	2964	3139	3926	3064	-
2100	5115	3127	3307	4161	3232	-
2200	5387	3290	3483	4399	3399	-

### Задание:

1. Определить энтальпию продуктов сгорания на выходе из топки, получаемых при полном сгорании 1 кг карагандинского угля состава:  $C^P = 54,7\%$ ;  $H^P = 3,3\%$ ;  $S^P = 0,8\%$ ;  $N^P = 0,8\%$ ;  $O^P = 4,8\%$ ;  $A^P = 27,6\%$ ;  $W^P = 8,0\%$ ; если известно, что температура газов на выходе из топки  $\theta_{\Gamma} = 1000 ^\circ\text{C}$ , доля золы топлива, уносимой продуктами сгорания,  $a_{\text{УН}} = 0,85$  и приведенная величина уноса золы сжигаемого топлива  $A_{\text{пр.УН}} = 4,6 \text{ кг}\cdot\%/ \text{МДж}$ . Коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_{\Gamma} = 1,3$ .

2. Определить энтальпию продуктов сгорания на выходе из топки, получаемых при полном сгорании 1 кг топлива в соответствии с заданием таблицы 3.4 и 3.5; если известно, что температура газов на выходе из топки  $\theta_{\Gamma} = 1100 ^\circ\text{C}$ . Коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_{\Gamma} = 1,15$ . Долю золы топлива, уносимой продуктами сгорания принять 0,7.

3. В топке котла сжигается 1 кг донецкого угля состава:  $C^P = 63,8\%$ ;  $H^P = 1,2\%$ ;  $S^P = 1,7\%$ ;  $N^P = 0,6\%$ ;  $O^P = 1,3\%$ ;  $A^P = 22,9\%$ ;  $W^P = 8,5\%$ . Определить энтальпию избыточного воздуха на выходе из топки при полном сгорании угля, если известно, что температура газов на выходе из топки  $\theta_{\Gamma} = 900$  °С. Коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_{\Gamma} = 1,2$ .

4. Определить энтальпию продуктов сгорания на выходе из топки, получаемых при полном сгорании 1 м<sup>3</sup> природного газа месторождения в соответствии с заданием таблицы 3.2 и 3.3; если известно, что температура газов на выходе из топки  $\theta_{\Gamma} = 1000$  °С. Коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_{\Gamma} = 1,1$ .

5. Определить энтальпию продуктов сгорания на выходе из топки, получаемых при полном сгорании 1 кг высокосернистого мазута состава:  $C^P = 83,0\%$ ;  $H^P = 10,4\%$ ;  $S^P = 2,8\%$ ;  $O^P = 0,7\%$ ;  $A^P = 0,1\%$ ;  $W^P = 3,0\%$ ; если известно, что температура газов на выходе из топки  $\theta_{\Gamma} = 1200$  °С. Коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_{\Gamma} = 1,15$ .

6. В топке котла сжигается 1 кг карагандинского угля состава:  $C^P = 54,7\%$ ;  $H^P = 3,3\%$ ;  $S^P = 0,8\%$ ;  $N^P = 0,8\%$ ;  $O^P = 4,8\%$ ;  $A^P = 27,6\%$ ;  $W^P = 8,0\%$ . Построить  $I\theta$ -диаграмму для продуктов сгорания в интервале температур горения топлива 600...2000°С. Коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_{\Gamma} = 1,3$ .

### Контрольные вопросы:

1. Дайте определение энтальпии.
2. Как определяется энтальпия продуктов сгорания?
3. От чего зависит и как определяется энтальпия газообразных продуктов сгорания?
4. Как определяется энтальпия воздуха и золы?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

### «Определение тепловых потерь и КПД котла»

**Цель работы:** Научиться составлять тепловой баланс и определять КПД (брутто и нетто) котельного агрегата.

#### Содержание отчета:

1. Конспект по общим сведениям данной работы.
2. Выполненные задания.
3. Ответы на контрольные вопросы.

#### Общие сведения:

*Тепловой баланс* — это сравнение между полезным теплом, используемым для получения пара или горячей воды, тепловыми потерями и общим количеством теплоты, поступившим в топку

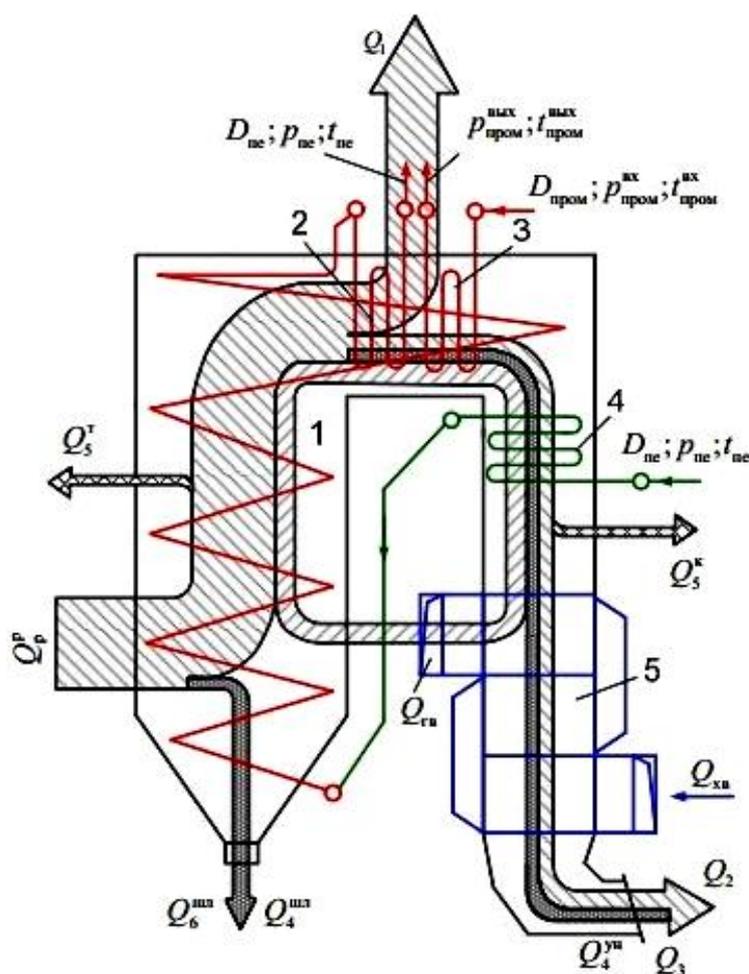


Рисунок 5.1 – Баланс теплоты парового котла.

Уравнение *прямого баланса* устанавливает зависимость между расходом топлива и теплопроизводительностью котла. При этом обязательно измеряются параметры и количество выработанного пара или воды.

Уравнение *обратного теплового баланса* устанавливает зависимость между КПД котла и тепловыми потерями (величины выражаются в процентах).

Тепловой баланс составляется для анализа процессов, происходящих в топке котла при сгорании топлива, с целью:

- определить причины снижения производительности котельного агрегата;

- разработать мероприятия, необходимые для повышения КПД.

На основании теплового баланса котельного агрегата определяют расход топлива и вычисляют коэффициент полезного действия, который является важнейшей характеристикой энергетической эффективности работы котла.

В котельном агрегате химически связанная энергия топлива в процессе горения преобразуется в физическую теплоту горючих продуктов сгорания. Эта теплота расходуется на выработку и перегрев пара или нагревание воды. Вследствие неизбежных потерь при передаче теплоты и преобразовании энергии вырабатываемый продукт (пар, вода и т.д.) воспринимает только часть теплоты. Другую часть составляют потери, которые зависят от эффективности организации процессов преобразования энергии (сжигания топлива) и передачи теплоты вырабатываемому продукту.

Тепловой баланс котельного агрегата заключается в установлении равенства между поступившим в агрегат количеством теплоты и суммой использованной теплоты и тепловых потерь. Тепловой баланс котельного агрегата составляется на 1 кг твердого или жидкого топлива или для 1 м<sup>3</sup> газа.

Уравнение теплового баланса (кДж/кг, кДж/м<sup>3</sup>) имеет вид:

$$Q_P^P = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 \quad (5.1)$$

или в процентах от располагаемой теплоты топлива:

$$q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 = 100 \quad (5.2)$$

где  $q_1 = (Q_1/Q_P^P) \cdot 100$ ;  $q_2 = (Q_2/Q_P^P) \cdot 100$  и т. д.

В уравнениях (5.1) и (5.2):  $Q_P^P$  – располагаемая теплота;  $Q_1$  ( $q_1$ ) – теплота, полезно использованная в котлоагрегате на получение пара;  $Q_2$  ( $q_2$ ) – потери теплоты с уходящими газами;  $Q_3$  ( $q_3$ ) – потери теплоты от химической неполноты сгорания топлива;  $Q_4$  ( $q_4$ ) – потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива;  $Q_5$  ( $q_5$ ) – потери теплоты в окружающую среду;  $Q_6$  ( $q_6$ ) – потеря теплоты с физической теплотой шлака.

Располагаемая теплота (кДж/кг, кДж/м<sup>3</sup>) на 1 кг твердого (жидкого) или на 1 м<sup>3</sup> газообразного топлива определяется по формулам (5.3), (5.4):

$$Q_P^P = Q_H^P + Q_{ТЛ} + Q_{В.ВН} + Q_{Ф} - Q_K \quad (5.3)$$

$$Q_P^P = Q_H^C + Q_{ТЛ} + Q_{В.ВН} + Q_{Ф} \quad (5.4)$$

где  $Q_H^P$  и  $Q_H^C$  – низшая теплота сгорания рабочей массы твердого и жидкого топлива и сухой массы газообразного топлива, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>);  $Q_{ТЛ}$  – физическая теплота топлива, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>);  $Q_{В.ВН}$  – теплота, вносимая в топку с воздухом, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>);  $Q_{Ф}$  – теплота, вносимая в топку с паровым дутьем, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>);  $Q_K$  – теплота, затраченная на разложение карбонатов при сжигании сланцев, кДж/кг.

1. Физическая теплота топлива определяется по формуле:

$$Q_{ТЛ} = c_T^P \cdot t_T \quad (5.5)$$

где  $c_T^P$  – теплоемкость рабочей массы топлива, кДж/(кг·К);  $t_T$  – температура топлива на входе в топку, °С.

Теплоемкость рабочей массы топлива определяется по формуле:

$$c_T^P = c_T^C \frac{100 - W^P}{100} + c_{H_2O} \frac{W^P}{100} \quad (5.6)$$

где  $c_T^C$ ,  $c_{H_2O}$  – соответственно теплоемкость сухой массы твердого топлива и воды, кДж/(кг·К) – для антрацита  $c_T^C$  равно 0,921; для каменных углей – 0,962; для бурых углей – 1,088; для фрезерного торфа – 1,297; для сланцев – 1,046.

Теплоемкость мазута:

$$c_T^P = 1,74 + 0,0025 \cdot t_T$$

Физическая теплота топлива учитывается в том случае, если оно предварительно подогрето вне котлоагрегата.

2. Теплота, вносимая в топку с воздухом определяется по формуле:

$$Q_{B.BH} = \alpha_T V^O c'_{PB} \Delta t_B \quad (5.7)$$

где  $\alpha_T$  – коэффициент избытка воздуха в топке;  $V^O$  – теоретический объем воздуха, необходимый для сгорания 1 кг топлива, м<sup>3</sup>/кг;  $c'_{PB}$  – средняя объемная теплоемкость воздуха при постоянном давлении, кДж/(м<sup>3</sup> К): при температуре воздуха до 300°C  $c'_{PB} = 1,33$  кДж/(м<sup>3</sup>К);  $\Delta t_B$  – разность температур подогретого и холодного воздуха, °C.

3. Теплота, вносимая в топку с паровым дутьем:

$$Q_\phi = W_\phi (i_\phi - 2510) \quad (5.8)$$

где  $W_\phi$  и  $i_\phi$  – соответственно расход и энтальпия пара, идущего на дутье или распыливание топлива, кг/кг и кДж/кг: для дутья  $W_\phi = 0,7 \div 0,8$  кг/кг; для распыливания паровыми форсунками  $W_\phi = 0,35$  кг/кг, паромеханическими форсунками  $W_\phi = 0,03 \div 0,035$  кг/кг.

4. Теплота, затраченная на разложение карбонатов при сжигании сланцев:

$$Q_K = 40,6K(CO_2)_K^P \quad (5.9)$$

где  $K$  – коэффициент разложения карбонатов.

Теплота, полезно использованная в котлоагрегате (кДж/кг) определяется по формуле:

$$Q_1 = \frac{D_{П.П}}{B} \left[ (i_{П.П} - i_{П.В}) + \frac{P}{100} (i_{К.В} - i_{П.В}) \right] + D_{Н.П} (i_{Н.П} - i_{П.В}) \quad (5.10)$$

где  $D_{П.П}$ ,  $D_{Н.П}$  – соответственно расход перегретого и насыщенного пара, кг/с;  $B$  – расход натурального топлива, кг/с;  $i_{П.П}$ ,  $i_{Н.П}$ ,  $i_{П.В}$ ,  $i_{К.В}$  – соответственно энтальпия перегретого и насыщенного пара, питательной и котловой воды, кДж/кг;  $P$  – величина непрерывной продувки, %.

Потери теплоты с уходящими газами (кДж/кг):

$$Q_2 = \frac{(V_{yx} c'_{PVX} \theta_{yx} - \alpha_{yx} V^O c'_{PB} t_B)(100 - q_4)}{100} = \frac{(I_{yx} - \alpha_{yx} I_{XB}^O)(100 - q_4)}{100} \quad (5.11)$$

где  $V_{yx}$  – объем уходящих (дымовых) газов на выходе из последнего газохода котлоагрегата, м<sup>3</sup>/кг;  $c'_{yx}$  – средняя объемная теплоемкость газов при постоянном давлении, определяемая по  $\theta_{yx}$ , кДж/(м<sup>3</sup> К);  $\theta_{yx}$  – температура уходящих газов на выходе из последнего газохода, °C;  $\alpha_{yx}$  – коэффициент избытка воздуха за котлоагрегатом;  $V^O$  – теоретический объем воздуха, необходимый для сгорания 1 кг топлива, м<sup>3</sup>/кг;  $t_B$  – температура воздуха в котельной, °C;  $q_4$  – потеря теплоты от механической неполноты сгорания, %;  $I_{yx}$ ,  $I_{XB}^O$  – соответственно энтальпии продуктов сгорания и холодного воздуха, кДж/кг.

При сжигании жидкого и газообразного топлива потери определяются по формуле:

$$Q_2 = \frac{(I_{yx} - \alpha_{yx} I_{XB}^O)}{100} \quad (5.12)$$

Потери теплоты от химической неполноты сгорания топлива (кДж/кг):

$$Q_3 = \frac{273 \cdot (C^P + 0,375 \cdot S_L^P) CO}{RO_2 + CO} \quad (5.13)$$

где  $C^P$  и  $S_L^P$  – содержание углерода и серы в топливе, %;  $CO$  – содержание оксида углерода в уходящих газах, %;  $RO_2 = CO_2 + SO_2$  – содержание  $CO_2$  и  $SO_2$  в уходящих газах, %.

Потери теплоты от механической неполноты сгорания (кДж/кг) состоят из потерь теплоты топлива со шлаком, потерь от провала несгоревших частиц топлива через колосники и потерь тепла в результате уноса мелких частиц топлива в газоходы котла:

$$Q_4 = Q_4^{ШП} + Q_4^{ПП} + Q_4^{УН} \quad (5.14)$$

*Потери теплоты в окружающую среду* (кДж/кг). В расчетах потери теплоты в окружающую среду принимаются по нормативным данным, а при испытаниях котельных агрегатов определяются из уравнения теплового баланса

$$Q_5 = Q_P - (Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_6) \quad (5.15)$$

или в процентах

$$q_5 = 100 - (q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_6)$$

*Потери теплоты с физической теплотой шлака* (кДж/кг)

$$Q_6 = \frac{a_{\text{шл}} \cdot c_{\text{шл}} \cdot t_{\text{шл}} \cdot A_P}{100} \quad (5.16)$$

где  $a_{\text{шл}}$  – доля золы топлива в шлаке: для камерных топок  $a_{\text{шл}} = 1 - a_{\text{УН}}$ , для слоевых топок  $a_{\text{шл}}$  нужно прибавить долю золы в провале  $a_{\text{ПР}}$ ;  $c_{\text{шл}}$  – теплоемкость шлака, кДж/(кг·К);  $t_{\text{шл}}$  – температура шлака, °С;  $A^P$  – содержание золы в топливе, %.

*Коэффициенты полезного действия котельного агрегата (брутто) и установки (нетто).*

Коэффициент полезного действия установки "брутто" не учитывает затраты энергии на обслуживание котельной установки: привод дымососов, вентиляторов, питательных насосов и прочие расходы. Коэффициент полезного действия "нетто" меньше КПД "брутто", так как он учитывает затраты энергии на собственные нужды установки.

КПД котельного агрегата (брутто) характеризует степень экономичности его работы и представляет собой отношение использованной в котлоагрегате теплоты к располагаемой теплоте топлива:

$$\eta_{KA}^{BP} = \frac{Q_1}{Q_P} \cdot 100 \quad (5.17)$$

или

$$\eta_{KA}^{BP} = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6) \quad (5.18)$$

КПД котельной установки (нетто) равен КПД котлоагрегата за вычетом расхода теплоты на собственные нужды (освещение, привод насосов, вентиляторов и т. д.):

$$\eta_{KV}^{HT} = \eta_{KA}^{BP} - \frac{Q_{C.H.}}{BQ_P} \cdot 100 \quad (5.19)$$

где  $Q_{C.H.}$  — расход теплоты на собственные нужды, кДж/с.

### Задание:

1. В топке котельного агрегата паропроизводительностью  $D = 13,4$  кг/с сжигается подмосковный уголь марки Б2 состава:  $C^P = 28,7\%$ ;  $H^P = 2,2\%$ ;  $S^P = 2,7\%$ ;  $N^P = 0,6\%$ ;  $O^P = 8,6\%$ ;  $A^P = 25,2\%$ ;  $W^P = 32,0\%$ .

Составить тепловой баланс котельного агрегата, а также определить КПД котла брутто и нетто, если известны:

температура топлива при входе в топку  $t_T = 20^\circ\text{C}$ ,

натуральный расход топлива  $B = 4$  кг/с,

давление перегретого пара  $P_{\text{П.П.}} = 4$  МПа,

температура перегретого пара  $t_{\text{П.П.}} = 450^\circ\text{C}$ ,

температура питательной воды  $t_{\text{П.В.}} = 150^\circ\text{C}$ ,

величина непрерывной продувки  $P = 4\%$ ,

теоретический объем воздуха, необходимый для сгорания 1 кг топлива  $V^0 = 2,94$  м<sup>3</sup>/кг,

объем уходящих газов на выходе из последнего газохода  $V_{\text{УХ}} = 4,86$  м<sup>3</sup>/кг,

температура уходящих газов на выходе из последнего газохода  $\theta_{\text{УХ}} = 160^\circ\text{C}$ ,

средняя объемная теплоемкость газов при постоянном давлении  $C_{P,УХ} = 1,415$  кДж/(м<sup>3</sup>·К),  
коэффициент избытка воздуха за последним газоходом  $\alpha_{УХ} = 1,48$ ,  
температура воздуха в котельной  $t_B = 30^\circ\text{C}$ ,  
средняя объемная теплоемкость воздуха при постоянном давлении  $C_{P,В} = 1,297$  кДж/(м<sup>3</sup>·К),  
содержание в уходящих газах оксида углерода  $CO = 0,2\%$  и трехатомных газов  $RO_2 = 16,6\%$   
и потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива  $q_4 = 4\%$ .

Потерями теплоты с физической теплотой шлака пренебречь.

2. В топке котла сжигается малосернистый мазут состава:  $C^P = 84,65\%$ ;  $H^P = 11,7\%$ ;  $S^P = 0,3\%$ ;  $O^P = 0,3\%$ ;  $A^P = 0,05\%$ ;  $W^P = 3,0\%$ .

Определить располагаемую теплоту, если температура подогрева мазута  $t_T = 93^\circ\text{C}$  и энтальпия пара, идущего на распыливание топлива паровыми форсунками,  $i_\phi = 3280$  кДж/кг.  $W_\phi = 0,35$  кг/кг.

### Контрольные вопросы:

1. Что выражает тепловой баланс котельного агрегата и с какой целью его составляют?
2. Какие статьи входят в приходную часть теплового баланса?
3. Какие статьи входят в расходную часть теплового баланса?
4. Что является полезно используемой теплотой для парового котла?
5. Охарактеризуйте потери теплоты с уходящими газами.
6. От чего зависят и как снизить потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива?
7. Охарактеризуйте потери теплоты от химической неполноты сгорания топлива.
8. От чего зависят и как снизить потери теплоты от наружного охлаждения котла?
9. Охарактеризуйте потери с теплотой шлака.
10. Как определяется КПД брутто котельного агрегата?
11. Как определяется КПД нетто котельной установки?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

### «Единицы измерения. Линейная интерполяция»

**Цель работы:** Научиться пересчитывать температуру, количество теплоты и давление в системе из одних единиц измерения в другие; изучить принцип линейной интерполяции.

#### Содержание отчета:

1. Краткий конспект общих сведений.
2. Выполненные задания в соответствии с вариантом.
3. Ответы на контрольные вопросы.

#### Общие сведения:

Основной единицей измерения *температуры* является градус Международной температурной шкалы, практически соответствующий градусу Цельсия. Эта величина равна 1/100 температурного интервала между 0 и 100 °С, т. е. между температурами плавления льда и кипения воды при давлении 760 мм рт. ст.

Абсолютной температурой называется температура, отсчитываемая от абсолютного нуля, т. е. от  $-273,16\text{ }^{\circ}\text{C}$ , и измеряемая в градусах Кельвина (°К).

Градус Кельвина по величине не отличается от градуса Цельсия. Поэтому абсолютная температура выражается в градусах стоградусной шкалы следующим образом:

$$T\text{ [}^{\circ}\text{K]} = t\text{ [}^{\circ}\text{C]} + 273,16$$

В системе СИ единицей измерения температуры установлен градус Кельвина. *Пример:*  $250\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C} = 523,16\pm 5\text{ }^{\circ}\text{K}$ .

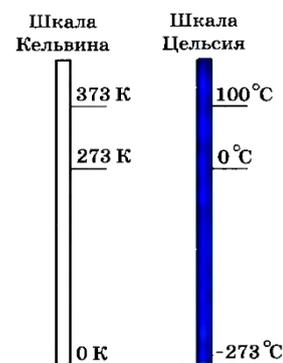


Рисунок 6.1 – Сравнение значений шкал температур

Приставка	Обозначение приставки		Множитель
	международное	русское	
экса	E	Э	$10^{18}$
пета	P	П	$10^{15}$
тера	T	Т	$10^{12}$
гига	G	Г	$10^9$
мега	M	М	$10^6$
кило	k	к	$10^3$
гекто	h	г	$10^2$
дека	da	да	$10^1$
деци	d	д	$10^{-1}$
санти	c	с	$10^{-2}$
милли	m	м	$10^{-3}$
микро	$\mu$	мк	$10^{-6}$
нано	n	н	$10^{-9}$
пико	p	п	$10^{-12}$
фемто	f	ф	$10^{-15}$
атто	a	а	$10^{-18}$

В системе СИ работа, энергия и количество теплоты измеряются в джоулях (Дж). Иногда применяют более крупную и удобную для практических целей единицу — килоджоуль (кДж), равный 1000 Дж. За единицу работы в СИ принимают работу, совершаемую силой в 1 Н на перемещении в 1 м. Энергия — физическая величина, показывающая, какую работу может совершить тело.

В качестве внесистемных тепловых единиц допускается применение калории и килокалории. Калория — это количество тепла, необходимого для нагрева 1 г воды на 1 °С (от 19,5 до 20,5 °С).

$$1\text{ кал (калория)} = 4,1868\text{ Дж};$$

$$1\text{ ккал (килокалория)} = 1000\text{ кал} = 4186,8\text{ Дж} = 4,187\text{ кДж};$$

$$1\text{ Мкал (мегакалория)} = 10^6\text{ кал} = 4,1868\text{ МДж};$$

1 Гкал (гигакалория) =  $10^9$  кал = 4186,8 МДж.

Таблица 6.1 – Значения приставок

Для сравнения при оценке топлива применяется так называемое условное тепло, теплота сгорания которого для расчета принимается условно равной 7000 ккал/кг. В таких случаях говорят об 1 кг или 1 т условного топлива (кг.у.т. или т. у. т.).

Измерение *давления* (атмосферного) определяется как давление атмосферного воздуха на находящиеся в нем предметы и на земную поверхность. Единицей измерения давления в основном является в Паскаль. Один Паскаль равен одному Ньютону на квадратный метр. Используя другие единицы измерения давления паскаль равен  $10^{-5}$  бар и  $7,5006 \cdot 10^{-3}$  миллиметр ртутного столба. Давления газов и жидкостей измеряют с помощью *вакуумметров, датчиков давления, манометров, дифференциальных манометров* (Это приборы для измерения перепада давлений. Применяется для измерения уровня жидкостей в резервуарах под давлением или расхода жидкости, газа и пара с помощью диафрагм методом измерения перепада давления на сужающем устройстве. Называется также датчиком разности давлений.). Прибор для измерения атмосферного давления — *барометр*.

Таблица 6.2 – Конвертор величин

Для того, чтобы перевести давление в единицах:	В единицы:							
	Па (Н/м <sup>2</sup> )	МПа	bar	атм	мм рт. ст.	мм в.ст.	м в.ст.	кгс/см <sup>2</sup>
	Следует умножить на:							
<b>Па (Н/м<sup>2</sup>)</b>	1	$1 \cdot 10^{-6}$	$10^{-5}$	$9.87 \cdot 10^{-6}$	0.0075	0.1	$10^{-4}$	$1.02 \cdot 10^{-5}$
<b>МПа</b>	$1 \cdot 10^6$	1	10	9.87	$7.5 \cdot 10^3$	$10^5$	$10^2$	10.2
<b>бар</b>	$10^5$	$10^{-1}$	1	0.987	750	$1.0197 \cdot 10^4$	10.197	1.0197
<b>атм</b>	$1.01 \cdot 10^5$	$1.01 \cdot 10^{-1}$	1.013	1	759.9	10332	10.332	1.03
<b>мм рт. ст.</b>	133.3	$133.3 \cdot 10^{-6}$	$1.33 \cdot 10^{-3}$	$1.32 \cdot 10^{-3}$	1	13.3	0.013	$1.36 \cdot 10^{-3}$
<b>мм в.ст.</b>	10	$10^{-5}$	0.000097	$9.87 \cdot 10^{-5}$	0.075	1	0.001	$1.02 \cdot 10^{-4}$
<b>м в.ст.</b>	$10^4$	$10^{-2}$	0.097	$9.87 \cdot 10^{-2}$	75	1000	1	0.102
<b>кгс/см<sup>2</sup></b>	$9.8 \cdot 10^4$	$9.8 \cdot 10^{-2}$	0.98	0.97	735	10000	10	1

*Интерполяция*, интерполирование – в вычислительной математике способ нахождения промежуточных значений величины по имеющемуся дискретному набору известных значений. Термин «интерполяция» впервые употребил Джон Валлис в своём трактате «Арифметика бесконечных».

Многим из тех, кто сталкивается с научными и инженерными расчётами, часто приходится оперировать наборами значений, полученных опытным путём или методом случайной выборки. Как правило, на основании этих наборов требуется построить функцию, на которую могли бы с высокой точностью попадать другие получаемые значения. Такая задача называется аппроксимацией. Интерполяцией называют такую разновидность аппроксимации, при которой кривая построенной функции проходит точно через имеющиеся точки данных.

Существует также близкая к интерполяции задача, которая заключается в аппроксимации какой-либо сложной функции другой, более простой функцией. Если некоторая функция слишком

сложна для производительных вычислений, можно попытаться вычислить её значение в нескольких точках, а по ним построить, то есть интерполировать, более простую функцию. Разумеется, использование упрощенной функции не позволяет получить такие же точные результаты, какие давала бы первоначальная функция. Но в некоторых классах задач достигнутый выигрыш в простоте и скорости вычислений может перевесить получаемую погрешность в результатах

*Пример:* Найти промежуточное значение (способом линейной интерполяции).

6000	15.5
6378	?
8000	19.2

$$? = 15.5 + \frac{(6378 - 6000)}{8000 - 6000} * \frac{(19.2 - 15.5)}{1} = 16.1993$$

или

$$? = \frac{19,2 - 15,5}{8000 - 6000} \cdot (6368 - 6000) + 15,5 = 16,1993$$

### Задание:

1. Переведите значение температуры в соответствии с требованиями Таблицы 6.3 для вашего варианта.

2, 3. Определите количество теплоты и давления в системе, исходя из данных своего варианта (Табл.6.3).

Таблица 6.3 – Индивидуальные задания для задач 1-3

№ варианта	Задание 1.		Задание 2.		Задание 3.	
	Температура		Количество теплоты, Q		Давление, P	
	t, °C	T, K	известно	определить	известно	определить
1	- 15	определить	6500 ккал	МДж	23 м в.ст.	МПа
2	определить	264	0,67 ГДж	Мкал	43 атм	мм в.ст.
3	36,6	определить	42 кДж	Мкал	2 бар	Па
4	определить	473	74000 кал	кДж	450 Па	кгс/см <sup>2</sup>
5	-28,5	определить	406 Дж	ккал	450мм рт.ст.	атм
6	определить	173,4	8 Мкал	Дж	5,6 кгс/см <sup>2</sup>	мм рт.ст.
7	158	определить	290 МДж	Гкал	3,8 МПа	кгс/см <sup>2</sup>
8	определить	300,6	32 Гкал	МДж	760 мм в.ст.	бар
9	-184	определить	43000 Дж	Мкал	10,6 атм	Па
10	определить	205	540 ккал	Дж	74 мм.рт.ст.	мм в.ст.
11	49	определить	29,3 МДж	ккал	65 кгс/см <sup>2</sup>	МПа
12	определить	18	36800 Мкал	ГДж	45 бар	атм
13	-52,5	определить	430000 кДж	Гкал	5400 Па	мм рт.ст.

Таблица 6.4 – Физические свойства вещества

Температура, °C	Теплоемкость $c$ , кДж/(кг·K)	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·K)	Динамическая вязкость $\mu \cdot 10^6$ , Па·с	Кинематическая вязкость $\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	Давление $p$ , 10 <sup>-5</sup> Па	Энтальпия $h$ , кДж/кг
0	4,212	999,9	0,551	1788	1,795	1,013	0
10	4,191	999,7	0,574	1306	1,306	1,013	42,04
20	4,183	998,2	0,599	1004	1,006	1,013	83,91
30	4,174	995,7	0,618	801,5	0,805	1,013	125,7
40	4,174	992,2	0,635	653,3	0,659	1,013	167,5
50	4,174	988,1	0,648	549,4	0,556	1,013	209,3
60	4,179	983,2	0,659	469,9	0,478	1,013	251,1
70	4,187	977,8	0,668	406,1	0,415	1,013	293,0
80	4,195	971,8	0,674	355,1	0,365	1,013	355,0
90	4,208	965,3	0,680	314,9	0,326	1,013	377,0
100	4,220	958,4	0,683	282,5	0,295	1,013	419,1
120	4,250	943,1	0,686	237,4	0,252	1,98	503,7
140	4,287	926,1	0,685	201,1	0,217	3,61	589,1
160	4,346	907,0	0,683	173,6	0,191	6,18	675,4
180	4,417	886,9	0,674	153,0	0,173	10,03	763,3
200	4,505	863,0	0,663	136,4	0,158	15,55	852,5

4.

Из таблицы 6.4 определить теплопроводность  $\lambda$  и энтальпию  $h$  вещества при заданной температуре (Табл. 6.6).

5. Зная параметр динамической вязкости  $\mu$  вещества (Табл.6.4) определить его температуру  $t$ .

6. По заданной температуре  $t$  и давлению  $p$  (Табл.6.6) определить энтальпию перегретого пара  $h$  (Табл.6.5).

Таблица 6.5 – Теплофизические свойства водяного пара

$t$	$p=170$			$p=175$			$p=180$			$p=185$		
	$t_s=352,26$			$t_s=354,64$			$t_s=356,96$			$t_s=359,22$		
	$v'=0,0017690; v''=0,008401;$ $h'=1691,6; h''=2550,8;$ $s'=3,8103; s''=5,1841$			$v'=0,0018019; v''=0,007962;$ $h'=1712,3; h''=2533,3;$ $s'=3,8417; s''=5,1497$			$v'=0,0018380; v''=0,007534;$ $h'=1733,4; h''=2514,4;$ $s'=3,8739; s''=5,1135$			$v'=0,0018780; v''=0,007115;$ $h'=1755,3; h''=2493,6;$ $s'=3,9071; s''=5,0746$		
	$v$	$h$	$s$									
405	0,01334	2943,8	5,7923	0,01277	2929,3	5,7614	0,01223	2914,5	5,7303	0,01171	2899,2	5,6989
410	0,01365	2966,3	5,8253	0,01308	2952,6	5,7956	0,01254	2938,7	5,7658	0,01202	2924,3	5,7358
415	0,01394	2987,8	5,8568	0,01337	2974,9	5,8282	0,01283	2961,7	5,7995	0,01231	2948,2	5,7707
420	0,01422	3008,6	5,8870	0,01365	2996,4	5,8592	0,01311	2983,9	5,8315	0,01260	2971,1	5,8038
425	0,01449	3028,8	5,9159	0,01392	3017,1	5,8890	0,01338	3005,2	5,8621	0,01287	2993,0	5,8353
430	0,01476	3048,3	5,9437	0,01419	3037,1	5,9178	0,01365	3025,7	5,8915	0,01313	3014,2	5,8655
435	0,01502	3067,2	5,9706	0,01445	3056,6	5,9451	0,01390	3045,7	5,9197	0,01339	3034,6	5,8945
440	0,01527	3085,7	5,9966	0,01470	3075,4	5,9717	0,01415	3065,0	5,9470	0,01364	3054,4	5,9224
445	0,01552	3103,8	6,0218	0,01494	3093,9	5,9975	0,01440	3083,9	5,9734	0,01388	3073,8	5,9494
450	0,01576	3121,4	6,0463	0,01518	3111,9	6,0225	0,01463	3102,3	5,9989	0,01411	3092,5	5,9754
460	0,01623	3155,7	6,0934	0,01565	3146,8	6,0704	0,01509	3137,9	6,0478	0,01457	3128,8	6,0253
470	0,01668	3188,8	6,1382	0,01610	3180,5	6,1160	0,01554	3172,1	6,0942	0,01501	3163,7	6,0725
480	0,01712	3220,8	6,1811	0,01653	3213,1	6,1596	0,01597	3205,2	6,1384	0,01543	3197,3	6,1174
490	0,01755	3252,1	6,2222	0,01695	3244,7	6,2014	0,01638	3237,4	6,1808	0,01584	3229,9	6,1604
500	0,01797	3282,6	6,2620	0,01736	3275,7	6,2416	0,01678	3268,7	6,2215	0,01624	3261,7	6,2017

Таблица 6.6 – Индивидуальные задания для задач 3-5.

<b>№ варианта</b>	<i>Задание 4.</i>	<i>Задание 5.</i>	<i>Задание 6.</i>	
	<i>Температура вещества <math>t</math>, °C</i>	<i>Динамическая вязкость <math>\mu</math>, Па·с</i>	<i>Температура пара <math>t</math>, °C</i>	<i>Давление пара <math>P</math>, МПа</i>
<b>1</b>	157	726	407	171
<b>2</b>	15	160	412	172
<b>3</b>	104	305	417	173
<b>4</b>	69	944	423	174
<b>5</b>	23	458	428	176
<b>6</b>	46	147	432	177
<b>7</b>	28	219	437	178
<b>8</b>	74	351	443	179
<b>9</b>	183	402	446	181
<b>10</b>	132	1204	452	182
<b>11</b>	37	695	458	183
<b>12</b>	96	815	463	184
<b>13</b>	125	479	469	172

**Контрольные вопросы:**

1. Как и для чего выполняется линейная интерполяция?
2. В каких единицах может измеряться температура?
3. Какие единицы измерения давления вы знаете?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

### «Изучение конструкций слоевых топок по чертежам»

**Цель работы:** Изучить классификацию, технические характеристики и конструкции слоевых топок; особенности сжигания топлива в слое.

#### Содержание отчета:

1. Описание конструкций различных топок.
2. Ответы на контрольные вопросы.

#### Общие сведения:

*Топки* - это часть парогенератора, предназначенная для сжигания топлива. Топка – один из основных элементов котельного агрегата. В ней происходит процесс горения, при котором химическая энергия топлива преобразуется в тепловую энергию продуктов сгорания, передаваемую далее жидкости и пару, находящемуся в котле, за счет которой генерируется пар.

Топка (камера сгорания) может иметь различные размеры и форму. Эти параметры задаются инженерами-теплотехниками. Главными характеристиками камеры сгорания являются *объем, тепловая мощность и состав продуктов сгорания* (в том числе доля механического и химического недожога, снижающих КПД топки, и доля вредных веществ).

*Фронтом* (передней стенкой) топки называется сторона, где расположена загрузочная дверца и/или горелки; у некоторых топок два фронта друг напротив друга. В противоположной стенке (задней) обычно находится отверстие для выхода продуктов сгорания (в энергетических котлах называемое *выходное окно*); иногда газы удаляются в другом направлении, например, в потолок.

Существуют *закрытые* и *открытые* топки. Они могут располагаться в печи, на паровозе или в стационарном котле.

#### *Классификация слоевых топок*

Слоевые топки предназначены для сжигания твердого кускового топлива. Они просты в эксплуатации, пригодны для различных сортов топлива, не требуют больших объемов топки, могут работать при значительных колебаниях тепловой нагрузки, отличаются относительно небольшим расходом энергии на собственные нужды и, главное, не требуют дорогих пылеприготовительных устройств.

Для сжигания твердого топлива в плотном слое применяют разнообразные топочные устройства, различающиеся как теплотехническими характеристиками (способами подвода топлива и воздуха, организацией смесеобразования, тепловой подготовкой), так и конструктивным исполнением. Обслуживание топки, в которой топливо сжигается в слое, сводится к следующим основным операциям: подача топлива в топку; шурование слоя, т.е. перемещение кусочков топлива относительно один другого и колосниковой решетки, на которой топливо сжигается, для улучшения условий подвода окислителя и удаления из топки шлака.

В зависимости от степени механизации указанных операций топочные устройства можно разделить на *не механизированные* (все три операции выполняются вручную); *полумеханические* (механизированы одна или две операции); *механические* (механизированы все три операции).

По режиму подачи топлива в плотный слой различают топочные устройства *с периодической* и *непрерывной* загрузкой топлива.

По организации тепловой подготовки и воспламенения топлива в слое различают топки *с нижним, верхним* и *смешанным* воспламенением.

#### *Характеристики процесса горения твердого топлива в плотном слое*

Структура горящего слоя твердого топлива, неподвижно лежащего на колосниковой решетке, при верхней загрузке топлива приведена на рис. 1.1, а. В верхней части слоя после загрузки находится свежее топливо, ниже располагается горящий кокс, а непосредственно над

решеткой — шлак. По мере движения при горении топливо и продукты его горения постепенно проходят все зоны. После загрузки на слой горящего кокса свежей порции топлива она постепенно нагревается, при этом происходит испарение влаги, выделение летучих. На рис. 7.1, б показано примерное распределение температуры по высоте слоя. Область наиболее высокой температуры соответствует зоне горения кокса, т.е. здесь и выделяется основное количество теплоты.

Образующийся при горении топлива шлак в виде жидких капель стекает с раскаленных кусочков кокса навстречу потоку воздуха. Оказавшись в слоях более низких температур шлак охлаждается и колосниковой решеткой он достигает уже в твердом состоянии. Его периодически удаляют с решетки, хотя он служит защитой от перегрева и, кроме того, служит источником теплоты для подогрева воздуха, способствует распределению воздуха по слою.

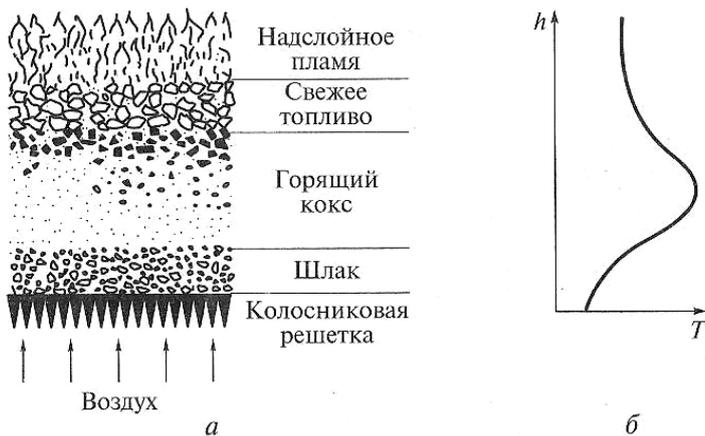


Рисунок 7.1 – Структура (а) горящего слоя твердого топлива и график (б) распределения температуры  $T$  по его высоте  $h$

Воздух, поступающий в слой топлива через решетку, называют *первичным*. Если первичного воздуха не хватает для полного сгорания топлива и над слоем имеются продукты неполного сгорания, то организуют дополнительную подачу воздуха в надслойное пространство. Такой воздух называют *вторичным*.

При верхней загрузке топлива на решетку осуществляются нижнее воспламенение топлива и встречное движение газозоудного и топливного потоков. Этим достигаются эффективное заживание топлива и благоприятные условия его горения.

Первичные химические реакции между топливом и окислителем  $O_2$  происходят в зоне раскаленного кокса.

Характер газообразования в слое горящего топлива показан на рисунке 7.2.

Рисунок 7.2 – Газообразование в слое горящего топлива

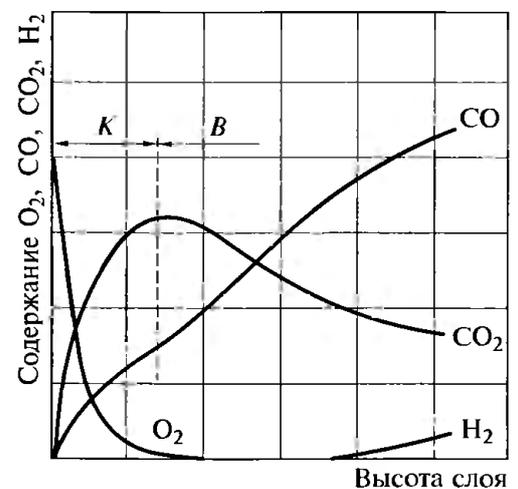
У основания слоя, в кислородной зоне  $K$ , в которой происходит интенсивное расходование кислорода, одновременно образуются  $CO_2$  и  $CO$ . К концу кислородной зоны содержание  $O_2$  снижается до 1.. 2 %, а концентрация  $CO_2$  достигает своего максимума. Температура слоя в кислородной зоне резко возрастает, имея максимум там, где устанавливается наибольшая концентрация  $CO_2$ .

В восстановительной зоне  $B$  кислород практически отсутствует. В этой зоне происходит восстановление  $CO_2$  на раскаленном углероде по реакции



По высоте восстановительной зоны содержание  $CO_2$  в газе уменьшается, тогда как содержание  $CO$  соответственно увеличивается.

Толщины кислородной и восстановительной зон зависят, в основном, от типа и размеров кусков горящего топлива и температурного режима. С увеличением крупности топлива толщины зон увеличиваются. Установлено, что толщина кислородной зоны составляет примерно 3—4 диаметра горящих частиц. Восстановительная зона толще кислородной в 4—6 раз.



*Топки для сжигания твердого топлива в слое. Слойные топки с неподвижной колосниковой решеткой и неподвижным слоем топлива*

Топки слоевого сжигания с неподвижным слоем на неподвижной колосниковой решетке (рис. 7.3) применяются в котлах малой мощности, как правило, с ручным обслуживанием и периодической загрузкой топлива. Они содержат решетку из чугуновых колосников **2**, опирающихся на балки **4**, заделанные в ее кирпичные стены **3**. Под решетку подают специальным воздухопроводом **6** (с помощью вентилятора или за счет естественной тяги) воздух, используемый для горения топлива. В колосниках имеются отверстия круглого или щелевидного сечения, расширяющиеся вниз, чтобы исключить застревание в них шлака, проваливающегося в бункер **5**. Свежие порции топлива забрасывают равномерным слоем на решетку через загрузочное окно **1**, закрываемое дверцей.

Обслуживание ручных слоевых топков связано со значительными интенсивными затратами тяжелого физического труда. Частичная механизация ручной топки может быть достигнута установкой поворотных или качающихся колосников (рис. 7.4). Этим облегчается одна их наиболее трудоемких печных операций — очистка решетки от шлака. При установке поворотных колосников колосниковая решетка составляется из 3 — 4 отдельных секций, каждая из которых состоит из поворотных колосников, закрепленных на общем валу.

Для очистки топки от шлака секции поочередно включают на выжиг топлива, после чего поворотом колосников шлак со всей секции сбрасывается в шлаковый бункер, установленный под решеткой.

В отличие от поворотных колосников, где с решетки после выжига удаляется весь шлак, при работе с качающимися колосниками при периодическом их покачивании достигаются разрыхление шлака и удаление лишь низлежащего наиболее выгоревшего слоя. Процесс горения слоя топлива, находящегося выше, при этом не нарушается.

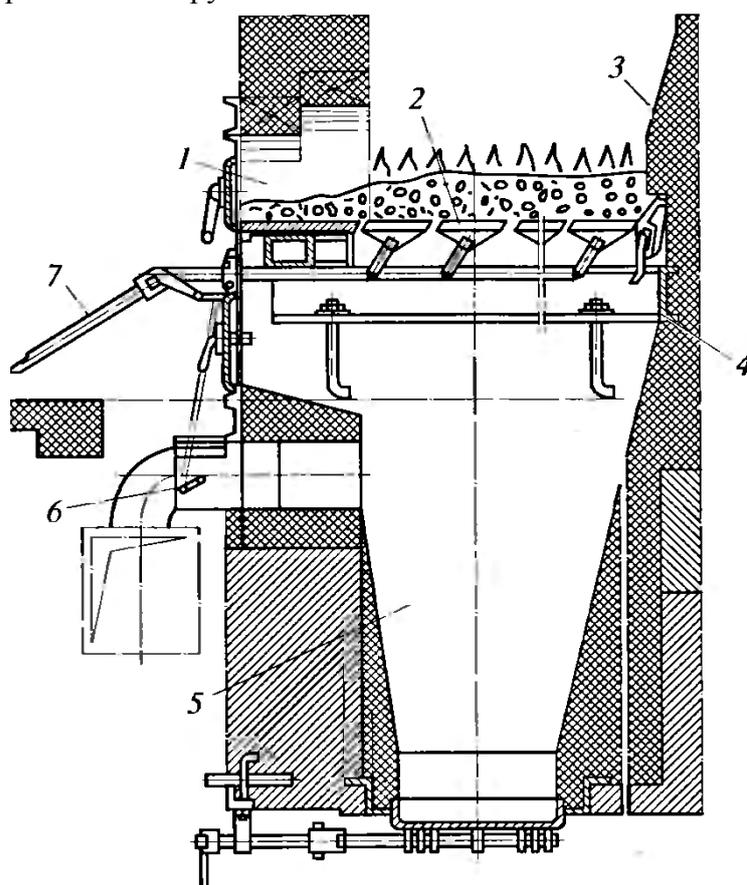


Рисунок 7.3 – Топка с колосниковой решеткой с ручным обслуживанием:

1- загрузочное окно; 2- колосник; 3-стена топки; 4- опорная балка; 5-бункер; 6-воздуховод; 7-привод решетки.

Полную очистку топки от шлака при наличии качающихся колосников проводят через 1 - 3 суток, а не 1 — 2 раза в смену, как это имеет место при неподвижных колосниках. Для поворотных и качающихся колосников применяют как ручной, так и механизированный приводы.

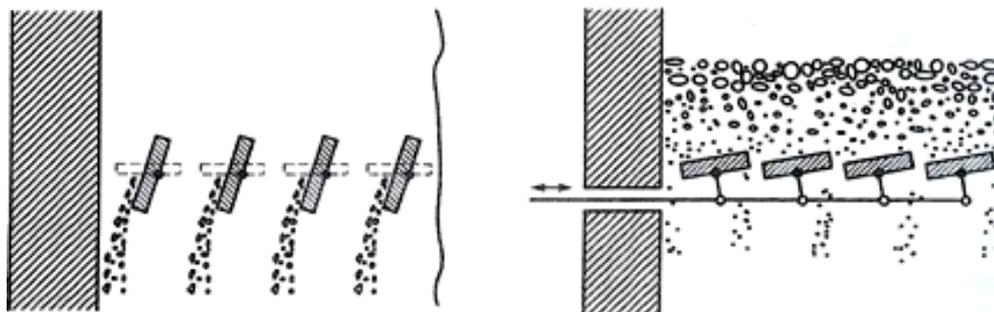


Рисунок 7.4 – Схема действия поворотных (а) и качающихся (б) колосников

Облегчение труда машиниста, а также улучшение условий работы слоя достигаются механизацией загрузки топлива на решетку с применением различных забрасывателей. В этом случае перед фронтом топки устанавливают бункер, из которого топливо поступает к забрасывателю, который подает его на слой. Используемые на практике забрасыватели топлива подразделяют на механические, пневматические и пневмомеханические. Схемы забрасывателей показаны на рис.

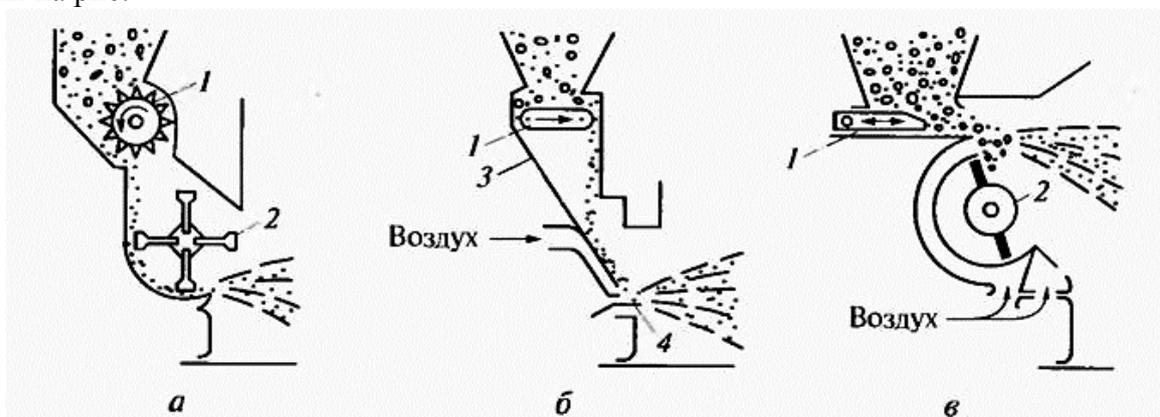


Рисунок 7.5 – Забрасыватели топлива: а) механический; б) пневматический; в) пневмомеханический: 1 - дозирующее устройство; 2 – метатель; 3 – разгонная плита; 4 – распределительная плита.

Обычно по ширине топки устанавливают несколько забрасывателей топлива.

При использовании *механического* забрасывателя (рис. 7.5, а) подача топлива на решетку осуществляется непрерывно вращающимся со скоростью 550... 800 мин<sup>-1</sup> лопастным метателем 2, к которому топливо поступает с помощью дозирующего устройства 1.

В *пневматическом* забрасывателе (рис. 7.5, б) топливо с разгонной плиты 3 сдувается на решетку воздухом, потоки которого устремляются из сопел круглой или щелевидной формы.

Расход воздуха составляет 0,2...0,25 м<sup>3</sup>/кг топлива, скорость истечения воздуха — 30... 80 м/с. В паровых пневматических забрасывателях используют пар, выходящий из сопел со скоростью около 400 м/с.

Забрасыватели дают неравномерное по фракционному составу распределение топлива по длине решетки, что нежелательно. Механические забрасыватели подают более крупные куски топлива на заднюю часть решетки, а мелкие — на переднюю. Пневматические (паровые) забрасыватели, наоборот, загружают более крупные куски топлива ближе к фронту топки, а более мелкие куски - в заднюю часть топки.

По принципу действия *пневмомеханический* забрасыватель (рис. 7.5, в) сочетает в себе механическое и пневматическое воздействие на кусочки топлива, в результате чего достигается более равномерное распределение топлива разных фракций по длине решетки.

#### *Топки с неподвижной колосниковой решеткой и перемещающимся слоем топлива*

Для сжигания твердого кускового топлива используют топки с неподвижными наклонными решетками с перемещающимся слоем топлива (рис. 7.6, а). Топливо из бункера 1 сползает или

подается дозатором в вертикальную шахту **9** и далее — на наклонно установленные колосниковые решетки **8**. Для горения под решетки вводится по каналам **7** воздух, который пронизывает слой лежащего топлива.

По мере выгорания топливо перемещается на подпирющие (горизонтальные или слабонаклонные) дожигательные решетки **6**, под которыми располагается золовой бункер **5**. Для дожигания топлива в объеме топки **4** на ее стенах **2** предусмотрены сопла **3** для подачи вторичного воздуха.

На рис. 1.6, б приведена топка скоростного горения с вертикально перемещающимся зажатом слоем топлива, предназначенная для сжигания древесных отходов. Вертикальную шахту **9** образуют фронтальная кирпичная стена и зажимающая стена **11** с отверстиями, отделяющая топливо от топочной камеры **14**. Окна **10** в верхней части до шахты обеспечивают проникновение в слой движущегося топлива топочных газов, интенсифицирующих протекание начальных фаз горения (нагрева топлива и выделения летучих). Подаваемый по воздушным каналам /воздух проходит через вертикальный слой топлива в сторону зажимающей стены и участвует в горении летучих и частично кокса. Продукты горения выводятся через отверстия в зажимающей стене. Часть воздуха подается на наклонную дожигательную решетку **6** и в объем топки через сопла **13**.

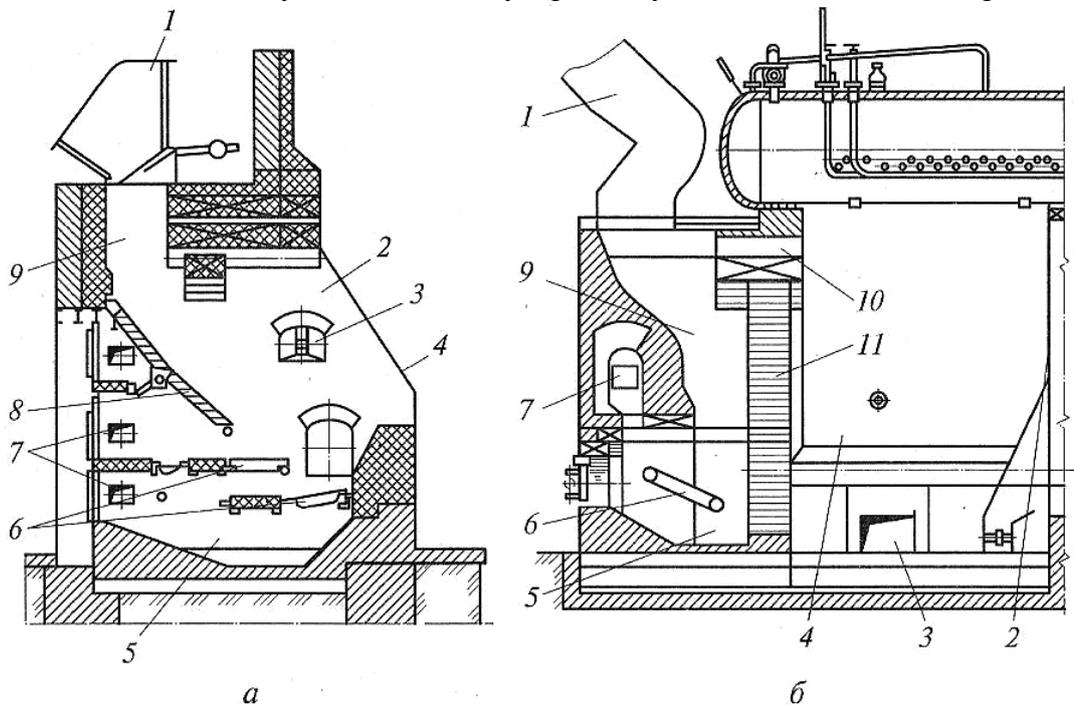


Рисунок 7.6 – Топки с неподвижными наклонными решетками с перемещающимся (а) и зажатом (б) слоями топлива:

1 - угольный бункер; 2 - стена топки; 3 - воздушное сопло; 4 - топочная камера (топка); 5 - золы бункер; 6 - дожигательная решетка; 7 — воздушные каналы; 8 - колосниковая решетка; 9 - шахта; 10 - окно; 11 - зажимающая стена шахты.

Принцип слоевого сжигания в периодически перемешиваемом и перемещаемом слое реализуется в топках с шурующей планкой (рис. 7.7), в которой механизированы все три операции: подачи топлива в топку, шуровки слоя и удаления шлака.

Топливо из бункера **3** поступает на горизонтальную неподвижную колосниковую решетку **10** с помощью шурующей планки **4**, связанной штангой **2** с приводом **1**.

Специфическая форма планки **4** с более крутым подъемом в сторону топки и пологая в обратном направлении (см. узел А на рис. 7.7) позволяет осуществлять переталкивание свежих порций топлива к противоположной стене топки **6** по колосниковой решетке **10** с подпорным уступом перед шлаковым бункером **8**.

Частичное перемещение раскаленного топлива в сторону свежего при обратном ходе планки способствует более раннему его зажиганию. Периодическое перемещение и перемешивание топлива при движении шурующей планки благоприятствует более равномерному его

распределению по решетке, интенсификации горения, разрушению образующейся на колосниках шлаковой корки и более равномерному распределению воздуха, поступающего под полотно решетки из коробов **9**. При шуровке наиболее мелкая зола может просыпаться через колосниковую решетку на подину **11**, с которой она периодически удаляется.

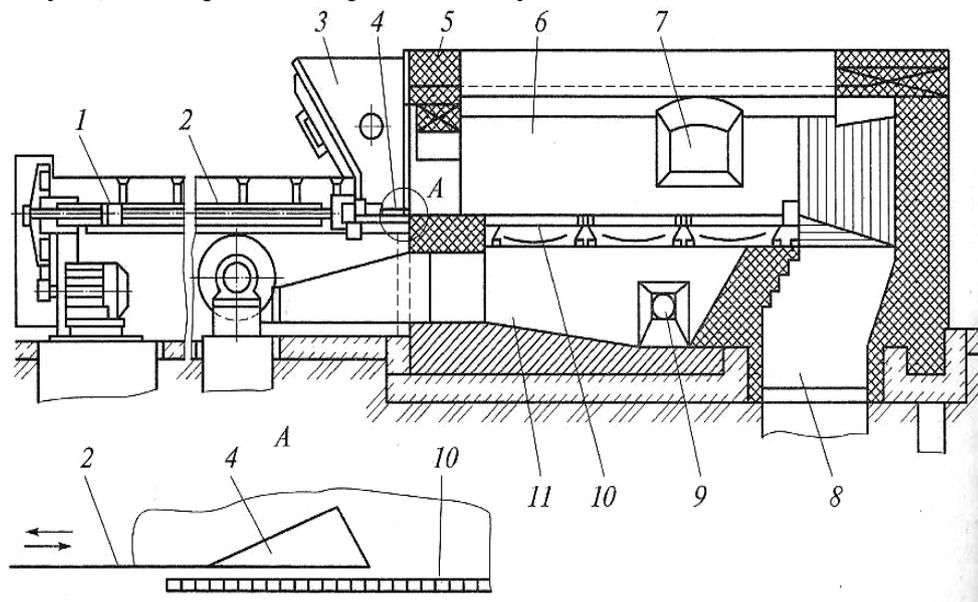


Рисунок 7.7 – Топка с шурующей планкой:

1 - привод планки; 2 - штанга; 3 - бункер топлива; 4 - шурующая планка; 5 - стена топки; 6 - топка; 7 - рабочее окно; 8 - шлаковый бункер; 9 - воздушный короб; 10 - колосниковая решетка; 11 – подина (нижняя горизонтальная поверхность в печи, в печной топке); стрелками показано направление движения шурующей планки.

### *Топки с движущейся колосниковой решеткой*

В механизированных топках с движущимися колосниковыми решетками горение происходит в плотном слое топлива, неподвижном относительно движущейся решетки. Свежие порции топлива либо подаются непосредственно на поступающую в топку часть полотна, либо разбрасываются сверху по полотну решетки с помощью специальных разбрасывателей.

В настоящее время применяются механические топки (рис. 7.8) с колосниковыми решетками прямого и обратного хода. В топке с решеткой прямого хода полотно с топливом перемещается от фронта топки к задней стенке (рис. 8.8, *а*), а в топке с решеткой обратного хода — от задней стенки к фронту (рис. 7.8, *б*).

В механических топках с цепными решетками полотно решетки **3** состоит из отдельных колосников, укрепленных на шарнирных цепях, надетых на две пары звездочек **6**. Ведущая пара приводится во вращение электродвигателем через редуктор. Скорость движения решетки можно изменять от 1 до 18 м/ч.

Топливо из загрузочного ящика **1** поступает на движущуюся решетку. Желаемую толщину слоя топлива устанавливают шибером **2**, который может перемещаться по вертикали. Необходимый для горения воздух подводится под решетку (между полотнами) и поступает в слой через зазоры в колосниках. По мере продвижения решетки топливо выгорает. Образующийся шлак сбрасывается с решетки шлакоснимателем **4** в шлаковый бункер **5**.

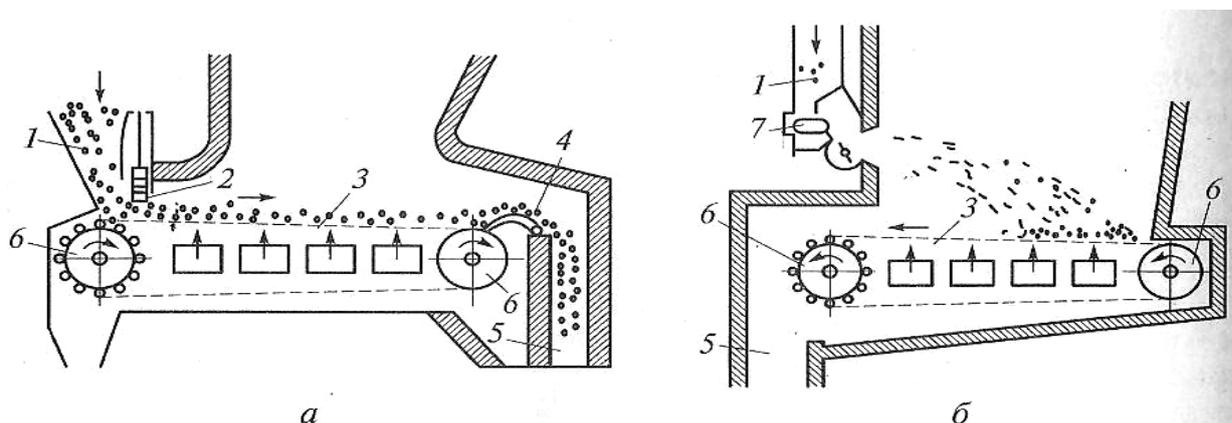


Рисунок 7.8 – Механические топки с колосниковыми решетками:

а - прямого хода; б - обратного хода; 1 - загрузочный ящик; 2 - шибер; 3 - полотно решетки; 4 - шлакосниматель; 5 - шлаковый бункер; 6 - звездочки; 7 - пневмомеханический забрасыватель топлива.

В топках с решетками обратного хода (см. рис. 7.8, б) применяют цепные решетки типа ТЧЗ (чешуйчатые с забрасывателем топлива), а также ТЛЗМ (ленчатые моноблочные с забрасывателем топлива).

Топливо поступает на решетку прямого хода на относительно холодные колосники. Прогрев его происходит в основном за счет теплоты излучения надслоено горящих газов, разогретой обмуровки топки и лишь частично от впереди расположенного на решетке горящего топлива. Таким образом, в топках прямого хода имеется и верхнее зажигание, при котором первоначально прогреваются и начинают гореть верхние слои топлива, а затем происходит разогрев и горение нижерасположенных слоев, переместившихся за время задержки горения на некоторое расстояние.

Чешуйчатая цепная решетка (рис. 7.9) состоит из полотна 1, набранного из наклонно расположенных беспровальных колосников. Кусочки провала (несгоревшие кусочки топлива) собираются в карманах б нижней части колосников. При сходе полотна вниз колосники опрокидываются и уловленный провал сбрасывается в бункер. Воздух проходит в слой через узкие щели в местах прилегания колосников одного к другому.

Весьма эффективным способом интенсификации перемешивания газов в топке является применение «острого» дутья, т.е. вдувание воздуха в топочную камеру с большой (50...80 м/с) скоростью в виде относительно тонких струй. Расход воздуха на «острое» (вторичное) дутье составляет 5... 10% общего его расхода.

Для уменьшения потерь теплоты от механической неполноты сгорания необходимо всемерно интенсифицировать выжиг топлива на шлаковом участке решетки. Эффективными в этом отношении являются низко расположенные в этой зоне горячие кирпичные своды. При налаженном процессе горение на решетке должно полностью заканчиваться примерно на расстоянии 0,3...0,5 м от места сброса шлака с решетки. В месте схода шлака устанавливают шлакосниматель (см. рис. 7.9), который несколько замедляет движение шлака, способствуя его выжигу, а также защищает решетку от оголения.

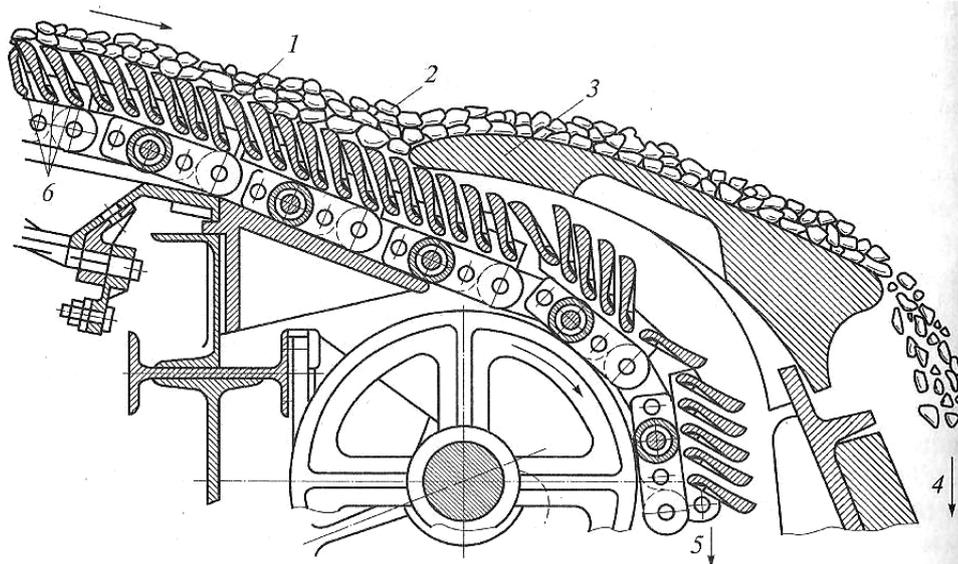


Рисунок 7.9 – Чешуйчатые беспровальные колосники и шлакосниматель:

1 - полотно решетки; 2 - шлак; 3 - шлакосниматели; 4 - сброс шлака в шлаковый бункер; 5 - сброс провала; 6 - карманы для сбора провала.

Чтобы избежать образования наростов шлака на боковых стенах топочной камеры, на уровне верхнего полотна цепной решетки с боковых ее сторон устанавливают водоохлаждаемые панели, представляющие собой коллекторы, включенные в систему циркуляции котла.

Применение горячего дутьевого воздуха способствует интенсификации горения топлива в слое. Предел подогрева воздуха лимитируется условиями работы решетки. Так, при сжигании на решетке антрацита — угольного топлива с малым выходом летучих, для которого тепловыделение происходит в основном в слое, — применяют подогрев воздуха до 150... 170 °С. При сжигании топлив с высоким выходом летучих (бурые, каменные угли), для которых тепловыделение в значительной степени переносится в топочный объем, применяют воздух, подогретый до 200...250°С.

### *Топки с кипящим слоем*

Эффективное сжигание твердого мелкозернистого (0...20 мм) топлива может быть достигнуто при использовании принципа кипящего слоя. При подаче воздуха под решетку плотный фильтруемый слой при определенных скоростях воздуха начинает расширяться, и при некотором дальнейшем увеличении скорости воздуха частицы приходят в движение (псевдоожигению), слой как бы кипит (отсюда название "кипящий слой"), высота и пористость его увеличивается.

Объем слоя в результате этого увеличивается в 1,2—1,8 раза в зависимости от интенсивности дутья и размера частиц топлива. Частицы топлива совершают возвратно-поступательное движение по высоте слоя, превращая слой топлива в подобие кипящей жидкости (рис. 1.10, *a*). По мере выгорания мелкие частицы выносятся в объем топки и там сгорают.

Минимальную скорость, при которой начинается псевдоожигение, называют первой критической скоростью  $W_{кр1}$ ; при второй критической скорости  $W_{кр2}$  аэродинамическая сила становится равной силе тяжести частиц топлива, и начинается их интенсивный вынос из слоя. Оба эти параметра имеют строго определенные значения только для монодисперсного материала с постоянной плотностью, а слой, как известно, состоит из полифракционного инертного материала и частиц топлива разной плотности.

Реальные топочные устройства с кипящим слоем работают со скоростями от  $W_{кр1}$  до  $W_{кр2}$ . Различают топки с обычным, или стационарным кипящим слоем (когда скорость в нем близка к  $W_{кр1}$ ) и топки с циркулирующим кипящим слоем (когда скорость близка к  $W_{кр2}$ ). В последнем случае из слоя выносятся значительная часть недогоревшего топлива, которое затем улавливается в горячих циклонах (б) и возвращается для дожига.

В кипящем слое в отличие от плотного слоя температура горения ниже (до 1000... 1200 °С). Температуру кипящего слоя поддерживают на уровне, исключающем плавление золы, во избежание шлакования слоя. Это может быть достигнуто установкой в слое охлаждающих поверхностей,

рециркуляцией дымовых газов. Кусочки топлива в кипящем слое интенсивно обдуваются воздухом, что способствует высокой скорости их сжигания.

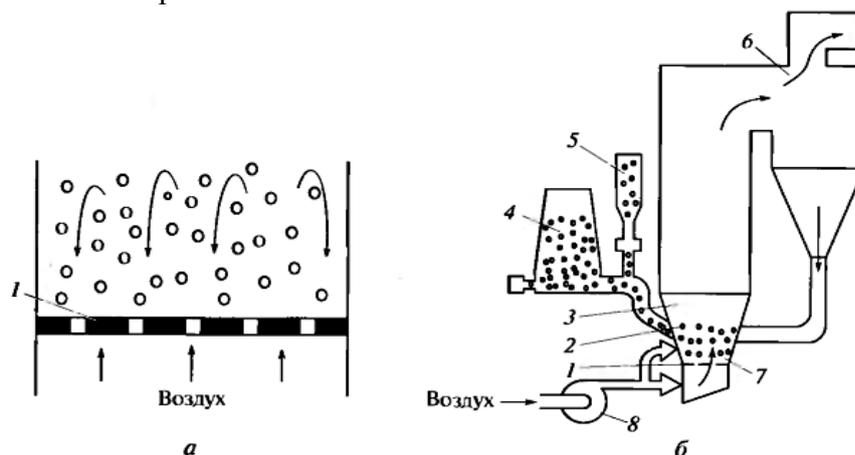


Рисунок 7.10 - Топки для сжигания топлива в кипящем слое:

а) схема сжигания топлива; б) конструкция с высокотемпературным циклоном;

1 - решетка; 2 - топливо; 3 - топка; 4 - бункер угля; 5 - бункер присадки; 6 - высокотемпературный циклон; 7- погруженная поверхность нагрева; 8- вентилятор.

На рис. 7.10, б показана схема топki с кипящим слоем, в которой топливо из бункера 4 подается в топку 3 на решетку 1. Под решетку вентилятором 8 нагнетается воздух.

Из бункера 5 в топливо добавляется размолотый доломит для связывания образующихся при сжигании оксидов серы. Крупные частицы топлива, уносимые из топki в газодол, улавливаются в высокотемпературном циклоне и возвращаются на дожигание в топку.

Особый интерес к организации сжигания топлив в кипящем слое вызван следующим. Во-первых, для сжигания в кипящем слое пригодны различные твердые топлива, включая низкосортные, крупностью 0...20 мм. При этом значительно сокращаются расходы на топливоприготовление. Расположение погруженной поверхности нагрева 7 в кипящем слое, где коэффициент теплоотдачи составляет 200...300 Вт/(м<sup>2</sup>·К), обеспечивает существенное снижение металлоемкости установки. Работа с относительно низкотемпературным слоем приводит к значительному уменьшению загрязнения атмосферы, так как большая часть серы, содержащейся в топливе, остается в слое и удаляется вместе с золой. Во вторых, благодаря более низкой температуре процесса отходящие из кипящего слоя газы практически не содержат токсичных оксидов азота.

Важно отметить, что в топках с кипящим слоем количество горючего материала составляет обычно небольшую долю от массы слоя, основу его составляет инертный материал или зола топлива (при сжигании высокозольных углей). Интенсивное перемешивание твердых частиц под воздействием сжижающего воздуха, проходящего через слой зернистого материала, обеспечивает повышенный тепло- и массообмен в слое. Погружение в кипящий слой поверхностей нагрева позволяет поддерживать температуру на таком уровне, при котором не происходит зашлаковки слоя.

К основным достоинствам метода сжигания твердого топлива в кипящем слое относятся следующие:

- обеспечивается высокий коэффициент теплопередачи;
- длительное пребывание частиц в слое позволяет сжигать уголь с повышенной зольностью и отходы производства;
- появляется возможность создать более компактное топочное устройство без системы пылеприготовления, при этом снижаются удельные капитальные затраты на сооружение котельной, а также ремонтные расходы;
- добавка известняка в слой связывает серу топлива с зольным остатком, что уменьшает выбросы сернистого ангидрида с дымовыми газами в атмосферу;

- низкие температуры в слое (800-950°C) обеспечивают отсутствие термических оксидов азота, что в некоторых случаях сокращает выбросы оксидов азота в атмосферу.

Топки с циркулирующим кипящим слоем отличаются более высокой степенью выгорания топлива (примерно 99), они могут работать с меньшим коэффициентом избытка воздуха (1,1-1,15).

Система подачи топлива у котлов с циркулирующим кипящим слоем проще, они менее требовательны к качеству топлива и лучше приспособлены к его ступенчатому сжиганию, необходимому для снижения выбросов оксидов азота.

### **Контрольные вопросы:**

1. По каким признакам и каким образом осуществляется классификация слоевых топок?
2. Какова структура горящего слоя твердого топлива, лежащего неподвижно на колосниковой решетке?
3. Укажите распределение температур и характер газообразования по высоте горящего слоя твердого топлива.
4. Каковы устройство и принцип действия слоевой топки с неподвижной колосниковой решеткой и неподвижным слоем топлива?
5. Каким образом осуществляется механизация загрузки топлива в слоевых топках?
6. Каковы устройство и принцип действия топки с неподвижной решеткой и перемещающимся слоем топлива?
7. Опишите устройство и принцип действия топки скоростного горения с зажатым слоем.
8. Каковы устройство и принцип действия топки с шурующей планкой?
9. Раскройте особенности устройства и принцип действия механизированной топки с движущейся колосниковой решеткой.
10. Какие приемы используются в механизированных топках с движущейся колосниковой решеткой для снижения потерь теплоты и интенсификации процесса горения топлива?
11. Каковы устройство и принцип работы топки с кипящим слоем?
12. Почему в топках с кипящим слоем активизируется процесс горения?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

### *«Изучение конструкции камерных топок по чертежам»*

**Цель работы:** Изучить классификацию, технические характеристики и конструкции камерных топок; особенности сжигания топлива в камерных топках.

#### **Содержание отчета:**

1. Описание конструкций различных топок.
2. Ответы на контрольные вопросы.

#### **Общие сведения:**

*Камерная топка* - топка паровых и водогрейных котлов, выполненная в виде прямоугольной призматической камеры, в которой топливо сгорает в струе воздуха (в факеле).

Классификация камерных топок:

- по методу сжигания топлива камерные топки разделяются на *факельные* с прямым выходом газов из топки и *вихревые*,
- по числу камер — на топки *однокамерные* и *двухкамерные*,
- по виду сжигаемого топлива — на топки *пылеугольные* и *газوماзутные*,
- по способу удаления шлака — на топки с *твердым* и *жидким* шлакоудалением.

Камерные топки применяют для сжигания твердого, жидкого и газообразного топлива. При этом твердое топливо должно быть предварительно размолото в тонкий порошок в специальных пылеприготовительных установках — углеразмельняющих мельницах, а жидкое топливо — распылено на очень мелкие капли в мазутных форсунках. Газообразное топливо не требует предварительной подготовки.

Основными элементами камерной топки являются: собственно топочная камера, лучевоспринимающие поверхности нагрева, горелки (или амбразуры), устройства для приема шлака и его удаления.

Топочная камера своей верхней частью примыкает к газоходу пароперегревателя, отделяясь от него рядами сильно разреженных котельных труб, называемым фестомом. В нижней части камеры находится золовая воронка, выполненная в виде опрокинутой усеченной пирамиды.

*Топочная камера* — отделенное обмуровкой котла от окружающей среды пространство, в котором происходит процесс горения топлива. Обмуровка вертикальных стен, потолочного перекрытия и золовой воронки (или горизонтального пода) должна быть не теплопроводной — для сведения к минимуму количества теплоты, теряемой камерной топкой в окружающую среду, и плотной — для исключения подсоса в камерную топку холодного воздуха извне или выбивания дымовых газов при работе котла с наддувом.

*Лучевоспринимающими поверхностями* нагрева камерной топки являются топочные экраны и фестон, а в котлах высокого давления — частично трубы пароперегревателя.

*Топочные водяные экраны* предохраняют кладку камеры от износа и разрушений под действием высокой температуры факела и расплавленных шлаков, но в большей степени представляют собой эффективную поверхность нагрева, воспринимающую большое количество теплоты, излучаемой факелом. Распространены экраны из гладких труб.

Камерную топку экранируют с расчетом, чтобы температура дымовых газов при выходе из них не превышала температуру начала деформации золы и чтобы исключалась возможность шлакования труб фестона расплавленной золой. Температуру дымовых газов в конце камерной топки принимают равной 1050—1150°C при сжигании углей и 950°C при сжигании сланцев и торфа.

*Основные преимущества камерных топок заключаются в следующем:*

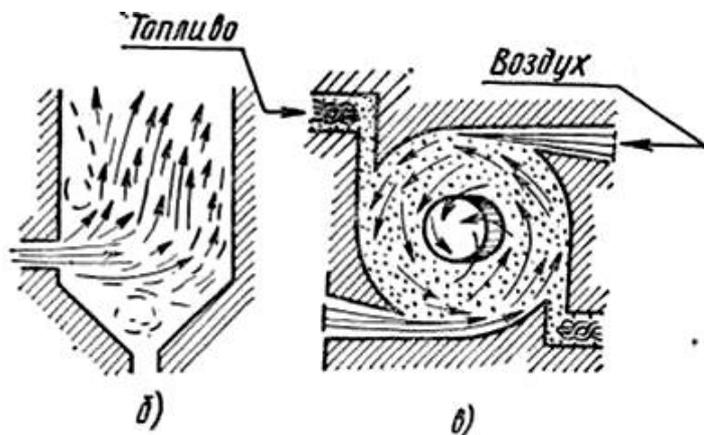
- 1) возможность экономичного использования практически всех сортов угля, в том числе и низкокачественных, которые трудно сжигать в слое;

- 2) хорошее перемешивание топлива с воздухом, что позволяет работать с небольшим избытком воздуха ( $\alpha=1,2-1,25$ );
- 3) возможность повышения единичной мощности котельного агрегата;
- 4) относительная простота регулирования режима работы и, следовательно, возможность полной автоматизации топочного процесса

Факельный способ позволяет сжигать с высокой надежностью и экономичностью самые различные и низкосортные виды топлива. Твердые топлива в пылевидном состоянии сжигают под котлами паропроизводительностью от 35 т/ч и выше, а жидкое и газообразное под котлами любой паропроизводительности.

Камерные (факельные) топки представляют собой прямоугольные камеры призматической формы, выполняемые из огнеупорного кирпича или огнеупорного бетона.

Рисунок 8.1 - Схемы процессов сжигания топлива: б – факельного, в – вихревого.



Стены топочной камеры изнутри покрывают системой кипяtilьных труб — топочными водяными экранами. Они представляют собой эффективную поверхность нагрева котла, воспринимающую большое количество тепла, излучаемого факелом, в то же время предохраняют кладку топочной камеры от износа и разрушения под действием высокой температуры факела и расплавленных шлаков.

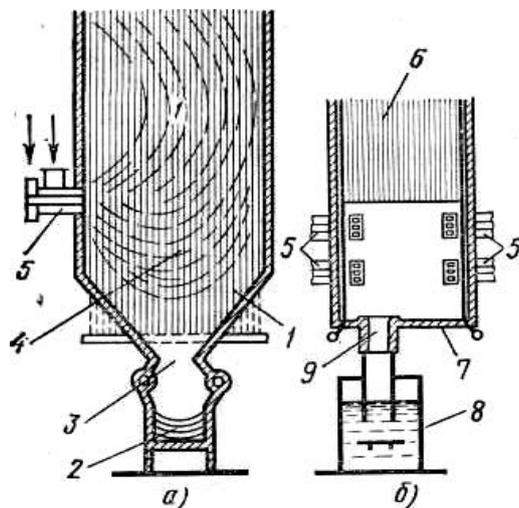


Рисунок 8.2 – Схемы камерных (факельных) топок: а – для пылевидного топлива с твердым шлакоудалением, б – для пылевидного топлива с жидким шлакоудалением; 1 – шлаковая холодная воронка, 2 и 8 – шлакоприемные устройства и ванна, 3 – горловина, 4 и 6 – топки, 5 – горелка, 7 – под, 9 – летка.

По способу удаления шлака факельные топки для пылевидного топлива разделяют на два класса: с твердым и жидким шлакоудалением.

### Пылеугольные топки с твердым шлакоудалением

Камера топки с твердым шлакоудалением снизу имеет воронкообразную форму, называемую холодной воронкой 1 (рис. 8.2). Капли шлака, выпадающие из факела, падают в эту воронку, затвердевают вследствие более низкой температуры в воронке, гранулируются в отдельные зерна и через горловину 3 попадают в шлакоприемное устройство 2.

Пылеугольные топки с твердым шлакоудалением обычно применяют для сжигания топлива с большим и умеренным выходом летучих веществ при тугоплавкой золе и высокой влажности. Твердый шлак из камерных топок удаляют через смывную шахту, размещаемую под шлаковой холодной воронкой. Выпадающие из факела капли шлака, охладившись при проходе через холодную воронку, скапливаются на дне шлакоприемной шахты, откуда их периодически удаляют, смывая струей воды, подаваемой из особых сопел.

Для охлаждения оседающих в топке жидких шлаковых частиц нижнюю часть топки выполняют в виде холодной воронки (рис. 8.3, а), имеющей сплошное экранирование стен. Наклон стенок воронки к горизонту составляет около 60% для обеспечения самопроизвольного сползания гранулированного шлака в шлаковую шахту.

Серьезным недостатком пылеугольных топок с твердым шлакоудалением является вынос из топочной камеры в газоходы агрегата основной массы золы топлива, что приводит к истиранию конвективных поверхностей нагрева, особенно при увеличении скорости потока. Холодная воронка неблагоприятно влияет также и на процесс горения, так как зона пониженной температуры оказывается при этом в непосредственной близости от горелок.

При значительном экранировании топочной камеры воспламенение топлива вообще затрудняется. Особенно это относится к малореакционным углям типа АШ. Для интенсификации зажигания, а также повышения устойчивости горения малореакционных углей применяют зажигательный пояс, представляющий собой часть топочных экранов, утепленную огнеупорным покрытием в области горелок. Применяют два типа зажигательных поясов: с покрытием гладких экранных труб фасонными кирпичами (рис. 8.3, б) и обмазкой ошпированных труб огнеупорной карборундовой или хромитовой массой (рис. 8.3, в)

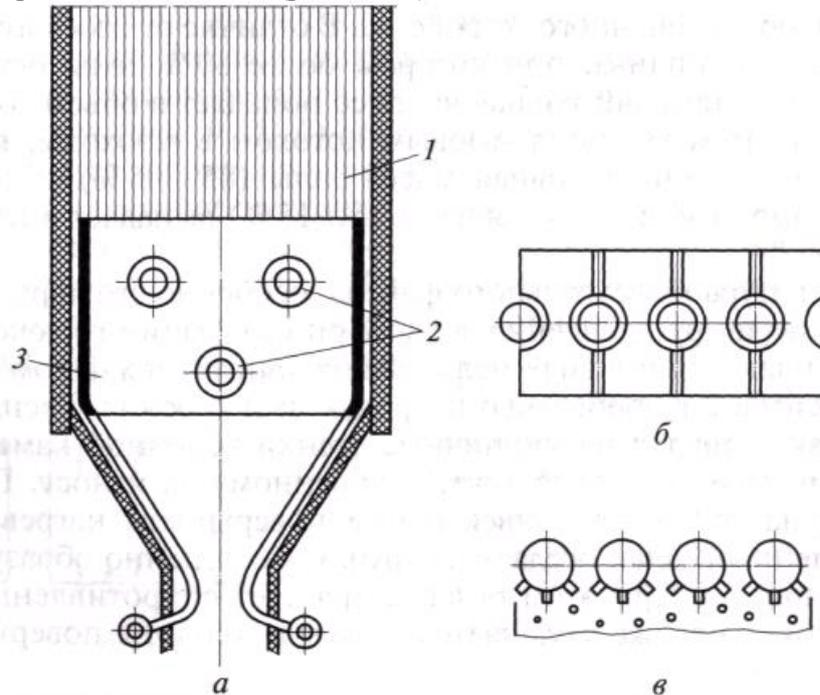


Рисунок 8.3 - Топка (а) с зажигательным поясом из огнеупорных фасонных кирпичей (б) и из огнеупорной обмазки (в): 1- топочные экраны; 2 - горелки; 3 - зажигательный пояс.

### *Топки с жидким шлакоудалением*

Камеру топки б (рисунок 8.2) с жидким шлакоудалением выполняют с горизонтальным или слегка наклонным подом 7, который в нижней части топочных экранов имеет тепловую изоляцию для поддержания температуры, превышающей температуру плавления золы. Расплавленный шлак, выпавший из факела на под, остается в расплавленном состоянии и вытекает из топки через летку 9 в шлакоприемную ванну 8, наполненную водой, затвердевает и растрескивается на мелкие частицы. Топки с жидким шлакоудалением делят на однокамерные и двухкамерные.

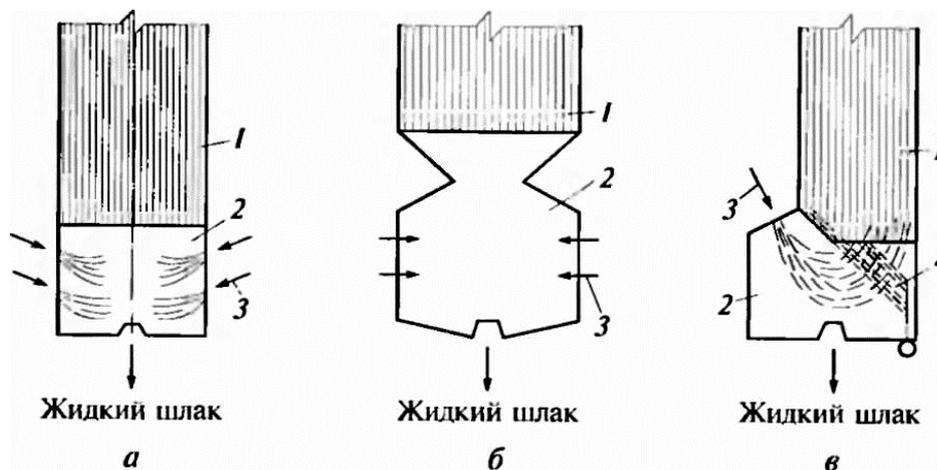


Рисунок 8.4 - Схемы пылеугольных факельных топков с жидким шлакоудалением;

**а** — однокамерная открытая топка; **б** — то же, полуоткрытая; **в** — двухкамерная топка:

**1** — холодная радиационная поверхность; **2** — поверхность топки, покрытая огнеупорной обмазкой; **3** — подача топлива; **4** — шлакоулавливающий пучок труб, покрытых гарнисажной футеровкой

В *однокамерной открытой* топке (рис. 8.4. а) пылевидное топливо через горелки поступает в камеру, стенки которой в нижней части покрыты ошипованными футерованными экранными трубами.

В связи с этим в камере при горении топлива развивается достаточно высокая температура, обеспечивающая плавление шлака. Расплавленный и уловленный здесь шлак через летку стекает в ванну (на рисунке не показана), где гранулируется водой, а затем охлаждается.

Степень улавливания золы в такой топке составляет 15... 30% общего содержания золы, поступившей с топливом. Следует, однако, отметить, что для такой открытой топки в области перехода от «горячей» зоны к не утепленной «холодной», где температура снижается и шлак теряет текучесть, наблюдается интенсивное ошлаковывание экранных поверхностей нагрева.

В *однокамерной полуоткрытой* топке (рис. 8.4, б) в результате специально выполненного пережима зона плавления и зона охлаждения в значительной степени разделены. В камере горения экранные трубы ошипованы и покрыты огнеупорной обмазкой, в связи с чем температура там составляет 1700... 1800°С. В камере улавливается 30...40% золы топлива, которая удаляется в жидком состоянии через летку. В верхней части топки расположены открытые экранные поверхности, обеспечивающие охлаждение газа и уносимой золы.

В *двухкамерной топке с жидким шлакоудалением* (рис. 8.4, в) камера горения топлива с жидким шлаком и камера охлаждения разделены шлакосепарационной решеткой, выполненной из ошипованных экранных труб 4, на поверхность которых нанесена огнеупорная обмазка.

Основная доля расплавленного шлака улавливается в камере горения. Дополнительно уловленный в шлакосепараторе шлак стекает по подину топки, откуда через летку он поступает в водяную ванну для грануляции. В двухкамерной топке улавливается до 70 % всей золы.

Под крупными котлами устанавливают шлакоприемные устройства с непрерывным удалением шлака, сооружая под шлаковой шахтой заполненную водой ванну, из которой шлак удаляется металлическим конвейером. Под камерной топкой имеется небольшой уклон и утепление. В его нижней части расположена летка с выходным отверстием для выпуска шлака в шлакоприемное устройство, заполненное водой. Во избежание размыва края летки окантованы змеевиковым холодильником. В топках с жидким шлакоудалением, благодаря более высокой температуре горения улучшается выгорание топлива, однако возрастают потери с физической теплотой шлака.

*Основной недостаток камерной топки с жидким шлакоудалением — опасность застывания шлака при пониженной нагрузке котлоагрегата.*

Камерная топка с жидким шлакоудалением применяют в основном при сжигании слабореактивных топлив с умеренными значениями температуры плавления золы (1300— 1350°С), влажности (20%) и зольности (25%), а также при сжигании топлива с низкой температурой

плавления золы, которая в камерной топке с твердым шлакоудалением может вызвать шлакование. При жидком шлакоудалении улучшаются показатели топочных устройств, нормализуется удаление золы и интенсифицируется теплопередача в конвективных поверхностях нагрева, так как повышается скорость движения продуктов сгорания.

Недостаток камерной топки — низкое энерго-выделение в топочной камере.

Способ сжигания топлива выбирается в зависимости от вида и рода топлива, а также паропроизводительности котельного агрегата.

Геометрически топочная камера характеризуется линейными размерами: шириной фронта  $a$ , глубиной  $b$  и высотой  $h_T$ , расчет которых определяется количеством сжигаемого топлива, его тепловыми физико-химическими характеристиками. Произведение  $f_T = ab$ ,  $m^2$  — сечение топочной камеры, через которое с достаточно большой скоростью (7-12 м/с) проходят раскаленные топочные газы. На уровне расположения горелок в сечении топки выделяется огромное количество теплоты и резко растет температура топочной среды.

Основной тепловой характеристикой топочных устройств паровых котлов является *тепловая мощность топки*, кВт,

$$Q_T = B \cdot Q_H^P \quad (8.1)$$

Характеризует количество теплоты, выделяющейся в топке при сжигании расхода топлива  $B$ , кг/с, с теплотой сгорания  $Q$ , кДж/кг. Если отнести все тепловыделение в зоне горения топлива к сечению топки, то получим расчетную характеристику — *тепловое напряжение сечения топочной камеры*

$$q_f = Q_T / f_T \quad (8.2)$$

Глубина топочной камеры  $b = 6 \div 10,5$  м определяется размещением горелок на стенах топочной камеры и обеспечением свободного развития факела в сечении топки так, чтобы высокотемпературные языки факела не касались охлаждающих настенных экранов. Глубина топки возрастает до  $8 \div 10,5$  м при использовании более мощных горелок с увеличенным диаметром амбразуры и при их расположении в несколько (два-три) ярусов на стенах топки.

Ширина фронта топки  $a = 9,5 \div 31$  м и зависит от вида сжигаемого топлива, тепловой мощности (паропроизводительности) котла и может быть получена из ранее принятых значений  $f_T$  и  $b$ . С увеличением мощности парового котла размер  $a$  растет, но не пропорционально росту мощности, характеризуя таким образом увеличение тепловых напряжений сечения топки и скорости газов в ней.

Высота топочной камеры  $h_T = 15 \div 65$  м должна обеспечить практически полное сгорание топлива по длине факела в пределах топочной камеры и размещение на ее стенах поверхности экранов, необходимых для охлаждения продуктов сгорания до заданной температуры.

Значения *допустимых тепловых напряжений* топочного объема также нормируются. Они изменяются от  $120$  кВт/м<sup>3</sup> при сжигании углей с твердым шлакоудалением до  $210$  кВт/м<sup>3</sup> при жидком шлакоудалении. Значение  $q_v$  определяет среднее время пребывания газов в топочной камере. С увеличением теплового напряжения  $q_v$  время пребывания газов в топочной камере уменьшается.

### *Вихревые и циклонные топки*

Из-за трудности факельного сжигания топлива был разработан способ сжигания его во взвешенном состоянии, получивший название вихревого.

В вихревых топках осуществляется устойчивое движение вращающегося воздушного потока, в котором находятся во взвешенном состоянии кусочки каменного угля размером от  $0,5$  до  $5$  мм. Вихревой характер движения топлива воздушного потока создает хорошие условия перемешивания топлива с воздухом, а следовательно, способствует более быстрому и полному выгоранию топлива.

Принцип работы топки заключается в огневой подсушке и сжигании топлива во взвешанном состоянии в вихревых топках с горизонтальной осью вращения. Вихревое движение потока создается воздушными струями, выходящими из дутьевых эжекторов сопел  $б$  и специальной обтекаемой конфигурации камеры  $з$ . Для дожигания наиболее крупных частиц топлива в нижней части топки установлена дожигательная колосниковая решетка  $1$ , под которую подается по трубе  $20$  % первичного воздуха.

Камерные циклонные топки разделяют на горизонтальные и вертикальные. На рисунке 8.6, *a* показана схема горизонтальной циклонной топки.

Смесь топлива с воздухом подается тангенциально в камеру горения 4, в результате чего в камере создается вихревое движение, и время пребывания частиц топлива в топке увеличивается.

Это позволяет сжигать пыль более грубого помола.

Поскольку камера горения выложена изнутри огнеупорным материалом, в ней практически отсутствует отвод тепла от продуктов сгорания и создается высокая температура, которая способствует повышению скорости сгорания топлива и образованию жидкого шлака.

Продукты сгорания с незначительным содержанием мельчайшей золы поступают через выходную горловину 2, а основная масса образующегося жидкого шлака стекает через летку 3.

Циклонная вертикальная топка предназначена для сжигания опилок и топливной крошки. К обычной топочной присоединяется вертикальная цилиндрическая камера (шахта) 9, дно которой представляет собой конус 8. Основной поток первичного воздуха нагнетается вентилятором через два канала 6 в канал 7. Такой способ подвода создает циклонное движение воздуха по шахте снизу вверх.

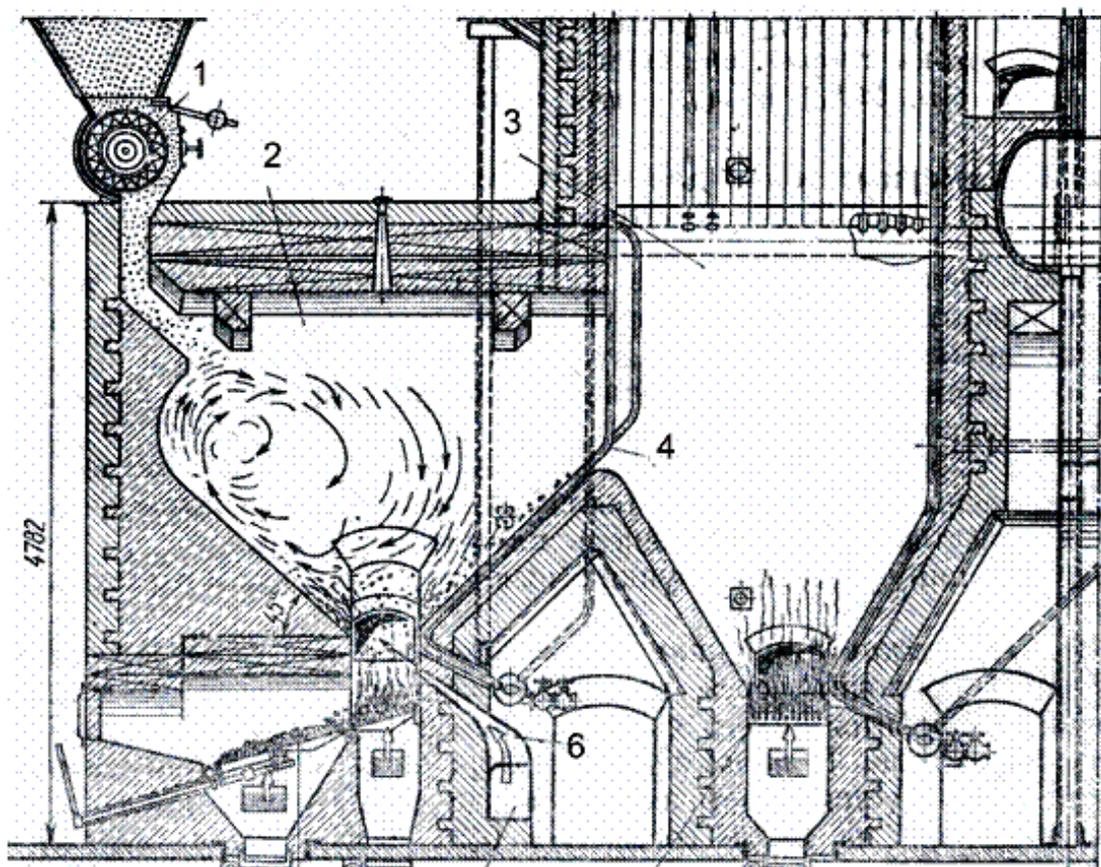


Рисунок 8.5 – Топка системы Шершнева для сжигания фрезерного торфа: 1 - барабанный питатель торфа; 2 - камера сгорания; 3 - камера догорания; 4 - трубы; 5 - дожигательная колосниковая решетка; 6 - сопла; 7 - воздушный короб; 8 - колосниковая решетка.

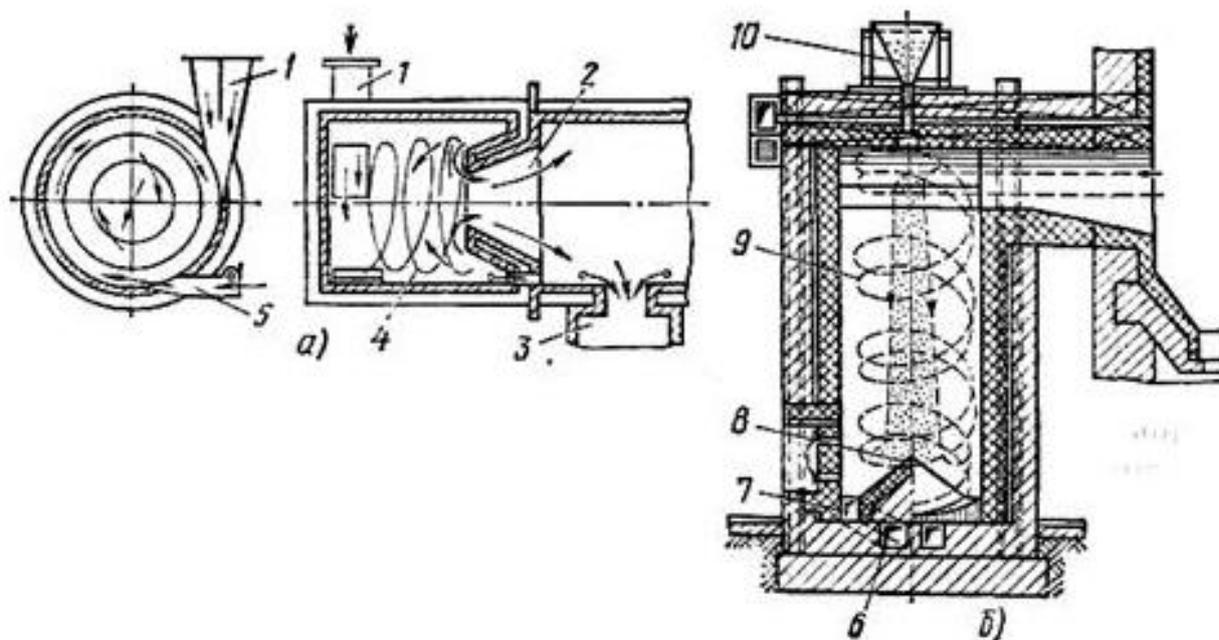


Рисунок 8.6 - Схемы циклонных топок: а) горизонтальных; б) вертикальных;

1 - входная камера топлива и воздуха; 2- выходная горловина; 3- летка для удаления шлака; 4 и 9- камеры горения; 5- острое дутье; 6 и 7- каналы подвода вторичного и первичного воздуха; 8- внутренний кирпичный конус; 10- воронка поступления топлива.

### Контрольные вопросы:

1. Камерная топка и ее основные элементы.
2. Назначение обмуровки топочной камеры.
3. Основные преимущества камерных топок.
4. Область применения пылеугольных топок с твердым шлакоудалением
5. Каковы особенности конструкции топки при твердом шлакоудалении?
6. Недостатки пылеугольных топок с твердым шлакоудалением.
7. Назначение зажигательного пояса.
8. Основной недостаток камерных топок с жидким шлакоудалением.
9. Область применения камерных топок с жидким шлакоудалением.
10. Преимущества камерных топок с жидким шлакоудалением.
11. Из чего выполняется шлакосепарационная решетка в двухкамерной топке с жидким шлакоудалением?
12. Недостатки открытой однокамерной топки с жидким шлакоудалением?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

### «Изучение конструкций пылеугольных горелок»

**Цель работы:** Изучить конструкции различных типов горелочных устройств по чертежам. Разобрать принцип их работы.

#### Содержание отчета:

1. Описание конструкций различных топков.
2. Ответы на контрольные вопросы.

#### Общие сведения:

Горелкой называется прибор, который питает процесс горения топливом и окислителем, и обеспечивает вблизи своего устья пространственную стабилизацию фронта воспламенения горючей смеси. Работа горелки непосредственно связана с работой топочной камеры.

Пылеугольные горелки служат для организованного ввода угольной пыли и воздуха в топку. С помощью горелок и рациональной компоновки их в значительной мере организуется топочный процесс: устойчивое зажигание факела, смесеобразование, интенсивное выгорание пыли и бесшлаковочная работа парогенератора.

Процесс смесеобразования в пылеугольных топках можно разбить на два этапа: смесеобразование - в горелке и вторичное - в топке.

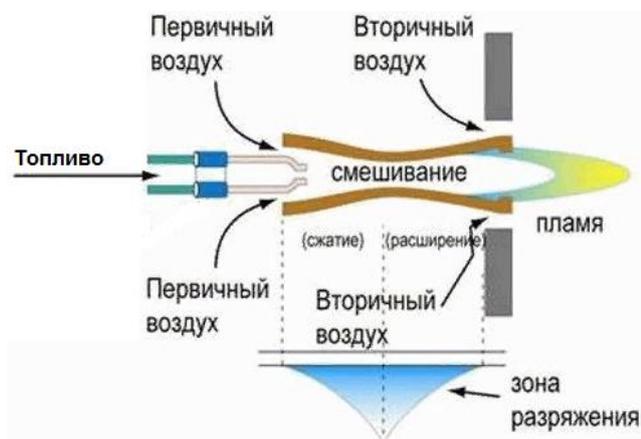


Рисунок 9.1 – Процесс смесеобразования

Первичный воздух – это часть воздуха для горения, подаваемого через горелку с целью предварительного смешения с топливом.

Горелочное устройство должно обеспечивать хорошее перемешивание пыли и воздуха, возможно более раннее воспламенение пылевоздушной смеси и способствовать практически полному выгоранию пыли.

Всережимное горелочное устройство, эскиз которого представлен на рис. 9.2, предназначено для сжигания высокорекреакционных углей с предварительной термической подготовкой потока угольной пыли высокой концентрации (ПВК) в его муфельной части.

Горелочное устройство состоит из муфельной части горелки 1 и короба подачи вторичного воздуха 2. Подача угольной пыли осуществляется по пылепроводу 3, который входит в муфельную часть по оси горелки. Регулирование расхода ПВК осуществляется пылепитателем, оборудованным двигателем с частотным приводом.

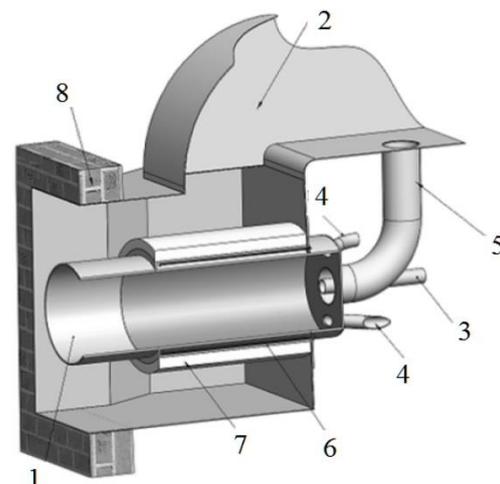
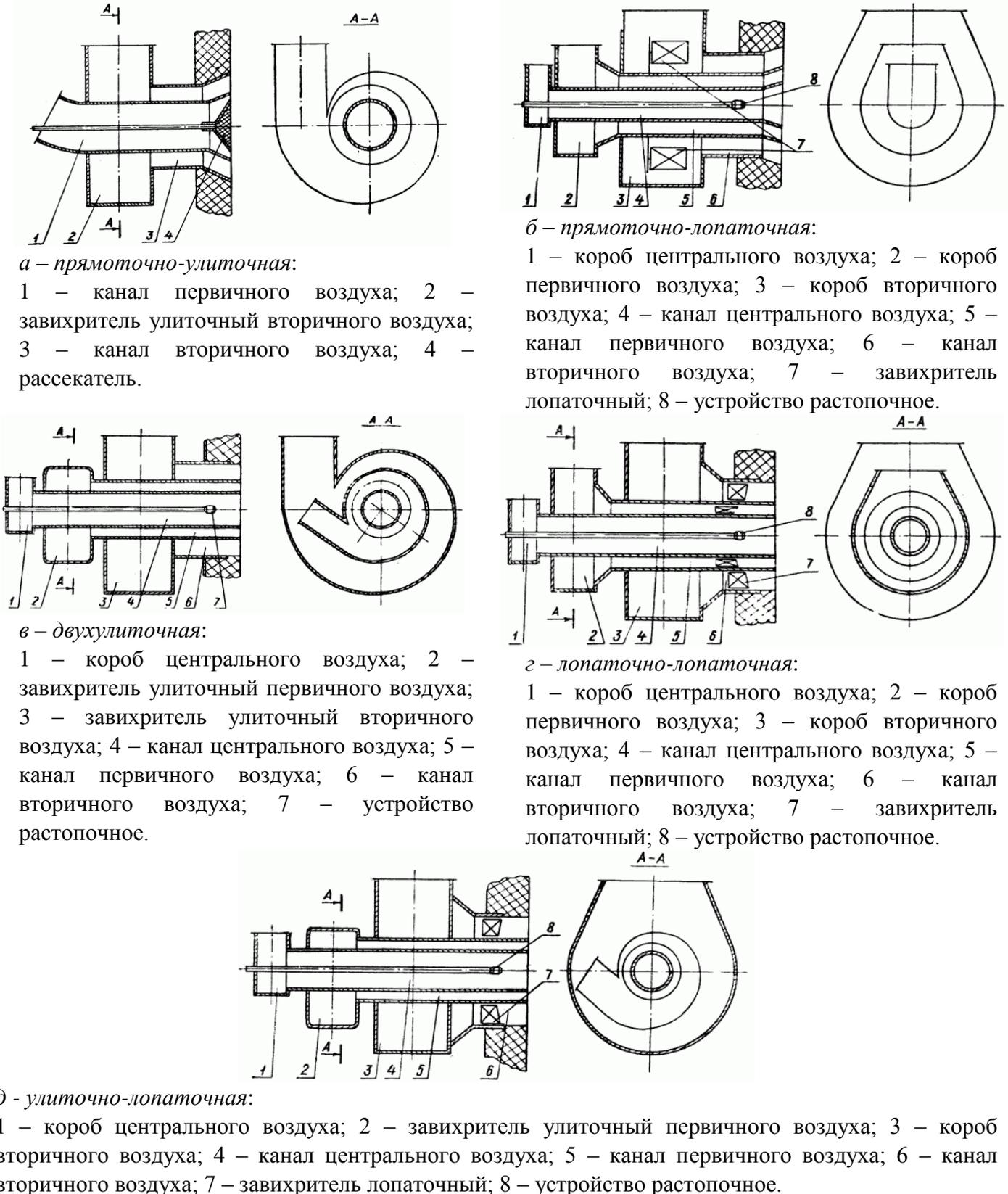


Рисунок 9.2 – Эскиз горелочного устройства.

Число оборотов лопастного питателя пыли (ППЛ-5) изменяется от 150 до 1500 об/мин, что соответствует расходам пыли от 0,139 до 1,39 кг/с. Первичный воздух подается тангенциально

через воздухопроводы 4, расположенные на торцевой стенке горелочного устройства. По трубопроводу 5 соосно пылепроводу 3 поступает воздух от короба вторичного воздуха 2. Для регулирования расхода первичного воздуха предусмотрена установка запорно-регулирующей аппаратуры, что позволяет варьировать значение коэффициента избытка воздуха, изменяя глубину газификации потока угольной пыли.

Рисунок 9.3 – Принципиальные схемы пылеугольных вихревых горелок:



Все современные промышленные пылеугольные топки построены на таком принципе, который позволяет активно регулировать только первичное смесеобразование (в горелке), предоставляя горению заканчиваться в вялой естественной форме в зонах затухающей турбулентности в топочной камере. Отсюда важна роль качества работы горелки.

По аэродинамическому способу ввода компонентов горючей смеси горелки подразделяют на вихревые, прямоточные и плоскофакельные, по типу сжигаемого топлива – на пылеугольные, газомазутные, газовые, мазутные и комбинированные пылеугольные (пыль, газ или пыль и мазут). Для сжигания угольной пыли применяются два основных типа горелок: вихревые и прямоточные.

Пылеугольные вихревые горелки применяют для сжигания практически всех видов твердого топлива, за исключением фрезерного торфа. Горелки имеют закручивающие аппараты, устанавливаемые в каналах ввода пылевоздушной смеси и воздуха. В зависимости от конструкции закручивающих аппаратов различают лопаточно-лопаточные (ГЛЛ), улиточно-лопаточные (ГУЛ), улиточно-улиточные (ГУУ), прямоточно-лопаточные (ГПЛ) и прямоточно-улиточные (ГПУ) горелки. Первым после индекса Г (горелка) указывается тип закручивающего аппарата по первичному воздуху.

Вихревые горелки, как обладающие высокой устойчивостью зажигания, рекомендуются преимущественно для сжигания пыли АШ (уголь донецкий небогащенный марки АШ), полуантрацитов и тощих углей в открытых и полукрытых топках с твердым и жидким шлакоудалением. Эти горелки могут быть использованы и для сжигания топлив и с большим выходом летучих. Вихревые горелки хорошо зарекомендовали себя на парогенераторах средней производительности, на которых их можно располагать сравнительно просторно. Для камерного (факельного) сжигания твердого топлива наибольшее распространение получили вихревые круглые, а также прямоточные щелевые и сопловые пылеугольные горелки.

Вихревыми называют пылеугольные горелки, у которых первичный и вторичный воздух или только вторичный воздух закручивается специальными завихрителями. Закручивание потоков достигается при помощи улиток, устанавливаемых на входе в горелку, или лопаток, устанавливаемых в горелке аксиально или тангенциально в потоке первичного или вторичного воздуха.

В пылеугольных котлах средней производительности применяются круглые турбулентные горелки ТКЗ-ЦКТИ и ОРГРЭС.

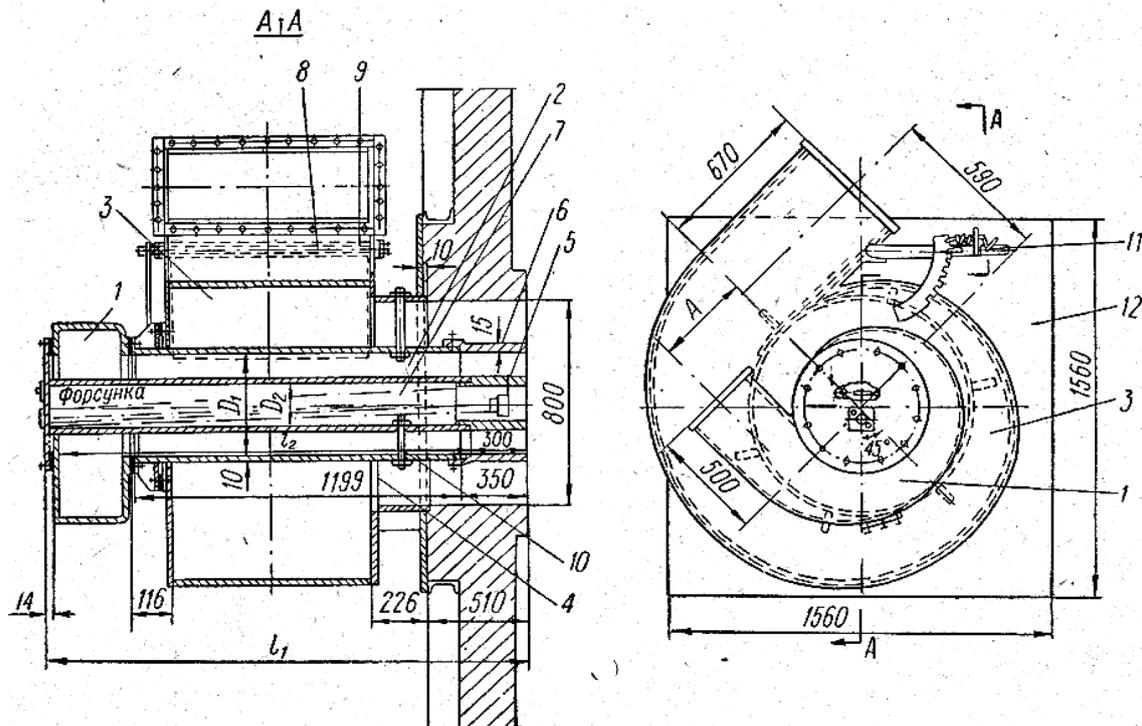


Рисунок 9.4 – Пылеугольная турбулентная горелка ТКЗ-ЦКТИ:

1 – улитка первичного воздуха; 2 – кольцевой канал первичного воздуха; 3 – улитка вторичного воздуха; 4 – кольцевой канал вторичного воздуха; 5 – внутренний наконечник трубы; 6

– наконечник трубы аэросмеси; 7 – внутренняя труба; 8 – заслонка; 9 – валик; 10 – стяжка; 11 – механизм поворота заслонки; 12 – плита.

Турбулентные пылеугольные горелки типа ТКЗ-ЦКТИ (рисунок 9.4) предназначены для сжигания всех видов углей, кроме антрацитов и тощих углей. Каждая горелка состоит из улитки первичного 1 и улитки вторичного воздуха 3 и трех concentрично расположенных труб, которые образуют два канала для прохода первичного и вторичного воздуха. Внутренняя и средняя трубы на выходном участке снабжены цилиндрическими насадками 5. Насадки изготавливаются из чугуна или из специально обработанной стали. Во внутренней трубе помещается мазутная форсунка, служащая для растопки котлоагрегата, а также для подсвечивания основного факела. Закрученные потоки воздуха и пыли при выходе из горелки в топку раскрываются под действием центробежных сил, вследствие чего в области выхода создается разрежение и приток горячих топочных газов к корню факела, способствующих воспламенению аэросмеси.

Горелки бывают как правого, так и левого вращения, смотря по направлению закручивания потоков вторичного воздуха.

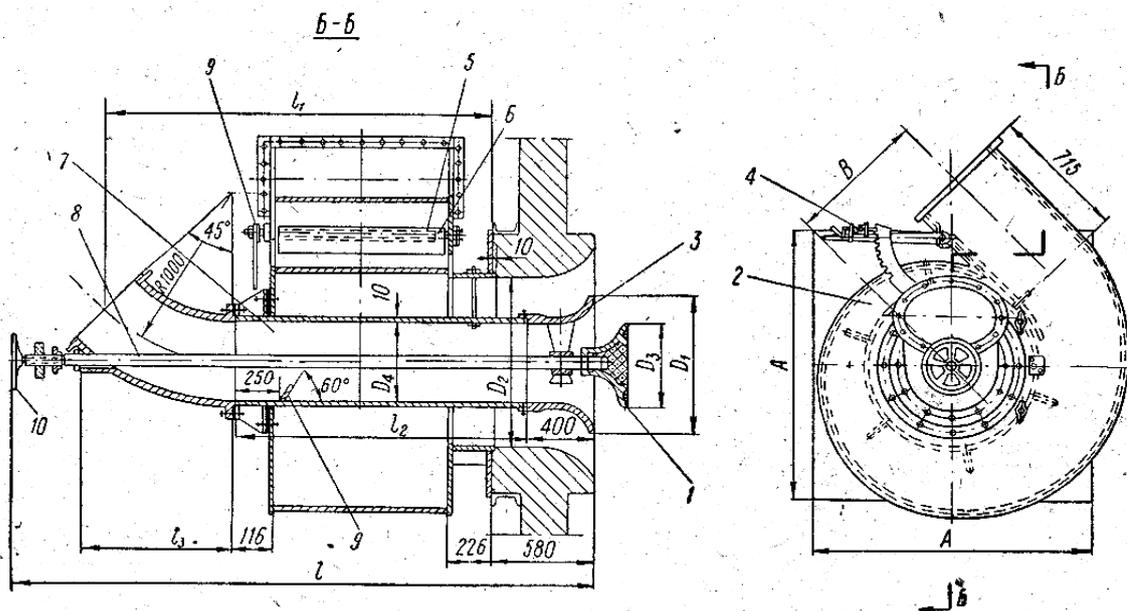


Рисунок 9.5 – Вихревая пылеугольная турбулентная горелка ОРГРЭС:

1 – конус горелки; 2 – улитка вторичного воздуха; 3 – растробы; 4 – механизм поворота заслонки; 5 – конус горелки; 6 – валик; 7 – труба аэросмеси; 8 – вал; 9 – выравнивающие листы; 10 – маховик.

В показанной на рисунке 9.3 прямоточно-улиточной горелке первичный воздух с пылью (пылевоздушная смесь или аэросмесь) подается через центральную трубу прямоточно, без закручивания. Вторичный воздух, подаваемый в топку через горелку, закручивается улиткой. Конструкция такой горелки (одноулиточная горелка) показана на рисунке 9.5. Аэросмесь поступает в топку через центральную трубу, имеющую на конце чугунный наконечник. Регулирование выходного сечения для аэросмеси осуществляется конусом-рассекателем, который может перемещаться.

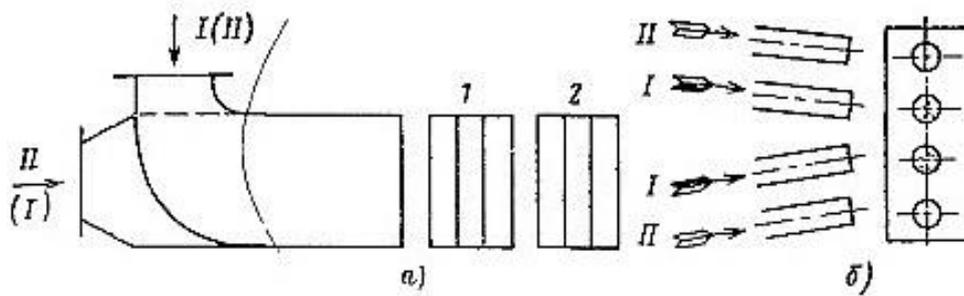


Рисунок 9.6 – Принципиальная схема прямоточных горелок: а – щелевая горелка; б – сопловая горелка; I – аэросмесь; II – вторичный воздух

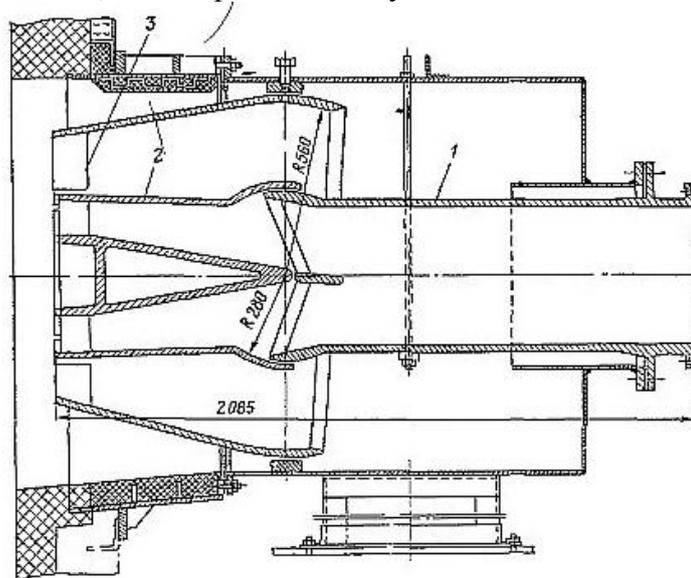
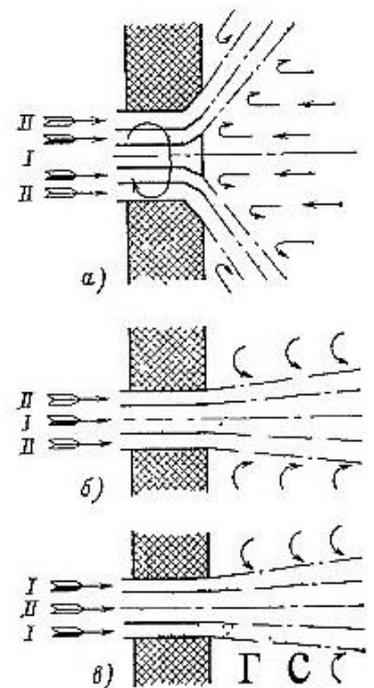


Рисунок 9.7 – Щелевая поворотная горелка: 1 – патрубок первичного воздуха; 2 – сопло первичного воздуха; 3 – сопло вторичного воздуха.

Конус-рассекатель обеспечивает хорошее раскрытие пылевоздушной струи, а также подсос горячих топочных газов к корню факела, что интенсифицирует воспламенение топлива. Вторичный воздух, подаваемый через улитку, выходит в топку завихренным через кольцевое пространство, образуемое наконечником и обмуровкой. Для растопки, а также при необходимости подсвечивать пылеугольный факел предусматривают установку мазутной форсунки, для чего в корпусе горелки имеется отверстие 6. В вихревых горелках, показанных на рис. 3.3, б-д, мазутные форсунки установлены по центру горелки. В прямоточных щелевых горелках (рис. 9.6, а) подача в топку аэросмеси и вторичного воздуха осуществляется отдельно через узкие щели. Такие пылеугольные горелки выполняются с внешним 1 и с внутренним 2 вводом вторичного воздуха. В прямоточных сопловых горелках (рис. 9.6, б) ввод аэросмеси и вторичного воздуха осуществляется отдельно через круглые сопла.

Примером прямоточной щелевой горелки является широко используемая поворотная горелка. В этой горелке (рис. 9.7) аэросмесь поступает через центральный патрубок, откуда через поворотные сопла-щели она выходит в топку. Вторичный воздух поступает в топку по наружному соплу. Сопла при помощи электродвигателя можно поворачивать вверх и вниз от горизонтальной плоскости на 12-20°. Это дает возможность менять положение факела в топке.

Для вихревых и прямоточных горелок характерны различные схемы воспламенения, дальность факела и сопротивление горелочного устройства. Схема зажигания пылевоздушной смеси для вихревых турбулентных горелок показана на рис. 9.8, а. В этих горелках



улиточный подвод воздуха и наличие конуса-рассекателя обеспечивают выходящей пылевоздушной струе дополнительную составляющую скорости, перпендикулярную оси горелки. При этом выходящая из горелки струя имеет форму полого гиперboloида вращения. Образующаяся в центральной его части зона разрежения приводит к непрерывному подосу сюда высокотемпературных топочных газов, обеспечивающих интенсивное зажигание пылевоздушной смеси. Воспламенение струи по внешней поверхности конуса тормозится прослойкой относительно холодного вторичного воздуха, находящегося между пылевоздушной смесью и горячими топочными газами.

Рисунок 9.8 – Схема зажигания пылевоздушной смеси: а – круглая турбулентная горелка; б – прямоточная горелка с внешним вторичным воздухом; в – прямоточная горелка с внутренним вторичным воздухом; I – аэросмесь; II – вторичный воздух.

Кроме того, здесь сказывается и охлаждающее влияние экранных поверхностей нагрева. В отличие от вихревых турбулентных горелок в прямоточных горелках разнос пылевоздушной струи отсутствует (рис. 9.8, б). Факел получается более дальноточным. Для горелки с внешним вторичным воздухом зажигание струи происходит по внешней ее поверхности. Наличие здесь вторичного воздуха, охватывающего пылевоздушную струю, несколько затрудняет прогрев и воспламенение смеси. Более целесообразна схема прямоточной горелки с внутренним подводом условия воспламенения пылевоздушной смеси.

Условия воспламенения пылегазовой смеси, интенсивность горения и длина факела в значительной степени зависят от соотношения первичного и вторичного воздуха и их скоростей на выходе из горелки. Для ускорения воспламенения топлива количество первичного воздуха, как указывалось, целесообразно уменьшать. Снижение доли первичного воздуха особенно целесообразно при сжигании малореакционных трудновоспламеняемых углей (антрацит, полуантрацит, тощий уголь). Минимально возможное количество первичного воздуха определяется условиями транспорта пыли через горелку. При сжигании малореакционных углей количество первичного воздуха принимают до 20 % общего количества, а при сжигании бурых углей до 40-45 %.

Для хорошего смесеобразования и подсоса горячих топочных газов, обеспечивающих прогрев и воспламенение пылевоздушной смеси, скорости первичного  $W_1$  и вторичного воздуха  $W_2$  на выходе из вихревых прямоточно-улиточных горелок тепловой мощностью 25-35 МВт при сжигании каменных и бурых углей должны составлять соответственно 18-20 и 22-25 м/с; для двухулиточных горелок такой же мощности при сжигании антрацитового штыба, полуантрацитов и тощих углей - соответственно 14-16 и 18-21 м/с, а при сжигании каменных углей 20-22 и 26-28 м/с.

Кроме указанных пылеугольных горелок тепловой мощностью 25 и 35 МВт, в соответствии с отраслевым стандартом ОСТ 24.030.26-78 для котлов большой производительности имеются пылеугольные горелки мощностью 50, 75, 100, 135 и 150 МВт. Для этих горелок скорости первичного и вторичного воздуха должны быть более высокими. Повышенные скорости выхода в топку первичного и вторичного воздуха (27-30 м/с) принимаются для прямоточных горелок, что здесь особенно необходимо для улучшения воспламенения пылегазовой смеси.

Повышенная скорость выхода воздуха в топку применяется и для сбросных горелок (35-45 м/с), через которые в топку для сжигания сбрасываются тончайшая угольная пыль, не уловленная в циклоне, и транспортирующий ее из мельницы сушильный агент-воздух. Если предусматривается возможность сжигания в топочной камере и твердого пылевидного, и газового топлив, применяют комбинированные пылегазовые горелки, что значительно упрощает топливно-воздушные коммуникации.

На рис. 9.9 для примера показана комбинированная пылегазовая горелка, представляющая собой вихревую горелку со встроенной многоструйной газовой горелкой.

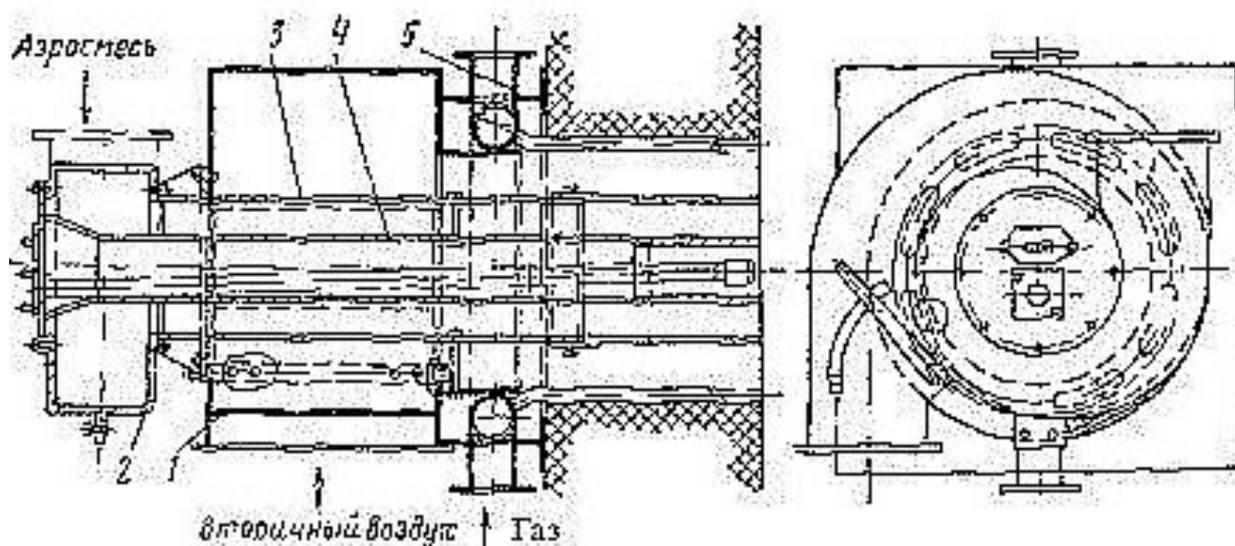


Рисунок 9.9 – Пылегазовая горелка: 1 – улитка вторичного воздуха; 2 – улитка аэросмеси; 3 – труба аэросмеси; 4 – внутренняя труба; 5 – газовый коллектор.

В центральной части горелки может быть установлена также и мазутная форсунка. При размоле угля в молотковых мельницах в ряде случаев угольная пыль вводится в топочную камеру через специальные пылеугольные горелки-амбразуры (рис. 9.10).

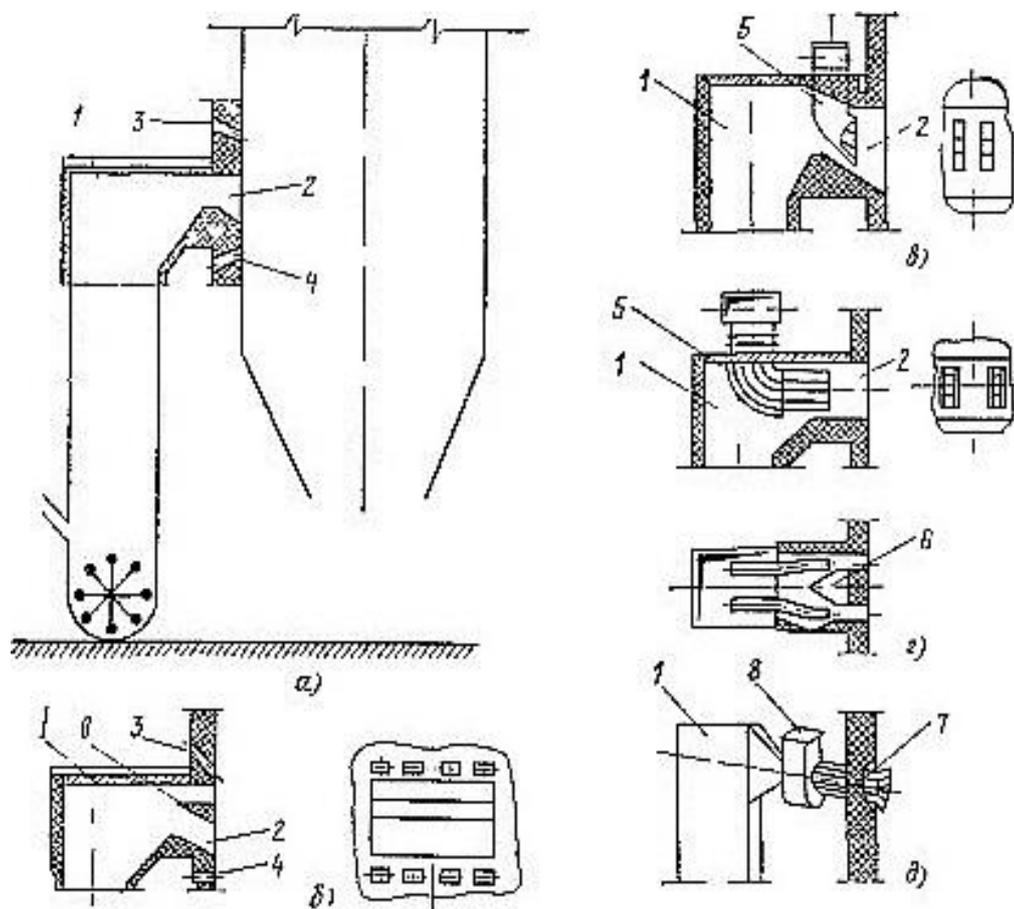


Рисунок 9.10 – Схемы горелочных устройств топок с молотковыми мельницами:  
 а – топка с открытой амбразурой; б – амбразура с горизонтальным рассекателем; в – эжекционная амбразура; г – амбразура с плоскими параллельными струями; д – вихревая горелка;  
 1 – шахта; 2 – амбразура; 3 – сопла вторичного воздуха (верхние); 4 – сопла вторичного воздуха (нижние); 5 – сопла вторичного воздуха; 6 – рассекатель; 7 – горелка; 8 – ввод вторичного воздуха.

В установках малой производительности подача готовой угольной пыли с первичным воздухом иногда осуществляется при помощи простейшей открытой амбразуры (рис.9.10, а). Сопла для подачи в топку вторичного воздуха располагаются над и под амбразурой.

При сжигании бурых углей и фрезерного торфа скорость выхода пылевоздушной смеси из амбразуры принимают 4-5 м/с, а скорость выхода из сопел вторичного воздуха - 20-25 м/с.

Работа таких горелок характеризуется, малым углом раскрытия факела, дальнотойностью, плохим перемешиванием пыли с вторичным воздухом, неблагоприятными условиями для воспламенения и горения пыли и др.

Амбразуры с горизонтальным рассекателем (рис. 9.10, б) обеспечивают увеличение угла раскрытия факела, улучшение воспламенения пыли, однако в них не устранен ряд других недостатков. Топка работает с повышенными потерями от механического недожога. Значительного улучшения аэродинамики топки достигают применением эжекционных амбразур ЦКТИ (рис. 9.10, в).

Подача вторичного воздуха при помощи щелевых насадок через амбразуру интенсифицирует перемешивание пылевоздушного потока и вторичного воздуха.

Часть вторичного воздуха со скоростью 35-45 м/с подается через сопла на задней стенке топки, чтобы ядро горения находилось в центральной части топочной камеры. Нашли применение амбразуры с устройством для сжигания топлива в тонких струях.

Например, амбразура конструкции МЭИ-Мосэнерго (рис. 9.10, г) разделена на вертикальные каналы - по числу сопел вторичного воздуха, который выходит со скоростью 40-50 м/с и эжектирует пылевоздушную смесь.

В топочную камеру смесь пыли с воздухом поступает со скоростью около 20 м/с через узкие вытянутые щели, расположенные на расстоянии 1500- 2000 мм. При этом обеспечивают интенсивный подсос горячих топочных газов и устойчивое зажигание и горение топлива.

### **Контрольные вопросы:**

1. Что называют горелкой?
2. Для чего предназначены пылеугольные горелки?
3. Какие требования предъявляют к горелочному устройству?
4. Как классифицируются горелки по аэродинамическому способу ввода компонентов горючей смеси?
5. Как классифицируются горелки в зависимости от конструкции закручивающих аппаратов?
6. Какие виды топлив сжигаются в вихревых горелках?
7. Принцип работы вихревой пылеугольной турбулентной горелки ОРГРЭС.
8. Принцип работы пылеугольной турбулентной горелки ТКЗ-ЦКТИ.
9. Для каких целей служит конус-рассекатель?
10. От чего зависит интенсивность горения и длина факела на выходе из горелок?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10

### «Изучение конструкций мазутных форсунок»

**Цель работы:** Изучить классификацию, технические характеристики и конструкции мазутных форсунок; особенности сжигания жидкого топлива.

#### Содержание отчета:

3. Описание конструкций различных мазутных форсунок.
4. Ответы на контрольные вопросы.

#### Общие сведения:

По способу распыливания мазутные форсунки делятся на три основные группы: *механические; паромеханические; паровые.*

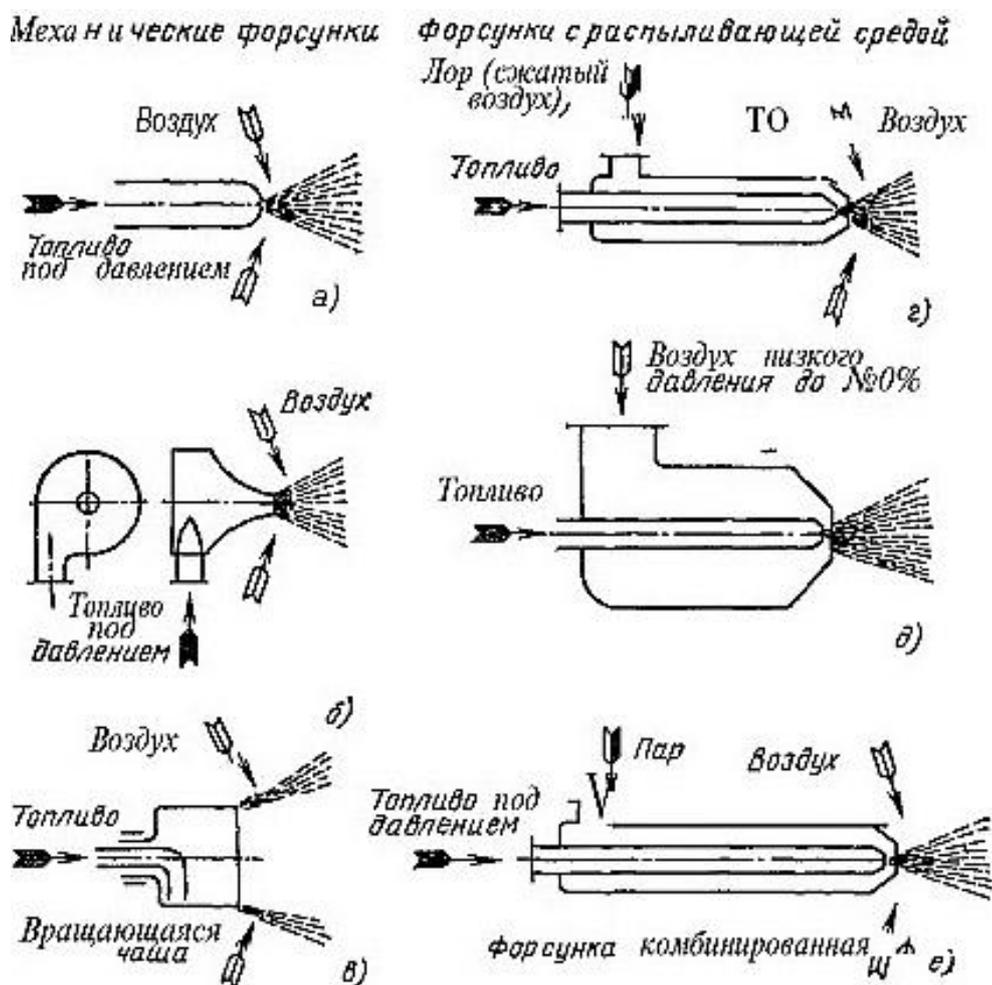


Рисунок 10.1 – Схема форсунок для распыливания жидкого топлива: а – прямоструйная; б – центробежная; в – с вращающейся чашей; г – высокого давления; д – низкого давления; е – комбинированная.

В механических форсунках распыливание осуществляется главным образом за счет энергии топлива при продавливании его под значительным давлением через малое отверстие - сопло (рис. 10.1, а), или за счет центробежных сил, создаваемых при закручивании топлива (рис. 10.1,б), или при вращении элементов самой форсунки (рис. 10.1,в). Дальнейшее размельчение полученных капель происходит под воздействием давления окружающей среды.

Мазутные форсунки с распиливающей средой осуществляют распиливание топлива главным образом за счет энергии движущегося с большой скоростью распылителя - пара или воздуха (рис. 10.1,е). В комбинированных форсунках (рис. 10.1, е) распиливание топлива осуществляется за счет совместного использования энергии топлива, подаваемого под давлением, и энергии распыливающей среды.

Число и тип форсунок выбираются в зависимости от мощности котла. Форсунки должны обеспечивать высокое качество распыливания и надлежащее смешение жидкого топлива с воздухом. Выполнение этих условий позволяет вести процесс горения с минимальными топочными потерями тепла. Форсунки должны допускать регулирование расхода топлива в диапазоне 40 – 110% с сохранением экономических показателей работы топки и быть надежными в эксплуатации.

*Механические форсунки* применяются в основном для котлоагрегатов повышенной мощности, где требуется большая единичная производительность. В этом случае особенно важны преимущества механических форсунок – экономичность вследствие отсутствия постороннего распылителя (пара или воздуха), бесшумная работа форсунок, компактность и отсутствие трубопровода для распылителя, небольшое давление воздуха перед форсункой.

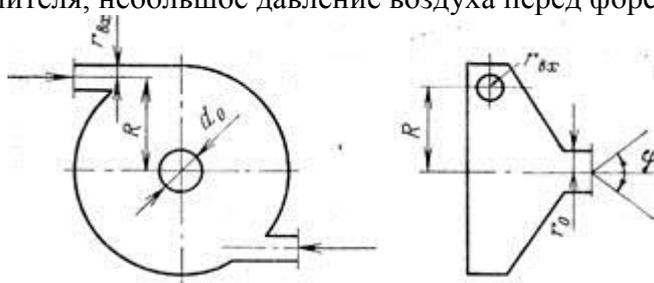


Рисунок 10.2 – Принципиальная схема центробежной механической форсунки

Механические форсунки обеспечивают экономичное и надежное сжигание мазутов марок М-40 – М-100. При повышенной вязкости мазута затрудняется фильтрация топлива, что приводит к забиванию форсунки.

Мазут вводится в вихревую камеру несколькими тангенциальными каналами, при этом создается интенсивно вращающийся вихрь. В центре потока создается пониженное давление, заполненное газовым вихрем, в результате чего истечение жидкого топлива из сопла происходит через кольцевое сечение толщиной  $r_0 - r_B$ , где  $r_0$  – радиус сопла, а  $r_B$  – радиус внутреннего газового вихря. На выходе из форсунки пленка жидкого топлива в зависимости от соотношения тангенциальной и аксиальной составляющих скорости раскрывается под определенным углом и затем под действием набегающего потока воздуха дробится на отдельные капли, которые движутся по параболе.

Верхний предел давления топлива перед форсункой выбирается с учетом затрат электроэнергии на привод насосов и износа распыливающих элементов форсунки. Работа топок с механическими форсунками регулируется изменением числа работающих форсунок.

Механические форсунки чувствительны к уменьшению давления мазута. При снижении давления ухудшается процесс распыливания, что приводит к значительному повышению потерь тепла с химическим недожогом, дымлению, коксованию форсунок.

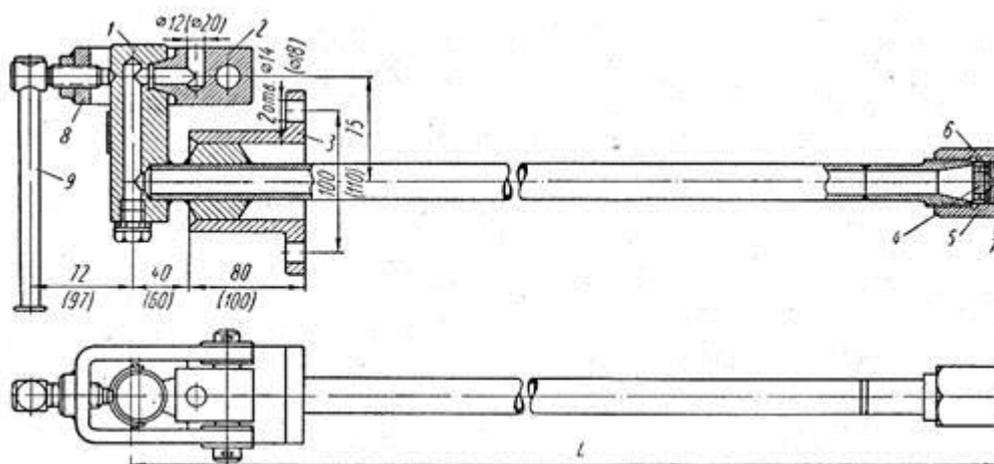


Рисунок 10.3 – Малая мазутная форсунка механического распыливания:

1 – колодка; 2 – топливный штуцер; 3 – фланец; 4 – распределительный диск; 5 – завихривающий диск; 6 – сопло; 7 – гайка; 8 – скоба; 9 – зажимной винт.

*Паро-механические форсунки* имеют более широкий диапазон регулирования за счет использования при сниженной нагрузке энергии пара для тонкого распыла мазута. Такая форсунка (рисунок 104) представляет собой соединение обычной механической форсунки с дополнительным кольцевым каналом подвода пара. Вместо центробежной вихревой камеры в форсунке применен аксиальный завихривающий аппарат с конусом-рассекателем. Поток пара со скоростью, близкой к критической, внедряется в распыляемую мазутную струю и за счет своей энергии тонко дробит капли мазута. Расход пара на распыл составляет не более 10% расхода мазута. Такая форсунка имеет диапазон качественного регулирования нагрузки 20 – 100%.

*Паровые форсунки* используются на электростанциях, сжигающих твердое топливо, только как растопочные. В длительной работе они не экономичны из-за большого расхода пара на распыл (40 – 60% расхода мазута). Пар давления 0,4 – 0,6 МПа эжектирует мазут и тонко дробит его. Мазут может иметь низкое давление. Форсунки этого типа просты по конструкции, обеспечивают высокое качество распыла мазута даже при невысоком его подогреве (до 80 °С). Обычно растопочные форсунки могут обеспечить около 30 % производительности парового котла.

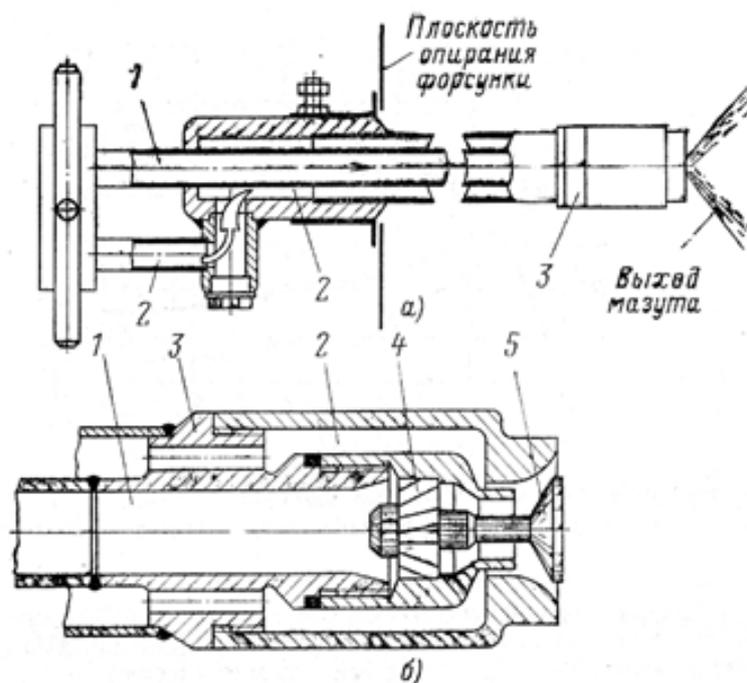


Рисунок 10.4 – Мазутная паромеханическая форсунка ТКЗ-4:



1 – колодка; 2 – топливный штуцер; 3 – зажимной винт; 4 – паровой штуцер; 5 – топливная труба; 6 – паровая труба; 7 – сопло; 8 – диффузор; 9 – насадка.

Дроблению выходящей из форсунки струи топлива способствуют возникающие в ней пульсации (колебания), интенсивность которых зависит от скорости истечения струи. Волновые колебания благоприятствуют распаду струи на отдельные капли. Дальнейшее дробление капель при их движении происходит вследствие превышения давления окружающей среды над силами поверхностного натяжения, стремящимися сохранить сферическую форму капель.

Для определения среднего диаметра капли  $d_{ср}$  используют, в частности, критериальные зависимости вида

$$\frac{d_{ср}}{D} = f \left( We, Lp, Re, \frac{G_r}{G_{ж}}, \frac{\rho_r}{\rho_{ж}}, \frac{\nu_r}{\nu_{ж}} \right), \quad (10.1)$$

где  $D$  - характерный геометрический размер (диаметр сопла);  $We = Dw^2\rho_r/\sigma$  - число Вебера (для форсунок с распыливающей средой);  $w$  - относительная скорость распыливаемой жидкости,  $\rho_r$  - плотность распылителя (окружающей среды);  $\sigma$  - коэффициент поверхностного натяжения жидкости;  $Lp = \sigma D / (\nu_{ж}^2 \rho_{ж})$  - число Лапласа;  $\rho_{ж}$  - плотность распыливаемой жидкости;  $\nu_{ж}$  - кинематическая вязкость жидкости;  $\nu_r$  - кинематическая вязкость распылителя (окружающей среды);  $Re = wD/\nu_{ж}$  - число Рейнольдса (для механических форсунок);  $G_r/G_{ж}$  - удельный расход распылителя (для форсунок с распыливающей средой).

Число Вебера характеризует соотношение инерционных сил распыляющего потока и сил поверхностного натяжения жидкости, число Лапласа - соотношение сил вязкости и поверхностного натяжения жидкости. При расчетах используют и другие системы критериев.

С повышением температуры распыливаемой жидкости поверхностное натяжение изменяется незначительно. Однако при этом заметно уменьшаются силы внутреннего (вязкостного) трения. Поэтому для уменьшения вязкости и улучшения распыливания мазут перед сжиганием подогревают до 90- 120 °С, что облегчает также условия транспорта его по трубопроводам. Для подогретого мазута влияние вязкости на тонину распыливания оказывается несоизмеримо меньшим влияния инерционных сил и сил поверхностного натяжения. Таким образом, размеры получающихся капель зависят от особенностей форсунки и уменьшаются с уменьшением выходного ее отверстия, с понижением поверхностного натяжения жидкости, с увеличением относительной скорости капли и среды и с увеличением плотности последней.

Для механической центробежной форсунки (рис. 10.1,б) тонина распыливания определяется в основном скоростью истечения жидкости, которая зависит от перепада давления на форсунку  $\Delta p$ . Средний размер капель  $d_{ср}$  обратно пропорционален перепаду давления  $\Delta p^{0,35/0,5}$  прямо пропорционален диаметру сопла  $D^{0,5/1}$ . Для форсунки с распыливающей средой важнейшим фактором, определяющим тонину распыливания, является относительная скорость распыливающего потока и жидкости  $w$ . Средний размер капель  $d_{ср}$  обратно пропорционален относительной скорости  $w^{0,9/1,25}$  и прямо пропорционален начальному диаметру сопла (струи)  $D^{0,4/0,55}$ .

Во избежание застывания мазута в трубопроводах мазутные линии прокладывают вместе с паровыми и снабжают общей изоляцией. Распыливание мазута механическими форсунками. При механическом распыливании качество последнего в значительной мере зависит от давления мазута, создаваемого насосом. Обычно мазут поступает к форсункам под давлением 2,0-3,5 МПа. Наличие механических примесей в мазуте и малые выходные отверстия форсунок (1,5-3,5 мм) обуславливают необходимость тщательной фильтрации мазута перед сжиганием.

Для механических форсунок вязкость мазута рекомендуется поддерживать около 2,5 °ВУ. Для достижения этой вязкости мазут марок 40 и 40 В рекомендуется подогревать до 90-100 °С, марок 100 и 100 В - до 110-120 °С.

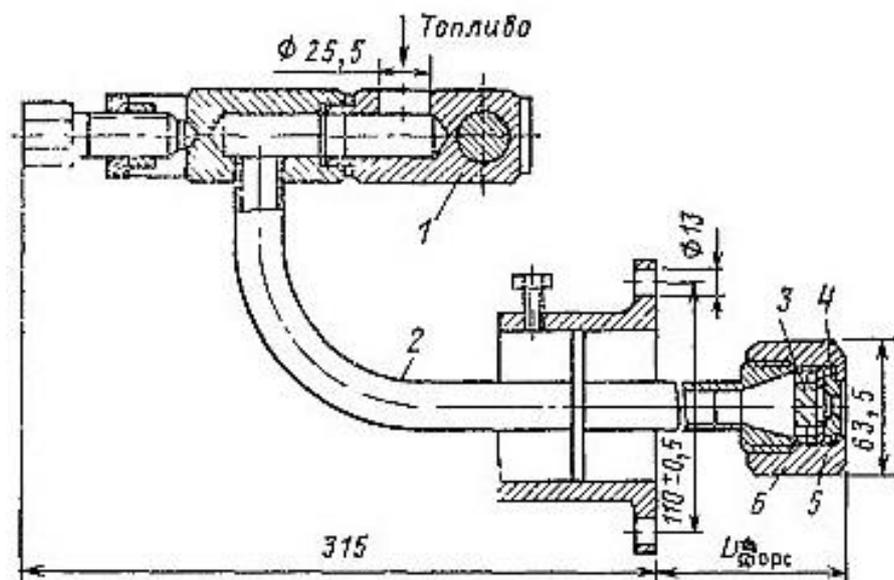


Рисунок 10.6 – Форсунка механическая средняя типа ОН-547: 1 – колодка с соединительными и крепежными деталями; 2 – ствол; 3 – распределитель; 4 – завихритель; 5 – сопло; 6 – гайка накидная.

Широкое распространение получили механические форсунки завода «Ильмарине». На рис. 10.6 показана механическая форсунка типа ОН-547, предназначенная для распыливания топочного мазута по ГОСТ 10585-75 в топках стационарных паровых котлов. Мазутные форсунки выпускаются нескольких типоразмеров. При давлении мазута перед форсункой 2,0 МПа производительность форсунки (типоразмер ОН-547-02) составляет 0,167 кг/с, а при давлении 3,5 МПа - 0,22 кг/с. В пределах одного типоразмера мазутные форсунки выпускаются длиной от 400 мм до 4000 мм. К распыливающей головке мазут поступает через ствол, проходит через отверстия распределителя в кольцевой канал, затем по тангенциальным каналам завихрителя попадает в камеру завихрения, приобретая вращательно-поступательное движение, и далее выбрасывается через сопло в топку в виде пленки, имеющей форму гиперboloида вращения - пелены. Взаимодействуя с окружающей газовой средой за счет возникающих пульсаций, пелена распадается на капли, которые в свою очередь от воздействия среды дробятся на мельчайшие капельки.

Производительность механических форсунок регулируют изменением давления мазута перед форсункой, вследствие чего они имеют малый диапазон регулирования. Так, если учесть, что производительность форсунки изменяется примерно в соответствии с соотношением

$$\frac{B_2}{B_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{0,5},$$

то при изменении давления, например, в 3 раза расход изменяется в 1,73 раза. Снижение давления ниже 11,2 МПа по условиям обеспечения необходимой тонины распыливания мазута не рекомендуется. В связи с этим более глубокое понижение нагрузки котла может быть осуществлено путем выключения части форсунок.

Имеются специальные конструкции механических форсунок, позволяющие регулировать производительность в достаточно широком диапазоне (форсунки с рециркуляцией мазута, вращающиеся и др.).

Для распыливания мазута форсунками высокого давления применяют пар или компрессорный воздух (см. рис. 10.1, г), а форсунками низкого давления - воздух, подаваемый вентилятором (см. рис. 10.1). При паровой пульверизации мазута применяют пар давлением 0,5-2,5 МПа. Удельный расход пара при этом составляет 0,3-0,35 кг/кг мазута.

При воздушной пульверизации мазута в форсунках высокого давления воздух, подаваемый компрессором, имеет давление 0,3-0,6 МПа, а его удельный расход составляет 0,6-1 кг/кг мазута. Через форсунку в этом случае поступает всего около 5-10 % воздуха, необходимого для полного сгорания мазута. Остальной воздух подается к корню факела. В форсунках высокого давления относительная скорость распыливающего агента доходит до 1000 м/с, чем обеспечивается хорошее дробление капелек мазута с получением тонкого распыла. Давление мазута перед форсунками с

учетом относительно больших размеров их каналов может быть небольшим. Менее жесткие требования предъявляются к очистке мазута.

Перед высоконапорными форсунками с паровым или воздушным распылом вязкость мазута должна быть около  $6^\circ \text{ВУ}$ , поэтому при работе на мазуте марки 40 рекомендуется поддерживать его температуру не ниже  $85^\circ \text{C}$ , при работе на мазуте марки 100- $105^\circ \text{C}$ .

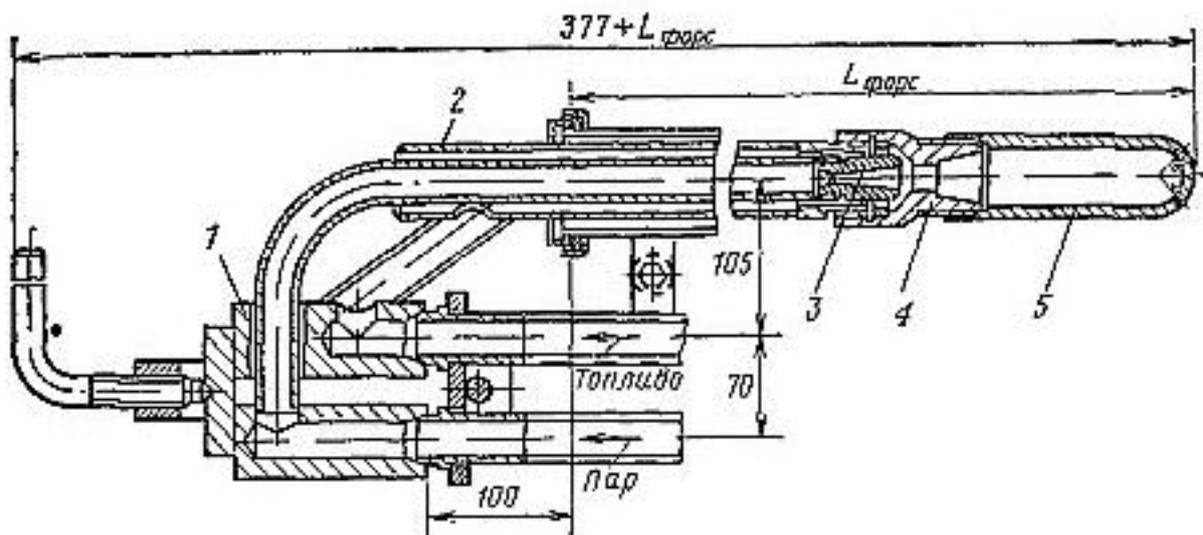


Рисунок 10.7 – Форсунка паровая типа ФП: 1 – колодка; 2 – ствол; 3 – сопло; 4 – диффузор; 5 – насадка.

Паровые высоконапорные мазутные форсунки характеризуются значительным потреблением энергии - на распыливание мазута расходуется до 5 % выработки пара котлом. При сжигании мазута с паровым и воздушным распыливанием применяют форсунки различных конструкций. На рис. 10.7 показаны мазутные форсунки парового распыливания типа ФП завода «Ильмарине».

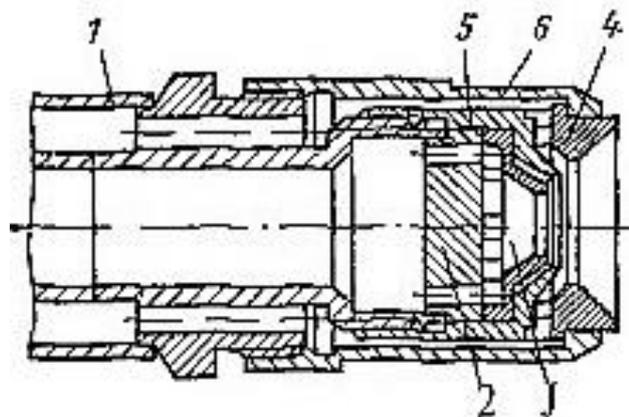
Из входного штуцера мазут попадает в кольцевой канал ствола форсунки между внутренней и наружной трубками. Пар поступает во внутреннюю трубу и выходит через расширяющееся сопло с высокой скоростью. Мазут, пройдя кольцевой канал, попадает в поток пара через кольцевую щель, образуемую отрезком сопла паровой трубы и внутренней конической поверхностью диффузора, где и распыливается. Качество распыливания мазута зависит от скорости истечения пара. Имеющийся на выходе форсунки насадок предназначен для увеличения угла раскрытия конуса распыливаемого мазута. Паровые форсунки типа ФП выпускаются различных типоразмеров производительностью по мазуту до 0,5 кг/с (1800 кг/ч). Давление пара перед форсункой 0,4 - 2,5 МПа, давление мазута - 0,4-0,5 МПа. Относительный расход пара на распыл мазута 0,4 кг/кг. Для улучшения взаимодействия пара и мазута применяются также форсунки с многосопловым распылителем.

Паровые мазутные форсунки характеризуются высоким качеством распыливания. Регулирование производительности осуществляется в широких пределах. Однако паровое распыливание мазута приводит к потере конденсата, к увеличению содержания водяных паров в продуктах сгорания и к повышенным потерям с уходящими газами, а также к усилению коррозии поверхностей нагрева. Работа таких форсунок отличается повышенным шумом.

Высоконапорные мазутные форсунки с воздушным распыливанием мазута не только распыливают топливо, но и интенсифицируют горение. Для высоконапорного воздушного распыливания (давление воздуха 0,5-2,5 МПа) могут быть использованы форсунки, предназначенные для парового распыливания. В форсунках с распыливающей средой низкого давления (см. рис. 10.1, д) применяют воздух под давлением 0,002-0,007 МПа. Через форсунку подают 50-100 % воздуха, необходимого для сгорания мазута, поэтому такие форсунки имеют относительно большие размеры. Мазут к форсунке поступает под небольшим давлением (0,03- 0,2 МПа).

Сравнительная оценка форсунок механических и с распыливающей средой. Как следует из рассмотренного, механические мазутные форсунки по сравнению с форсунками с распыливающей средой требуют более тонкой очистки мазута, что усложняет мазутное хозяйство предприятия. По сравнению с высоконапорными паровыми механические форсунки дают более грубое распыливание. Так, при давлении мазута около 2 МПа средний размер капелек составляет около 40 мкм, а при распыливании паром с давлением 1 МПа - около 2 мкм. Важнейшим преимуществом механических форсунок перед паровыми является значительно меньший (примерно в 10 раз) расход энергии на собственные нужды. Они создают при работе значительно меньший шум, более компактны. Работа механических форсунок не вызывает увеличения содержания водяных паров в продуктах сгорания, как это имеет место при паровых форсунках. Механические мазутные форсунки дают более короткий факел с большим углом раскрытия.

Рисунок 10.8 – Распылительная головка паромеханической форсунки типа ФПИ: 1 – ствол; 2 – распределитель; 3 – завихритель топливный; 4 – сопло паровое; 5 – гайка; 6 – гайка накидная.



Существенным недостатком обычных механических форсунок является относительно малый диапазон изменения их производительности (80-100% по сравнению с 20-100% у паровых форсунок). С учетом изложенного для котлов средней и большой производительности при постоянной работе на мазуте применяют механические мазутные форсунки как наиболее экономичные. Паровые мазутные форсунки используют для установок малой мощности и в качестве растопочных. Распыливание мазута комбинированными форсунками. Устранение основного недостатка механических форсунок - малого диапазона регулирования производительности - достигается применением комбинированного паромеханического распыливания мазута. Используемые для этого мазутные форсунки (10.8) при повышенных нагрузках котла работают как механические, а при малых нагрузках (менее 60%), а также в пусковых режимах в них подают также пар.

К комбинированным могут быть отнесены и ротационные мазутные форсунки завода «Ильмарине» (рис. 10.9). Мазут по центральному трубопроводу подается в распыливающую чашу с частотой вращения 5-7 тыс об/мин. Мазут распределяется по внутренней поверхности чаши и в виде тонкой пленки выбрасывается в топочную камеру, дроблению пленки способствует первичный воздух, поступающий при давлении 0,01 МПа через зазор на выходе из чаши.

Воздух подается крыльчаткой вентилятора, сидящей на одном валу с приводом чаши. В качестве привода применяются электродвигатели с большой частотой вращения, а также воздушные и паровые турбины. Первичный воздух составляет около 20 % общего количества воздуха, необходимого для горения мазута. Остальной воздух подается в топку через кольцевое пространство, образуемое соплом и кожухом форсунки.

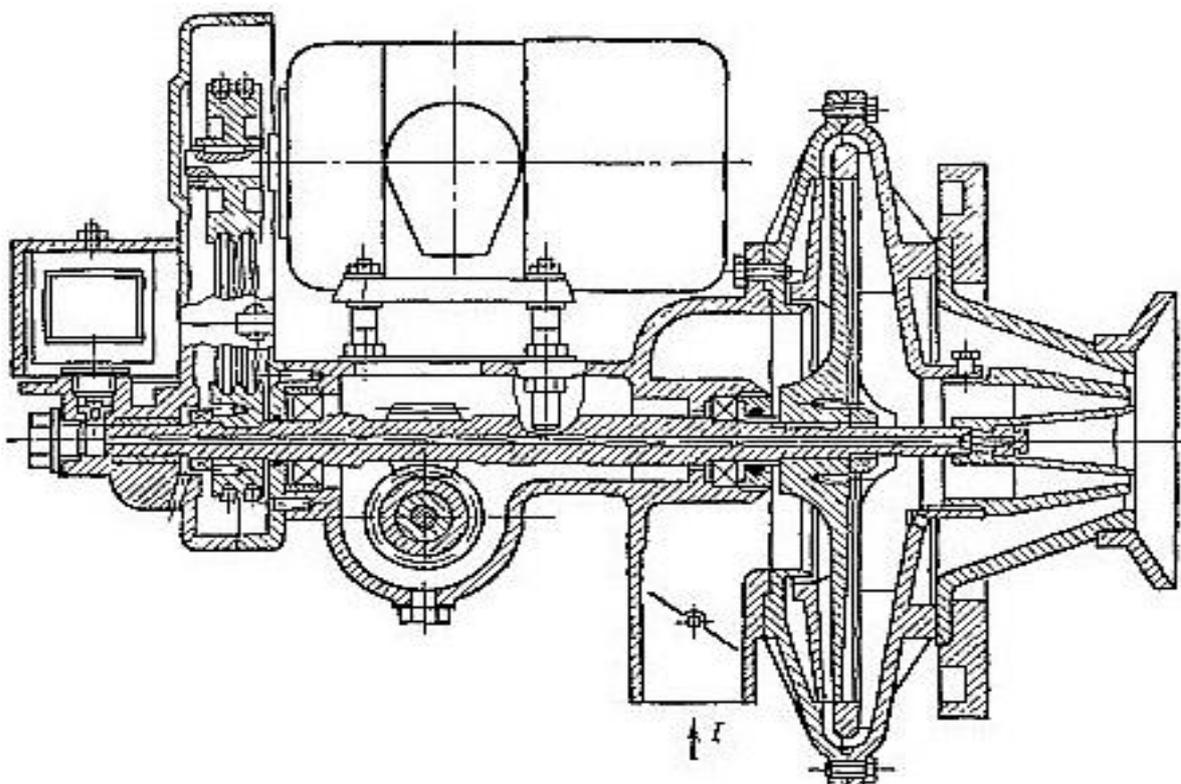


Рисунок 10.9 – Ротационная форсунка: I – первичный воздух.

Ротационные мазутные форсунки не требуют тщательной фильтрации мазута, дают хорошее распыливание и обладают широким диапазоном регулирования производительности (15-100%). Недостатками таких форсунок являются сложность конструкции и шум при работе. В последнее время благодаря указанным положительным особенностям ротационные форсунки начинают находить все расширяющееся применение как автономные мазутные форсунки, так и в комбинированных газомазутных горелках.

### Контрольные вопросы:

5. Камерная топка и ее основные элементы.
6. Назначение обмуровки топочной камеры.
7. Основные преимущества камерных топок.
8. Область применения пылеугольных топок с твердым шлакоудалением
5. Каковы особенности конструкции топки при твердом шлакоудалении?
6. Недостатки пылеугольных топок с твердым шлакоудалением.
7. Назначение зажигательного пояса.
8. Основной недостаток камерных топок с жидким шлакоудалением.
9. Область применения камерных топок с жидким шлакоудалением.
10. Преимущества камерных топок с жидким шлакоудалением.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11

### «Изучение конструкций газовых горелок»

**Цель работы:** Изучить конструкции различных типов горелочных устройств по чертежам. Рассмотреть принцип их работы.

#### **Содержание отчета:**

3. Описание конструкций различных газовых горелок.
4. Ответы на контрольные вопросы.

#### **Общие сведения:**

В зависимости от назначения и условий эксплуатации горелки газовой её элементы имеют различное конструктивное исполнение. Основные элементы горелки газовой: смеситель и горелочная насадка со стабилизирующим устройством.

*К горелкам предъявляют следующие требования:*

1. Основные типы горелок должны изготавливаться на заводах серийно по техническим условиям. Если горелки изготовляют по индивидуальному проекту, то при вводе в эксплуатацию они должны пройти испытания для определения основных характеристик;
2. Горелки должны обеспечивать пропуск заданного количества газа и полноту его сжигания с минимальным коэффициентом расхода воздуха  $\alpha$ , за исключением горелок специального назначения (например, для печей, в которых поддерживается восстановительная среда);
3. При обеспечении заданного технологического режима горелки должны обеспечить минимальное количество вредных выбросов в атмосферу;
4. Уровень шума, создаваемого горелкой, не должен превышать 85 дБ при измерении шумомером на расстоянии 1 м от горелки и на высоте 1,5 м от пола;
5. Горелки должны устойчиво работать без отрыва и проскока пламени в пределах расчетного диапазона регулирования тепловой мощности;
6. У горелок с предварительным полным смешением газа с воздухом скорость истечения газоздушной смеси должна превышать скорость распространения пламени;
7. Для сокращения расхода электроэнергии на собственные нужды при использовании горелок с принудительной подачей воздуха сопротивление воздушного тракта должно быть минимальным;
8. Для уменьшения эксплуатационных расходов конструкция горелки и стабилизирующие устройства должны быть достаточно просты в обслуживании, удобны для ревизии и ремонта;
9. При необходимости сохранения резервного топлива горелки должны обеспечивать быстрый перевод агрегата с одного топлива на другое без нарушения технологического режима;
10. Комбинированные газомазутные горелки должны обеспечивать примерно одинаковое качество сжигания обоих видов топлива – газового и жидкого (мазута).

#### **Диффузионные горелки**

В диффузионные горелки воздух, необходимый для горения газа, поступает из окружающего пространства к фронту факела за счет диффузии.

Такие горелки применяются обычно в бытовых приборах. Их можно использовать также при увеличении расходе газа, если необходимо распределить пламя по большой поверхности. Во всех случаях газ подается в горелку без примеси первичного воздуха и смешивается с ним за пределами горелки. Поэтому иногда эти горелки называют горелками внешнего смешивания.

Большинство диффузионных горелок газовых монтируют на стенках топки или печи. В котлах получили распространение т. н. подовые горелки газовые, которые размещаются внутри топки, в нижней её части. Подовая горелка газовая состоит из одной или нескольких газораспределительных труб, в которых просверлены отверстия. Труба с отверстиями устанавливается на колосниковой решётке или поду топки в щелевом канале, выложенным из огнеупорного кирпича. Через огнеупорный щелевой канал поступает требуемое количество

воздуха. При таком устройстве горение струек газа, выходящих из отверстий в трубе, начинается в огнеупорном канале и заканчивается в топочном объеме. Подовые горелки создают малое сопротивление прохождению газа, поэтому они могут работать без принудительного дутья.

Диффузионные горелки газовые характеризуются более равномерной температурой по длине факела.

Однако эти горелки газовые требуют повышенного коэффициента избытка воздуха (по сравнению с инжекционными), а также создают более низкие тепловые напряжения топочного объема и худшие условия для догорания газа в хвостовой части факела, что может приводить к неполному сгоранию газа.

Диффузионные горелки газовые применяют в промышленных печах и котлах, где требуется равномерная температура по длине факела. В некоторых процессах диффузионные горелки газовые незаменимы. Например, в стекловаренных, мартеновских и др. печах, когда идущий на горение воздух подогревается до температур, превышающих температуру воспламенения горючего газа с воздухом. Успешно применяются диффузионные горелки газовые и в некоторых водогрейных котлах.

Наиболее простые по конструкции диффузионные горелки (рис. 11.1) представляют собой трубу с высверленными отверстиями. Расстояние между отверстиями выбирается с учетом скорости распространения пламени от одного отверстия к другому. Эти горелки имеют небольшие тепловые мощности и применяются при сжигании природных и низкокалорийных газов под небольшими водонагревательными устройствами.

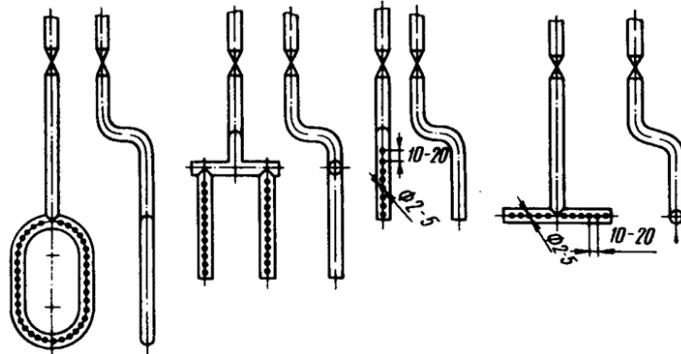


Рисунок 11.1 – Диффузионные горелки

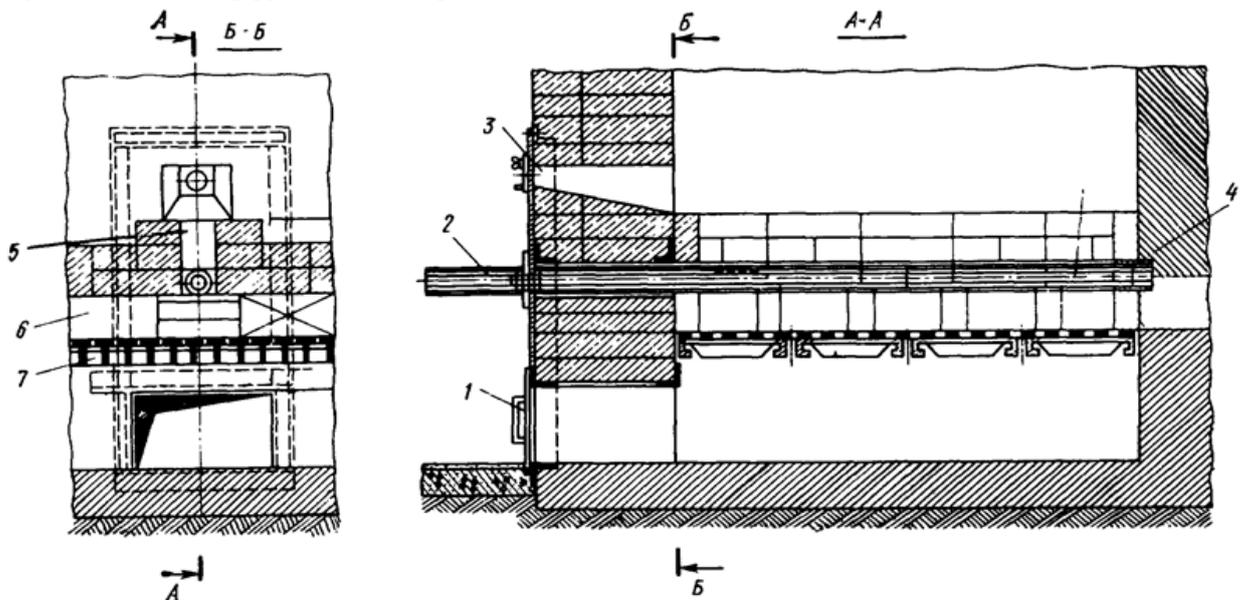


Рисунок 11.2 – Подовая диффузионная горелка:

1 – регулятор воздуха; 2 – горелка; 3 – смотровое окно; 4 – центрующий стакан; 5 – горизонтальный тоннель; 6 – выкладки из кирпича; 7 – колосниковая решетка.

К промышленным горелкам диффузионного типа относятся подовые щелевые горелки (рис. 11.2). Обычно они представляют собой трубу диаметром до 50 мм, в которой просверлены

отверстия диаметром до 4 мм в два ряда. Канал представляет собой щель в поде котла, откуда и название горелок – подовые щелевые.

Из горелки 2 газ выходит в топку, куда из-под колосников 7 поступает воздух. Газовые струйки направляются под углом к потоку воздуха и равномерно распределяется по его сечению. Процесс смешения газа с воздухом осуществляется в специальной щели, сделанной из огнеупорного кирпича. Благодаря такому устройству усиливается процесс смешивания газа с воздухом и обеспечивается устойчивое зажигание газозадушной смеси.

Колосниковая решетка закладывается огнеупорным кирпичом и оставляются несколько щелей, в которых размещаются трубы с просверленными отверстиями для выхода газа. Воздух под колосниковую решетку подается вентилятором или в результате разряжения в топке. Огнеупорные стенки щели являются стабилизаторами горения, предотвращают отрыв пламени и одновременно повышают процесс теплоотдачи в топке.

### ***Инжекционные горелки***

Инжекционными называются горелки, в которых образование газозадушной смеси происходит за счет энергии струи газа. Основным элементом инжекционной горелки – инжектор, подсасывающий воздух из окружающего пространства внутрь горелок.

В зависимости от количества инжектируемого воздуха горелки могут быть полного предварительного смешения газа с воздухом или с неполной инжекцией воздуха.

Горелки с неполной инжекцией воздуха. К фронту горения поступает только часть необходимого для сгорания воздуха, остальной воздух поступает из окружающего пространства. Такие горелки работают на низком давлении газа. Их называют инжекционными горелками низкого давления.

Иногда в инжекционных горелках газовых подсосывание необходимого количества горючего газа, давление которого близко к атмосферному, осуществляется энергией струи воздуха. В горелках *полного смешения* (с газом перемешивается весь необходимый для горения воздух), работающих на газе среднего давления, образуется короткий факел пламени, а горение завершается в минимальном топочном объеме. В инжекционных горелках газовых *частичного смешения* поступает только часть (40 ÷ 60%) требующегося для горения воздуха (т. н. первичный воздух), который и смешивается с газом. Остальное количество воздуха (т. н. вторичный воздух) поступает к факелу пламени из атмосферы за счёт инжектирующего действия газо-воздушных струй и разрежения в топках.

В отличие от инжекционных горелок газовых среднего давления, в горелках низкого давления образуется однородная газо-воздушная смесь с содержанием газа больше верхнего предела воспламенения; эти горелки газовые устойчивы в работе и имеют широкий диапазон тепловой нагрузки.

Для устойчивого горения газозадушной смеси в инжекционных горелках газовых среднего и высокого давления применяют стабилизаторы: дополнительные поджигающие факелы вокруг основного потока (горелки с кольцевым стабилизатором), керамические туннели, внутри которых происходит горение газозадушной смеси, и пластинчатые стабилизаторы, создающие завихрение на пути потока.

В топках значительных размеров инжекционные горелки газовые собирают в блоки из 2 и более горелок.

Широкое применение получили инжекционные горелки газовые инфракрасного излучения (т. н. беспламенные горелки), в которых основное количество получаемого при горении тепла передаётся излучением, т.к. газ сгорает на излучающей поверхности тонким слоем, без видимого факела. Излучающей поверхностью служат керамические насадки или металлические сетки. Эти горелки применяют для обогрева помещений с большой кратностью обмена воздуха (спортивные залы, торговые помещения, теплицы и др.), для сушки окрашенных поверхностей (тканей, бумаги и др.), разогрева мерзлого грунта и сыпучих материалов, в промышленных печах. Для равномерного нагрева больших поверхностей (печей нефтеперерабатывающих заводов и др. промышленных печей) применяют т. н. панельные инжекционные излучающие горелки. В этих горелках газозадушная смесь из смесителя попадает в общий короб, а далее по трубкам смесь распределяется по отдельным туннелям, в которых и происходит её сгорание. Панельные горелки имеют малые

габариты и широкий диапазон регулирования, малочувствительны к противодействию в топочной камере.

Основными частями инжекционных горелок (рис. 11.3) являются регулятор первичного воздуха, форсунка, смеситель и коллектор.

Регулятор первичного воздуха 7 представляет собой вращающийся диск или шайбу и регулирует количество первичного воздуха, поступающего в горелку. Форсунка 1 служит для превращения потенциальной энергии давления газа в кинетическую, т.е. для придания газовой струе такой скорости, которая обеспечивает подсос необходимого воздуха. Смеситель горелки состоит из трех частей: инжектора, конфузора и диффузора. Инжектор 2 создает разрежение и подсос воздуха. Самая узкая часть смесителя – конфузор 3, выравнивающий струю газозвдушной смеси. В диффузоре 4 происходит окончательное перемешивание газозвдушной смеси и увеличение ее давления за счет снижения скорости.

Из диффузора газозвдушная смесь поступает в коллектор 5, который и распределяет газозвдушную смесь по отверстиям 6. Форма коллектора и расположение отверстий зависит от типа горелок и их назначения.

Инжекционные горелки низкого давления имеют ряд положительных качеств, благодаря которым их широко применяют в бытовых газовых приборах, а также в газовых приборах для предприятий общественного питания и других коммунально-бытовых потребителей газа. Горелки используют также в чугунных отопительных котлах.

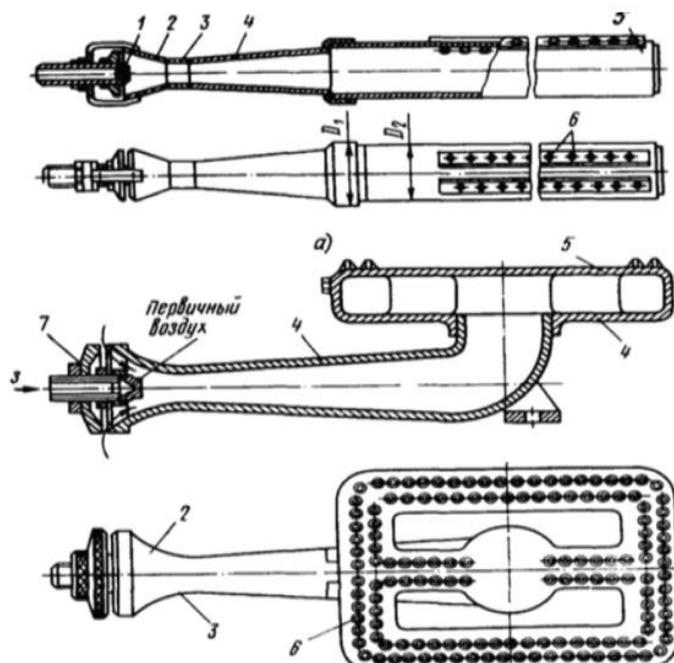


Рисунок 11.3 – Инжекционные атмосферные газовые горелки:

*а* – низкого давления; *б* – горелка для чугунного котла; 1 – форсунка, 2 – инжектор, 3 – конфузор, 4 – диффузор, 5 – коллектор, 6 – отверстия, 7 – регулятор первичного воздуха.

Основные преимущества инжекционных горелок низкого давления: простота конструкции, устойчивая работа горелок при изменении нагрузок; надежность и простота обслуживания; бесшумность работы; возможность полного сжигания газа и работа на низких давлениях газа; отсутствие подачи воздуха под давлением.

Важной характеристикой инжекционных горелок неполного смешения является коэффициент инжекции – отношение объема инжектируемого воздуха к объему воздуха, необходимого для полного сгорания газа. Так, если для полного сгорания  $1 \text{ м}^3$  газа необходимо  $10 \text{ м}^3$  воздуха, а первичный воздух составляет  $4 \text{ м}^3$ , то коэффициент инжекции равен  $4:10=0,4$ .

Характеристикой горелок является также кратность инжекции – отношение первичного воздуха к расходу газа горелкой. В данном случае, когда на  $1 \text{ м}^3$  сжигаемого газа инжектируется  $4 \text{ м}^3$  воздуха, кратность инжекции равна 4.

Достоинство инжекционных горелок: свойство их саморегулирования, т.е. поддержание постоянной пропорции между количеством подаваемого в горелку газа и количеством инжектируемого воздуха при постоянном давлении газа.

### ***Горелки с принудительной подачей воздуха***

Горелки с принудительной подачей воздуха широко применяют в различных тепловых устройствах коммунальных и промышленных предприятий.

По принципу действия эти горелки подразделяются на горелки с предварительным смешением газа (рис.11.4) и топлива и на горелки без предварительной подготовки газозвоздушной смеси. Горелки обоих типов могут работать на природном, коксовом, доменном, смешанном и других горючих газах низкого и среднего давления. Диапазон рабочего регулирования —  $0,1 \div 5000$  м<sup>3</sup>/ч.

Воздух в горелки подается центробежными или осевыми вентиляторами низкого и среднего давления. Вентиляторы могут быть установлены на каждой горелке или один вентилятор на определенную группу горелок. При этом, как правило, весь первичный воздух подается вентиляторами, вторичный же практически не влияет на качество горения и определяется только подсосом воздуха в топочную камеру через неплотности топочной арматуры и лючки.

Преимуществами горелок с принудительной подачей воздуха являются: возможность применения в топочных камерах с различным противодавлением, значительный диапазон регулирования тепловой мощности и соотношения газ — воздух, сравнительно небольшие размеры факела, незначительный шум при работе, простота конструкции, возможность предварительного подогрева газа или воздуха и использования горелок большой единичной мощности.

Горелки низкого давления применяют при расходе газа  $50 \div 100$  м<sup>3</sup>/ч, при расходе  $100 \div 5000$  целесообразно использовать горелки среднего давления.

Давление воздуха в зависимости от конструкции горелки и необходимой тепловой мощности принимается равным  $0,5 \div 5$ кПа.

Для лучшего перемешивания топливно-воздушной смеси в большинство горелок газ подается небольшими струями под различным углом к потоку первичного дутьевого воздуха. С целью интенсификации смесеобразования потоку воздуха придают турбулентное движение при помощи специально установленных завихряющих лопаток, тангенциальных направляющих и т.д.

К наиболее распространенным горелкам с принудительной подачей воздуха внутреннего смешения относят горелки с расходом газа до  $5000$  м<sup>3</sup>/ч и более. В них можно обеспечить заранее заданное качество подготовки топливно-воздушной смеси до ее подачи в топочную камеру.

В зависимости от конструкции горелки процессы смешения топлива и воздуха могут быть различными: первый — подготовка топливно-воздушной смеси непосредственно в камере смешения горелки, когда в топку поступает готовая газозвоздушная смесь, второй — когда процесс смешения начинается в горелке, а заканчивается в топочной камере. Во всех случаях скорость истечения газозвоздушной смеси разна  $16...60$  м/с. Интенсификации смесеобразования газа и воздуха достигают путем струйной подачи газа, применения регулируемых лопаток, тангенциального подвода воздуха и пр. При струйной подаче газа используют горелки с центральной подачей газа (от центра горелки к периферии) и с периферийной.

Максимальное давление воздуха на входе в горелку —  $5$  кПа. Она может работать при противодавлении и разрежении в топочной камере. В данных горелках в отличие от горелок внешнего смешения, пламя менее светящееся и относительно небольших размеров. В качестве стабилизаторов наиболее часто применяют керамические тоннели. Однако могут быть использованы все рассмотренные выше способы.

Горелка типа ГНП с принудительной подачей воздуха и центральной подачей газа, сконструированная специалистами института Теплопроект, предназначена для использования в топочных устройствах со значительными тепловыми напряжениями. В этих горелках предусмотрено закручивание потока воздуха с помощью лопаток. В комплект горелки входят два сопла: сопло типа А, применяемое для короткофакельного сжигания газа с  $4\div 6$  отверстиями для выхода газа, направленными перпендикулярно или под углом  $45^\circ$  к потоку воздуха, и сопло типа Б, используемое для получения удлиненного факела и имеющее одно центральное отверстие,

направленное параллельно потоку воздуха. В последнем случае предварительное смешение газа и воздуха происходит значительно хуже, что приводит к удлинению факела.

Стабилизация факела, обеспечивается применением огнеупорного тоннеля из шамотного кирпича класса А. Горелки могут работать на холодном и подогретом воздухе. Коэффициент избытка воздуха — 1,05. Горелки такого типа применяют в паровых котлах, хлебопекарной промышленности.

Двухпроводная газомазутная горелка ГМГ предназначена для сжигания природного газа или малосернистых видов жидкого топлива типа дизельного, бытового, мазутов флотских Ф5, Ф12 и пр. Допускается совместное сжигание газа и жидкого топлива.

Газовое сопло горелки имеет два ряда отверстий, направленных под углом  $90^\circ$  друг к другу. Отверстия на боковой поверхности сопла позволяют подавать газ в закрученный поток вторичного дутьевого воздуха, отверстия на торцевой поверхности — в закрученный поток первичного воздуха.

Процесс образования газозвушной смеси в горелках с принудительной подачей воздуха начинается непосредственной в самой горелке, а завершается уже в топке. В процессе сжигания газ сгорает коротким и несветящимся пламенем. Требующийся для сгорания газа воздух, подается в горелку принудительно с помощью вентилятора. Газ и воздух подаются по отдельным трубам.

Данный вид горелок еще называют двухпроводными или смесительными горелками. Чаще всего используются горелки, работающие на низком давлении газа и воздуха. Также некоторые конструкции горелок используются и при среднем давлении.

Устанавливаются горелки в топках котлов, в нагревательных и сушильных печах и т.д.

*Принцип работы горелки с принудительной подачей воздуха:* Газ поступает в сопло 1 с давлением до 1 200 Па и выходит из него через восемь отверстий диаметром 4,5 мм. Эти отверстия должны быть расположены под углом  $30^\circ$  к оси горелки. Специальные лопатки, которые задают вращательное движение потоку воздуха, расположены в корпусе 2 горелки. В процессе работы газ в виде мелких струек поступает в закрученный поток воздуха, который помогает хорошему смешиванию. Горелка заканчивается керамическим тоннелем 4, имеющим запальное отверстие 5.

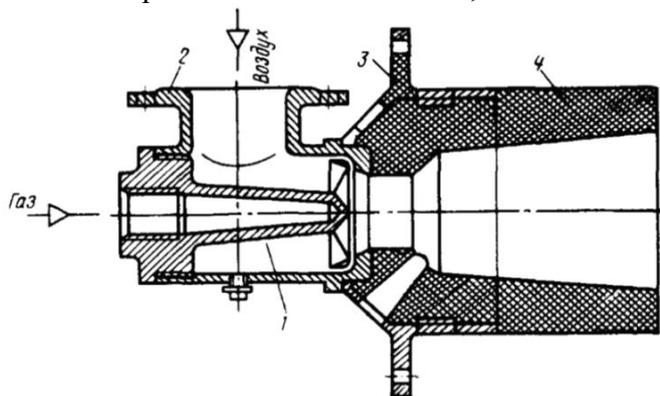


Рисунок 11.4 – Горелка с принудительной подачей воздуха:

1 — сопло; 2 — корпус; 3 — фронтальная плита; 4 — керамический тоннель.

*Горелки с принудительной подачей воздуха обладают рядом достоинств:*

- высокая производительность;
- широкий диапазон регулирования производительности;
- возможность работы на подогретом воздухе.

В существующих разнообразных конструкциях горелок интенсификация процесса образования газозвушной смеси достигается следующими способами:

- разбиением потоков газа и воздуха на мелкие потоки, в которых происходит смесеобразование;
- подачей газа в виде мелких струек под углом к потоку воздуха;
- закручиванием потока воздуха различными приспособлениями, встроенными внутрь горелок.

**Комбинированные горелки**

Комбинированными называются горелки, работающие одновременно или раздельно на газе и мазуте или на газе и угольной пыли.

Их применяют при перебоях в подаче газа, когда необходимо срочно найти другой вид топлива, когда газовое топливо не обеспечивает необходимого температурного режима топки; подача газа на данный производится только в определенное время (ночью) для выравнивания суточной неравномерности газопотребления.

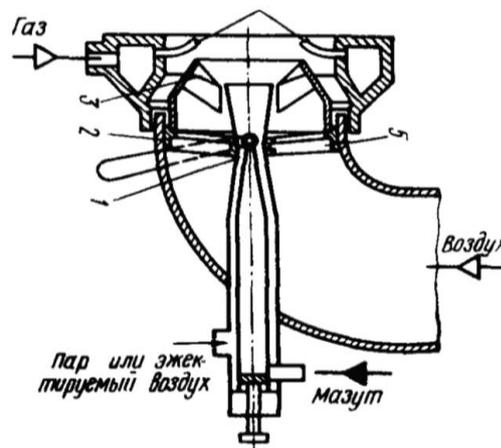
Наибольшее распространение получили газомазутные горелки с принудительной подачей воздуха. Горелка состоит из газовой, воздушной и жидкостной частей. Газовая часть представляет собой полое кольцо, имеющее штуцер для подвода газа и восемь трубочек для распыления газа.

Жидкостная часть горелки состоит из мазутной головки и внутренней трубки, заканчивающейся форсункой 1 (рис. 11.5).

Подача мазута в горелку регулируется вентилем. Воздушная часть горелки состоит из корпуса, завихрителя 3, воздушной заслонки 5, с помощью которой можно регулировать подачу воздуха. Завихритель служит для лучшего перемешивания струи мазута с воздухом. Давление воздуха 2÷3 кПа, давление газа до 50 кПа, а давление мазута до 0,1 МПа.

Рисунок 11.5 – Комбинированная газомазутная горелка:

1 – мазутная форсунка, 2 – воздушная камера, 3 – завихритель, 4 – трубки выхода газа, 5 – воздушная регулировочная заслонка.



Применение комбинированных горелок дает более высокий эффект, чем одновременное использование газовых горелок и мазутных форсунок или газовых пылеугольных горелок.

Комбинированные горелки необходимы для надежной и бесперебойной работы газоиспользующего оборудования и установок крупных промышленных предприятий, электростанций и других потребителей, для которых перерыв в работе недопустим.

Рассмотрим принцип действия комбинированной пылегазовой горелки конструкции Мосэнерго (рис. 11.6)

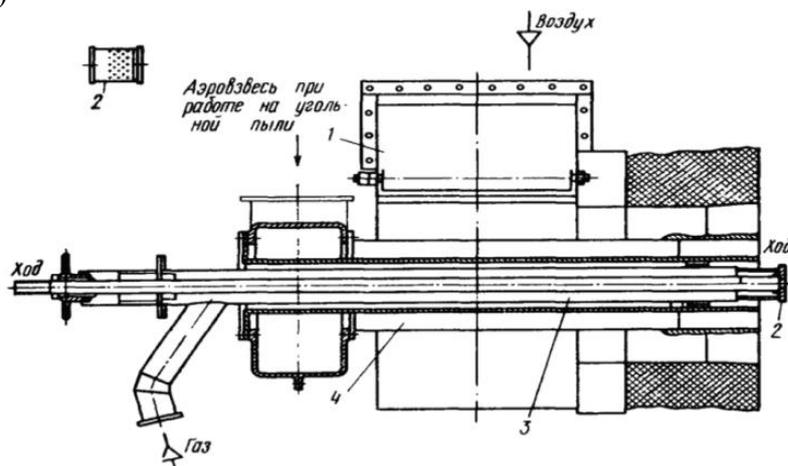


Рисунок 11.6 – Комбинированная пылегазовая горелка с центральной подачей газа:

1 – улитка для закручивания воздушного потока, 2 – наконечник газоподводящих труб, 3 – кольцевой канал для подачи смеси первичного воздуха с угольной пылью.

При работе на угольной пыли в топку по кольцевому каналу 3 центральной трубы подается смесь первичного воздуха с угольной пылью, а вторичный воздух поступает в топку через улитку 1.

В качестве резервного топлива служит мазут, в этом случае в центральной трубе устанавливается мазутная форсунка. При переводе горелки на газовое топливо мазутную форсунку заменяют кольцевым каналом, по которому подается газовое топливо.

В центральной части канала устанавливается труба с чугунным наконечником 2. Наконечник 2 имеет косые щели, через которые выходит газ и пересекается с потоком закрученного воздуха, выходящего из улитки 1. В усовершенствованных конструкциях горелок в наконечнике вместо щелей предусмотрено 115 отверстий диаметром 7 мм. В результате скорость выхода газа увеличивается почти в два раза (150 м/с).

В новых конструкциях горелки применяется периферийная подача газа, при которой газовые струйки, имеющие более высокую скорость, чем воздушные, пересекают закрученный поток воздуха, движущийся со скоростью 30 м/с, под прямым углом. Такое взаимодействие потоков газа и воздуха обеспечивает быстрое и полное перемешивание, в результате чего газоздушная смесь сгорает с минимальными потерями.

Увеличивается применение газотурбинных горелок, в которых подача воздуха осуществляется осевым вентилятором, приводимым в движение газовой турбиной. Эти горелки предложены в начале 20 века (турбогорелка Эйкарта). Под действием реактивной силы вытекающего газа турбина, вал и вентилятор приводятся во вращение в сторону, противоположную истечению газа. Производительность горелки регулируется величиной давления поступающего газа. Газотурбинные горелки могут применяться в топках котлов. Перспективными являются высоконапорные турбинные горелки газовые с самоподачей воздуха через рекуператоры и воздушные экономайзеры: газо-мазутные горелки газовой большой производительности, работающие на подогретом и холодном воздухе.

#### ***Автоматизация процессов сжигания газа***

Свойства газового топлива и современные конструкции газовых горелок создают благоприятные условия для автоматизации процессов сжигания газа. Автоматическое регулирование процесса горения повышает надежность и безопасность эксплуатации газоиспользующих агрегатов и обеспечивает их работу в соответствии с наиболее оптимальным режимом.

Сегодня в газоиспользующих установках применяются системы частичной или комплексной автоматизации. Комплексная газовая автоматика состоит из следующих основных систем:

- автоматика регулирования;
- автоматика безопасности;
- аварийной сигнализации;
- телотехнического контроля.

Регулирование и управление процессом горения определяется работой газовых приборов и агрегатов в заданном режиме и обеспечением оптимального режима сгорания газа. Для этого регулирование процесса горения предназначена автоматика регулирования бытовых, коммунальных и промышленных газовых приборов, и агрегатов. Таким образом, поддерживается постоянная температура воды в баке у емкостных водонагревателей, постоянное давление пара у паровых котлов.

Подача газа к горелкам газоиспользующих установок прекращается автоматикой безопасности в случае:

- погасание факела в топке;
- понижении давления воздуха перед горелками;
- повышении давления пара в котле;
- повышении температуры воды в котле;
- понижении разряжения в топке.

Отключение этих установок сопровождается соответствующими звуковыми и световыми сигналами. Не менее важен и контроль загазованности помещения, в котором расположены все газовые приборы и агрегаты. Для этих целей устанавливают электромагнитные клапаны, которые прекращают подачу газа в случаях превышения ПДК в окружающем воздухе  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$ .

Добиться оптимального режима в условиях технологического процесса можно при помощи приборов теплотехнического контроля

Условия эксплуатации газоиспользующего оборудования определяют степень его автоматизации.

Дистанционное управление газоиспользующих установок достигается путем использования приборов контроля и сигнализации.

### **Газовая горелка для котла отопления**

Основной рабочий узел любого газового котла – это газовая горелка. Она обеспечивает подготовку воздушно-топливной смеси, подачу его в камеру сгорания и формирование устойчивого пламени. Именно газовая горелка для газового котла отопления определяет его экономичность и надежность. При выборе оборудования следует уделить особое внимание типу конструкции горелки и ее особенностям.



Рисунок 11.7 – Горение газа

В составе бытовых котлов отопления применяются в основном только два типа газовых горелок по способу подготовки топливной смеси:

- атмосферные;
- вентиляторные (надувные).

Тип горелки определяет требования к конструкции камеры сгорания, теплообменника, эксплуатационные характеристики котла и способ отвода отработанных газов, выхлопа. Последний параметр является ключевым для выбора котла. Для атмосферных горелок обязательно нужен дымоход для поддержания естественной тяги. Для надувных достаточно вывести специальный коаксиальный дымоход за пределы помещения.

Для котлов отопления важно контролировать не только процесс горения как таковой, но и выходную тепловую мощность, ведь целью является нагрев теплоносителя и поддержания постоянной заданной температуры. Так определяется основная эксплуатационная характеристика – способ регулировки мощности:

- одноступенчатая;
- двухступенчатая;
- с плавной регулировкой пламени;
- модуляционные.



Рисунок 11.8 – Одноступенчатая газовая горелка Riello

*Одноступенчатая горелка* работает только в одном режиме полного сжигания всего поступающего газа. Основное преимущество – простая конструкция и, соответственно, низкая стоимость оборудования. Однако требуется постоянно включать и выключать подачу газа, чтобы поддерживать требуемую температуру теплоносителя. На выходе получается три существенных недостатка: повышенное потребление газа, сильные колебания температуры теплоносителя в котле, снижение ресурса при частом включении/выключении.

*Двухступенчатый* режим регулировки мощности позволяет работать котлу на полную мощность или только на 40-60%. Достигается это за счет ограничения поля горения газа, фактически перекрывая часть выходных сопел и ограничения объема поступающего газа или контролем давления на входе, уменьшая или увеличивая размер факела пламени.

*Плавная регулировка пламени* подразумевает регулировку объема поступающего газа на весь объем газовой горелки. Уменьшается или увеличивается размер факела пламени и соответственно результирующая тепловая мощность котла в пределах 40-100%.

*Модуляционные* горелки фактически комбинируют двух-, трехступенчатый способ с плавной регулировкой. Есть возможность ограничить поле горения, отключая часть сопел, а также регулировать размер пламени. В результате в полностью автоматическом режиме корректируется мощность от 10 до 100% при сохранении высокого КПД.

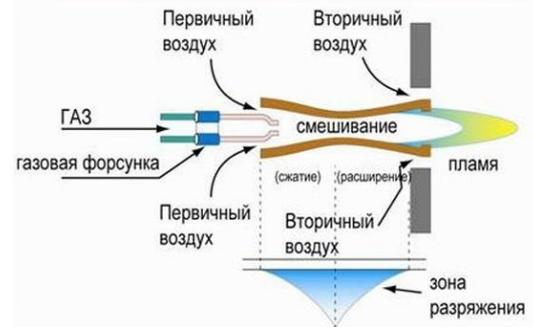
### Атмосферные горелки

Природный газ смешивается с воздухом непосредственно из помещения. Используется принцип простого эжектора. Газ поступает в сопла специальной формы внутри канала горелки, куда имеется доступ внешнему воздуху, а на некотором расстоянии формируется ряд выходных прорезей, куда поступает уже подготовленная газовоздушная смесь. На участке от сопла к выходному отверстию направленная струя газа образует разрежение, постоянно подтягивая воздух извне и перемешиваясь с ним.

Рисунок 11.9 – Схема работы атмосферной горелки

Поле горения в камере сгорания формируется рядами параллельных каналов, в каждом из которых установлено отдельное сопло.

После сгорания разогретый выхлоп поднимается под воздействием естественной тяги вверх к теплообменнику, отдавая часть энергии, и далее в канал дымохода. За счет перепада температуры воздуха внутри помещения и в дымоходе образуется тяга и движение воздуха, за счет чего к горелке постоянно поступает новая порция кислорода.



Преимущества:

- простота конструкции, дешевизна компонентов;
- энергонезависимость, горение и его поддержание происходит за счет налаженного процесса циркуляции воздуха и давления в газовой магистрали;
- простой принцип регулировки выходной мощности;
- бесшумность;
- компактные габариты и малый вес;
- простота установки, замены и обслуживания.

Недостатки:

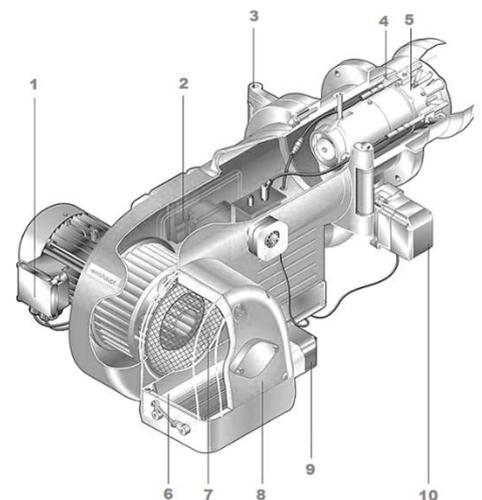
- обязательно требуется дымоход;
- качество сгорания газа зависит от состава воздуха и от качества исполнения всех компонентов газовой горелки и уровня тяги, которая во многом зависит от внешних факторов.

### Вентиляторные горелки

Надувные газовые горелки сложнее в конструкции и в управлении, зато обеспечивают практически полный контроль автоматикой процесса горения, выходной тепловой мощности и расхода газа. Воздух для смешения с природным газом берется извне помещения и подается в камеру сгорания принудительно с помощью производительного вентилятора. Управляя вентилятором и заслонкой, есть возможность строго регулировать пропорции газа и воздуха в зависимости от давления газа, режима работы котла и даже состава поступающего воздуха.

Рисунок 11.10 – Схема устройства вентиляторной горелки:

- 1 – двигатель горелки со встроенным силовым контактором;
- 2 – цифровой менеджер горения и встроенный блок управления и индикации;
- 3 – корпус горелки;
- 4 – контроль пламени;
- 5 – смесительное устройство;
- 6 – воздушные заслонки;
- 7 – защитная решетка;
- 8 – шумоизолированный регулятор воздуха;
- 9 – сервопривод воздушной заслонки;
- 10 – сервопривод газового дросселя.



Отвод выхлопа и отработанных газов происходит принудительно. Нет нужды оставлять выхлоп слишком горячим, для поддержания тяги, а значит, больше тепла передается теплоносителю, повышая КПД котельного оборудования. Используется коаксиальный дымоход, состоящий из двух труб разного диаметра, притом одна

вставлена внутри другой. По внутренней трубе отводится выхлоп наружу, а в промежутке между трубами поступает свежий воздух к горелке.

Так как подача воздуха, газа и их смешение происходит в принудительном порядке, надувные газовые горелки гораздо проще проектировать под использование нескольких типов топлива: газа и жидкого топлива (дизтоплива, бензина, этилового спирта и керосина).

Преимущества:

- полный контроль подготовки топливной смеси и горения;
- широкий диапазон настройки мощности;
- снижение общего потребления газа;
- повышенный КПД котла;
- возможность установки в квартирах или домах, не оборудованных дымоходом;
- возможность комбинировать тип топлива без переделки и перенастройки горелки и камеры сгорания.

Недостатки:

- высокая стоимость оборудования;
- энергозависимость, если нет электричества – подача газа перекрывается;
- обслуживание и эксплуатация только с привлечением специалистов.

Для непрерывной работы котла с надувной газовой горелкой требуется установка ИБП (источника бесперебойного питания), а также желательно наличие стабилизатора напряжения.

*Автоматические*

Подготовка топливной смеси и поддержка процесса горения – достаточно простые задачи, и решаются за счет конструкции самой горелки, формы сопла, выходных форсунок. Блок автоматики в любом котле отопления отвечает за другие задачи:

- поддержка горения запальника, розжиг с помощью пьезоэлемента или искровым разрядником;
- регулировка тепловой мощности;
- обработка любых нештатных ситуаций.

В числе последних учитываются:

- отсутствие тяги для атмосферных горелок или проблемы в работе вентилятора для надувных;
- низкое давление в газовой магистрали;
- затухание пламени запальника или горелки;
- превышение допустимой температуры оборудования.

Реакция на аварийные ситуации всегда одинакова – перекрыть подачу газа и по возможности сигнализировать пользователю о возникновении проблемы.

Предварительная настройка требуется в обязательном порядке для атмосферных газовых горелок. Необходимо настроить заслонку для подачи воздуха, жиклер для дозировки газа и положение сопла так, чтобы на выходе получить пламя с равномерным горением и ровным голубоватым цветом, что будет сигнализировать о верной пропорции газа и воздуха.

В надувных газовых горелках подача воздуха автоматизирована и управляется электронным блоком управления. Первоначальные настройки практически не затрагивают механических компонентов системы, за исключением заслонки на входе подачи воздуха, что определяет максимальный и минимальный объем поступления.

Вентиляторные системы оборудуются редуктором, который нормализует давление на входе, чем решается проблема установка пропорций для газозвдушной смеси. В зависимости от рабочего давления в газовых трубах определяется режим работы редуктора.

Со временем газовые горелки требуют очистки и технического обслуживания. Если в составе оборудования имеется фильтр тонкой очистки, то он обязательно прочищается или идет под замену. Если фильтра нет, то нужно прочистить сопла, в которых скапливаются пыль, грязь и маслянистые вещества, поступающие в них с газом.

Чистка выполняется сжатым воздухом, но только если его давление не превышает допустимого для данного типа горелки или просто струей воздуха. Сопла допускается чистить полимерными щетками средней жесткости с коротким ворсом, однако лучше справляются

специальные чистящие составы, в которых любая грязь размокает и легко сходит без повреждения основы.

### **Контрольные вопросы:**

11. Что называют горелкой?
12. Для чего предназначены пылеугольные горелки?
13. Какие требования предъявляют к горелочному устройству?
14. Как классифицируются горелки по аэродинамическому способу ввода компонентов горючей смеси?
15. Как классифицируются горелки в зависимости от конструкции закручивающих аппаратов?
16. Какие виды топлив сжигаются в вихревых горелках?
17. Принцип работы вихревой пылеугольной турбулентной горелки ОРГРЭС.
18. Принцип работы пылеугольной турбулентной горелки ТКЗ-ЦКТИ.
19. Для каких целей служит конус-рассекатель?
20. От чего зависит интенсивность горения и длина факела на выходе из горелок?

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколов Е.Я. Котельные установки и их эксплуатация. - М., Академия, 2010.
2. Смирнова М.В. Теплоснабжение.- издательский дом «ИН-ФОЛИО», 2011.
3. Копылов А.С., Лавочкин В.М., Очков В.Ф. Водоподготовка в энергетике – М.: Издательство МЭН, 2011.
4. Стерман А.С., Покровский В.Н. Физические и химические методы обработки воды на ТЭС. М.: Академия, 2011.
5. Паровые и водогрейные котлы. Справочное пособие.- Издательство «ДЕАН», С-Пб, 2000.
6. Правила безопасного устройства и эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды. Госгортехнадзор России, 1993.
7. Правила безопасного устройства и эксплуатации паровых и водогрейных котлов. Госгортехнадзор России, 1993.
8. ГОСТ 25449-82 Теплообменники водоводяные и пароводяные. Типы,
9. Варваркин В.К., Панов П.А. Справочное пособие по наладке котельных установок и тепловых сетей. – М.: Высшая школа, 1984.
10. Правила устройства и безопасной эксплуатации паровых и водогрейных котлов. – М.: ПИО ОБТ, 1997.
11. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением. – М.: ПИО ОБТ, 1996.
12. Правила безопасности в газовом хозяйстве. – М.: НПО ОБТ, 2000.
13. Строительные нормы и правила СНиП 23-01-99 Строительная климатология. - М.: 2003.