

УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЯНОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

*Салаватский филиал  
Кафедра химико-технологических процессов*

# **ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ И ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА**

**Учебно-методическое пособие по выполнению курсовой работы по  
курсу**

***«Техническая термодинамика  
и энерготехнология химических производств»***

**для студентов специальности 25.04**

**Салават 1999**



Учебно-методическое пособие используется студентами специальности 25.04 при выполнении курсовой работы по "Технической термодинамике и энерготехнологии химических производств". Представлены общие указания по выполнению работы, задание и исходные данные к нему, порядок расчета, требующиеся справочные данные и вопросы для самостоятельного контроля и усвоения материала по разделам курса «Промышленные теплоэнергетические установки», «Термодинамические методы анализа энерго-химико-технологических систем» и «Вторичные энергетические ресурсы», «Топливо. Виды сжигаемого топлива ». Рассмотрен метод эксергетического анализа применительно к котельному агрегату. Кратко изложены теоретические основы метода.

**СОСТАВИТЕЛИ:**

Евдокимова Н.Г., к. т. н., доцент  
Шеин В.П., ассистент

**РЕЦЕНЗЕНТЫ:**

Аникеев И.К., к.т.н.,  
главный технолог НПЗ  
ОАО «Салаватнефтеоргсинтез»  
Пыхтеев И.А., и.о. главного  
энергетика ГУП СОМЗ

**© Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
1999**



## ВВЕДЕНИЕ

Наука, изучающая процессы получения и использования теплоты в различных производствах, а также машины и аппараты, предназначенные для этих целей, называется теплотехникой. В настоящее время роль теплотехники значительно возросла в связи с необходимостью экономного использования топливно-энергетических ресурсов, решением проблемы охраны окружающей среды и созданием безотходных технологий. Проблемы развития энергетической промышленности, теплофикации сопровождаются освоением новых технологий производства тепловой и электрической энергий, развитием конструкций паровых котлов и их вспомогательного оборудования, освоением новых видов топлива, совершенствованием контрольно-измерительной техники и средств управления оборудованием.

Для специалистов любого технического профиля важна теоретическая и практическая подготовка по основным разделам теплотехники, энергосбережения, основным законам термодинамики.

Фундаментальной Энергетической программой Российской Федерации является энергосберегающая политика. Нефтяная, газовая и нефтеперерабатывающая отрасли промышленности составляют часть топливно-энергетического комплекса страны. Нефтеперерабатывающая, нефтехимическая и химическая промышленность являются наиболее энергоемкими отраслями народного хозяйства. В себестоимости производства отдельных видов продукции в этих отраслях промышленности на долю энергетических затрат приходится от 10 до 60%, например, на переработку одной тонны нефти затрачивается 165-180 кг условного топлива [1]. Энергетическое хозяйство НПЗ и НХЗ включает собственно энергетические установки (ТЭЦ, котельные, компрессорные, утилизационные, холодильные и теплонасосные установки и др.), энергетические элементы теплотехнических установок и энергетические элементы комбинированных энерго-химико-технологических систем (ЭХТС), производящих технологическую и энергетическую продукцию.

В данной работе на примере котельного агрегата рассматриваются методы расчета процесса сжигания и расхода топлива, к.п.д., теплового и энергетического балансов. Экономия топлива при его сжигании является одной из важнейших задач в решении топливно-энергетической проблемы. Вопросы экономии топлива и рационального использования тепла решаются в курсовой работе применением в схеме котельной установки экономайзера, воздухонагревателя, котла-утилизатора.



## **1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ И О ПАРОВЫХ КОТЛАХ**

Котельные установки могут быть либо основным элементом тепловой электростанции, либо выполнять самостоятельные функции. Например, отопительные котельные установки служат для обеспечения отопления и горячего водоснабжения, промышленные – для технологического тепло- и пароснабжения и т.д. В зависимости от назначения котельная установка состоит из парового или водогрейного котла и соответствующего вспомогательного оборудования, обеспечивающего его работу.

Паровой (водогрейный) котел – это устройство, в котором для получения пара (горячей воды) требуемых параметров используют теплоту, выделяющуюся при сгорании органического топлива или отходящих газов.

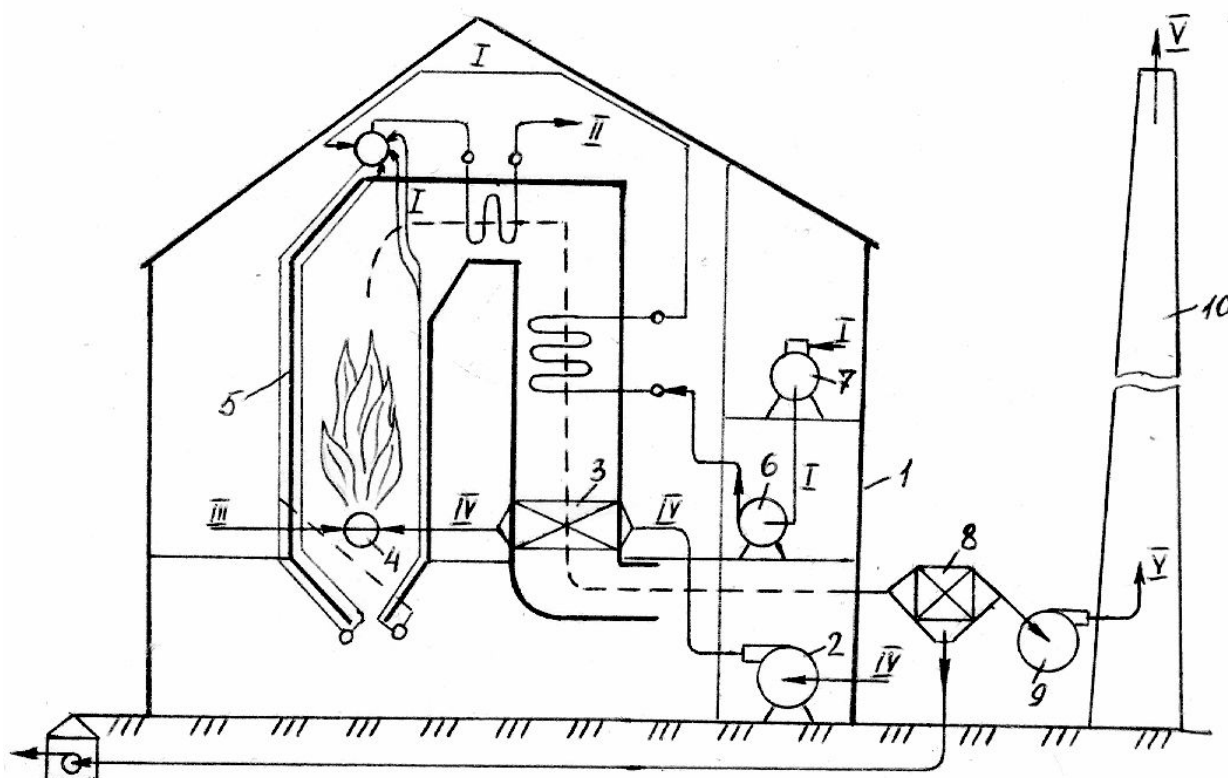
Для удобства схему котельной установки рассматривают в виде отдельных трактов соответствующего назначения: топливного, газового, пароводяного и золошлакоудаляющего. На рис.1 представлена технологическая схема котельной установки барабанного котла высокого давления со сжиганием твердого топлива в пылевидном состоянии.

Основными элементами парового котла являются поверхности нагрева – теплообменные поверхности, предназначенные для передачи теплоты от теплоносителя к рабочему телу (вода, пароводяная смесь, пар или воздух).

Совокупность последовательно расположенных по ходу рабочего тела поверхностей нагрева соединяющих их трубопроводов составляет пароводяной тракт парового котла. В основной пароводяной тракт входят: экономайзер, барабан, отводящие трубы, опускные трубы, распределительный коллектор, трубы топочных экранов, потолочный и конвективный пароперегреватели.

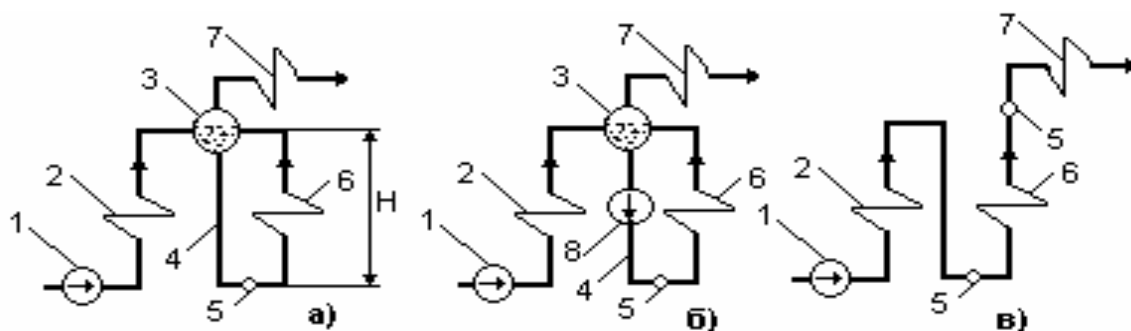
Топливный тракт котла представляет собой совокупность оборудования для транспорта и подготовки его для сжигания. Воздушный тракт работает под избыточным давлением, развиваемым дутьем вентилятора. Подогрев воздуха в воздухоподогревателе позволяет обеспечить сушку топлива и повысить интенсивность и экономичность горения топлива.

По виду сжигаемого топлива различают паровые котлы для газообразного, жидкого и твердого топлива. По особенностям газозвоздушного тракта различают котлы с естественной, уравновешенной тягой и с наддувом. По виду пароводяного тракта различают барабанные и прямоточные котлы. На рис.2 представлены схемы пароводяных трактов паровых котлов. В настоящее время на тепловых электростанциях (ТЭС) и теплоэлектроцентралях (ТЭЦ) наибольшее применение нашли барабанные котлы, в которых зафиксирована граница раздела между паром и водой.



**Рис.1. Схема котельной установки с барабанным котлом естественной циркуляции:**

1 – здание котельной; 2 – дутьевой вентилятор; 3 – воздухоподогреватель; 4 – горелки; 5 – топка котла; 6 – водяной насос; 7 – бак питательной воды; 8 – золоулавливающее устройство; 9 – дымосос; 10 – дымовая труба; I – водяной тракт; II – перегретый пар; III – топливный тракт, IV – путь движения воздуха; V – тракт продуктов сгорания.



**Рис. 2. Схемы пароводяного тракта паровых котлов:**

а) барабанного с естественной циркуляцией, б) барабанного с принудительной циркуляцией, в) проточного; 1 – питательный насос, 2 – экономайзер, 3 – барабан, 4 – опускные трубы, 5 – коллектор, 6 – подъемные трубы испарительной поверхности нагрева, 7 – пароперегреватель, 8 – циркуляционный насос.



Паровые котлы характеризуются основными параметрами: номинальной производительностью, давлением, температурой пара (основного и промежуточного перегрева) и питательной воды. По параметрам рабочего тела различают котлы низкого (менее 1 МПа), среднего (1-10 МПа), высокого (10-22,5 МПа) и сверхкритического давления (более 22,5 МПа). Наиболее характерные особенности и основные параметры вводятся в его обозначения. В принятых по ГОСТ 3619-82 обозначениях указывается тип котла, паропроизводительность (т/ч) и давление (МПа), температура перегрева, вид сжигаемого топлива и некоторые другие особенности.

## 2. СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Выполненная курсовая работа оформляется в соответствии с требованиями ЕСКД.

Пояснительная записка должна содержать:

- введение;
- литературный обзор;
- исходные данные;
- расчет процесса горения топлива и определение теоретической температуры горения;
- расчет теплового баланса котельного агрегата и диаграмму тепловых потоков в масштабе;
- эксергетический баланс котельного агрегата и диаграмму эксергетических потоков в масштабе;
- расчет котла-утилизатора;
- эскиз котельного агрегата (формат А3) и описание его работы;
- схему котла-утилизатора (формат А4) и ее краткое описание;
- выбор, схемы (формат А4) и описание работы вспомогательного оборудования: экономайзера, воздухоподогревателя, горелки;
- список используемой литературы.

## 3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

3.1. Введение. В этом разделе работы на основании изучения литературных источников и лекционного материала приводятся данные об основных задачах энерготехнологии, энергосбережения и перспективах развития котельных агрегатов химических производств.

3.2. Литературный обзор готовится по одной из предложенных тем:

- «Котельные установки и паровые котлы»,
- «Технологические схемы получения электрической и тепловой энергии»,
- «Энергетическое топливо»,
- «Современные тенденции в организации и регулировании топочных



процессов»;

- «Вторичные энергоресурсы»;
- «Вопросы охраны окружающей среды при сжигании органического топлива»;
- «Утилизационные установки и котлы-утилизаторы»;
- «Паровые турбины электростанций»;
- «Теплоэнергетические системы промышленных предприятий»;
- «Перспективы и основные направления развития топливно-энергетического комплекса РФ»;
- «Топливо-энергетический комплекс Башкортостана»;
- «Источники энергии и ресурсы энергетического сырья».

Студент сам может предложить тему литературного обзора, согласовав ее с руководителем курсовой работы. Объем литературного обзора должен быть в пределах 13 – 15 страниц рукописного текста.

3.3. Исходные данные к курсовой работе приведены в табл. 1 и 2. Номер варианта выбирается по последней и предпоследней цифрам зачетной книжки или студенческого билета. Температуру окружающего воздуха принять  $t_o = 0^\circ\text{C}$ , а температуру подогрева воздуха в воздухонагревателе -  $t_{воз} = 200^\circ\text{C}$ . Величину непрерывной продувки принять  $\Pi = 3\%$ .

3.4. Расчеты процесса горения, определения теоретической температуры горения, теплового и эксергетического балансов котельного агрегата, расчет котла-утилизатора производятся в соответствии с разделами учебно-методического пособия.

3.5. Выбор котельного агрегата производится по паропроизводительности, температуре пара, его давлению и типу сжигаемого топлива. Описание и принципиальные схемы котельных агрегатов приведены в учебной литературе [2,3,4,5,12,13,14] и в приложении 2 данного учебно-методического пособия.

3.6. Схему теплового баланса котельного агрегата, диаграмму эксергетических потоков построить в масштабе, аналогично рис. 4 и 6.

3.7. Выбор, описание и схему котла-утилизатора взять из [2,7,12] или в приложении 3 учебно-методического пособия.

3.8. Выбор и описание работы вспомогательного оборудования. К вспомогательному оборудованию относятся пароперегреватели, экономайзеры, воздухоподогреватели и горелки. При выборе данного оборудования пользоваться литературой [2,4,5,6,12,13,14] и приложениями 4, 5 и 6; учитывают эффективность работы, металлоемкость, поверхность теплообмена, простоту конструкции и обслуживания, условия работы (температуру, давление рабочего тела).





3.9. Графическая часть курсовой работы выполняется аккуратно в соответствии с правилами ЕСКД. Схема-эскиз котельного агрегата выполняется на листе формата А3. Схемы котла-утилизатора, пароперегревателя, экономайзера, воздухоподогревателя и горелки выполняются на листах формата А4.

#### 4. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ К ЗАДАНИЮ

Таблица 1

Предпоследняя цифра шифра	$P_{н.п.}, \text{МПа}$	$t_{н.п.}, ^\circ\text{C}$	$t_{н.в.}, ^\circ\text{C}$	$t_{yx}, ^\circ\text{C}$	$P_{к.у.}, \text{МПа}$	$\alpha_m$
0	8,0	450	40	190	1,6	1,05
1	8,0	400	50	190	1,7	1,20
2	10	350	60	175	1,8	1,15
3	10	435	70	170	1,9	1,10
4	12	425	80	160	1,5	1,15
5	12	440	85	185	1,0	1,20
6	10,0	500	90	145	1,1	1,15
7	10,0	350	95	140	1,2	1,10
8	14,0	420	100	175	1,3	1,20
9	14,0	400	110	190	1,4	1,05

Таблица 2

Последняя цифра шифра	Вид топлива	Паропроизводительность $D$ , т/ч	Присос воздуха $\Delta\alpha$
0	Мелитопольский природный газ	45	0,35
1	Западно-Сибирский природный газ	50	0,30
2	Ставропольский природный газ	35	0,20
3	Бугурусланский природный газ	40	0,25
4	Саратовский природный газ	40	0,30
5	Оренбургский природный газ	45	0,30
6	Бухарский природный газ	35	0,20
7	Топочный газ НПЗ	50	0,35
8	Жирный газ НПЗ	35	0,30
9	Коксовый газ	45	0,30

Характеристика данных газов представлена в приложении.





## 5. РАСЧЕТ КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА

### 5.1. Расчет процесса горения топлива

5.1.1. Для обеспечения полного горения топлива практически в котельный агрегат подается воздух с избытком по сравнению с теоретическим. Это характеризуется коэффициентом избытка воздуха за установкой:

$$\alpha_{yx} = \alpha_{yx} + \alpha_{yx} \quad (1)$$

5.1.2. Теоретическое количество воздуха, необходимого для полного сгорания 1 нм газообразного топлива,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ,

$$V^0 = 0,0476 \cdot \left[ 0,5 \cdot (CO + H_2) + \sum \left( m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n + 1,5 H_2 S - O_2 \right]. \quad (2)$$

5.1.3. Объем трехатомных газов,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ,

$$V_{RO_2} = 0,01 \cdot (CO + \sum m C_m H_n + H_2 S + CO_2). \quad (3)$$

5.1.4. Теоретический объем азота,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ,

$$V_{N_2} = 0,79 V^0 + \frac{N_2^P}{100}. \quad (4)$$

5.1.5. Объем избытка воздуха,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ,

$$\Delta V_{BO_3} = (\alpha_{yx} - 1) \cdot V^0. \quad (5)$$

5.1.6. Объем водяных паров,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ,

$$V_{H_2O} = 0,01 \cdot \left( H_2 + \sum \frac{n}{2} C_m H_n + H_2 S \right) + 0,016 \cdot \alpha_m \cdot V^0. \quad (6)$$

5.1.7. Объем продуктов сгорания, образующихся при сжигании 1  $\text{м}^3$  (при нормальных условиях) топлива,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ,

$$V_{\Gamma} = V_{RO_2} + V_{N_2} + V_{H_2O} + \Delta V_{BO_3}. \quad (7)$$

5.1.8. Плотность топочного газа при нормальных условиях,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ,

$$\rho_m = 0,01 \cdot [1,96 \cdot CO_2 + 0,52 \cdot H_2 S + 1,25 \cdot N_2 + 1,43 \cdot O_2 + 1,25 \cdot CO + 0,089 \cdot H_2 + \sum (0,536 \cdot m + 0,046 \cdot n) \cdot C_m H_n + 0,803 \cdot H_2 O]. \quad (8)$$



5.1.9. Масса дымовых газов при сжигании газообразного топлива,  $\text{кг/м}^3$ ,

$$G_{\Gamma} = \rho_m + 1,306 \cdot \alpha_{yx} \cdot V^0. \quad (9)$$

5.1.10. Определяем теоретическую температуру горения, для чего вычислим энтальпию продуктов сгорания при произвольных температурах (например, 1400 и 2000°C) по формуле

$$h_{nc} = (V_{CO_2} \cdot C'_{CO_2} + V_{N_2} \cdot C'_{N_2} + V_{H_2O} \cdot C'_{H_2O} + \Delta V_{BO_3} \cdot C'_{BO_3}) \cdot t, \quad (10)$$

где  $C'$ - средние объемные изобарные теплоемкости углекислого газа, азота, водяных паров и воздуха соответственно, определяются по табл.П1.3. По рассчитанным значениям при 1400°C и при 2000°C строят в масштабе зависимость энтальпии продуктов сгорания от температуры  $h_{nc}=f(t)$ .

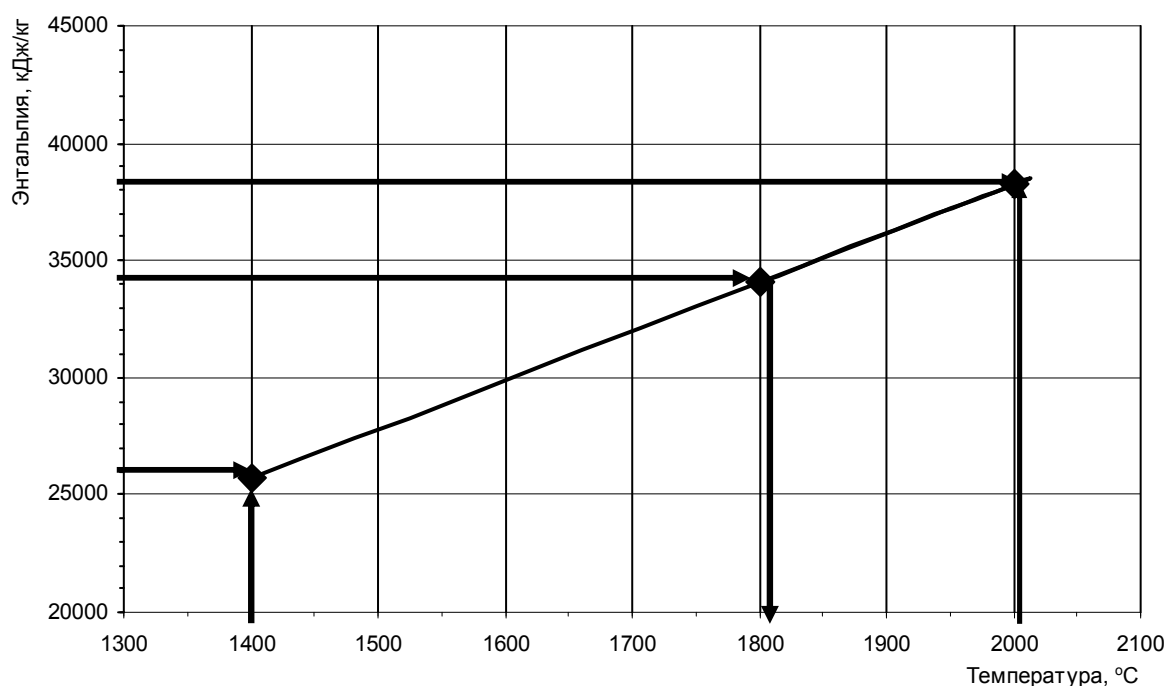


Рис.3. Диаграмма  $ht$  - продуктов сгорания

Энтальпию продуктов сгорания ( $\text{кДж/м}^3$ ) при теоретической температуре определяем из уравнения теплового баланса топки



$$Q_H^P + h_m + h_{\text{BO}_3} = h_{nc}^m, \quad (11)$$

где  $h_m$  - физическое тепло топлива, ввиду его малости можно принять  $h_{\text{BO}_3}$  - физическое тепло воздуха;

$$h_{\text{BO}_3} = \alpha_m \cdot C'_{\text{BO}_3} \cdot t_{\text{BO}_3}, \quad (12)$$

здесь  $t_{\text{BO}_3}$  - температура воздуха, выбирается согласно заданию;  $C'_{\text{BO}_3}$  - средняя изобарная объемная теплоемкость воздуха при температуре воздуха, определяется из табл. П1.4. Зная  $h_{nc}^m$ , по  $ht$ -диаграмме определяем теоретическую температуру горения.

5.1.11. Энтальпию уходящих газов (кДж/м<sup>3</sup>) определяем:

5.1.11.1. С воздухоподогревателем

$$h_{yx} = (V_{\text{CO}_2} \cdot C'_{\text{CO}_2} + V_{\text{N}_2} \cdot C'_{\text{N}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} \cdot C'_{\text{H}_2\text{O}} + (\alpha_{yx} - 1) \cdot V_{\text{BO}_3} \cdot C'_{\text{BO}_3}) \cdot t_{yx}. \quad (13)$$

5.1.11.2. Без воздухоподогревателя

$$h'_{yx} = (V_{\text{CO}_2} \cdot C'_{\text{CO}_2} + V_{\text{N}_2} \cdot C'_{\text{N}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} \cdot C'_{\text{H}_2\text{O}} + (\alpha_{yx} - 1) \cdot V_{\text{BO}_3} \cdot C'_{\text{BO}_3}) \cdot t_{yx}. \quad (14)$$

Для этого случая определим приближенное значение температуры уходящих газов  $t'_{yx}$  без воздухоподогревателя из уравнения теплового баланса последнего:

$$1,293 \cdot C_{\Gamma} V_{\Gamma} (t'_{yx} - t_{yx}) = \alpha_m \cdot V^0 \cdot C_{\text{BO}_3} (t_{\text{BO}_3} - t_0) \cdot 1,293, \quad (15)$$

где  $C_{\Gamma}$  - средняя изобарная массовая теплоемкость газов; принимаем

$$C_{\Gamma} = 1,16 \text{ кДж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)};$$

$C_{\text{BO}_3}$  - средняя изобарная массовая теплоемкость воздуха; принимаем

$$C_{\text{BO}_3} = 1,02 \text{ кДж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)},$$

откуда

$$t'_{yx} = t_{yx} + \frac{0,88 \cdot \alpha_m \cdot V^0 \cdot t_{\text{BO}_3}}{V_{\Gamma}}. \quad (16)$$



## 5.2. Тепловой баланс котельного агрегата

Тепловой баланс котла, как и любого теплотехнического агрегата, характеризуется равенством между количествами подведенной (располагаемой) и расходуемой теплоты:  $Q_{\text{прих}} = Q_{\text{расх}}$ . Обычно тепловой баланс составляют на единицу количества сжигаемого топлива: 1 кг твердого или жидкого, либо  $1 \text{ м}^3$  газообразного топлива, взятого при нормальных условиях. С учетом этого и пренебрегая физической теплотой топлива и холодного воздуха, можно считать, что  $Q_{\text{прих}} = Q_{\text{н}}^{\text{P}}$  ( $Q_{\text{н}}^{\text{P}}$  – низшая теплота сгорания единицы топлива в рабочем состоянии).

Тепловой баланс котельного агрегата рассчитывается по уравнению согласно схеме рис.4.

$$Q_{\text{н}}^{\text{P}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 \quad (17)$$

то же в % :

$$100\% = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6, \quad (18)$$

где  $Q_1$  – полезно использованная в котельном агрегате теплота;  $Q_2$ - потери теплоты с уходящими газами ;  $Q_3$ - потери теплоты от химической неполноты сгорания (см.табл.П1.2);  $Q_4$ - потери теплоты от механической неполноты сгорания, принимаем равными нулю ;  $Q_5$ - потери теплоты от наружного охлаждения (см.табл.П1.3);  $Q_6$ - потери с физическим теплом шлака, принимаем равными нулю.

5.2.1. Потери теплоты с уходящими газами определяем для случаев:

5.2.1.1. С воздухоподогревателем

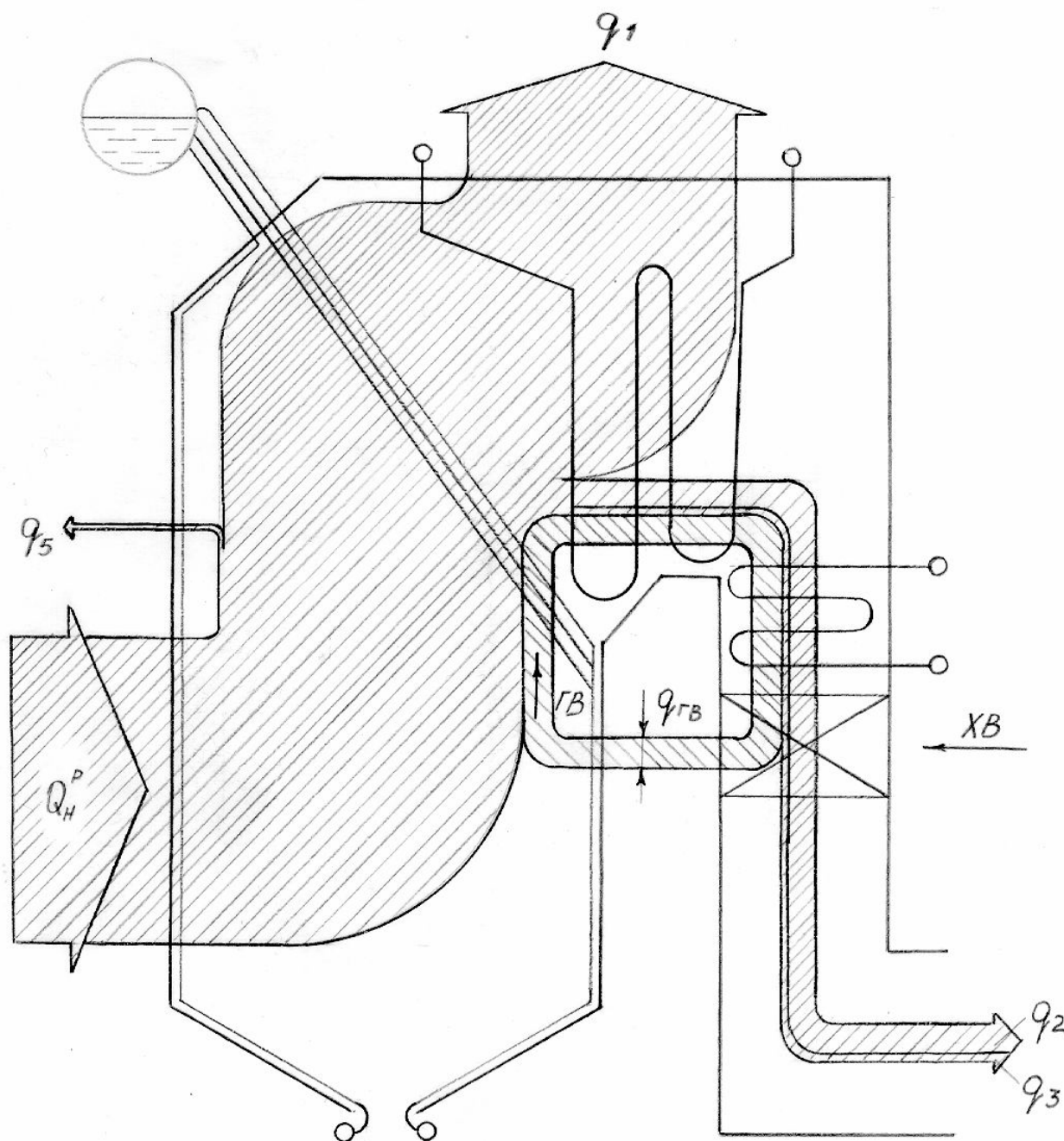
$$q_2 = \frac{h_{\text{yx}} - h_0}{Q_{\text{н}}^{\text{P}}} \cdot (100 - q_4). \quad (19)$$

5.2.1.2. Без воздухоподогревателя

$$q_2' = \frac{h_{\text{yx}} - h_0}{Q_{\text{н}}^{\text{P}}} \cdot (100 - q_4), \quad (20)$$

где  $h_0 = 0$  при  $t_0 = 0^\circ \text{C}$ .

5.3. К.п.д. брутто котельного агрегата, %



**Рис.4. Тепловой баланс котельного агрегата**

5.3.1. С воздухоподогревателем

$$\eta_{K.A.} = q_1 = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6). \quad (21)$$

5.2.2. Без воздухоподогревателя

$$\eta'_{K.A.} = q'_1 = 100 - (q'_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6). \quad (22)$$



5.4. Часовой расход натурального тепла, м<sup>3</sup>/ч:

5.4.1. С воздухоподогревателем

$$B = \frac{D \cdot \left[ (h_{П.П.} - h_{П.В.}) + \frac{\Pi}{100} \cdot (h' - h_{П.В.}) \right]}{Q_H^P \cdot \frac{\eta_{К.А.}}{100}}, \quad (23)$$

где  $h_{nn}$  - энтальпия перегретого пара, определяется по таблицам [3,9] термодинамических свойств воды и водяного пара при  $t_{nn}$  и  $P_{nn}$ ;  $h_{nv}$  - энтальпия питательной воды при температуре  $t_{nv}$  и  $P_{nn}$  также определяется по таблицам [3,9].  $h'$  - энтальпия воды в котельном агрегате; принимаем равной энтальпии воды при температуре насыщения  $t_n$  и  $P_{nn}$  в таблицах [3,9].

5.4.2. Без воздухоподогревателя

$$B' = \frac{D \cdot \left[ (h_{П.П.} - h_{П.В.}) + \frac{\Pi}{100} \cdot (h' - h_{П.В.}) \right]}{Q_H^P \cdot \frac{\eta'_{К.А.}}{100}}, \quad (24)$$

где  $D$  - производительность котельного агрегата, кг/ч.

## 6. УПРОЩЕННЫЙ ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНС КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА

Различные виды энергии имеют неодинаковую ценность с точки зрения возможности их практического использования. Способность совершения механической работы принята в качестве всеобщего показателя качества энергии различных видов. Чем больше отличаются параметры системы от параметров окружающей среды, тем выше энергетическая ценность данной системы. Практическая энергетическая ценность вещества или системы равна нулю, если их параметры соответствуют параметрам окружающей среды.

Максимальная работа, совершаемая системой при ее взаимодействии с окружающей средой, получила название эксергии. «Эксергия материи является максимальной работой, которую эта материя может совершить в обратимом процессе с окружающей средой, если в конце этого процесса все участвующие в нем виды материи приходят в состояние термодинамического равновесия со всеми компонентами окружающей среды» [19]. Эксергию наглядно можно изобразить графически (рис.5).

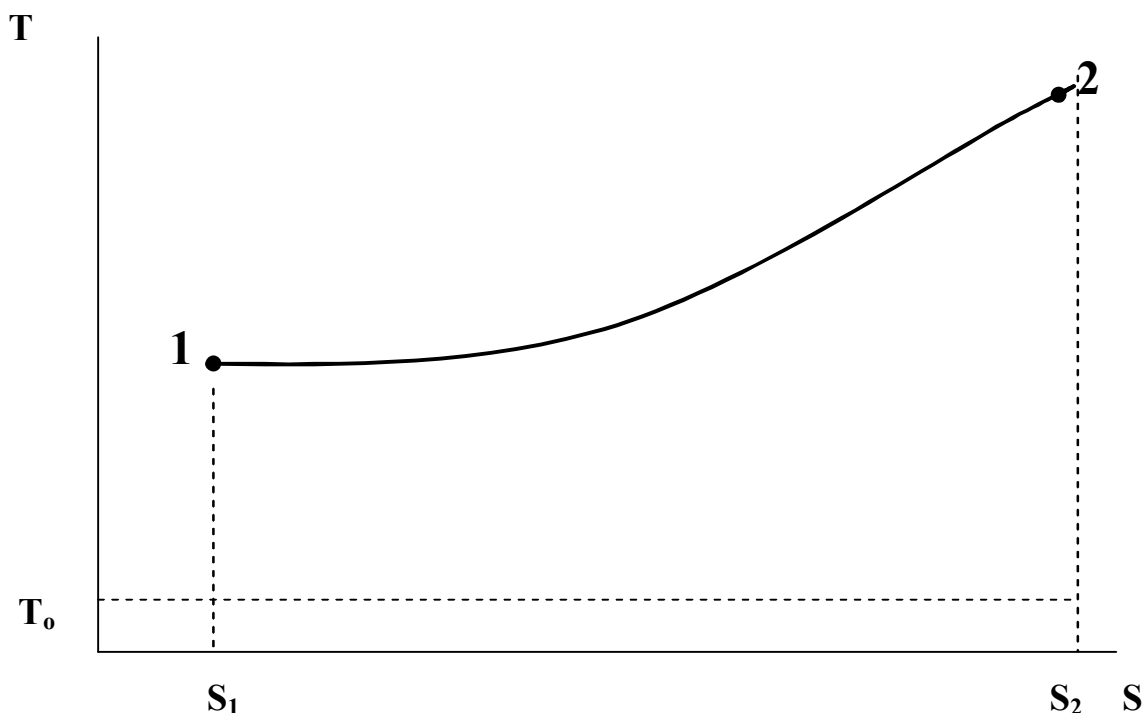


Рис.5. Эксергия теплоты

В произвольном процессе 1-2 к телу подводится теплота (площадь  $12S_2S_1$ ). Эксергия подводимой теплоты изображается заштрихованной площадью  $e_q = q - T_o(S_2 - S_1)$ . Площадь под линией  $T_o = \text{const}$  равна  $T_o(S_2 - S_1)$ , представляет собой часть теплоты, которую невозможно использовать для практических целей. Та часть энергии, которая не может быть превращена в механическую энергию, называется энергией  $A$ , следовательно,  $q = e_q + A$ , где  $A = T_o(S_2 - S_1)$ .

Различают эксергию теплоты, эксергию вещества в замкнутом объеме, эксергию вещества в потоке. Для расчета удельных эксергий используются зависимости:

- эксергия теплоты  $e_q = q(1 - (T_o/T))$ ;

- эксергия вещества в замкнутом объеме

$$e_v = (U - U_o) - T_o(S - S_o) + P_o(V - V_o);$$

- эксергия вещества в потоке  $e_h = h - h_o - T_o(S - S_o)$ ,

где  $T_o, T$  – абсолютные температуры окружающей среды, вещества или потока соответственно;  $U_o, h_o, S_o, V_o$  – внутренняя энергия, энтальпия, энтропия, удельный объем при  $T_o$ ;  $U, h, S, V$  – то же при  $T$ ;  $P_o$  – давление окружающей среды.

Приведенные зависимости не всегда позволяют просто рассчитать эксергию, поэтому используют другие упрощенные зависимости. В частно-



сти, это относится к топливам. Их химическую эксергию рассчитывают по формулам:

- для жидких топлив  $e=0,975 Q_v$ ;
- для твердых топлив  $e= Q_v(1-W_p)$ ;
- для газообразного топлива  $e=1,04Q_v$ , где

$Q_v$  – высшая теплота сгорания топлива, кДж/кг, кДж/м<sup>3</sup>;  $W_p$  – влажность твердого топлива.

Каждая анализируемая система характеризуется материальным, тепловым и эксергетическим балансами. Всякий реальный необратимый процесс сопровождается потерями эксергии и уравнение потоков эксергии имеет вид неравенства  $\sum E' > \sum E''$ , т.е. сумма эксергий на входе в систему всегда больше сумме эксергий на выходе из нее. С учетом потерь эксергий вследствие необратимости процессов ( $\sum D = T_0 \Delta S$  – уравнение Гюи-Стодолы), происходящих в системе, получим уравнение эксергетического баланса

$$\sum E'' = \sum E' - \sum D = \sum E' - T_0 \Delta S.$$

На рис.6 изображена диаграмма Грассмана для процесса сжигания топлива.

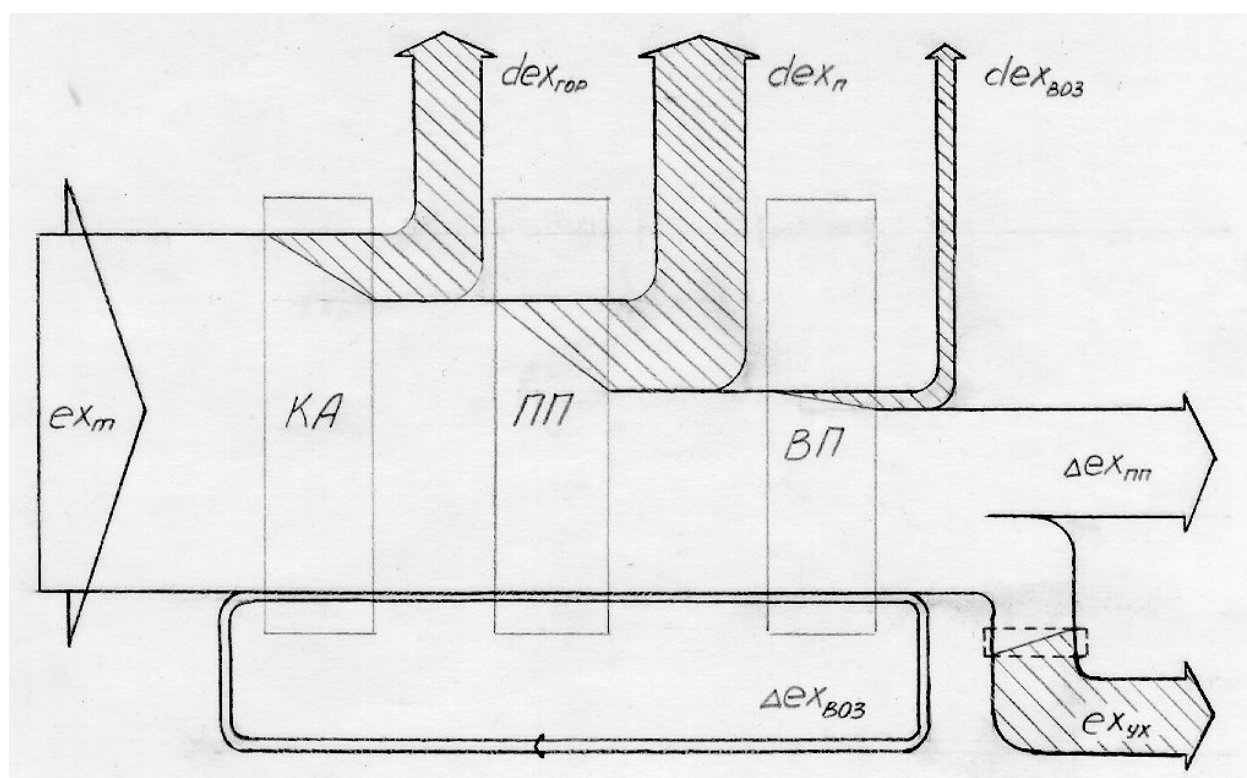


Рис.6. Эксергетическая диаграмма Грассмана для процесса сжигания топлива:

- внешние потери;
- ▨ внутренние потери.



Установка состоит из подогревателей топлива и воздуха ВП, камеры сжигания КА и элемента ПП, где происходит использование эксергии топлива. В установку поступают потоки топлива и воздуха с эксергиями  $ex_m$  и  $\Delta ex_{603}$  соответственно. В результате подогрева топлива и воздуха в подогревателе ВП за счет эксергии продуктов сгорания  $E_5$  их эксергия возрастает от  $E_1$  до  $E'_1$ . Процесс подогрева сопровождается потерей эксергии  $dex_{603}$ , вызванной необратимым теплообменом между продуктами сгорания, топливом и воздухом. Далее подогретое топливо и воздух с эксергией  $E_2$  поступает в камеру сгорания КА, где осуществляется процесс превращения эксергии топлива и воздуха в продукты сгорания высокой температуры. Процесс сгорания топлива в камере сгорания сопровождается потерей эксергии  $dex_{гор}$ . Продукты сгорания с эксергией  $E_3$  поступают в элемент ПП, которым является парогенератор (пароперегреватель). Процесс использования эксергии продуктов сгорания  $E_4$  в ПП сопровождается эксергетическими потерями  $dex_{пп}$ , вызванными необратимым теплообменом. Остаточная эксергия  $\Delta ex_{603}$  частично используется для подогрева топлива и воздуха в топливо- и воздухоподогревателях. Эксергия выбрасываемых в атмосферу продуктов сгорания  $ex_{гор}$  используется в котлах-утилизаторах.  $\Delta ex_{пп}$  является полезно использованной эксергией перегретого пара.

6.1. Эксергия топлива ( $\text{кДж/м}^3$ ) с достаточной точностью для приближенных практических расчетов может быть принята равной теплоте сгорания топлива:

$$ex_m = Q_H^P. \quad (25)$$

6.2. Эксергия тепла продуктов сгорания ( $\text{кДж/м}^3$ ) определяется по зависимости

$$ex_{\Gamma} = Q_H^P \cdot \left( 1 - \frac{T_0}{T_{теор}} \right), \quad (26)$$

где  $T_0$  - температура окружающего воздуха, К;  $T$  - теоретическая температура горения, К.

6.3. Потери при адиабатном горении (без учета потерь эксергии за счет теплообмена топки с окружающей средой),  $\text{кДж/м}^3$ ,

$$dex_{ГОР} = ex_m - ex_{\Gamma} \quad (27)$$

или в %:



$$dex_{ГОР} = \frac{ex_m - ex_{\Gamma}}{ex_m} \cdot 100\% . \quad (28)$$

6.4. Определяем уменьшение эксергии продуктов сгорания (кДж/м<sup>3</sup>) за счет теплообмена в нагревательно-испарительной части:

$$\Delta ex'_{\Gamma} = 1,293 \cdot V_{\Gamma} \cdot \left[ C_{\Gamma} \cdot (t_{TEOP} - t'_{yx}) - T_0 \cdot C_{\Gamma} \cdot \ln \frac{T_{TEOP}}{T'_{yx}} \right] . \quad (29)$$

6.5. Приращение эксергии в процессе превращения воды в перегретый пар, кДж/м<sup>3</sup>,

$$\Delta ex_{П.П.} = \frac{D}{B} \cdot [(h_{П.П.} - h_{П.В.}) - T_0 \cdot (S_{П.П.} - S_{П.В.})], \quad (30)$$

где  $S_{П.П.}$ ,  $S_{П.В.}$  - удельная энтропия перегретого пара и питательной воды соответственно, определяется по таблицам термодинамических свойств воды и водяного пара [3,9], кДж/(кг К).

6.6. Потеря эксергии от теплообмена по водопаровому тракту, кДж/м<sup>3</sup>,

$$dex_{\Pi} = \Delta ex'_{\Gamma} - \Delta ex_{П.П.} \quad (31)$$

или в %:

$$dex_{\Pi} = \frac{\Delta ex'_{\Gamma} - \Delta ex_{П.П.}}{ex_m} \cdot 100\% . \quad (32)$$

6.7. Уменьшение эксергии продуктов сгорания за счет теплообмена в воздухоподогревателе, кДж/м<sup>3</sup>,

$$\Delta ex''_{\Gamma} = 1,293 \cdot V_{\Gamma} \cdot \left[ C_{\Gamma} \cdot (t'_{yx} - t_{yx}) - T_0 \cdot C_{\Gamma} \ln \frac{T'_{yx}}{T_{yx}} \right] . \quad (33)$$

6.8. Увеличение эксергии воздуха в воздухоподогревателе, кДж/м<sup>3</sup>,

$$\Delta ex_{BO3} = 1,293 \cdot \alpha_m \cdot V^0 \cdot \left[ C_{BO3} \cdot (t_{BO3} - t_0) - T_0 \cdot C_0 \ln \frac{T_{BO3}}{T_0} \right] . \quad (34)$$

6.9. Потеря эксергии за счет теплообмена в воздухоподогревателе, кДж/м<sup>3</sup>,

$$dex_{BO3} = \Delta ex''_{\Gamma} - \Delta ex_{BO3} \quad (35)$$

или в %:



$$dex_{BO3} = \frac{\Delta ex_{II}^I - \Delta ex_{BO3}}{ex_m} \cdot 100\% . \quad (36)$$

6.10. Составим эксергетический баланс котельного агрегата и определим эксергию уходящих газов, кДж/м<sup>3</sup> :

$$ex_m = \Delta ex_{II.P.} + dex_{ГОР} + dex_{II} + dex_{BO3} + ex_{УХ}, \quad (37)$$

$$ex_{УХ} = ex_m - (\Delta ex_{II.P.} + dex_{ГОР} + dex_{II} + dex_{BO3}) \quad (38)$$

или в %:

$$ex_{УХ} = \frac{ex_{УХ}}{ex_m} \cdot 100\% . \quad (39)$$

6.11. Эксергетический к.п.д. котельного агрегата оценим через среднетермодинамическую температуру при теплоподводе, К:

$$T_m = \frac{h_{II.P.} - h_{II.B.}}{S_{II.P.} - S_{II.B.}} . \quad (40)$$

6.12. Эксергетический к.п.д. котельного агрегата, %:

6.12.1. С воздухоподогревателем

$$\eta_{K.A.}^{EX} = \eta_{K.A.} \cdot \frac{Q_H^P}{ex_m} \cdot \left( 1 - \frac{T_0}{T_m} \right) . \quad (41)$$

6.12.2. Без воздухоподогревателя

$$\eta_{K.A.}^{EX'} = \eta_{K.A.}' \cdot \frac{Q_H^P}{ex_m} \cdot \left( 1 - \frac{T_0}{T_m} \right) . \quad (42)$$

6.13. Диаграмма потоков эксергии котельного агрегата строится в масштабе (см. рис. 6).

## 7. РАСЧЕТ ГАЗОТРУБНОГО КОТЛА - УТИЛИЗАТОРА

Котлы-утилизаторы применяют для внешней энергетической утилизации тепловых отходов различных технологических установок, не используемых или частично используемых для регенерации в технологическом процессе. Характерной отличительной особенностью КУ является отсутствие у них топочного устройства для сжигания топлива. Использование тепловых



отходов в КУ обеспечивает получение дополнительной продукции в виде энергетического или технологического пара, горячей воды, неводяного энергетического теплоносителя и т.п., что приводит к экономии топлива на предприятии.

Газотрубные КУ широко применяются во многих отраслях промышленности. Продукты сгорания (отходящие технологические газы) в этих КУ проходят внутри труб, размещенных в водяном объеме барабана. Эти котлы не требуют специальной облицовки, характеризуются высокой газоплотностью, простотой изготовления, монтажа, обслуживания и пониженными требованиями к питательной воде. Газотрубные КУ имеют относительно низкий коэффициент использования теплоты отходящих от технологических агрегатов газов (50...60%), низкий предел давления вырабатываемого пара (1,5...2,0 МПа), ограниченный пропуск отходящих газов (до 30...40 тыс. м<sup>3</sup>/ч). В связи с этим применение газотрубных котлов целесообразно для установок небольшой мощности.

В зависимости от конструктивного оформления газотрубные котлы-утилизаторы делят на горизонтальные и вертикальные.

Основные конструктивные и технологические характеристики горизонтальных одно- и двухбарабанных газотрубных КУ приведены в [7]. В приложении представлены данные по газотрубным котлам-утилизаторам, наиболее широко применяемым в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности.

Подобранный котел-утилизатор, например, КУ-40 (рис.7), работает следующим образом. Дымовые газы поступают по каналу подачи 7 во входную камеру 9, предварительно омывают наружную поверхность пароперегревателя 8, отдают часть тепла сухому насыщенному пару. Затем проходят дымогарные трубы 11, которые закреплены в трубных решетках 10. Корпус аппарата 4, две трубные решетки и дымогарные трубы образуют барабан котла-утилизатора, куда подается питательная вода. Восприняв тепло от поверхности дымогарных труб, вода кипит при давлении и температуре насыщения и превращается во влажный насыщенный пар. Уровень кипящей воды в барабане котла-утилизатора поддерживается автоматически. В сепараторе 15 отделяются капли влаги и полученный сухой насыщенный пар по трубопроводу подается в пароперегреватель, где его температура повышается более температуры насыщения. Продукты сгорания из дымогарных труб поступают в выходную камеру 16, где очищаются от твердых веществ и направляются в дымовую трубу. Для очистки, осмотра и аварийного сброса давления предусмотрены грязевой 3, смотровой 12 люки и предохранительный клапан 13. Котел-утилизатор устанавливается на фундаменте 2, закрепляется аварийными болтами.

7.1. Выбор типа котла. Газы перед котлом-утилизатором имеют невысокую температуру  $t=350\text{--}500^\circ\text{C}$ , а абсолютное давление насыщенного пара составляет всего 0,55...1,4 МПа. Как следует из [2] и каталога-справочника



[7], этим условиям наиболее удовлетворяет газотрубный котел-утилизатор с большим водяным объемом. Такой котел отличается простотой обслуживания и большой надежностью.

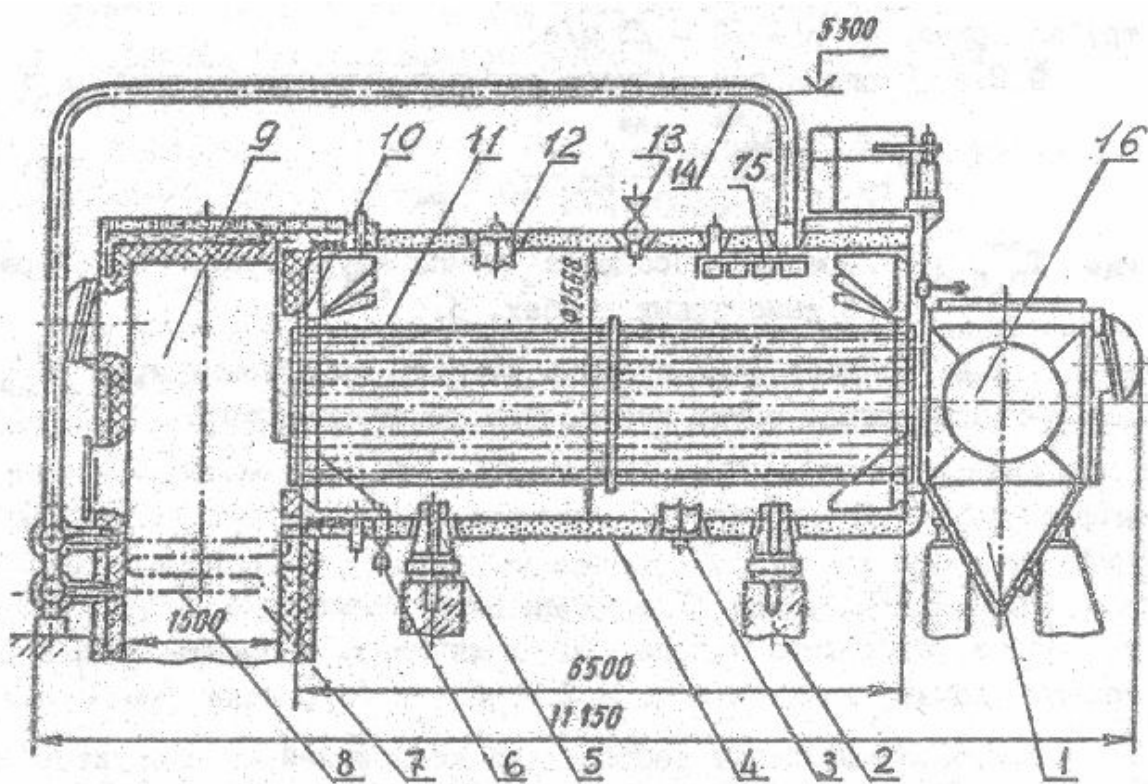


Рис. 7. Котел-утилизатор КУ-40:

1-коническое днище для удаления золы; 2- бетонный фундамент; 3- грязевой люк; 4- корпус; 5- опорный узел; 6- труба подачи питательной воды; 7- канал подачи дымовых газов; 8- пароперегреватель; 9-входная камера; 10- трубная решетка; 11- дымовые трубы; 12- смотровой люк; 13- предохранительный клапан; 14- труба подачи сухого насыщенного пара; 15- сепаратор; 16- выходная камера

7.2. Объем продуктов сгорания принимаем согласно расчету и по расходу газов через котел-утилизатор  $V_{\Gamma}^{\prime} = V_{\Gamma} \cdot B^{\prime}$ , м<sup>3</sup>/ч, выбираем котел-утилизатор, который предназначен для нефтеперерабатывающей и химической отраслей промышленности, а также количество котлов-утилизаторов, которые включаются в работу параллельно.

7.3. Определяем среднюю температуру продуктов сгорания в котле-утилизаторе, °С:

$$t_{\Gamma CP}^{\prime} = \frac{t_{yx}^{\prime} + t_{yx}}{2} \quad (43)$$



7.4. Выписываем теплофизические свойства продуктов сгорания при  $t_{cp}$  из табл.:

$\lambda_{\Gamma}$  – коэффициент теплопроводности, Вт/м°С ;

$\nu_{\Gamma}$  – коэффициент кинематической вязкости, м/с ;

$C_{\Gamma}$  - средняя объемная теплоемкость дымовых газов, кДж/кг К;

$Pr_{\Gamma}$  – критерий Прандтля.

7.5. Выбираем скорость движения продуктов сгорания по дымовым трубам

(обычно  $W = 10-25$  м/с<sup>2</sup>).

7.6. Определяем необходимую площадь поперечного сечения дымовых труб, м<sup>2</sup>:

$$F_{mp} = \frac{V_{\Gamma}}{W \cdot 3600}. \quad (44)$$

7.7. Принимаем из [7] диаметр дымогарных труб котла-утилизатора, тогда количество дымогарных труб определяется:

$$n = \frac{4 \cdot F_{mp}}{\pi \cdot d_{BH}^2}. \quad (45)$$

7.8. Полученное количество  $n \leq n'$  сравниваем с величиной, имеющейся в технической характеристике котла-утилизатора [7], при невыполнении условия неравенства увеличиваем скорость движения продуктов сгорания по дымогарным трубам и расчет повторяем до соблюдения условий неравенства.

7.9. Коэффициент теплоотдачи конвекций от продуктов сгорания к стенкам дымогарных труб при продольном движении газа в трубах в соответствии с [8], Вт/(м<sup>2</sup> К),

$$\alpha_K = 0,023 \cdot \frac{\lambda_{\Gamma}}{d_{BH}} \cdot \left( \frac{W \cdot d_{BH}}{\nu_{\Gamma}} \right)^{0,8} \cdot P_{\Gamma}^{0,4} \cdot C_t \cdot C_e, \quad (46)$$

где  $C_t$  и  $C_e$  - поправочные коэффициенты;

$C_t = 1,06$  - при охлаждении газов;

$C_e = 1$  - при  $l/d \geq 50$ .

7.10. Коэффициент теплопередачи от газов к воде через дымогарные трубы, Вт/м<sup>2</sup> К,





$$K = \frac{\alpha_K}{1 + \varepsilon \cdot \alpha_K}, \quad (47)$$

где  $\varepsilon = 0,005$  - коэффициент загрязнения поверхности нагрева (опытная величина) [8].

7.11. Теплота, переданная продуктами сгорания испаряемой воде в котле-утилизаторе, кВт,

$$Q = \frac{G_{\Gamma} \cdot B' \cdot (t'_{yx} - t_{yx}) \cdot C_{\Gamma}}{3600}. \quad (48)$$

7.12. Методика расчета среднеинтегральной величины температурного напора изложена в [1,2,3,4,6]. Величина температурного напора ( $^{\circ}\text{C}$ ) определяется по зависимости

$$\Delta t_{CP} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_M}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_M}}. \quad (49)$$

При  $\Delta t_{\delta} / \Delta t_M = 0,6 \dots 1,67$  температурный напор определяется как среднеарифметическая величина

$$\Delta t_{CP} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_M}{2}, \quad (50)$$

где  $\Delta t_{\delta}$  - разность температур сред на том конце поверхности нагрева, где она наибольшая,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\Delta t_M$  - разность температур сред на другом конце поверхности нагрева, где она наименьшая,  $^{\circ}\text{C}$ .

7.13. Принимая по аналогии с [8] потери тепла котлом-утилизатором в окружающую среду равной 10 %, определяем поверхность нагрева котла-утилизатора,  $\text{м}^2$ :

$$\boxed{F_{K.UT.} = \frac{(1 - 0,1) \cdot Q}{K \cdot \Delta t_{CP}}}, \quad (51)$$

7.14. Длина дымогарных труб (м) вычисляется по зависимости

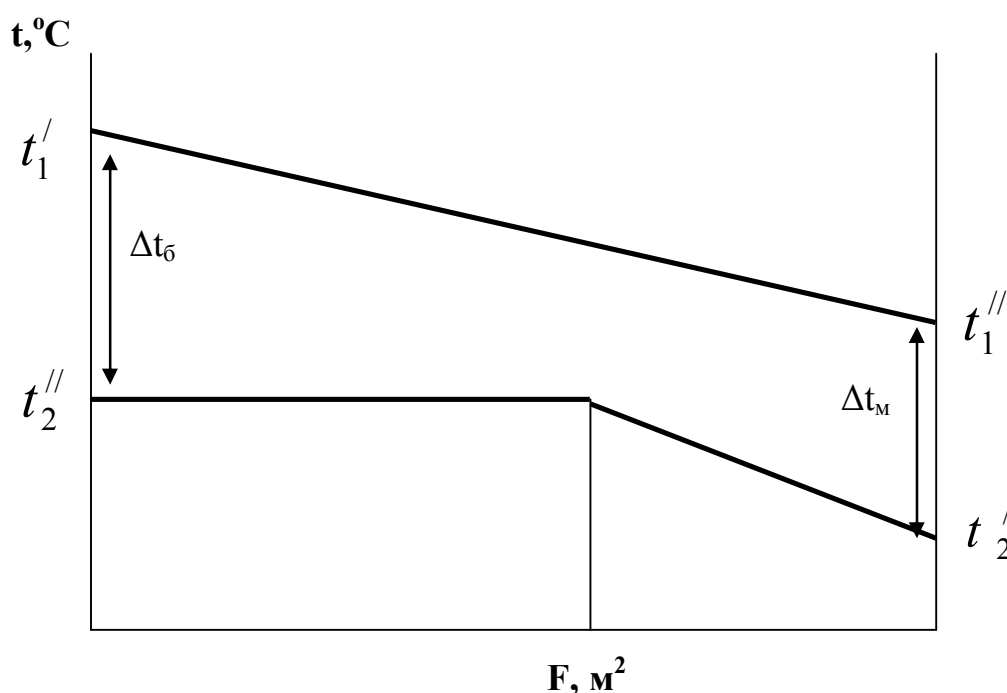
$$l = \frac{F_{K.UT.}}{\pi d_{cp} \cdot n}. \quad (52)$$

7.15. Паропроизводительность (кг/с) котла-утилизатора определяется из уравнения теплового баланса

$$Q = D_{K.UT.} \cdot (h'' - h_{П.В.}) + 0,1Q, \quad (53)$$

где  $h''$  - удельная энтальпия сухого насыщенного пара, кДж/кг;  $h_{нв}$  - удельная энтальпия питательной воды, кДж/кг; 0,1 - доля потерь тепла в окружающую среду, тогда

$$D_{K.YT.} = \frac{Q - 0,1 \cdot Q}{h'' - h_{П.В.}} \quad (54)$$



**Рис. 8. Схема относительного движения сред и изменения их температур вдоль поверхности нагрева:**

$t'_1$  – температура дымовых газов, входящих в котел-утилизатор;  $t''_1$  – температура дымовых газов, покидающих котел-утилизатор;  $t'_2$  – температура питательной воды;  $t''_2$  – температура насыщения воды при давлении в котле-утилизаторе

7.16. Известно [2], что эксергетический к.п.д. проточного теплообменника (теплопарогенератора) равен отношению изменения эксергии нагреваемого (горячего) тела. Тогда при отсутствии тепловых потерь в котле-утилизаторе эксергетический к.п.д. выразится следующим соотношением:

$$\eta_{K.YT.}^{ex} = \frac{D_{K.YT.} \cdot \left[ (h'' - h_{П.В.}) - T_0 \cdot (S'' - S_{П.В.}) \right]}{G_{\Gamma} \cdot B' \cdot \left[ C_{\Gamma} \cdot (t'_{yx} - t_{yx}) - T_0 \cdot C_{\Gamma} \cdot \ln \frac{T'_{yx}}{T_{yx}} \right]} \quad (55)$$

7.17. Потери эксергии за счет теплообмена в котле-утилизаторе, кДж/м<sup>3</sup>,



$$\Delta ex_{K.YT.} = \frac{D_{K.YT.}}{B'} \cdot (h'' - h_{П.В.}) - T_0 \cdot (S'' - S_{П.В.}), \quad (56)$$

$$dex_{K.YT} = \Delta ex_{\Gamma}'' - \Delta ex_{K.YT}, \quad (57)$$

или в %:

$$dex_{K.YT} = \frac{\Delta ex_{\Gamma}'' - \Delta ex_{K.YT}}{ex_m} \cdot 100\% . \quad (58)$$

7.18. Эксергетический баланс котельного агрегата, работающего без воздухоподогревателя, но с котлом-утилизатором имеет следующий вид

$$ex_m = \Delta ex_{П.П.} + dex_{ГОР} + dex_{П} + dex_{K.YT} + ex_{УХ}, \quad (59)$$

определяем эксергию уходящих газов:

$$ex_{УХ} = ex_m - (\Delta ex_{П.П.} + dex_{ГОР} + dex_{П} + dex_{K.YT}), \quad (60)$$

или в %:

$$ex_{УХ} = \frac{ex_{УХ}}{ex_m} \cdot 100\% . \quad (61)$$

7.19. Эксергетический к.п.д. котельного агрегата с котлом-утилизатором:

$$\eta_{K.A.}^{EX} = \left( 1 - \frac{ex_{УХ} + dex_{ГОР} + dex_{П}}{ex_m} \right) \cdot 100\% . \quad (62)$$

7.20. По результатам расчетов проводят анализ влияния энергосберегающего оборудования на эффективность и энергетическое совершенство котельной установки.

## 8. ГОРЕЛОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА И ИХ ВЫБОР

Сжигание жидкого и газообразного топлива осуществляется с помощью устройств, называемых горелками. Они предназначены для ввода топлива и окислителя (обычно воздуха) в печь или топку, смешения потоков до начала горения или в самом процессе горения и стабилизации факела.

Конструкция горелочных устройств топок должна отвечать следующим требованиям:

- обеспечивать стабильное равномерное распределение тепловой энергии по зонам топки;



- обеспечивать полное сжигание топлива любого состава;
- горение должно быть устойчивым без отрыва пламени от выходной части горелки;
- иметь большую единичную теплопроизводительность, позволяющую в топке размещать ограниченное число горелок;
- отличаться простотой изготовления, сборки, монтажа;
- обеспечивать эффективный и экономичный расход топлива, работать с минимальным расходом воздуха (1,05...1,1);
- быть конструктивно не сложной и удобной для технического обслуживания;
- обеспечивать безопасность эксплуатации и ремонта, а также сохранять чистоту окружающей среды и др.

Применяемые на нефтехимических заводах горелочные устройства – комбинированные горелки (ГП), их технические характеристики и рисунок представлены в приложении 4.

Акустические газовые горелки (АГГ) используются для энергетических топок, для печей пиролиза углеводородного сырья и высокотемпературных трубчатых печей нефтяных технологических процессов. Конструкция АГГ разработана на принципиально новой теоретической основе с применением акустического резонанса, создающего мощный вихревой эффект смешения топливного газа с атмосферным воздухом. Акустические горелки обладают рядом преимуществ:

- высокая теплопроизводительность горелки сочетается с равномерным сжиганием газообразного топлива любого состава;
- простота конструкции и небольшая масса облегчают ее изготовление, монтаж, ремонт, обслуживание;
- равномерное излучение тепловой энергии в топке способствует улучшению рабочего режима, увеличению межремонтного пробега;
- в результате вихревого смешения топливного газа с атмосферным воздухом в горелках образуется однородная газозооудшная смесь, сгорающая с малым избытком воздуха;
- горелки пригодны для подключения к автоматической системе управления тепловым процессом работы топки;
- большой ресурс работы горелок (30000 ч).

Технические характеристики и рисунок АГГ представлены в приложении 4.

## 9. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется топливом?
2. Дайте классификацию топлив.
3. Каков состав жидкого и твердого топлива?
4. Дайте теплотехническую оценку элементов топлива.



5. Что называется балластом топлива?
6. Каков состав газообразного топлива?
7. Дайте определение низшей и высшей теплоты сгорания.
8. Что понимают под условным топливом?
9. Что называется горением топлива?
10. Понятие полного и неполного горения.
11. Как определяется теоретически необходимое количество воздуха при сгорании топлива?
12. Дайте понятие коэффициента избытка воздуха.
13. Каковы состав и количество продуктов сгорания топлива?
14. Каким образом можно определить полноту сгорания топлива?
15. Приведите классификацию топочных устройств.
16. Перечислите основные показатели работы топок.
17. Что называется котельным агрегатом (котельной установкой)? Ее назначение.
18. Классификация котельных агрегатов.
19. Объясните принцип действия котла с естественной циркуляцией.
20. Для чего предназначен водяной экономайзер?
21. Напишите уравнение теплового баланса котельного агрегата. Объясните, какие составляющие входят в это уравнение.
22. Что такое эксергия?
23. Как определяется эксергия тепла?
24. В чем заключается эксергетический метод термодинамического анализа?
25. Что называется теоретической температурой горения и как ее можно определить?
26. Каковы вопросы охраны окружающей среды при сжигании топлива?
27. Назовите типы котлов, применяемых на предприятиях нефтегазовой промышленности.
28. Как решаются вопросы экономии топлива в выполненном задании?
29. Понятие о вторичных энергоресурсах (ВЭР).
30. Каковы пути снижения энергозатрат на теплоснабжение предприятий?
31. Назовите основные группы вторичных энергетических ресурсов.
32. Расскажите о современном состоянии использования ВЭР в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности.
33. Какие ВЭР можно использовать при эксплуатации котельного агрегата?
34. Вычисление теоретически необходимого количества воздуха для сжигания твердого и жидкого топлива (по стехиометрическим уравнениям).



35. Написать уравнение по определению теоретически необходимого количества воздуха для сжигания газообразного топлива (с учетом стехиометрических уравнений).

36. Написать уравнение по определению низшей и высшей теплоты сгорания.

37. Сущность процессов естественной циркуляции воды и сепарации влаги в паровом котле.

38. Назначение и принцип действия пароперегревателя и воздухоподогревателя в котельном агрегате.

39. Назначение и принцип действия водяного экономайзера в котельном агрегате.

## **9. ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ В КОТЕЛЬНОМ АГРЕГАТЕ**

1. Дополнив программу расчета процесса горения на ЭВМ, проанализируйте влияние коэффициента избытка воздуха ( $\alpha = 1,05-2$ ) на теоретическую температуру горения топлива, приняв шаг изменения равным 0,1.

2. Используя ЭВМ, проводите исследование по влиянию коэффициента избытка воздуха на температуру уходящих продуктов сгорания, и на их энтальпию.

3. Используя ЭВМ, проведите исследования влияния температуры воздуха ( $t_{\text{воз}} = 100-200^\circ\text{C}$ ), подаваемого в камеру сгорания на термический коэффициент полезного действия котельного агрегата, приняв шаг изменения равным  $10^\circ\text{C}$ .

4. Проанализируйте эксергетическую эффективность котла-утилизатора в зависимости от температуры уходящих продуктов сгорания или коэффициента избытка воздуха, применив расчеты на ЭВМ. Программа расчета представлена в приложении 7.

## **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

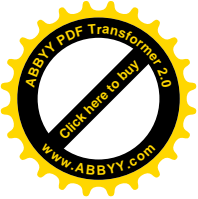
1. Куперман Л.И., Романовский С.А. Вторичные энергоресурсы и энерготехнологическое комбинирование в промышленности.-Киев.: Высшая школа. Головное изд-во, 1986.

2. Чечеткин А.В., Занемонец Н.А. Теплотехника.- М.: Высшая школа, 1986.



3. Алаборский А.Н., Недужий И.Н. Теплотехника.-Киев.: Высшая школа. Головное изд-во, 1986.
4. Баскаков А.П., Берг Б.В., Витт О.К. Теплотехника.- М.: Энергоиздат, 1982.
5. Ларионов Н.Н. Теплотехника.- М.: Стройиздат, 1985.
6. Дытнеровский Ю.И. Основные процессы и аппараты химической технологии.- М.: Химия, 1983.
7. Котлы-утилизаторы энерготехнологические.- М.: НИИинформтяжмаш, 1973.
8. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод.- М.: Энергия, 1973.
9. Ривкин С.Л., Александров А.А. Термодинамические свойства воды и водяного пара: Справочник.- М.: Энергоиздат, 1984.
10. Роддатис К.Ф., Соколовский Я.Б. Справочник по котельным установкам малой производительности. - М.: Энергия, 1975. - 240 с.
11. Теплотехнический справочник. М.: Энергия, 1975, 1976. -Т. 1,2.
12. Панин В.И. Котельные установки малой и средней мощности.- М.:Изд-во по строительству, 1964.
13. Деев Л.В., Балахничев Н.А. Котельные установки и их обслуживание. - М. :Высшая школа, 1990.
14. Двойнишников В.А., Деев Л.В., Изюмов М.А. Конструкция и расчет котлов и котельных установок. – М.:Машиностроение, 1988.
15. Бузников Е.Ф., Роддатис К.Ф., Берзиныш Э.Я. Производственные и отопительные котельные. – М.: Энергоиздат, 1984.
16. Рабинович О.М. Сборник задач по технической термодинамике. – М.:Машиностроение, 1976.
17. Евтюхин Н.А., Кузнецова В.В., Молчанова Р.А. Термодинамический анализ топливосжигающих устройств. – Уфа: УГНТУ, 1995.
18. Евтюхин Н.А., Латыпов Р.Ш. К энергосберегающей технологии химико-технологических систем: Методические указания. – Уфа: УНИ, 1987.
19. Сажин Б.С., Булеков А.П. Эксергетический метод в химической технологии. – М.: Химия, 1992.





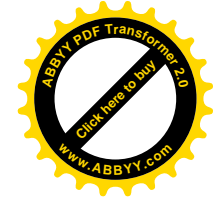
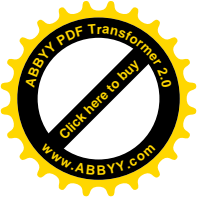
## ПРИЛОЖЕНИЯ

### ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Таблица П1.1

#### ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕКОТОРЫХ ГАЗОВ

Наименование газов	Состав газов, % по объему														Теплота сгорания сухого газа, МДж/м <sup>3</sup>
	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>5</sub> H <sub>11</sub>	H <sub>2</sub> S	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	
Бугурус-ланский	0,2	0,0	76,7	3,5	0,0	4,5	1,7	0,8	0,6	1,0	0,0	11	0,0	0,0	33,9
Саратов-ский	0,2	0,0	90,0-	2,0	2,0	1,2	0,7	0,4	0,2	0,0	0,0	3,3	0,0	0,0	35,8
Милито-польский	0,2	0,0	93,0	2,9	2,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	1,8	0,0	0,0	35,1
Западно-Сибир-ский	0,0	0,2	92,0	3,0	0,7	1,9	0,5	0,3	0,1	0,0	0,0	1,3	0,0	0,0	36,5
Ставро-польский	0,1	0,0	93,0	3,0	2,0	0,4	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3	0,0	0,0	35,5
Оренбург-ский	0,7	1,0	91,0	0,4	1,0	3,1	1,9	0,6	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	37,9
Бухар-ский газ	0,4	0,0	92,0	2,0	0,9	1,2	1,9	0,6	0,1	1,0	0,9	0,0	0,0	0,0	36,7
Коксовый газ	6,34	55,63	22,24	0,0	2,63	0,0	0,0	0,0	0,0	0,39	0,78	7,32	2,24	2,43	16,422
Топочный газ НПЗ	0,0	3,3	15,3	2,0	16,4	4,8	25,0	25,7	4,3	3,2	0,0	0,0	0,0	0,0	83,7
Жирный газ	0,0	0,0	0,0	0,0	9,6	0,0	48,2	35,1	6,8	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	102,1



Продолжение приложения 1  
Таблица П1.2

**ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЗДУХА И ДЫМОВЫХ ГАЗОВ**

Темпе- ратура, °C	Воздух					Дымовые газы				
	$\nu$ $10^6 \text{ м}^2/\text{с}$	$\lambda$ $10^2 \text{ Вт/м}^\circ\text{С}$	$C_p$ , кДж/кг °C	Pr	$\rho$ кг/м <sup>3</sup>	$\nu$ $10^6 \text{ м}^2/\text{с}$	$\lambda$ $10^2 \text{ Вт/м}^\circ\text{С}$	$C_p$ , кДж/кг °C	Pr	$\rho$ кг/м <sup>3</sup>
0	13,3		1,006	0,73	1,293	12,2	2,28	1,042	0,72	1,295
100	23,0	3,22	1,009	0,70	0,996	21,5	3,13	1,068	0,69	0,950
200	34,8	3,94	1,029	0,68	1,746	32,8	4,02	1,097	0,67	0,748
300	48,2	4,61	1,047	0,67	0,615	45,8	4,85	1,122	0,65	0,617
400	63,0	5,22	1,068	0,66	0,524	60,4	5,70	1,151	0,64	0,525
500	79,3	5,75	1,099	0,65	0,466	76,3	6,56	1,185	0,63	0,457
600	96,8	6,25	1,114	0,64	0,604	93,6	7,44	1,214	0,62	0,405
700	115,0	6,71	1,125	0,63	0,362	112,0	8,28	1,239	0,61	0,363
800	135,0	7,20	1,156	0,62	0,329	132,0	9,15	1,264	0,60	0,330
900	155,0	7,64	1,172	0,61	0,301	152,0	10,02	1,291	0,59	0,301



Продолжение приложения 1

Таблица П1.3  
СРЕДНИЕ ИЗОБАРНЫЕ ОБЪЕМНЫЕ ТЕПЛОЕМКОСТИ  
НЕКОТОРЫХ ГАЗОВ, кДж/(м<sup>3</sup> °С)

$t, ^\circ\text{C}$	$C'_{\text{воз}}$ Воздух	$C'_{\text{N}_2}$ Азот	$C'_{\text{co}_2}$ Углекислый газ	$C'_{\text{H}_2\text{O}}$ Водяной пар
0	1,2971	1,2987	1,5998	1,4943
100	1,3004	1,3004	1,7003	1,5052
200	1,3071	1,3038	1,7373	1,5223
300	1,3172	1,3109	1,8627	1,5424
400	1,3289	1,3205	1,9297	1,5654
500	1,3427	1,3322	1,9887	1,5897
600	1,3565	1,3452	2,0411	1,6148
700	1,3708	1,3686	2,0884	1,6412
1400	1,4528	1,4407	2,3136	1,8280
1500	1,4620	1,4499	2,3354	1,8527
1600	1,4708	1,4587	2,3555	1,8761
1700	1,4788	1,4671	2,3743	1,6996
1800	1,4867	1,4746	2,3915	1,9213
1900	1,4939	1,4821	2,4074	1,9423
2000	1,5010	1,4888	2,4221	1,9628
2100	1,5072	1,4955	2,4359	1,9824
2200	1,5135	1,5018	2,4484	2,0009
2300	1,5194	1,5072	2,4602	2,0189
2400	1,5253	1,5127	2,4710	2,0365
2500	1,5303	1,5177	2,4811	2,0528



## Продолжение приложения 1

Таблица П1.4

### ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАМЕРНЫХ ТОПОК

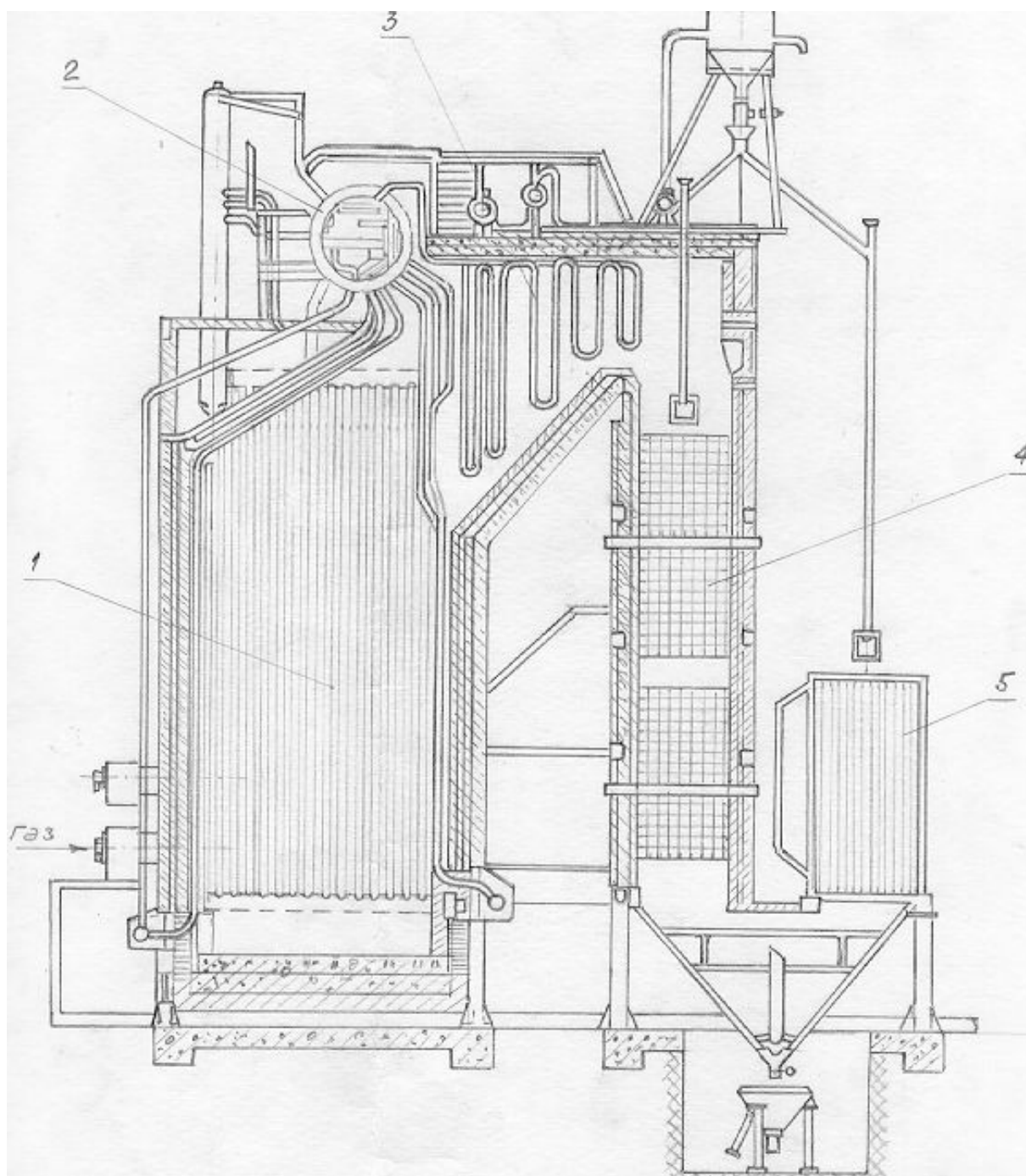
Камерные топки	Принцип сжигания топлива	Коэффициент избытка воздуха в топке, $\alpha_m$	Потери тепла от химической неполноты сгорания, $q_3$
Горелки полного предварительного смешения	кинетический	1,05	0,5...1,0
Атмосферные горелки	диффузионный	1,20	2,5...3,0
Горелки с незавершенным предварительным смешением	смешанный	1,15	1,0...2,5
Камерные для сжигания жидких и газообразных топлив, экранированные	смешанный	1,15	1,5
	кинетический	1,10	0,5...1,0

Таблица П1.5

### ПОТЕРИ ТЕПЛА НА НАРУЖНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ АГРЕГАТА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЕГО ПАРПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Паропроизводительность котельного агрегата, $D, \text{т/ч}$	6,5	10,0	12,0	20,0	25,0	35,0	40,0	45,0	50,0	65,0	90,0	150
Потери тепла на наружное охлаждение, $q_5, \%$	2,2	1,8	1,6	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,85	0,8	0,7	0,6

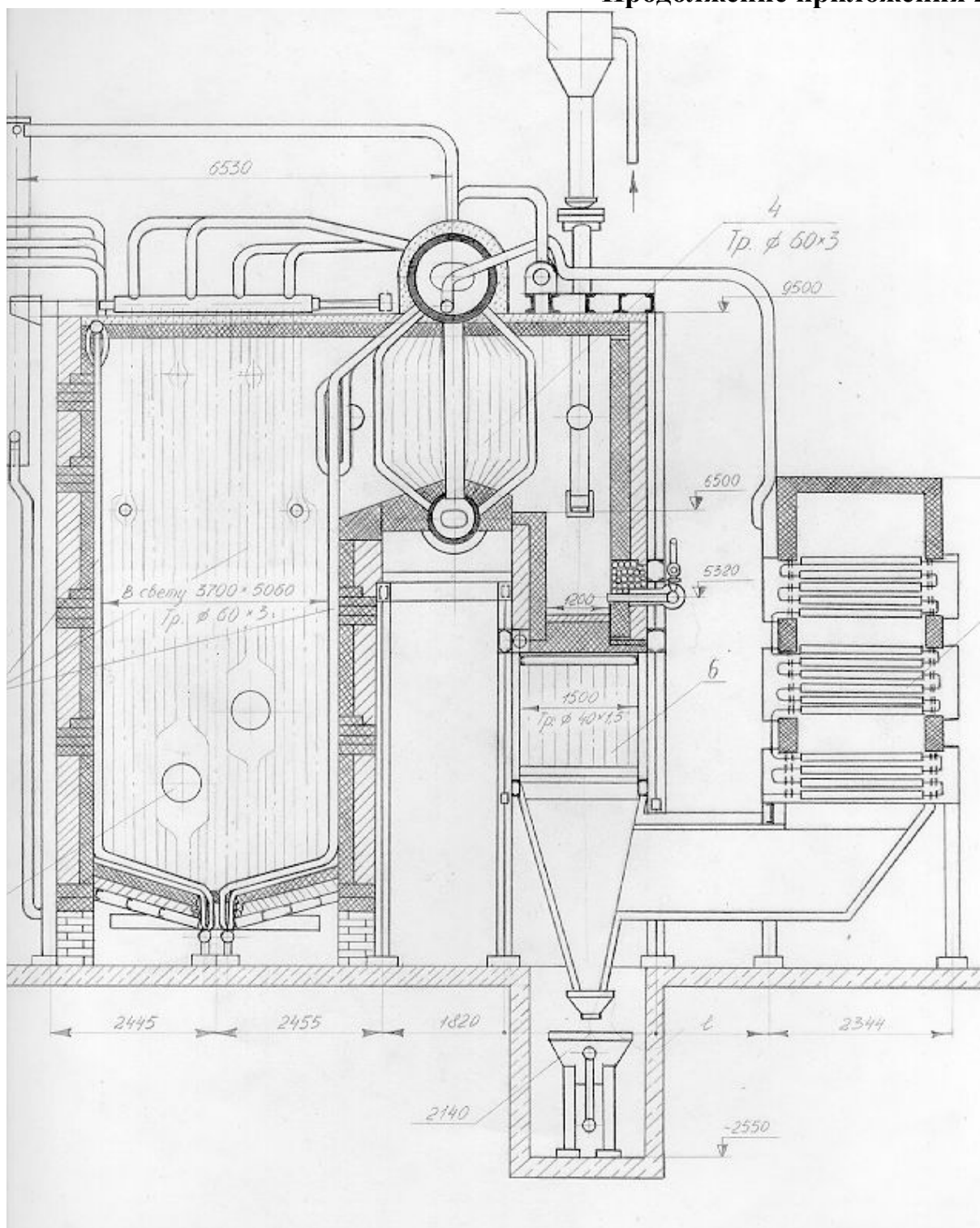
## ПРИЛОЖЕНИЕ 2



**Рис.1. Паровой котел типа БГ-35-Р:**

**1-камерная топка, 2-барабан, 3-коллектор, 4-блок экономайзеров, 5-воздухоподогреватель, 6-пароперегреватель**

## Продолжение приложения 2

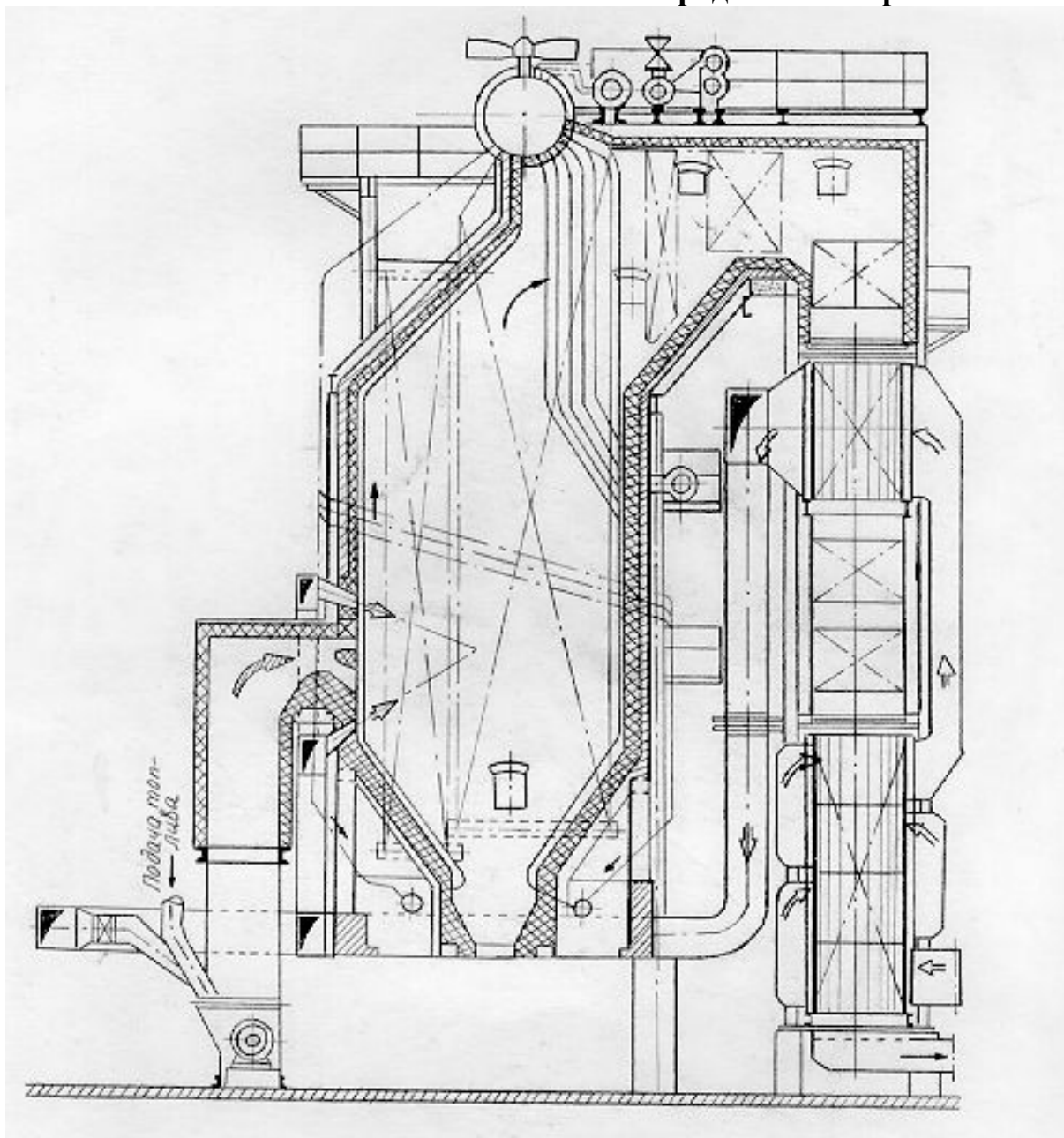


**Рис.2. Двухбарабанный паровой котел типа Е (ГМ):**

1,6-нижний и верхний коллекторы, 2-трубы топочных экранов, 3-топочная камера, 4-обмуровка, 5-выносной циклон, 7-отводящие трубы, 8,11-верхний и нижний барабаны, 9-фестон, 10-трубы котельного пучка, 12-пароперегреватель, 13-экономайзер, 14-воздухоподогреватель, 15-опускные трубы



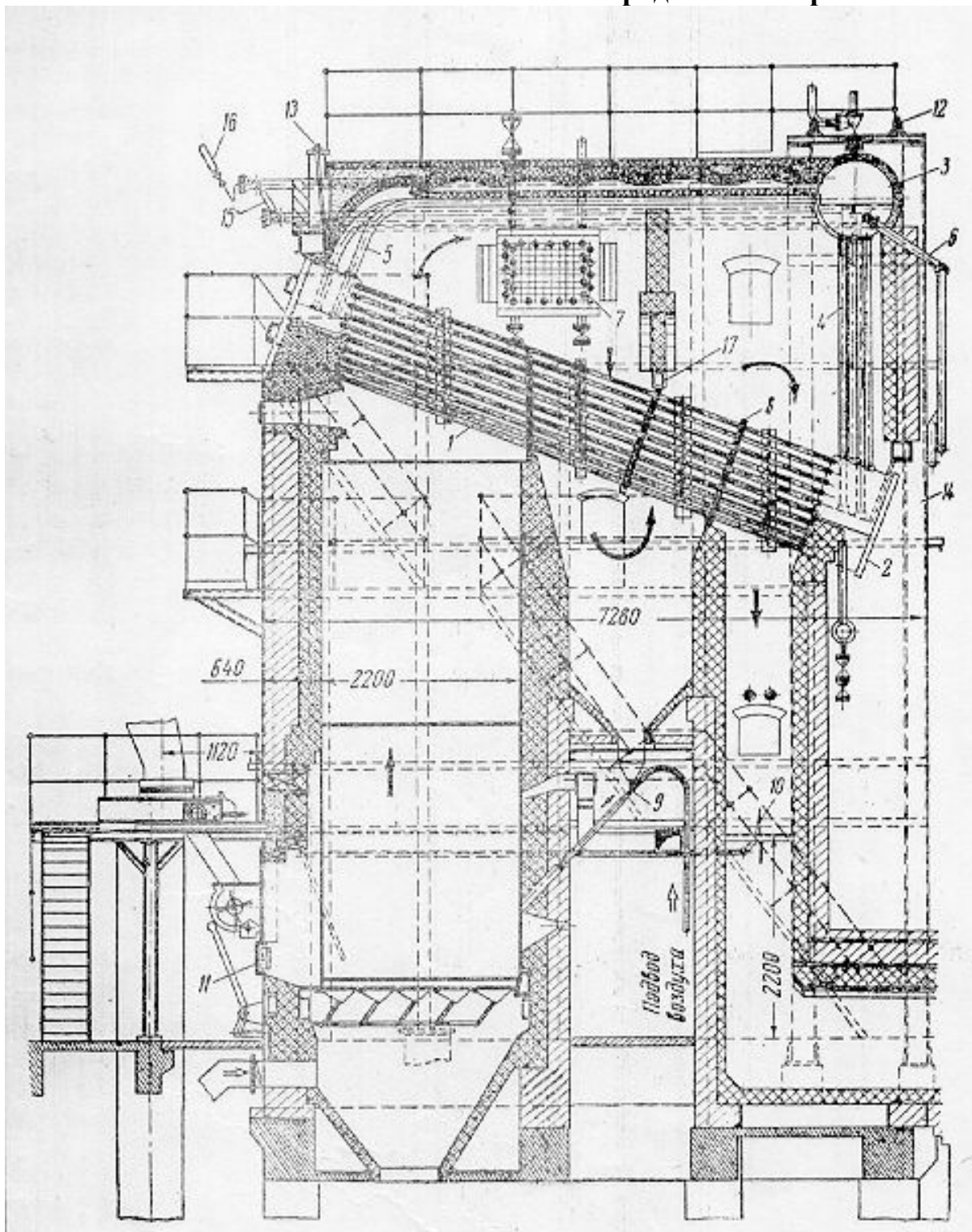
## Продолжение приложения 2



**Рис.3. Паровой котел типа ТП-35-у с шахтно-мельничной топкой:**

1-барабан, 2-боковые экраны, 3-фронтальный экран, 4-задний экран, 5-опускные трубы для питания экранов, 6-змеевики пароперегревателя, 7-поверхностный теплообменник, 8-выходной коллектор пароперегревателя, 9-первая группа экономайзера, 10-вторая группа экономайзера, 11,12-первая и вторая группа воздухоподогревателя, 13-воздуховод, 14-холодная воронка топки, 15-сепарационная шахта, 16-взрывной клапан, 17-мельница, 18,19-верхние и нижние шлицы

## Продолжение приложения 2

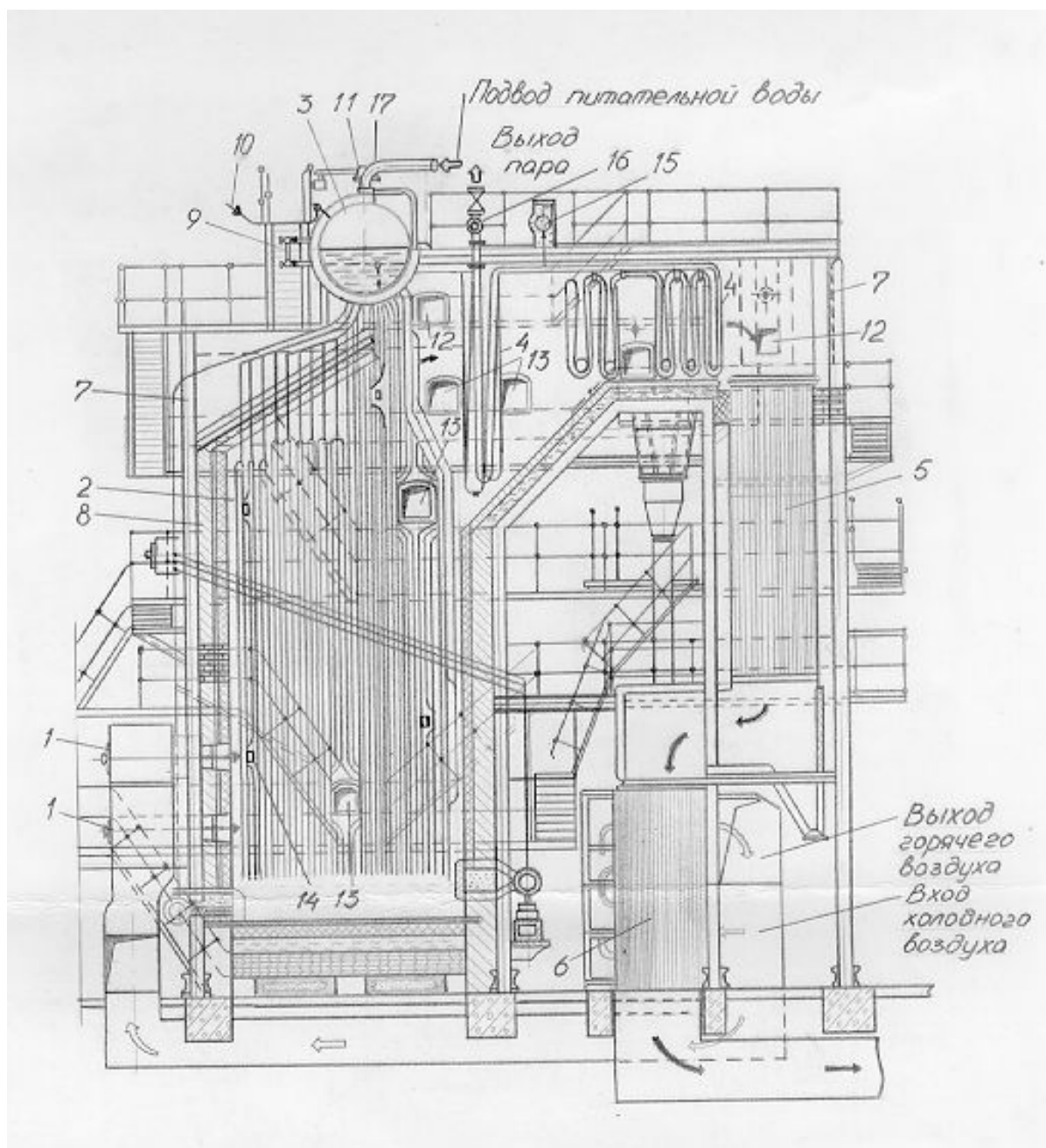


**Рис.4. Горизонтальный водотрубный котел системы Шухова-Берлина:**

1-кипяtilьные трубы, 2-головки, 3-барабан котла, 4-опускные трубы, 5-подъемные трубы, 6-питательная труба, 7-пароперегреватель, 8-газовые перегородки, 9-эжекторное устройство для возврата уноса, 10-заслонка дымовая, 11-топка с механическим забрасывателем, 12-хомут, 13-крюк, 14-каркас котла, 15-водоуказательное стекло, 16-манометр, 17-газовая перегородка



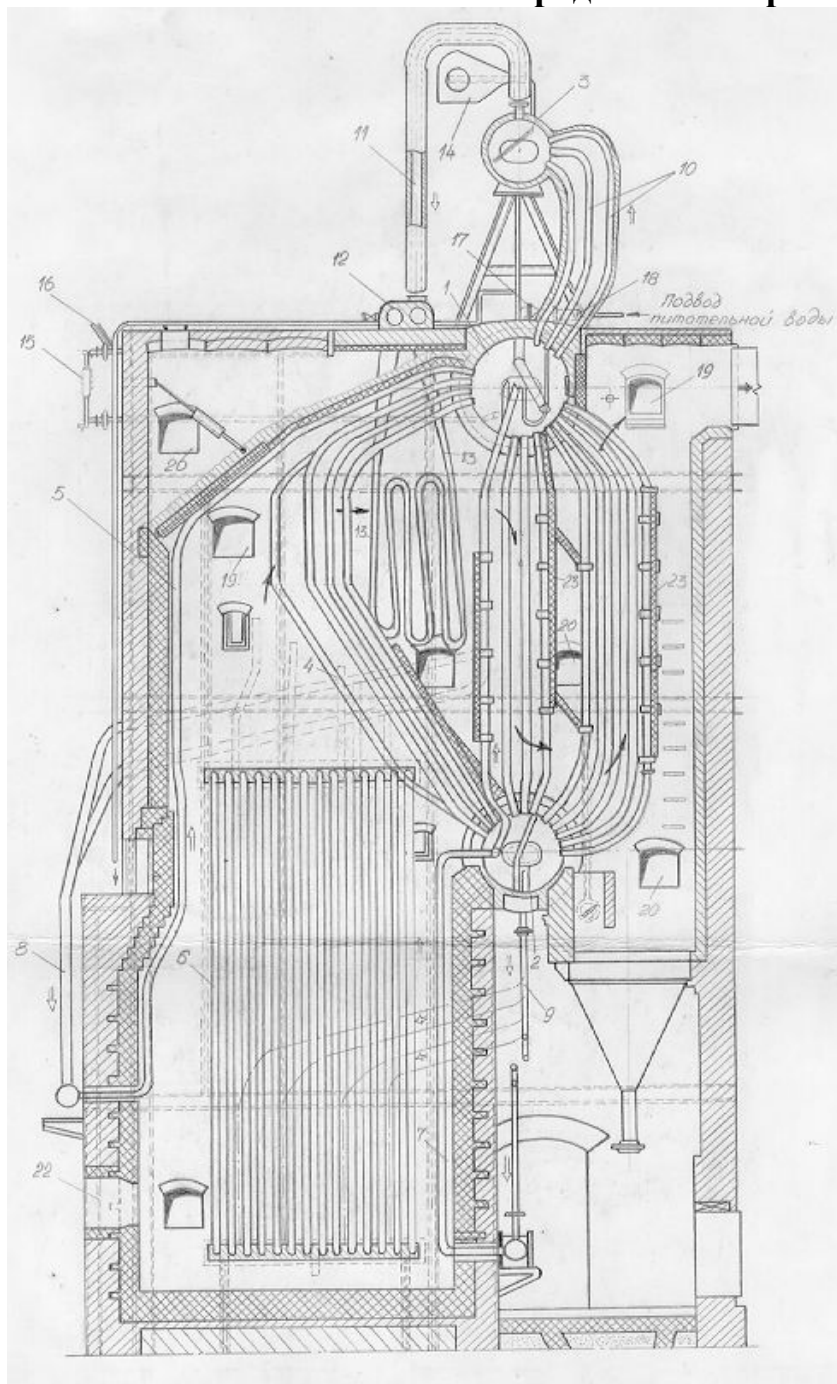
## Продолжение приложения 2



**Рис.5. Паровой котел типа БГ-35 с газомазутной топкой, паропроизводительностью 35 т/ч:**

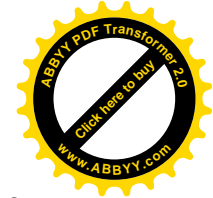
1-газомазутные тарелки, 2-экранированная топка, 3-барaban, 4-пароперегреватель, 5-водяной экономайзер, 6-трубчатый воздухоподогреватель, 7-каркас, 8-обмуровка, 9-водоуказательный прибор, 10-манометр, 11-клапан предохранительный, 12-взрывные клапаны, 13-лаз, 14-гляделка, 15-регулятор перегрева, 16-выходной коллектор пароперегревателя, 17-подвод питательной воды

## Продолжение приложения 2



**Рис.6. Двухбарабанный котел с газомазутной топкой на давлении 2,2 Мпа:**

1-верхний барабан, 2-нижний барабан, 3-сухопарник, 4-первый пучок кипящих труб, 5-фронтальный экран, 6-боковые экраны, 7-задний экран, 8-питательные трубы фронтального экрана, 9-питательные трубы заднего и боковых экранов, 10-пароперепускные трубы, 11-паропровод, 12-коллекторы пароперегревателя, 13-змеевики пароперегревателя, 14-предохранительный клапан, 15-водоуказательный прибор, 16-манометр, 17-запорный питательный клапан, 18-обратный питательный клапан, 19-взрывной клапан, 20-лаз, 21-гляделька, 22-место установок газомазутных горелок, 23-газовые перегородки

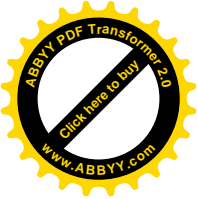


## Продолжение приложения 2

Таблица П2.1.

### ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАРОВЫХ КОТЛОВ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ

№	Тип котла	Паропро- изводи- тель- ность, т/ч	Давление пара, МПа	Темпера- тура па- ра, °С	Вид сжи- гаемого топлива	Темпе- ратура пита- тельной воды, °С
1	Е-35-ГМ	35/40	4,0	440	Газ/мазут	145
2	Е-50-1,4ГМ	50	1,4	440	газ	100
3	Е-50-4,0ГМ	50	4,0	440	Газ/мазут	145
4	Е-75-3,9ГМ	75	4,0	440	Газ/мазут	145
5	ТП-20-У	20	3,9	440	газ	100
6	ТП-35-У	35	3,9	440	Газ/мазут	90
7	БМ--35	35	3,9	440	Мазут/газ	110
8	БГ-35	35	3,9	440	газ	100
9	ГМ-50-1	50	3,9	440	газ	110
10	БГ-35-Р	45	3,9	440	газ	110
11	Б-25-ГМ	25	2,2	350	Газ/мазут	90
12	Двухбара- банный ГМ	25-50	2,2-4,4	350-550	Газ/мазут	90-140
13	Шухова- Берлинга	30	1,3	350	Газ/мазут	80



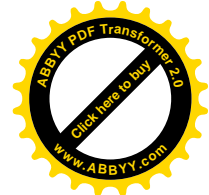
### ПРИЛОЖЕНИЕ 3

#### Таблица ПЗ.1

### ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЗОТРУБНЫХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ КОТЛОВ-УТИЛИЗАТОРОВ

Тип КУ	КУ-16	КУ-40	Г-445Б	Г-250	Г-105/300БТ	Г-420	Г-420БПЭ	Г-950	Г-330БИ	Г-1030Б
Паропроизводительность, т/ч	1,6-2,0	7,4	4,8	3,2	7,6	1,0	25	5,9	9,5	31
Давление пара, МПа	0,9-1,4	0,9-1,4	1,4	1,4	0,5	0,5	1,5	0,5	1,4	1,4
Температура газов на входе, до °С	600	600	1200	600	1285	280	900	287	1200	1200
Расход газов через котел, нм <sup>3</sup> /ч	16000	40000	25000	16000	74000	72600	56200	21900	15000	50000
Температура питательной воды, °С	50	50	50	60	65	90	100	40	100	90
Поверхность нагрева, м <sup>2</sup> Пароперегревателя Испарительной части	7,2 275	18,0 485	- 445	- 250	- 105	- 210	5,7 420	- 475	- 330	- 1030
Число дымогарных труб, шт	239	438	648	500	212	1044	790	1600	648	1032
Наружный диаметр дымогарных труб, м	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,032	0,05	0,032	0,05	0,05
Внутренний диаметр дымогарных труб, м	0,054	0,054	0,044	0,044	0,044	0,028	0,044	0,028	0,044	0,044
Длина дымогарных труб, м	6,5	6,5	4,96	3,61	3,61	4,96	3,61	8,1	3,4	7,3





## Продолжение приложения 3

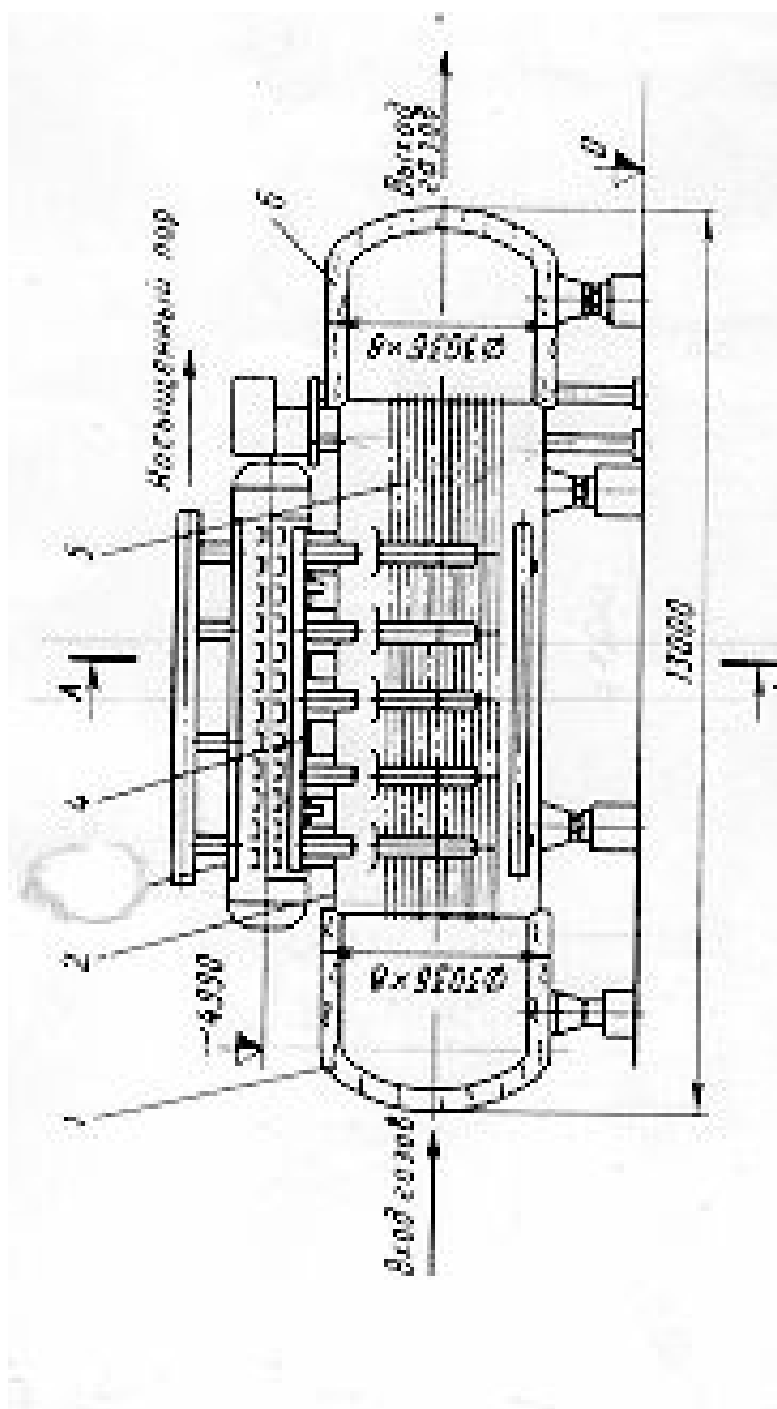
---



### **Рис.1. Котел-утилизатор типа КУГ-66:**

**1-дымогарные трубы, 2-экономайзеры, 3,4-входная и выходная газовые камеры,  
5-пароперегреватель, 6-газоход**

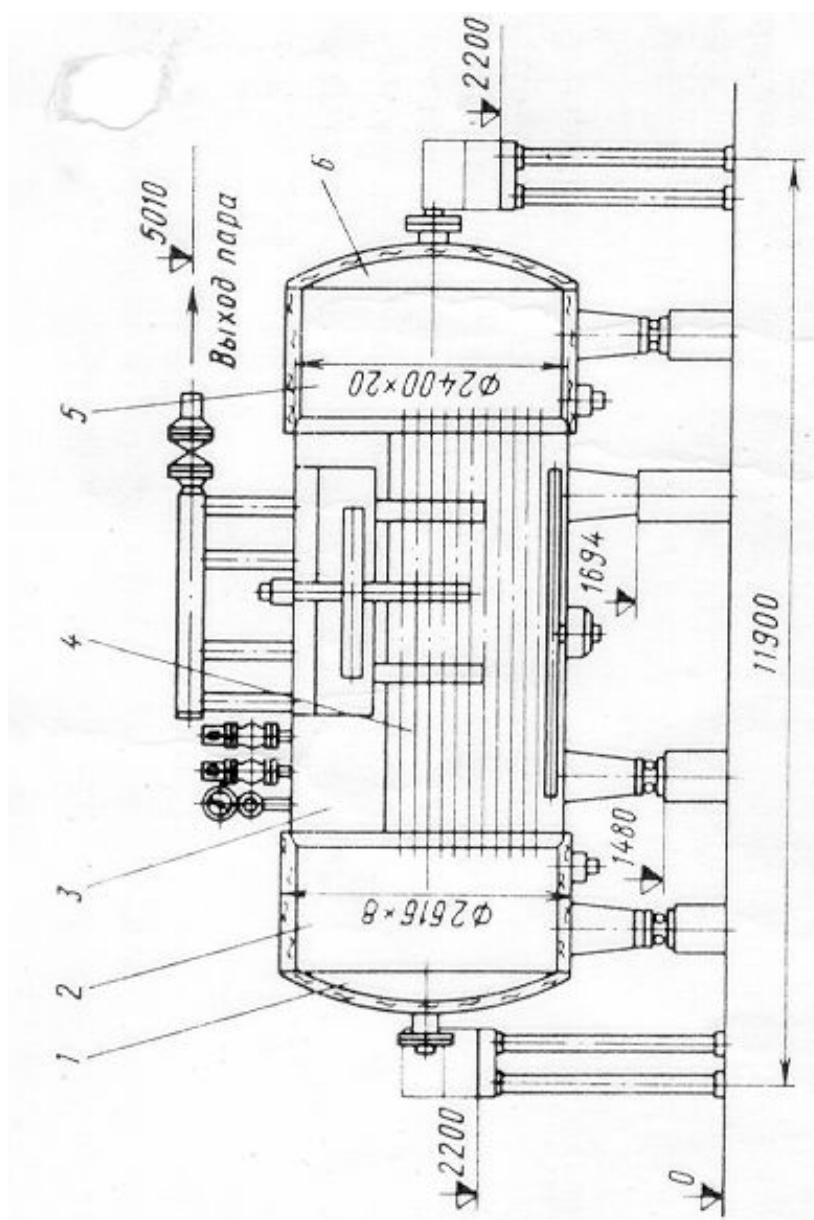
# Продолжение приложения 3



**Рис. 2. Котел-утилизатор Г-1030Б:**

1-верхняя газовая камера, 2-нижний барабан, 3-верхний барабан, 4-сепарационное устройство, 5-дымогарные трубы, 6-выходная камера

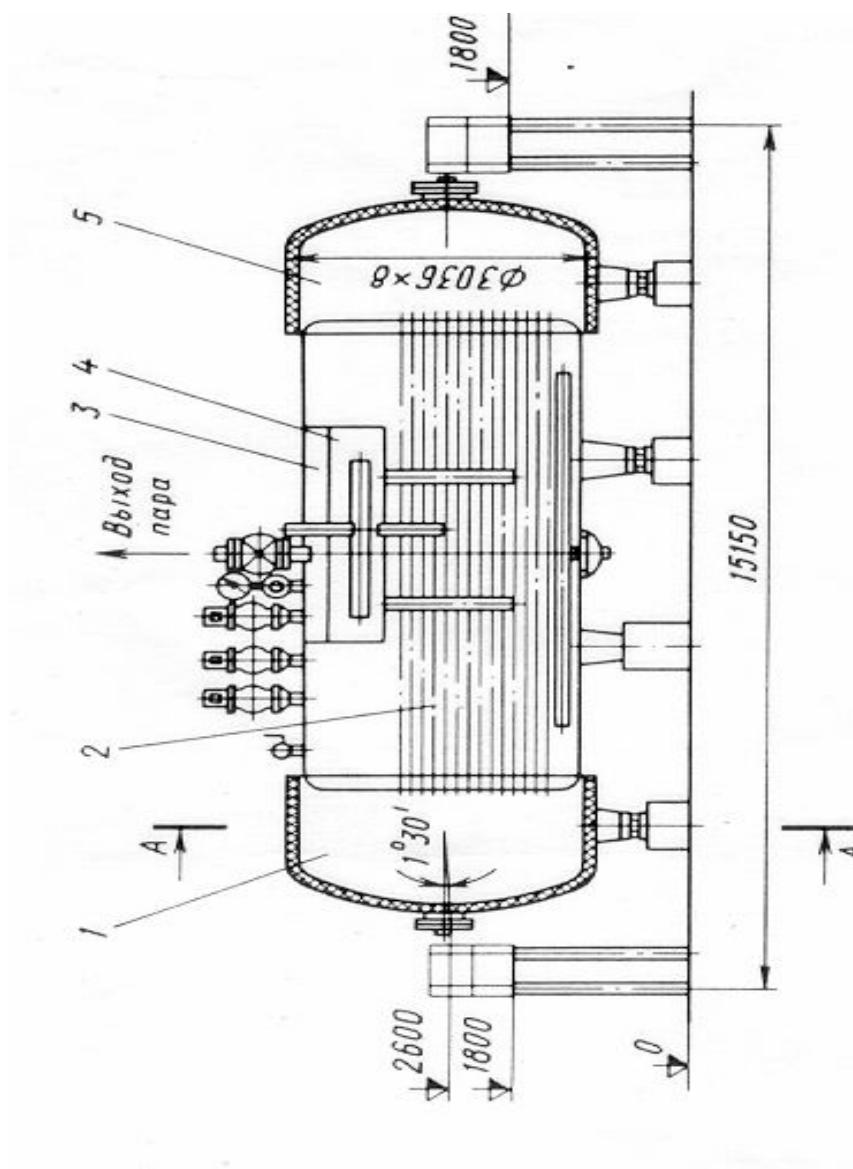
### Продолжение приложения 3



**Рис.3. Котел-утилизатор Г-420:**

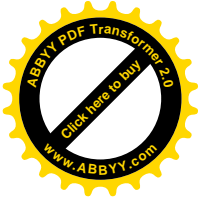
**1-входная газовая камера, 2,5-разделительные перегородки, 3-барабан, 4-дымогарные трубы, 6-выходная газовая камера**

# Продолжение приложения 3



**Рис.4. Котел-утилизатор Г-950:**

**1-входная камера, 2-дымогарные трубы, 3-испарительный барабан, 4-сепарационное устройство, 5-выходная камера**

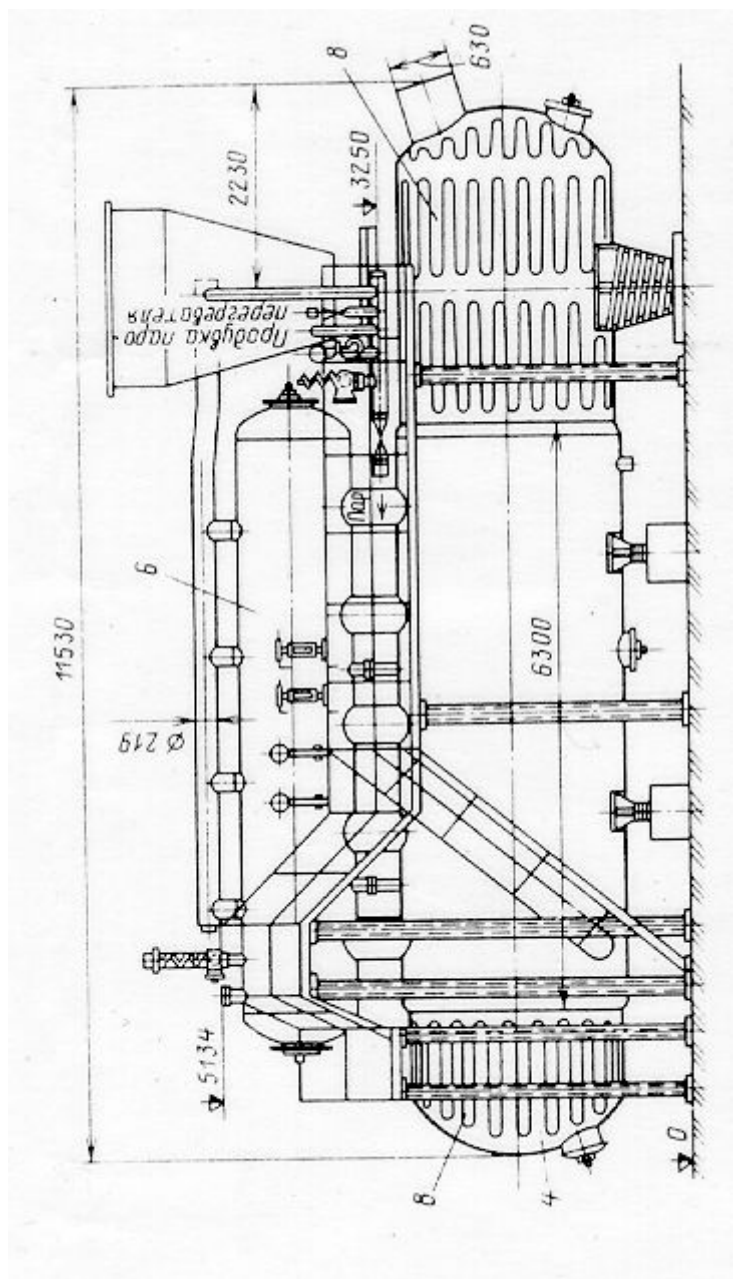


Technical drawing of a centrifugal pump assembly, showing a side view and a cross-section of the pump housing. The drawing includes the following dimensions and labels:

- Dimensions:**
  - 8345 (Total height)
  - 7910 (Height to the top of the pump housing)
  - 6200 (Distance from the top of the pump housing to the center of the impeller)
  - 4990 (Distance from the center of the impeller to the top of the pump housing)
  - 4400 (Distance from the center of the impeller to the top of the pump housing)
  - 2755 (Distance from the center of the impeller to the top of the pump housing)
  - 2400 (Distance from the center of the impeller to the top of the pump housing)
  - 8710 (Total width)
  - 1040 (Distance from the center of the impeller to the top of the pump housing)
  - 1226 (Distance from the center of the impeller to the top of the pump housing)
  - 377 (Distance from the center of the impeller to the top of the pump housing)
  - 428 (Distance from the center of the impeller to the top of the pump housing)
  - 38 (Distance from the center of the impeller to the top of the pump housing)
- Labels:**
  - Выход напор (Discharge outlet)
  - Коллектор (Collector)
  - 1 (Pump housing)
  - 2 (Impeller)
  - 3 (Pump housing)
  - 4 (Pump housing)
  - 5 (Pump housing)
  - 6 (Pump housing)
  - 7 (Pump housing)

**1-входная газовая камера, 2-нижний барабан, 3-верхний барабан, 4-сепарационное устройство, 5-дымогарные трубы, 6-выходная газовая камера, 7-предвключенная испарительная поверхность**

### Продолжение приложения 3

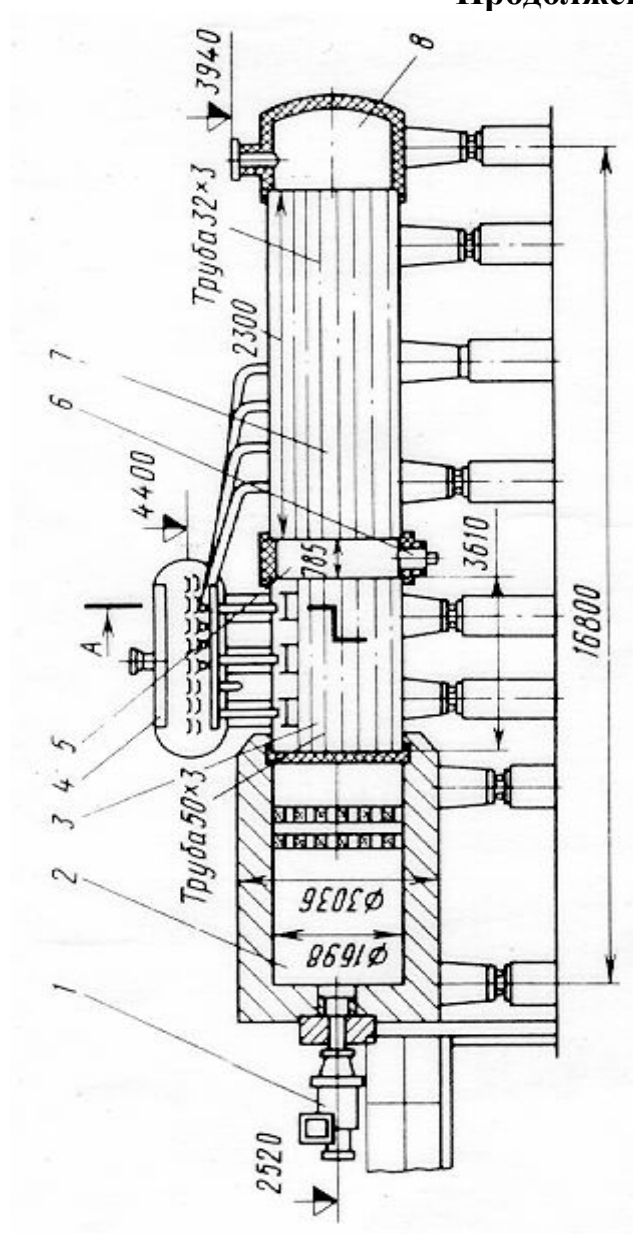


**Рис. 6. Котел-утилизатор Г-420БПЭ:**

1-газотрубная поверхность нагрева, 2-нижний барабан, 3-входная газовая камера.  
4-поворотная газовая камера, 5-выходная газовая камера, 6-верхний барабан, 7-пароперегреватель, 8-змеевики для разогрева металла поворотной и выходной газовых камер



### Продолжение приложения 3



**Рис.7. Котел-утилизатор Г-105/300БТ:**

1-горелочное устройство, 2-топочная камера, 3,7-трубчатые поверхности нагрева, 4- паросборник, 5-промежуточная газовая камера, 6-штуцер, 8-выходная газовая камера

## ПРИЛОЖЕНИЕ 4

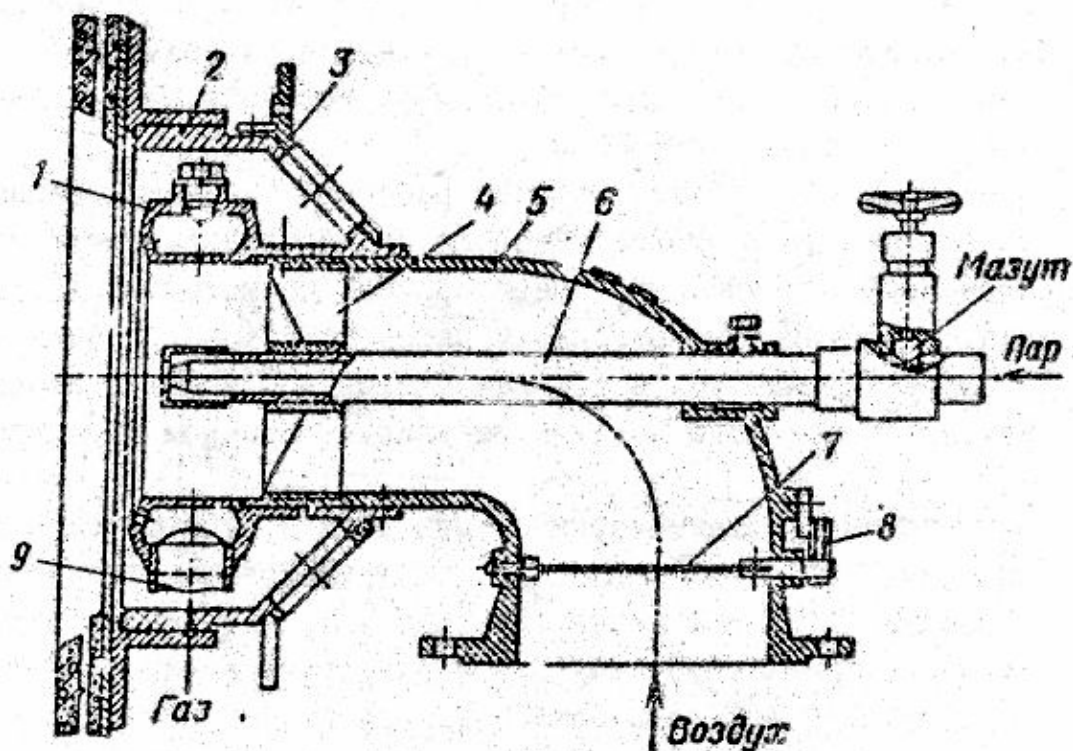


Рис.1. Горелка типа ГП:

1-газовый коллектор, 2- корпус, 3- регистр, 4- воздушный завихритель, 5- воздухо-вод, 6- форсунка, 7- шибер, 8- сектор, 9- газоподводящая труба

Таблица П4.1.

### ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГОРЕЛОК ТИПА ГП

Характеристика	Горелка	
	ГП-1	ГП-2
Тепловая мощность, МВт	1,91	2,4
Производительность:		
на жидком топливе, кг/ч	480	216
на газе, м <sup>3</sup> /ч	210	250
Давление перед горелкой, МПа	0,47	0,38
Давление в камере сгорания, Па	510	150
Температура перед горелкой, °С		
Мазута	120	120
Газа	250	250
Удельный расход пара на распыление топлива, кг/кг	0,17	0,2
Коэффициент избытка воздуха при работе		
На мазуте	1,1	1,1
На газе	1,07	1,08
Масса, кг	73	73

Продолжение приложения 4

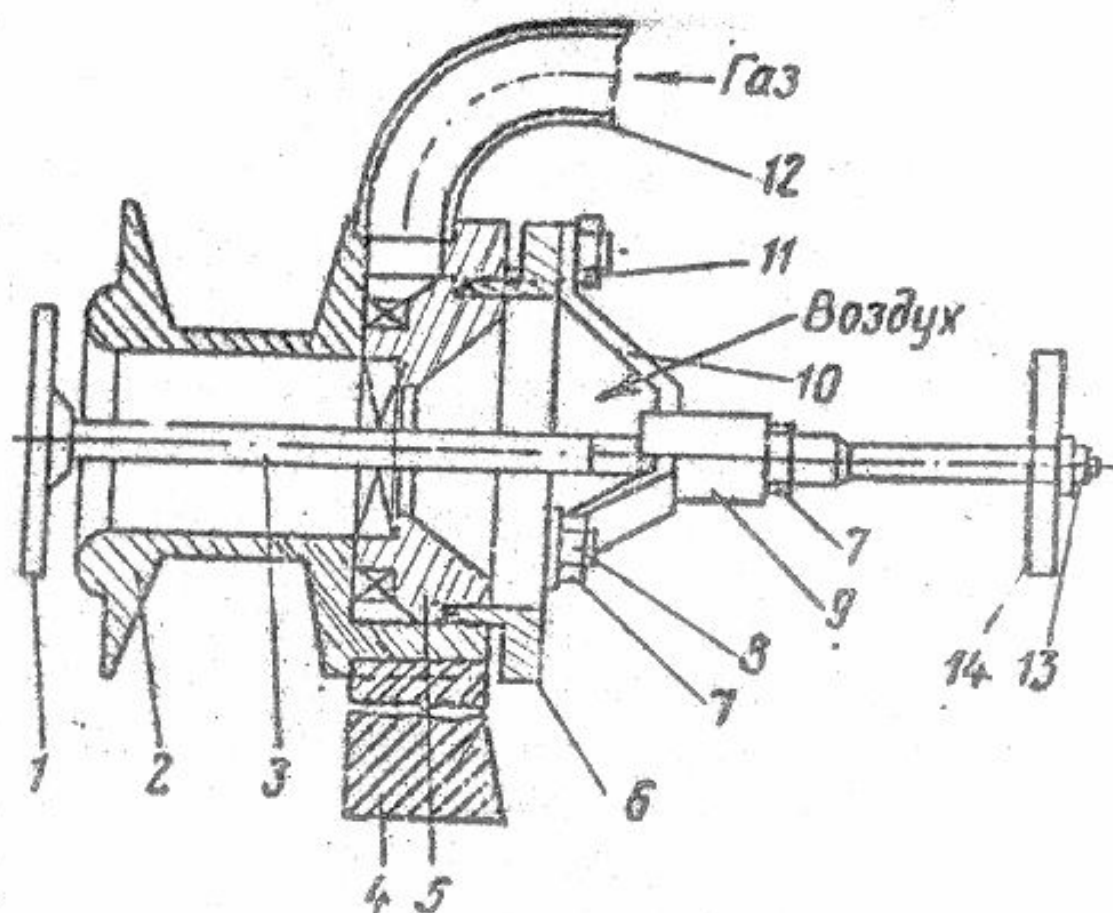


Рис.2. Акустическая газовая горелка типа АГГ:

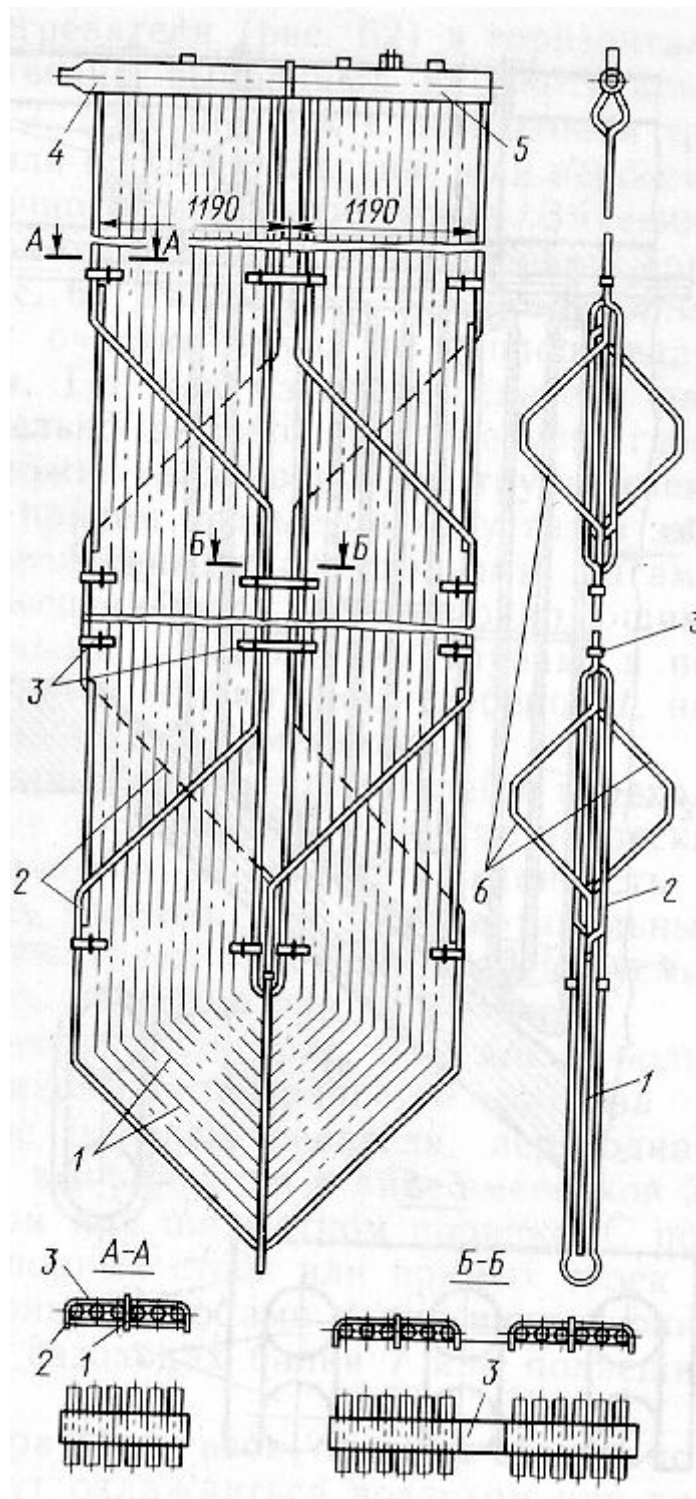
1-регулирующий диск, 2-корпус, 3-шток, 4-стойка, 5-резонатор, 6-нажимная втулка, 7,13-гайки, 8-болт, 9-втулка направляющая, 10-траверса, 11-сальниковая набивка, 12-газовый отвод, 14-рукоятка.

Таблица П4.2.

**ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АКУСТИЧЕСКИХ ГАЗОВЫХ ГОРЕЛОК АГГ**

Характеристика	АГГ-1	АГГ-2	АГГ-3	АГГ-4
Тепловая мощность, кВт	До 2970	464-1392	185-557	92-278
Расход топливного газа, м <sup>3</sup> /ч	100-320	50-150	20-60	10-30
Давление топливного газа, кПа	50-300	50-300	50-300	50-300
Коэффициент избытка воздуха	1,03-1,05	1,08	1,05	1,05
Масса горелки, кг	6	4,2	3,5	2,8

## ПРИЛОЖЕНИЕ 5

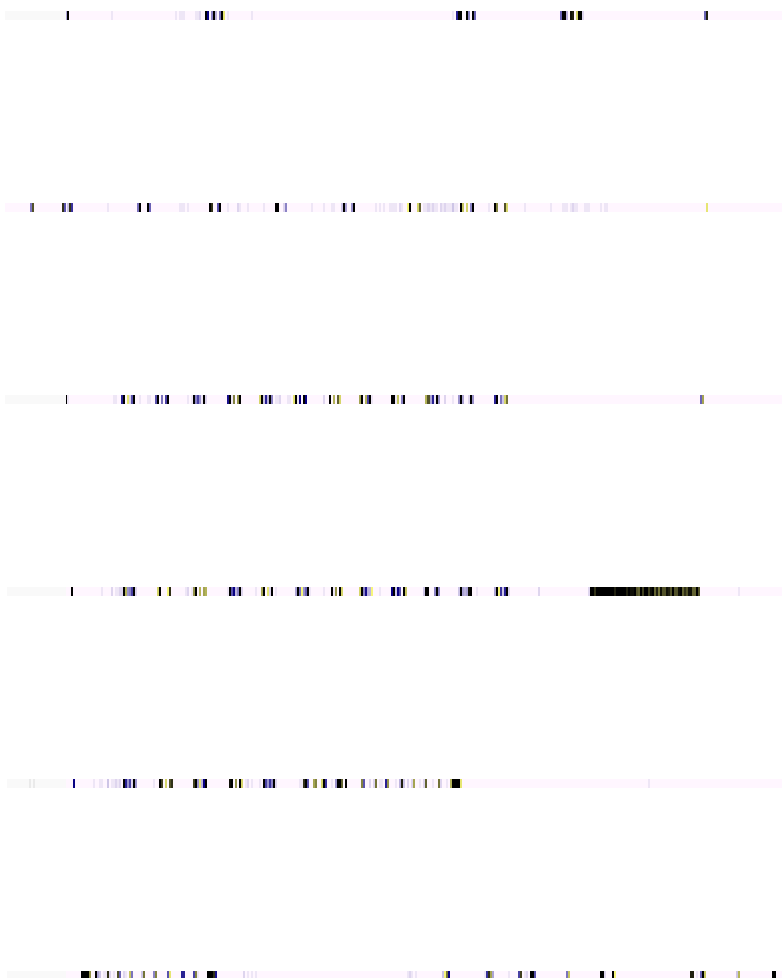


**Рис.1. Ширмовый пароперегреватель (ширма):**

1-средние трубы ширмы, 2-обвязочные трубы, 3-дистанционирующие планки, 4,5-входной и выходной коллекторы, 6-связующие трубы



## Продолжение приложения 5

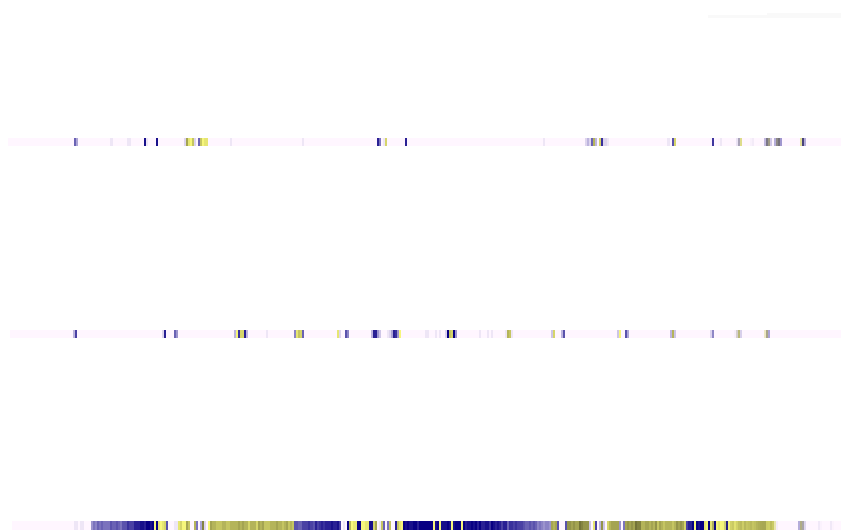


**Рис.2. Пароперегреватель с вертикальными трубами (а) при коридорном или шахматном их расположении:**

**1-дистанционирующие гребенки, 2,4-трубы вертикального и потолочного пароперегревателя, 3-скоба подвески, 5-балки потолочного перекрытия, 6-коллекторы, 7-дистанционирующие накладки**



## Продолжение приложения 5



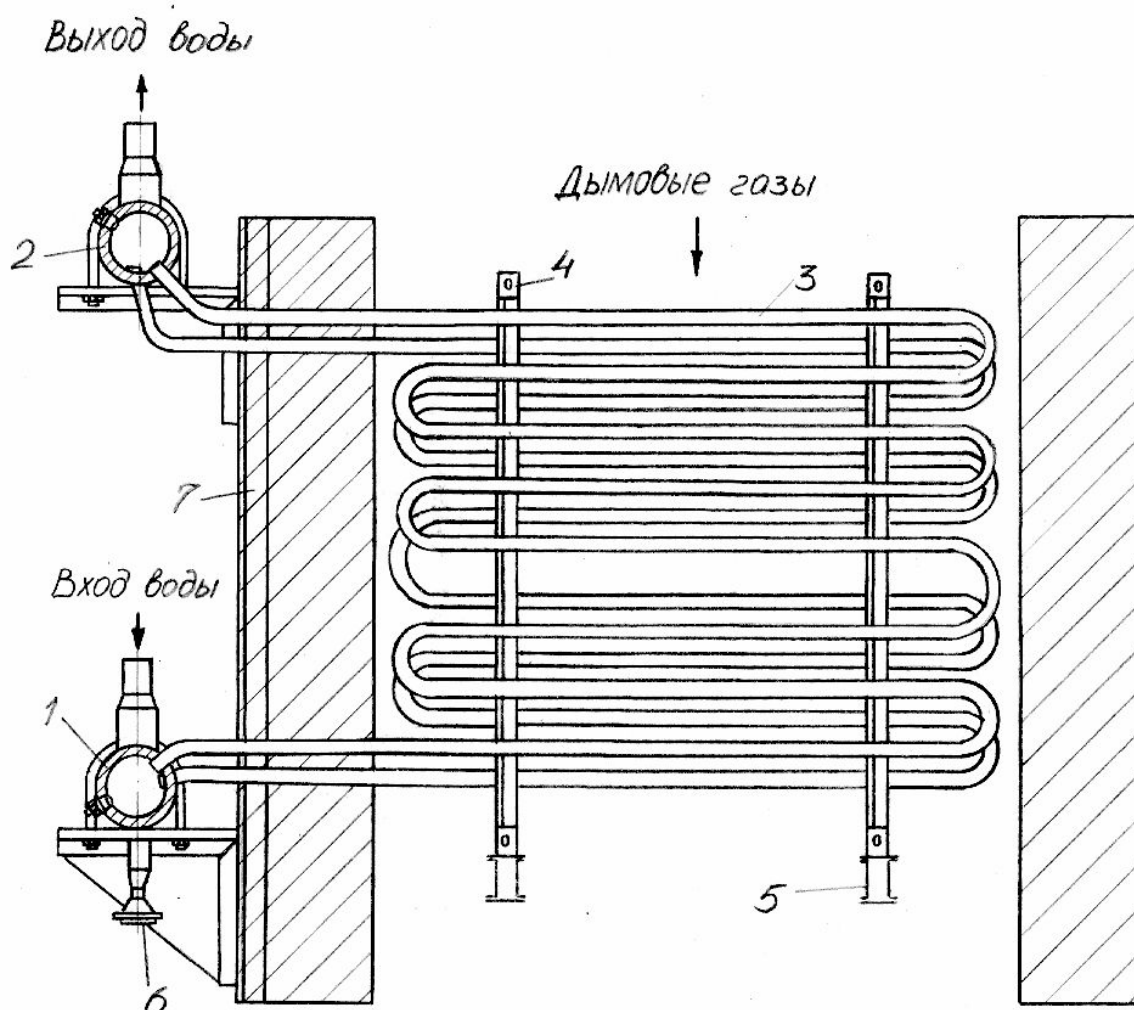
**Рис.3. Горизонтальный пароперегреватель:**

**1-опорные балки, 2-трубы, 3-стойки**

Пароперегреватели устанавливают в зоне высокой температуры газов, чтобы обеспечить наиболее высокие выходные температуры пара. Поэтому они работают в тяжелых условиях. В зависимости от места установки пароперегреватели могут быть полурadiaционными и конвективными. При работе котлов температура газов по сечению газохода обычно неравномерна, а следовательно, температура пара по отдельным змеевикам, находящихся в разных зонах, может сильно отличаться. Чтобы уменьшить перегрев отдельных змеевиков, применяют многоступенчатые пароперегреватели с перемешиванием среды в коллекторах после каждой ступени и перекрестными перебросами пара из одной зоны обогрева в другую.



## ПРИЛОЖЕНИЕ 6



**Рис.1. Водяной экономайзер змеевиковый:**

**1-нижний входной коллектор, 2-верхний выходной коллектор, 3-змеевики, 4-опорные стойки змеевика, 5-опорная балка с воздушным охлаждением, 6-спуск воды, 7-обмуровка**

# Продолжение приложения 6

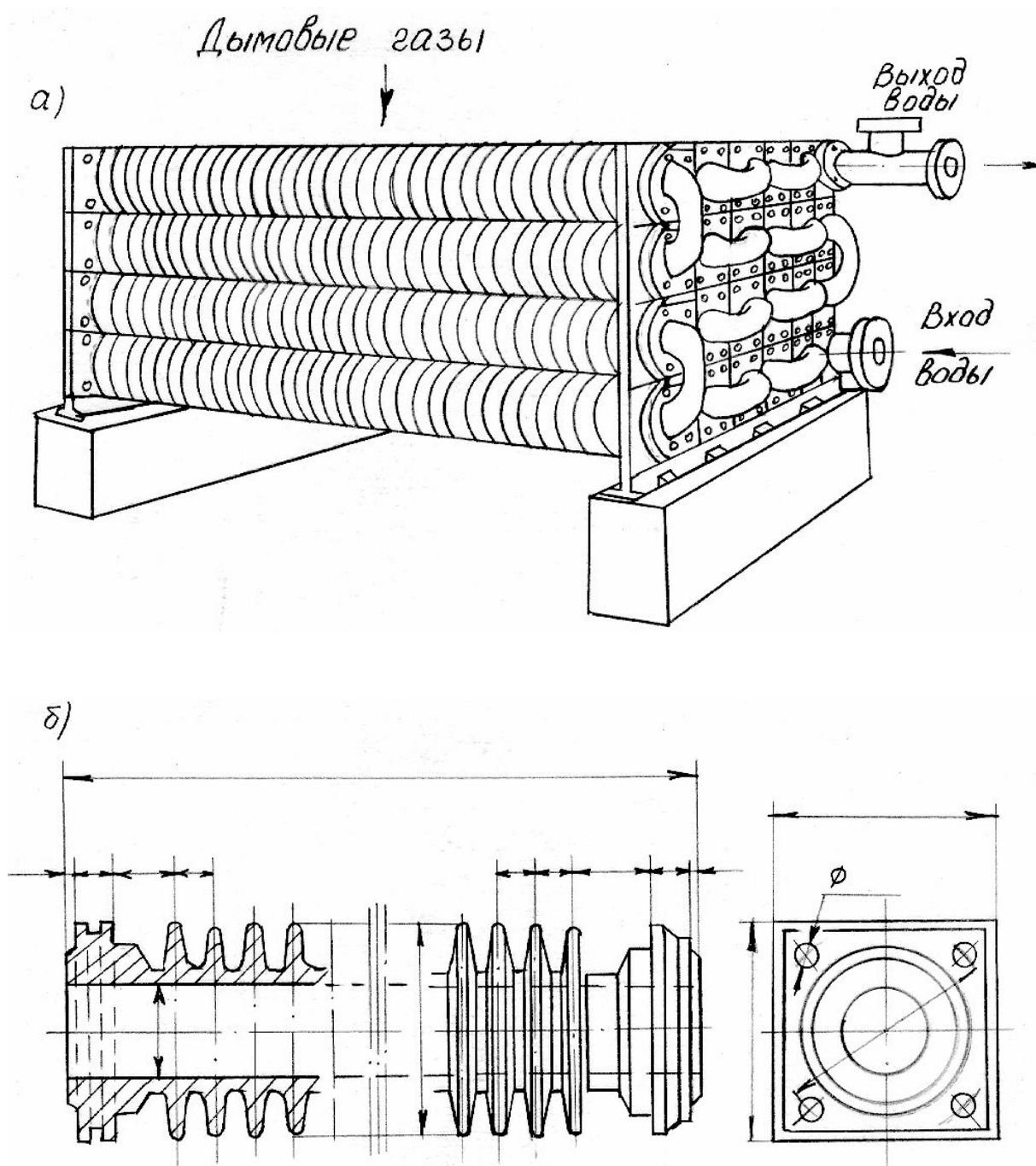
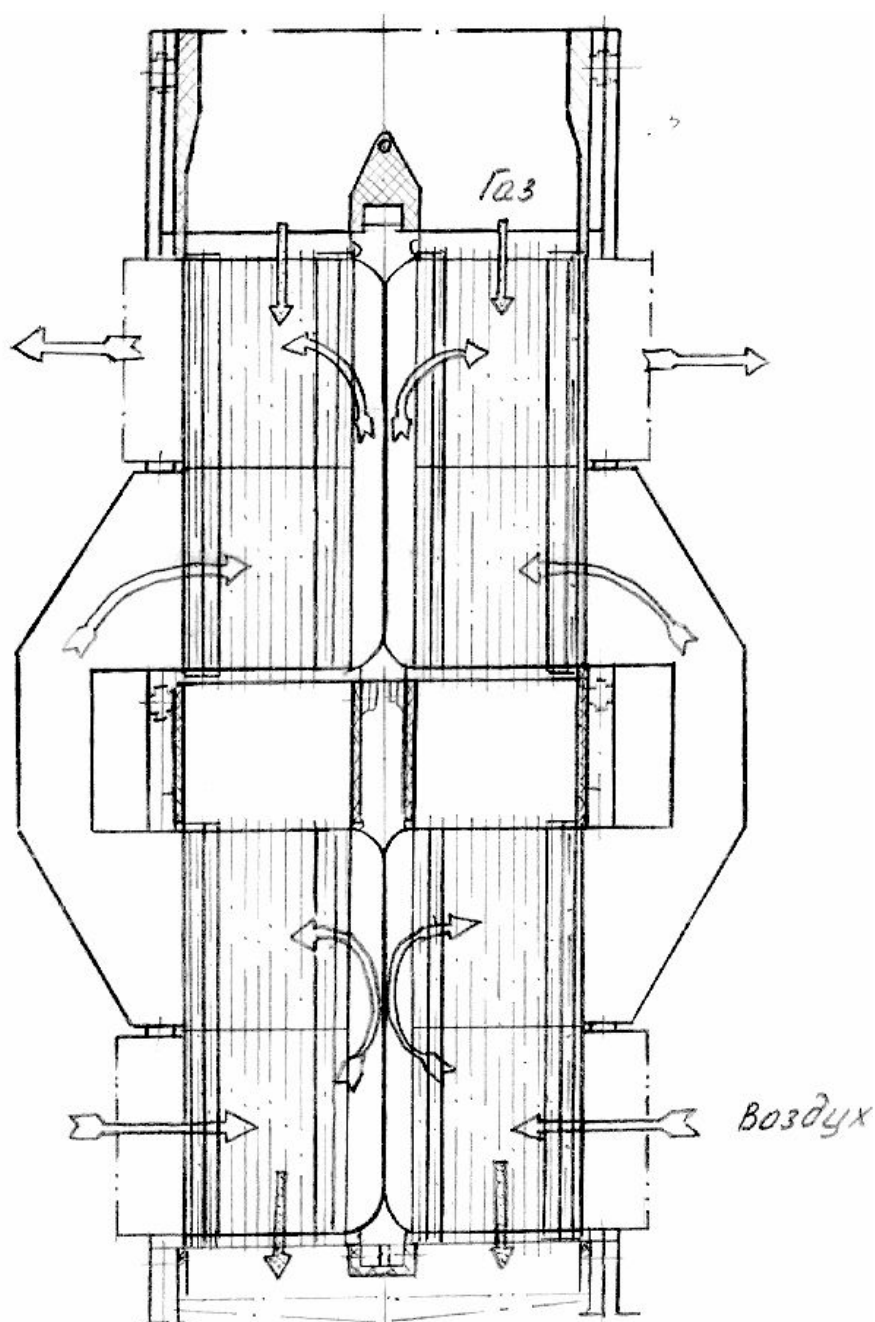


Рис.2. Чугунный ребристый экономайзер ВТИ:

а) общий вид, б) ребристые трубы

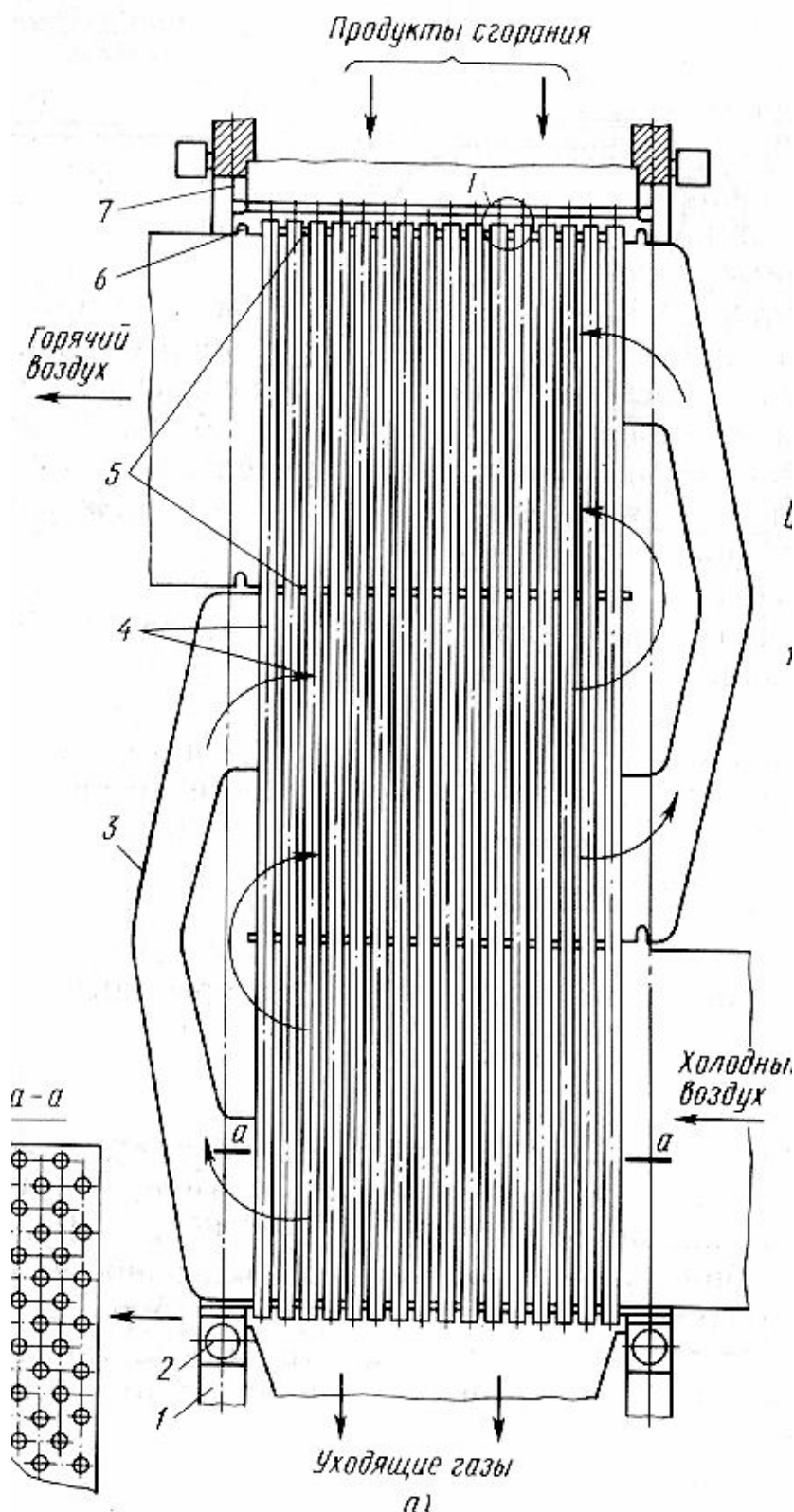
Продолжение приложения 6



**Рис.3. Трубчатый воздухоподогреватель двухпоточный:**

**1-секция трубчатого воздухоподогревателя, 2-перепускной короб, 3-обмуровка, 4-колонны каркаса**

# Продолжение приложения 6



**Рис.4. Трубчатый воздухоподогреватель однопоточный:**

1-трубки, 2-трубные доски, 3-перепускные короба для воздуха, 4-люк для лаза, 5-компенсатор, 6-опора для воздухоподогревателя





## ПРИЛОЖЕНИЕ 7

### ПРОГРАММА РАСЧЕТА ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ НА ЯЗЫКЕ "БЕЙСИК"

```
4 REM
5 REM ***** РАСЧЕТ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ *****
6 REM
7 GOSUB 300
10 PRINT`      ВВЕДИТЕ КОМПАНЕНТЫ ГАЗОВОЙ СМЕСИ`
15 PRINT` СОДЕРЖАНИЕ КОМПАНЕНТОВ, %`
20 INPUT` CO, H2, CH4 `CO,H2,C1
25 INPUT` C2H2, C2H4,C3H6 `C2CH3C4
30 INPUT` C3H8, C4H10, C5H11 `C5,C6,C7
35 INPUT` H2S, O2, N2 `S2O2N2
40 INPUT` CO2, H2O `C,O
45 INPUT` ВЛАГОСОДЕРЖАНИЕ, Г/М3 `D
50 INPUT` КОЭФФИЦИЕНТ ИЗБЫТКА ВОЗДУХА `A
52 PRINT
55 PRINT` ===== ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ =====`
60 PRINT` =====`
63 PRINT!3.3!
65 PRINT` ВЛАГОСОДЕРЖАНИЕ, Г/М3 ..... `D
70 PRINT` КОЭФФИЦИЕНТ ИЗБЫТКА ВОЗДУХА ..... `D
75 PRINT` СОДЕРЖАНИЕ КОМПАНЕНТОВ СМЕСИ, %`
78 PRINT!3.2!
80 PRINT` CO .... `CHO: PRINT` H2 .... `H2
85 PRINT` CH4 ... `C1: PRINT` C2H2 .. `C2
90 PRINT` C2H4 .. `CH3: PRINT` C3H6 .. `C4
95 PRINT` C3H8 .. `CH5: PRINT` C6H10 . `C6
100 PRINT` C5H11 . `C7: PRINT` H2S ... `S
105 PRINT` O2 .... `O2: PRINT` NH2 .... `N2
110 LETV0=0.476*(0.5*(CO+H2)+2*C1+2.5*C2+3*C3+H4.5*C4)
115 LETV0=V0+0.0476*(5*C5+.5*C6+7.75*C7+1.5*S+O)
120
LETV1=0.01*(CO+C1+2*C2+2*C3+3*C4+3*C5+4*C6+5*C7+S+C)
125 LETV2=0.79V0+N2/100
130 LETV3=0.01*(H2+2*C1+C2+2*C3+3*C4+4*C5+5*C6+5.5*C7+S)
135 LETV3 =V3+0.01 *0.124*D+0.01*A*V0
140 LETV4=(A-1)*V0: LETV5=V1+V2+V3+V4
145 LETP=0.01*(1.96*C+111.59S+111.25*N2+1.43*O2+1.25*CO)
150 LETP=P+H0.01*(0.089*H2+0.72*C1+1.264*C2+H1.25*C3)
```



## Продолжение приложения 7

```
155 LETP=P+0.01*(1.884*C4+2.076*C5+2.04N*C6+3.18*C7)
160 LETM=P+D/1000+1.30*A*VO
15 LETQ=127.7*CO+108*H2+358*CH1+555*C2+590*C3+636C4
170 LETQ=Q+913*C5+1185*C6+1465*C7+934*S
175 PRINT: PRINT: PRINT
180 PRINT`===== РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА =====`
182 PRINT
185 REM
190 REM ===== ПЕЧАТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ =====
195 REM
H197 PRINT!F1.3!
200 PRINT`ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ОБЪЕМ ВОЗДУХА, М3/М3 ... `V0
205 PRINT`ОБЪЕМ 3-Х АТОМНЫХ ГАЗОВ, М3/М3 ..... `V1
210 PRINT`ОБЪЕМ АЗОТА, М3/М3 ..... `V2
215 PRINT`ОБЪЕМ ВОДЯНЫХ ПАРОВ,М3/М3 ..... `V3
220 PRINT`ОБЪЕМ ВОЗДУХА,М3/М3 ..... `V4
225 PRINT`ОБЪЕМ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ,М3/М3 ..... `V5
230 PRINT`ПЛОТНОСТЬ ГАЗОВ,КГ/М3 ..... `P
235 PRINT`МАССА ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ, КГ/М3 ..... N`M
240 PRINT`ТЕПЛОТА СГОРАНИЯ, ДЖ/М3 ..... `Q
245 PRINT#H0
250 STOP
255 END
300 INPUT`ВАМ НУЖНА РАСЧЕТКА РЕЗУЛЬТАТОВ (ДА-1,НЕТ-
0) ?`J
305 IF J=0 GOTO 350
310 PRINT#0
315 FOR I=1 TO 30: PRINT: NEXT I
320 PRINT`ВАМ НЕОБХОДИМО НАБРАТЬ КОМАНДУ - 52
PRINT#1.`
325 PRINT`НАЖМИТЕ КЛАВИШУ ?ПС? ИЛИ ?В1?. ПОДАЙТЕ`
330 PRINT`КОМАНДУ GOTO 350. НАЖМИТЕ КЛАВИШУ ?ПС?`
335 PRINT`ИЛИ ?ВКТ?`
340 STOP
350 RETURN
360 END
```





## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	1
1. Общие сведения о котельных установках и о паровых котлах	2
2. Содержание курсовой работы	4
3. Методические указания	4
4. Исходные данные к заданию	6
5. Расчет котельного агрегата	7
5.1. Расчет процесса горения топлива	7
5.2. Тепловой баланс котельного агрегата	10
6. Упрощенный эксергетический баланс котельного агрегата	12
7. Расчет газотрубного котла-утилизатора	17
8. Горелочные устройства и их выбор	23
9. Контрольные вопросы	24
10. Исследование и анализ процесса горения в котельном агрегате	26
Библиографический список	26
Приложение 1	28
Приложение 2	32
Приложение 3	39
Приложение 4	46
Приложение 5	48
Приложение 6	51
Приложение 7	55