

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Промышленная теплоэнергетика и экология»

**Н. А. Вальченко**

# **КОТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

**ПРАКТИКУМ**

**по выполнению лабораторных работ  
для студентов специальностей  
1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика»  
и 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация  
энергооборудования организаций»  
дневной и заочной форм обучения**

Гомель 2022

УДК 621.182(075.8)  
ББК 31.384я73  
В16

*Рекомендовано научно-методическим советом  
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого  
(протокол № 4 от 24.12.2020 г.)*

Рецензент: доц. каф. «Электроснабжение» ГГТУ им. П. О. Сухого  
канд. техн. наук *А. А. Капанский*

**Вальченко, Н. А.**  
В16 Котельные установки промышленных предприятий : практикум по выполнению лаборатор. работ для студентов специальностей 1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика» и 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация энергооборудования организаций» днев. и заоч. форм обучения / Н. А. Вальченко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2022. – 35 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <https://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

Практикум по выполнению лабораторных работ по курсу «Котельные установки промышленных предприятий» позволит студентам закрепить знания по основным разделам дисциплины, а также приобрести навыки применения теоретических знаний при решении теплотехнических задач по расчету и проектированию котельных установок. Может быть использован студентами при выполнении курсового и дипломного проектирования.

Для студентов специальностей 1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика» и 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация энергооборудования организаций» дневной и заочной форм получения образования.

УДК 621.182(075.8)  
ББК 31.384я73

© Учреждение образования «Гомельский  
государственный технический университет  
имени П. О. Сухого», 2022

# Лабораторная работа № 1

## Составление материального баланса нагреваемой среды

Цель работы: определить потери и технологические расходы рабочего тела.

### 1. Общие сведения

Котельная установка – совокупность котла и вспомогательного оборудования.

Вспомогательными называют оборудование и устройства для подачи топлива, питательной воды и воздуха, для удаления продуктов сгорания, очистки дымовых газов, удаления золы и шлака и т.д.

Котел – устройство, в котором для получения пара и нагрева воды с давлением выше атмосферного, потребляемых вне самого устройства, используется теплота, выделяющаяся при сгорании органического топлива и протекании технологического процесса, а также теплота от уходящих газов.

Производительность котельной установки – количество вырабатываемого пара (подогреваемой воды) в единицу времени.

Для удаления нелетучих примесей воды, вводимых с питательной водой, из котла предусматривается удаление - продувка некоторого количества воды с загрязняющими ее примесями. В связи с этим в приходную часть материального баланса входит поступающая в котел питательная вода количеством  $G_{п.в.}$ , кг/с, а в расходную часть - количества полученного водяного пара  $D_n$  и продувки  $G_{пр.}$ .

Применяют непрерывную и периодическую продувки котла.

Периодическая продувка применяется в основном для удаления шлама из нижних коллекторов и барабанов котлов, являющихся шламоотстойниками.

Непрерывная продувка предназначена для удаления избыточной щелочности и снижения солесодержания котловой воды, и она осуществляется из верхнего барабана котла.

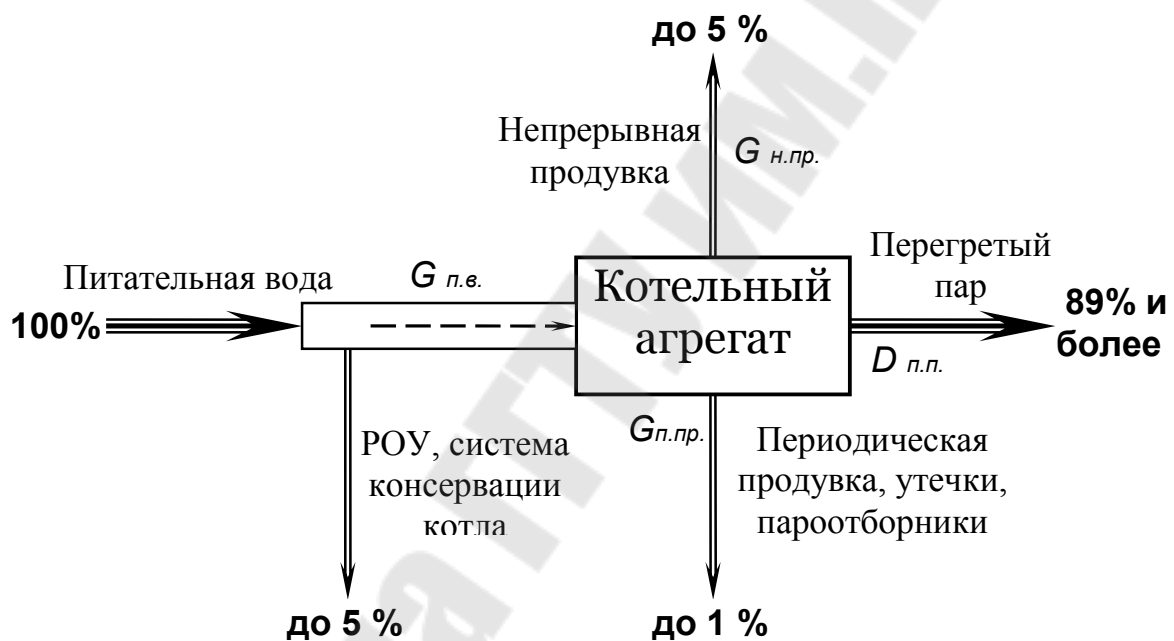
### 2. Краткое описание испытываемого котельного агрегата

Данные об используемом в лабораторной работе котельном агрегате заносятся в табл.1:

## Характеристика котельного агрегата

Наименование величины	Значение
Тип котла	
Топливо	
Пароизводительность, кг/ч	
Рабочее давление, МПа	
Температура пара, °С	
Состав котла	

## 3. Схема материального баланса нагреваемой среды



## 4. Порядок выполнения и обработка опытных данных

Расходы рабочего тела измеряются по приборам, установленным на щите управления котла и заносятся в табл.3.

Действительную производительность котла необходимо уточнить с помощью коэффициента  $K$ , учитывающего давление и температуру пара (см. табл.2).

Таким образом:

$$D_{н.п.} = D_{н.п.прибора} \cdot K, \quad \text{т/ч} \quad (1)$$

где  $D_{н.п.прибора}$  – расход пара по прибору.

Таблица 2.

Значения  $K$  в зависимости от температуры и давления

$P, \text{ МПа}$ $t, \text{ }^\circ\text{C}$	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
370	0,748	0,835	0,924	1,002	1,075
380	0,742	0,831	0,915	0,992	1,066
390	0,735	0,824	0,905	0,983	1,055
400	0,729	0,817	0,898	0,974	1,046
410	0,722	0,810	0,890	0,966	1,035
420	0,717	0,804	0,885	0,958	1,028
430	0,712	0,797	0,875	0,950	1,020
440	0,705	0,791	0,869	0,942	1,010
450	0,701	0,791	0,862	0,934	1,003
460	0,695	0,779	0,856	0,925	0,992
470	0,690	0,774	0,849	0,920	0,986

Расход воды на непрерывную и периодическую продувку котла:

$$G_{np.} = D_{n.n.} \cdot P \cdot 10^{-2}, \text{ т/ч} \quad (2)$$

где  $P$  – величина продувки, %.

Материальный баланс нагреваемой среды (вода-пар), согласно рис.1, принимает следующий вид:

$$G_{n.в.} = D_{n.n.} + G_{н.пр.} + G_{н.пр.} \text{ т/ч} \quad (3)$$

Погрешность измерений определяется из уравнения:

$$\Delta = \frac{G_{н.в.} - (D_{н.н.} + G_{н.пр.} + G_{н.пр.})}{G_{н.в.}} \cdot 100, \% \quad (4)$$

Неувязка не должна превышать 1%, т.е.  $\Delta < 1,0 \%$ .

Таблица 3

## Результаты замеров и расчетов

$G_{н.в.}, \text{ т/ч}$	$D_{н.н.} \text{ прибора}, \text{ т/ч}$	$K$	$D_{н.н.}, \text{ т/ч}$	$G_{н.пр.}, \text{ т/ч}$	$G_{н.пр.}, \text{ т/ч}$	$\Delta, \%$

## Контрольные вопросы

1. Дать определение котла и котельной установки.
2. Для чего необходима непрерывная продувка котла?
3. В чем смысл периодической продувки котла?
4. Составить уравнение материального баланса рабочего тела котла.

## Лабораторная работа № 2

### Составление теплового баланса котельной установки

Цель работы: определение составляющих величин теплового баланса и коэффициента полезного действия котельной установки.

#### 1. Общие сведения

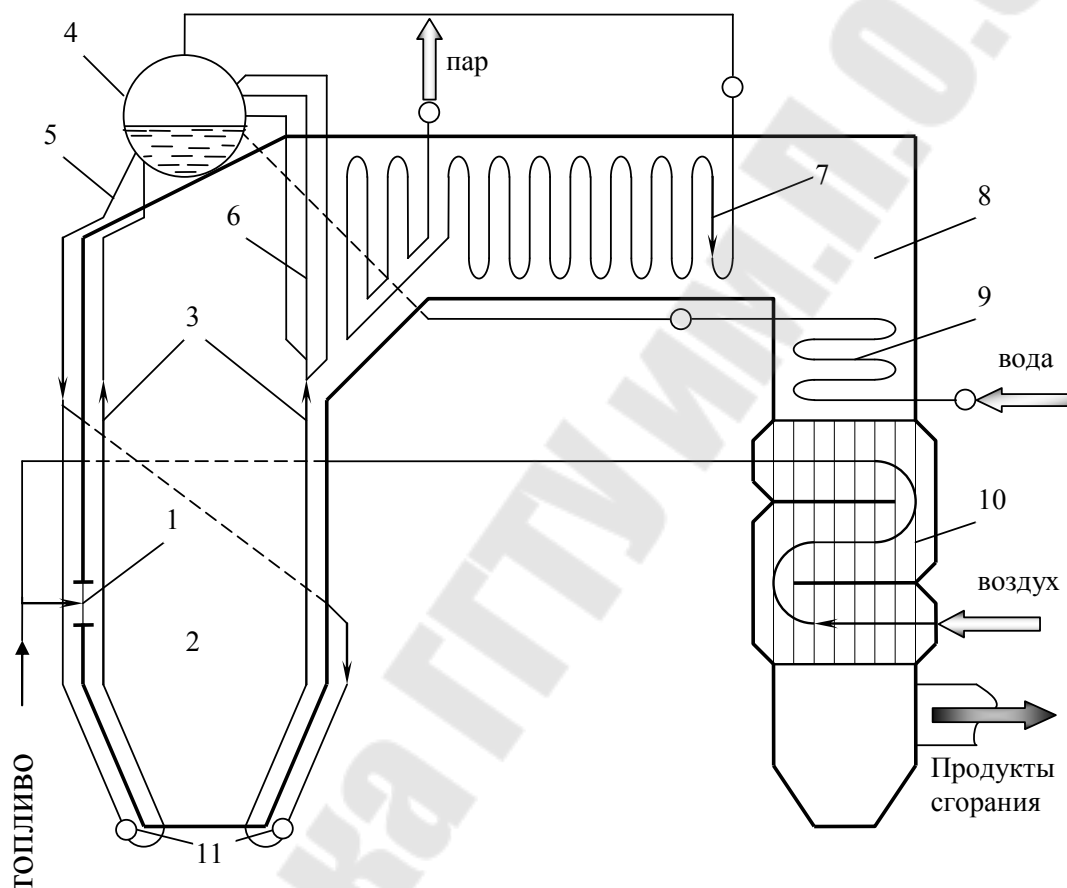


Рис. 1. Схема котельной установки и её краткое описание

Работа котельной установки осуществляется следующим образом. Топливо вместе с воздухом, подогретым в воздухоподогревателе 10, поступает в топочную камеру 2 через горелку 1. На стенах топочной камеры расположены экраны 3, состоящие из большого числа вертикальных труб, которые соединены в верхней части с барабаном котла 4, а в нижней части – с коллекторами 11.

Образующиеся в результате процесса горения дымовые газы направляются в газоходы котла, омывая при этом первоначально фестоны 6, расположенные на выходе из топки.

После топочной камеры продукты сгорания проходят через пароперегреватель 7, а затем по опускному газоходу через экономайзер 9 и воздухоподогреватель 10.

Вода питательными насосами подается в экономайзер, затем она подается в верхний барабан котла. Из барабана вода по опускным трубам 5 поступает в коллектора. Из коллекторов вода поступает в экранные трубы 3, образуемая в них пароводяная смесь поступает в барабан котла.

Опускные трубы и коллекторы прокладывают вне топочного пространства. Это создает возможность для осуществления естественной циркуляции воды и пароводяной смеси за счет разности масс столбов воды в опускных и экранных трубах.

Принудительную циркуляцию воды в паровом котле можно организовать за счет специального насоса, установленного на опускных трубах.

Принудительная циркуляция воды позволяет увеличить скорость движения и располагать парообразующие трубы в топке любым образом (наклонно, горизонтально), исходя из размещения котла в ограниченных по высоте помещениях и более удобно его конструировать.

## 2. Тепловой баланс котельной установки

Целями составления теплового баланса котельного агрегата являются:

- определение значений всех приходных и расходных статей баланса;
- расчет коэффициента полезного действия котельного агрегата;
- анализ расходных статей баланса с целью установления причин ухудшения работы котельного агрегата.

На основе теплового баланса разрабатываются мероприятия по повышению эффективности энергоиспользования в котельной установке.

Тепловой баланс котла, как и любого другого теплотехнического агрегата, характеризует равенство между приходом и расходом теплоты:

$$Q_{\text{прих}} = Q_{\text{расх}}, \text{ кДж/м}^3 \text{ (кДж/кг)}. \quad (1)$$



При отсутствии выработки пара за счет теплоты экзотермических реакций можно принять:

$$Q_{прих} = Q_p^p, \text{ кДж/м}^3 \text{ (кДж/кг)}, \quad (2)$$

где  $Q_p^p$  – располагаемое тепло на  $1 \text{ м}^3$  или  $1 \text{ кг}$  топлива:

$$Q_p^p = Q_n^p + Q_{нар} + Q_{ф.т.} + Q_{ф.в.}, \text{ кДж/м}^3 \text{ (кДж/кг)}; \quad (3)$$

или

$$Q_p^p = Q_n^p / K_Q, \text{ кДж/м}^3 \text{ (кДж/кг)}, \quad (4)$$

где  $Q_n^p$  – низшая теплота сгорания топлива,  $\text{кДж/м}^3$  (кДж/кг);

$Q_{нар}$  – тепло, вносимое в топку паром для распыления жидкого или пылеобразного твердого топлива, кДж/кг;

$Q_{ф.т.} = c \cdot t$  – физическое тепло  $1 \text{ м}^3$  или  $1 \text{ кг}$  топлива;

$c$  – теплоемкость топлива,  $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$  или  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;

$t$  – температура топлива,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$Q_{ф.в.}$  – физическая теплота воздуха, подогреваемого вне котла за счет постороннего источника,  $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$  или  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;

$K_Q$  – коэффициент, учитывающий дополнительное тепло, вносимое подогретыми вне котла топливом и воздухом:

$$K_Q = \frac{1}{1 + (Q_{ф.т.} / Q_n^p) + (Q_{ф.в.} / Q_n^p)}. \quad (5)$$

Расходная часть теплового баланса для установившегося режима работы парогенератора определяется по выражению:

$$Q_p^p = Q_{расх} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6, \text{ кДж/м}^3 \text{ (кДж/кг)}, \quad (6)$$

где  $Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6$  – потери тепла с уходящими газами, химическим и механическим недожогом топлива, потери от наружного охлаждения и с физическим теплом шлака,  $\text{кДж/м}^3$ ;

$Q_1$  – тепло, израсходованное на процесс парообразования,  $\text{кДж/м}^3$  (кДж/кг);

Для газообразного топлива следует принять:

$$Q_4 = 0; \quad Q_6 = 0; \quad Q_\phi = 0.$$

Разделив левую и правую часть общего уравнения теплового баланса (6) на величину  $Q_p^p$ , его приводят к виду:

$$1 = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6. \quad (7)$$

Величина

$$q_1 = \frac{Q_1}{Q_p^p} = D_{n.n.}(h_{n.n.} - h_{n.в.}) + G_{н.пр.}(h_{к.в.} - h_{н.в.}), \quad (8)$$

где  $D_{n.n.}$ ,  $G_{н.пр.}$  – действительные расходы перегретого пара и продувочной воды, кг/ч (принимаются из предыдущей работы);

$h_{n.n.}$ ,  $h_{н.в.}$ ,  $h_{к.в.}$  – энтальпии перегретого пара, питательной и котловой воды, кДж/кг.

Потери тепла  $q_2$  можно определить по формуле:

$$q_2 = \frac{Q_2}{Q_p^p} = \frac{(h_{yx} - \alpha_{yx} \cdot h_{yx}^0)(100 - q_4)}{Q_p^p}, \quad (9)$$

или 
$$q_2 = \frac{Q_2}{Q_p^p} = (\kappa \cdot \alpha_{yx} + c) \cdot (t_{yx} - \frac{\alpha_{yx} \cdot t_{x.в.}}{\alpha_{yx} + b}) \cdot K_Q \cdot A_t \cdot 10^{-2}, \quad (10)$$

где  $h_{yx}$  – энтальпия уходящих газов при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha_{yx}$  и температуре  $t_{yx}$ , кДж/кг;

$h_{yx}^0$  – энтальпия теоретически необходимого количества воздуха при температуре  $t_{x.в.}$ , кДж/кг;

$\kappa$ ,  $c$ ,  $b$  – коэффициенты, зависящие от вида и качества топлива, для газообразного топлива  $\kappa = 3,52$   $c = 0,63$   $b = 0,18$ ;

$A_t$  – коэффициент, учитывающий влияние  $t_{yx}$  на теплоемкость продуктов сгорания:

$$A_t = 0,9805 + 0,00013 \cdot t_{yx}. \quad (11)$$

Величину потерь от химической  $q_3$  и механической  $q_4$  неполноты сгорания при сжигании газообразного топлива можно принять равными:

$$q_3 = 0,5 \div 1 \%; \quad q_4 = 0.$$

Потери  $q_5$  для котлов средней производительности можно принять из табл. 1. в зависимости от паропроизводительности котлоагрегата.

Таблица 1

### Потери тепла в окружающую среду

Паропроизводительность, т/ч	Величина потерь тепла в окружающую среду, %
20	1,83
30	1,67
40	1,30
50	1,10
60	0,95
70	0,80
80	0,70

### 3. Порядок выполнения и обработки опытных данных

Расход рабочего тела и топлива, а также температуры питательной воды, перегретого и продувочного пара, уходящих газов и холодного воздуха измеряются по приборам, установленным на щите управления котлоагрегата и заносятся в табл. 2.

Таблица 2

### Результаты измерений по приборам

Паропроизводительность котлоагрегата, кг/ч	Расход газа по прибору, м <sup>3</sup> /ч	Температуры, °С				
		Перегретого пара	Продувочного воды	Питательной воды	Уходящих газов	Холодного воздуха

Далее определяются отдельные составляющие теплового баланса по уравнениям (7), (8), (9 или 10), входящие в них значения величин по рекомендациям ранее пройденных курсов теплотехники и теории процессов горения топлива.

Неувязка теплового баланса (формула 7) не должна превышать 1%.

Коэффициент полезного действия БРУТТО котлоагрегата определяется соотношением

$$\eta_{к.а.}^{бр} = 1 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6), \quad (12)$$

Для современных парогенераторов  $\eta_{к.а.}^{бр} = 0,92 \div 0,94$ .

Коэффициент полезного действия парогенератора НЕТТО определяется с учетом расхода электроэнергии и тепла на собственные нужды:

$$\eta_{к.а.}^н = \eta_{к.а.}^{бр} - q_{с.н}, \quad (13)$$

где  $q_{с.н}$  – суммарный расход энергии на собственные нужды, в долях единицы от величины  $Q_I$ .

### Контрольные вопросы

1. Объяснить принцип работы парового котла.
2. В чем отличие естественной циркуляции воды от принудительной?
3. Для чего составляется тепловой баланс?
4. Назвать составляющие теплового баланса котлоагрегата.
5. Как определяются величины  $\eta_{к.а.}^{бр}$  и  $B_g$ .
6. В чем отличие коэффициентов полезного действия БРУТТО и НЕТТО котельного агрегата?

## Лабораторная работа №3

### Испытание пароперегревателя котельного агрегата

Цель работы: изучить конструкцию испытываемого пароперегревателя и на основании составления теплового баланса определить температуру дымовых газов в газоходе за перегревателем и его коэффициент теплопередачи.

#### 1. Общие сведения

Пароперегреватель представляет собой дополнительную поверхность нагрева, устанавливаемую перед конвективной поверхностью котла или на границе газоходов непосредственно за топочным устройством.

В пароперегревателе происходит передача тепла от дымовых газов к пару. При этом его температура увеличивается от температуры насыщенного пара (при давлении в котле) до требуемой температуры перегрева при неизменном давлении.

Каждый пароперегреватель представляет собой системы цельнотянутых параллельных труб диаметром 28–42 мм, изогнутых в виде змеевиков, вальцованных или приваренных к круглым коллекторам. Использование труб небольшого диаметра упрощает гибку змеевиков и увеличивает коэффициент теплоотдачи. Толщина стенок труб зависит от рабочего давления пара и может быть от 3 до 5 мм.

По своей конструкции пароперегреватели бывают вертикальные и горизонтальные с поперечным омыванием продуктами сгорания. Наиболее широкое распространение получили исключительно вертикальные, так как их крепление получается более простым.

Надежность работы змеевиков зависит от способа подвода насыщенного пара и отвода перегретого пара из него. В зависимости от направления движения газов и пара различают три основные схемы включения пароперегревателя в газовый поток: прямоточную, противоточную и комбинированную. При прямоточном включении направление движения продуктов сгорания и пара по змеевикам совпадают, т.е. в одном направлении. В такой схеме наиболее высокая температура газов находится в области наиболее низкой температуры пара, а температурный напор минимален, что требует наиболее развитых поверхностей нагрева.

При противоточной схеме потоки продуктов сгорания и пара направляются навстречу друг другу. Температурный напор в этой схеме максимальный и необходимая поверхность теплообмена минимальна.

При комбинированном включении часть змеевиков включается в работу по прямоточной схеме, а часть – по противоточной. Данная схема является наиболее оптимальной по условиям надежности работы.

По тепловосприятию пароперегреватели делятся на конвективные и конвективно-радиационные. Конвективный пароперегреватель обычно устанавливают в горизонтальном соединительном газоходе между топкой и конвективной шахтой котла. В конвективно-радиационных пароперегревателях конвективная часть устанавливается в газоходе котла, а радиационная – в топке котла.

Температуру пара в котлах с давлением до 2,4 МПа не регулируют. При давлениях более 2,4 МПа для регулировки температуры используют редуционно-охладительные установки (РОУ) или промежуточные пароохладители. Установки РОУ устанавливают на выходе пара из пароперегревателя и регулирование осуществляется путем впрыска определенного количества конденсата в пар. Промежуточные пароохладители устанавливают в рассечку между ступенями пароперегревателя. Пароохладитель представляет собой теплообменник по трубкам которого циркулирует питательная вода, а пар поступает в межтрубное пространство. Регулирование температуры перегретого пара производится изменением количества питательной воды, пропускаемой по трубкам пароохладителя.

## 2. Тепловой баланс пароперегревателя

В основу теплового баланса пароперегревателя положено равенство количества тепла, переданного дымовыми газами  $Q_{д.г.}$  и воспринятого паром через поверхность пароперегревателя  $Q_{н.п.}$ , т. е.

$$Q_{д.г.} = Q_{н.п.} \text{ кДж/м}^3 \quad (1)$$

В свою очередь:

$$Q_{д.г.} = \varphi \cdot (h'_{д.г.} - h''_{д.г.} + \Delta\alpha \cdot h_{np}^0), \text{ кДж/м}^3; \quad (2)$$

$$Q_{н.п.} = \frac{D_{н.п.} \cdot [(h'_{н.п.} - h') + (1-x) \cdot r]}{B_{д.}}, \text{ кДж/м}^3. \quad (3)$$

В данные уравнения вошли следующие величины:

$$\varphi - \text{коэффициент сохранения тепла, } \varphi = 1 - \frac{q_5}{\eta_{к.а.}^{пр} + q_5}; \quad (4)$$

$h'_{д.з.}, h''_{д.з.}$  – энтальпии дымовых газов на входе и выходе из пароперегревателя, кДж/м<sup>3</sup>;

$h_{н.р.}^0$  – энтальпия присасываемого воздуха, принимается при температуре  $t_{х.в.} = 30$  °С.

$$h_{н.р.}^0 = V_0 \cdot C_{\epsilon} \cdot t_{х.в.}, \text{ кДж/м}^3, \quad (5)$$

$C_{\epsilon}$  – объемная изобарная теплоемкость воздуха, при  $t_{х.в.} = 30$  °С, принимаем  $C_{\epsilon}' = 1,00$  кДж/м<sup>3</sup>;

$\Delta\alpha$  – приращение коэффициента избытка воздуха в пароперегревателе, принимаем  $\Delta\alpha = 0,05$ ;

$D_{н.н.}$  – паропроизводительность котлоагрегата, кг/ч;

$h_{н.н.}$  – энтальпия перегретого пара, кДж/кг;

$h$  – энтальпия насыщенного пара при давлении в котле, кДж/кг;

$x$  – степень сухости насыщенного пара в пароперегревателе,  
 $x=0,97 \div 0,98$ .

$r$  – скрытая теплота парообразования, принимается по таблицам водяного пара при давлении в котле, кДж/кг;

$B_{\delta}$  – действительный расход топлива, м<sup>3</sup>/ч.

Тепловой баланс пароперегревателя можно дополнить уравнением теплопередачи, которое можно записать в следующем виде:

$$K_{н.н.} = \frac{Q_{н.н.} \cdot B_{\delta}}{3,6 \cdot F_{н.н.} \cdot \Delta t_{cp}}, \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}, \quad (6)$$

где  $K_{н.н.}$  – коэффициент теплопередачи;

$\Delta t_{cp}$  – среднелогарифмический температурный напор в пароперегревателе,

$$\Delta t_{cp.} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{м.}}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{м.}}}, \text{ } ^\circ\text{С}, \quad (7)$$

где  $\Delta t_{\delta}$  и  $\Delta t_{м.}$  – соответственно большая и меньшая разность температур между греющим (дымовыми газами) и нагреваемым (пар) теплоносителями.

### 3. Порядок выполнения и обработки опытных данных

Для выполнения лабораторной работы необходимы следующие конструктивные характеристики пароперегревателя: общая поверхность нагрева  $F_{п.п.}$  ( $\text{м}^2$ ); количество параллельных змеевиков ( $Z$ ); размеры газохода (высота ( $в$ , м), ширина ( $а$ , м)); наружный ( $d_n$ , м) и внутренний ( $d_{вн}$ , м) диаметры труб; число труб по ходу газохода  $n$ ; поперечный  $S_1$  и продольный шаг  $S_2$ .

Таблица 1

#### Характеристика пароперегревателя

$F_{п.п.}$	$Z$	$а$	$в$	$d_n$	$d_{вн}$	$n$	$S_1$	$S_2$	Направление движения газа и пара
$\text{м}^2$	шт.	м	м	м	м	шт.	м	м	

Расчет осуществляется в следующей последовательности:

1) устанавливаются основные параметры работы котлоагрегата и пароперегревателя со щита управления и заносятся в таблицу 2.

Таблица 2

#### Опытные параметры работы пароперегревателя

$D_{п.п.}$ , кг/ч	Температура дымовых газов в пароперегревателе, °С		Температура перегретого пара, $t_{п.п.}$ , °С	$V_d$ , $\text{м}^3/\text{ч}$	Давление пара в котле, $P_{к.а.}$ , МПа
	на входе $t'_{д.г.}$	на выходе $t''_{д.г.}$			

2) определяется величина  $\varphi$  по известной величине  $q_5$ , определенной в лабораторной работе № 2.

3) по опытной температуре  $t'_{д.г.}$  с помощью предварительно построенной  $ht$ -диаграммы дымовых газов определяется энтальпия  $h'_{д.г.}$ ;

4) определяется энтальпия присасываемого воздуха по уравнению (5), при этом  $V_0$  определяется исходя из элементарного состава топлива на основании уравнений, рассмотренных в ранее изученном курсе “Топливо и теории процессов горения”;

5) по  $hs$ -диаграмме или таблицам водяного пара определяются его энтальпии  $h_{п.п.}$  и  $h'$ , а также величина  $r$ ;



6) из формул (1), (2) и (3) определяется энтальпия дымовых газов на выходе из пароперегревателя  $h''_{\text{д.г.}}$  и по  $ht$ -диаграмме дымовых газов определяется их температура после пароперегревателя  $t''_{\text{д.г.}}$ ;

7) по имеющимся температурам строится график изменения температур теплоносителей в пароперегревателе (рис.1) и определяются величины  $\Delta t_{\text{б}}$  и  $\Delta t_{\text{м}}$  и величина  $\Delta t_{\text{ср}}$  из уравнения (7).

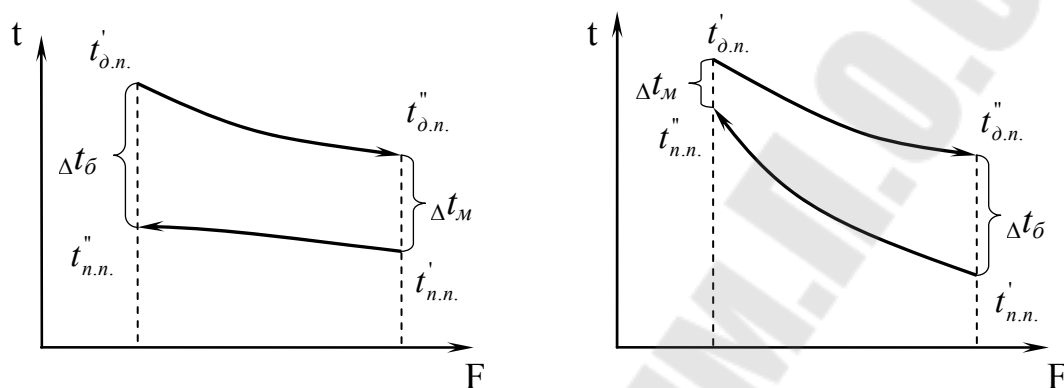


Рис. 1. Изменение температур в пароперегревателе

8) с помощью уравнения (6) определяется величина коэффициента теплопередачи. При этом величина  $h'_{\text{д.г.}}$  рассчитывается по температуре дымовых газов  $t'_{\text{д.г.}}$ , полученной в результате расчетов и по опытному значению, взятому из таблицы 2.

Таблица 3.

### Результаты расчетов

Производительность котла, кг/ч	Температура дымовых газов на выходе из пароперегревателя, °С		Коэффициент теплопередачи пароперегревателя, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	
	опытная	расчетная	опытный	расчетный

### Контрольные вопросы

1. Дать краткую теплотехническую характеристику пароперегревателя.
2. На какие типы пароперегреватели делятся по конструкции и по тепловосприятию?
3. Назовите способы регулировки температуры пара.

4. Какие существуют схемы включения пароперегревателя в газовый поток?

5. Произвести анализ основных величин, составляющих уравнения теплового баланса пароперегревателя.

6. Объяснить имеющиеся расхождения опытных и расчетных величин теплового баланса пароперегревателя.

## Лабораторная работа № 4

### Испытание экономайзера

Цель работы: изучить конструкцию экономайзера котлоагрегата и определить его коэффициент теплопередачи.

#### 1. Общие сведения

В экономайзере питательная вода перед подачей в котел подогревается дымовыми газами за счет использования теплоты продуктов сгорания топлива. Наряду с предварительным подогревом возможно частичное испарение питательной воды, поступающей в барабан котла. В зависимости от температуры, до которой ведется подогрев воды, экономайзеры подразделяют на два типа – некипящие и кипящие. В некипящих экономайзерах по условиям надежности их работы подогрев воды ведут до температуры на  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  ниже температуры насыщенного пара в паровом котле или температуры кипения воды при имеющемся рабочем давлении в водогрейном котле. В кипящих экономайзерах происходит не только подогрев воды, но и частичное (до 15 %) ее испарение.

Различают экономайзеры: групповые, если они установлены на группу котлов или на все котлы котельной, индивидуальные, если они установлены у каждого котла и входят в состав котлоагрегата. Наибольшее предпочтение отдается индивидуальным экономайзерам, т.к. их работа в большей мере соответствует режиму работы котла.

По материалу конструкции бывают чугунные и стальные.

Чугунные экономайзеры по принципу работы относятся только к не кипящему типу, а стальные – могут быть как кипящего, так и некипящего типов.

Чугунными экономайзерами оборудуются паровые котлы с рабочим давлением до  $24\text{ кгс/см}^2$ . Паровые котлы с рабочим давлением свыше  $24\text{ кгс/см}^2$  оборудуются стальными экономайзерами.

Чугунные экономайзеры собираются из ребристых чугунных труб, соединяемых при помощи поворотных колен с фланцами, называемых калачами.

Стальные экономайзеры изготавливают в виде змеевиков из труб диаметром  $28\div 38\text{ мм}$ , концы которых привариваются к коллекторам.

На рис. 1 представлена схема стального экономайзера, установленного в газоходе котла и состоящего из двух ступеней. Между первой и второй ступенями расположена первая ступень воздухоподогревателя.

Питательная вода под давлением поступает в нижний коллектор экономайзера и последовательно проходит снизу вверх по всем змеевикам и выходит через верхний коллектор, направляясь в котел. Продукты сгорания проходят через экономайзер сверху вниз, между его трубами.

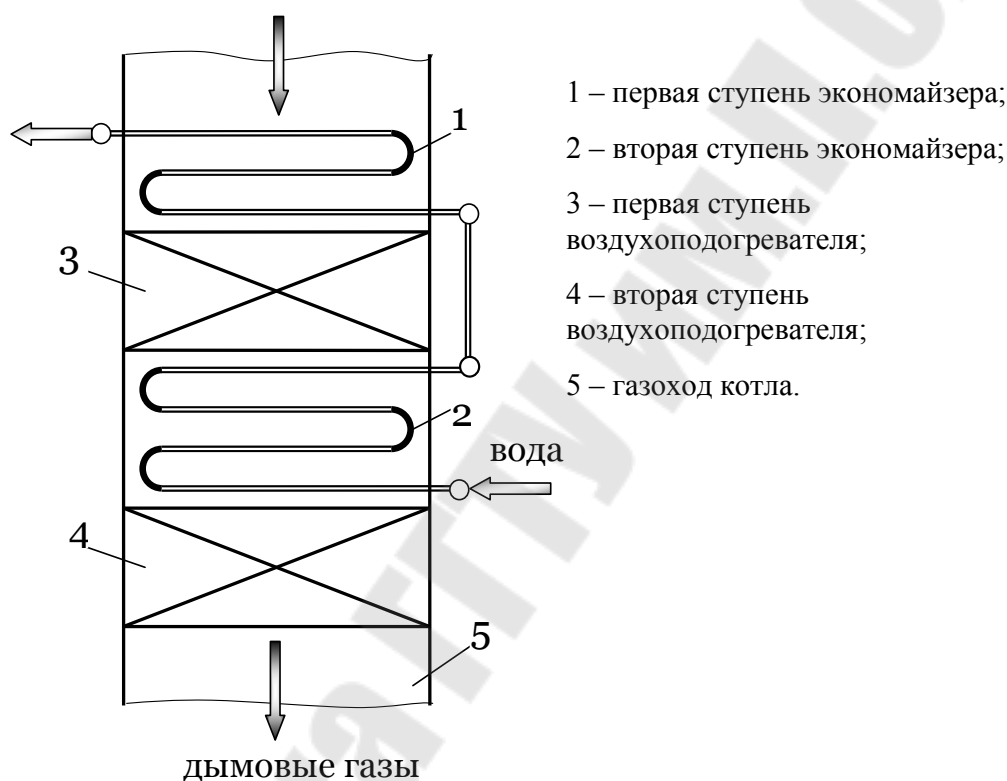


Рис. 1. Схема расположения экономайзера и воздухоподогревателя в газоходе котла

## 2. Тепловой баланс экономайзера

Для выполнения лабораторной работы необходимо воспользоваться тремя уравнениями, устанавливающими количество тепла, участвующее в процессе теплопередачи в экономайзере. Эти уравнения описаны в лабораторной работе №3 и для экономайзера записываются в следующем виде:

$$Q_{\text{эк}} = \frac{F_{\text{эк}} \cdot K_{\text{эк}} \cdot \Delta t_{\text{ср}}}{B_{\text{д}}}, \text{ кДж/м}^3; \quad (1)$$

$$Q_{\text{ЭК}} = \varphi \cdot (h'_{\text{ЭК}} - h''_{\text{ЭК}} - \Delta\alpha \cdot h_{\text{пр}}^0), \text{ кДж/м}^3; \quad (2)$$

$$Q_{\text{ЭК}} = \frac{G_{\text{н.в.}} \cdot C_{\text{в}} (t'' - t')}{B_{\text{д}}}, \text{ кДж/м}^3, \quad (3)$$

где  $h'_{\text{ЭК}}$ ,  $h''_{\text{ЭК}}$  – энтальпии газов на входе и выходе из экономайзера, кДж/м<sup>3</sup>;

$t'$  и  $t''$  – температуры воды на входе и выходе из экономайзера,

$t' = t_{\text{н.в.}}$ , °С;

$C_{\text{в}}$  – теплоемкость воды, принимаем  $C_{\text{в}} = 4,19$  кДж/(кг·К);

$G_{\text{н.в.}}$  – расход питательной воды, кг/ч;

$F_{\text{ЭК}}$  – площадь поверхности экономайзера,  $F_{\text{ЭК}} = F'_{\text{э}} + F''_{\text{э}}$ , м<sup>2</sup>.

### 3. Порядок выполнения работы и обработки опытных данных

Таблица 1

#### Основные конструктивные характеристики экономайзера.

Поверхность нагрева первой ступени, $F'_{\text{э}}$ , м <sup>2</sup>	Поверхность нагрева второй ступени, $F''_{\text{э}}$ , м <sup>2</sup>	Диаметры труб		Направление движения воды и дымовых газов
		наружный, $d_{\text{н.}}$ , мм	внутренний, $d_{\text{вн.}}$ , мм	

- 1) со щита управления котлоагрегата снимаются основные параметры его работы и заносятся в таблицу 2.

Таблица 2

#### Опытные параметры работы котла и экономайзера

Действительный расход топлива, $B_{\text{д}}$ , кг/ч	Расход питательной воды $G_{\text{н.в.}}$ , кг/ч	Температура питательной воды на входе в экономайзер $t_{\text{н.в.}}$ , °С	Температуры дымовых газов, °С			
			первая ступень		вторая ступень	
			на входе $t_1$	на выходе $t_2$	на входе $t_3$	на выходе $t_4$

2) согласно уравнению (2) по известным температурам дымовых газов определяются величины  $Q'_{эк}$  и  $Q''_{эк}$  - тепло, переданное в первую и во вторую ступени экономайзера;

3) определяется полное количество тепла, передаваемое дымовыми газами подогреваемой воде из соотношения:  $Q_{эк} = Q'_{эк} + Q''_{эк}$ ;

4) с помощью уравнения (3) определяется температура воды на выходе из экономайзера  $t''$ ;

5) по известным температурам дымовых газов и воды определяется средний температурный напор  $\Delta t_{cp}$  по методике, приведенной в лабораторной работе №3;

6) в соответствии с уравнением (1) определяется искомая величина коэффициента теплопередачи

$$K_{эк} = \frac{Q_{эк} \cdot B_d}{3,6 \cdot F_{эк} \cdot \Delta t_{cp}}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К});$$

7) результаты расчетов сводятся в таблицу 3.

Таблица 3

#### Результаты расчетов.

Температура воды, °С		Средний температурный напор, °С	Кол-во тепла, передаваемое в экономайзер, кДж/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплопередачи экономайзера, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)
на входе	на выходе			

#### Контрольные вопросы

1. Привести краткую характеристику экономайзера.
2. На какие типы делятся экономайзеры?
3. Чем отличаются чугунные экономайзеры от стальных?
4. Проанализировать величины, входящие в уравнения (1), (2), (3).
5. Установить возможные варианты увеличения коэффициента теплопередачи.

## Лабораторная работа № 5

### Процессы, протекающие в разожженном котле

Цель работы: изучить процессы, протекающие в разожженном котле.

#### Теоретическая часть

Эксплуатация стальных прямоточных водогрейных и комбинированных пароводогрейных котлов имеет свои особенности, обусловленные их конструкцией и режимом работы. Основной особенностью водогрейных котлов является работа их при постоянном расходе сетевой воды и включении непосредственно в тепловую сеть. Основной особенностью комбинированных пароводогрейных котлов является необходимость регулирования паровой и водогрейной нагрузок, а также наличие двух различных циркуляционных контуров: одного для выработки перегретой воды, другого для выработки пара.

Надежность и долговечность работы водогрейных котлов зависит главным образом от условий циркуляции воды и стойкости поверхностей нагрева к коррозии.

В циркуляционном контуре водогрейного котла недопустимо закипание воды, так как это приводит к гидравлическим ударам и может вывести котел из строя. Опасно не только общее закипание воды в отдельных обогреваемых трубах, но и появление поверхностного кипения. Под поверхностным кипением понимают образование пузырьков пара на внутренней поверхности труб водогрейного котла при средней температуре воды, меньшей температуры кипения. Образование паровых пузырей на стенках трубы возможно только в случае достижения стенкой температур, превышающих температуру насыщения. Во избежание поверхностного кипения необходим некоторый недогрев воды до температуры насыщения при давлении, равном давлению на выходе из котла.

Для предотвращения поверхностного кипения в трубах водогрейного котла необходимо поддержание определенных скоростей воды при недогреве ее до кипения на 30—35 °С в условиях максимальной нагрузки.

Эксплуатация водогрейных котлов показала, что в трубах опускных панелей при определенных скоростях и тепловых нагрузках происходит поверхностное кипение. Это приводит к появлению гид-

равлических ударов и отложению накипи на внутренних стенках труб. На процесс поверхностного кипения оказывает влияние удельная нагрузка поверхности нагрева, а также гидравлические и тепловые неравномерности. Увеличение удельной тепловой нагрузки труб и высоты экранной панели требует повышения минимальной допустимой скорости воды в трубах. Неравномерный обогрев труб продуктами сгорания способствует увеличению гидравлической неравномерности и вынуждает повышать минимальные допустимые скорости воды в трубах.

Во избежание гидравлических ударов при эксплуатации водогрейных котлов недопустимы тепловые перекосы в топке. Отсутствие тепловых перекосов достигается при работе всех установленных горелок с одинаковой тепловой мощностью. Регулирование форсировки топки следует производить одинаковым изменением тепловой мощности всех работающих горелок.

Водогрейные котлы в течение большей части отопительного сезона эксплуатируются с низкими нагрузками при низких температурах обогреваемой среды и останавливаются на длительный срок в летнее время. Эти особенности работы котлов способствуют наружной и внутренней коррозии поверхностей нагрева. У водогрейных котлов наблюдаются следующие виды коррозии наружных поверхностей:

- низкотемпературная сернокислотная,
- местная под неудаляющимися золовыми отложениями,
- низкотемпературная кислородная, стояночная.

Сернокислотная низкотемпературная коррозия вызывает износ труб экранных и конвективных поверхностей нагрева. Экранные трубы изнашиваются со стороны, обращенной в топку, а конвективные — со всех сторон. Толщина стенок труб уменьшается довольно равномерно. Определить износ по внешним признакам трудно. Трубы, подвергающиеся износу, имеют ровную, гладкую, как бы вороненую поверхность.

Наиболее эффективным способом борьбы с низкотемпературной сернокислотной и кислородной коррозией является повышение температуры стенки труб путем увеличения температуры воды на входе в водогрейный котел. При кратковременной работе на мазуте (в пределах 1100 ч в год) рекомендуется поддерживать температуру воды на входе в котел не менее 70 °С, а при сжигании только сернистых мазутов — около 90 °С. При сжигании природного газа или других топлив,



не содержащих серы, температура воды на входе в котел должна быть выше точки росы, т.е. не менее 60 °С. Поддержание указанных температур на входе в котел достигается смешением выходящей из котла воды с обратной сетевой водой, т.е. рециркуляцией горячей воды.

### Практическая часть

1. Включить питание стенда.
2. Запустить ПО NTC-14.02.exe на ПК.
3. Настроить параметры топлива и теплоносителя в окне [Настройки].
4. Настроить (если требуется) параметры работы насосов.
5. Настроить параметры нагрева теплоносителя в настройках котла.
6. Открыть окно котла.
7. Выбрать тип топлива – [Газ].
8. Открыть краны В1, В4, В5, краны В2, В3 закрыть.
9. Запустить котел.
10. Изменяя уровень мощности котла от 20 до 100% с шагом 10% или 20%, снять для каждого значения мощности показания индикаторов расхода газа (FГАЗА), температуры дымовых газов (ТДГ) и концентрации СО в дымовых газах (СО%). Данные занести в таблицу 1.
11. Остановить котел нажав кнопку [Стоп] или [Остановка].
12. Рассчитать по (1) и (2) мощность котла Р и величину КПД для каждого столбца таблицы 1. Заполнить таблицу 1.
13. При необходимости построить графики зависимости параметров FГАЗА, ТДГ, СО%, КПД от величины Р%.

Расчет мощности котла [кВт]:

$$P = P_{\%} \cdot P_{ном} , \quad (1)$$

где  $P_{ном}$  – номинальная мощность котла.

Расчет коэффициента полезного действия, %:

$$КПД = \frac{P}{F_{газа} \cdot q_{газа}} , \quad (2)$$

где  $q_{газа}$  – удельная теплота сгорания газа (см. в настройках ПО).

Таблица 1

## Режимная карта

Параметры		Значение величины					
		1	2	3	4	5	...
P%	%						
P	кВт						
F <sub>газа</sub>	м <sup>3</sup> /ч						
T <sub>дг</sub>	°С						
СО%	мг/м <sup>3</sup>						
КПД	-						

14. Запустить котел.

15. Для выбранного уровня мощности (P%), изменяя коэффициент избытка воздуха (alpha) от 1 до 1,5 с шагом 0,1 (или другим), снять для каждого значения alpha показания индикаторов расхода газа (F<sub>газа</sub>), температуры дымовых газов (T<sub>дг</sub>) и концентрации СО в дымовых газах (СО%). Данные занести в таблицу 2.

16. Остановить котел нажав кнопку [Стоп] или [Остановка].

17. Рассчитать по (2) величину КПД для каждого столбца таблицы 2. Заполнить таблицу 2.

18. Если необходимо, повторить пункты 14...17 для другой величины мощности (P%). Данные занести в таблицу, аналогичную таблице 2.

Таблица 2

## Влияние коэффициента избытка воздуха

Параметры		Значение величины					
		1	2	3	4	5	...
P%	%						
P	кВт						
alpha	-						
F <sub>газа</sub>	м <sup>3</sup> /ч						
T <sub>дг</sub>	°С						
СО%	мг/м <sup>3</sup>						
КПД	-						

19. При необходимости повторить опыты для другого вида топлива (мазута). 20. Выключить питание стенда.

## Контрольные вопросы

1. От чего зависит надежность и долговечность водогрейных котлов?
2. Основной особенностью комбинированных пароводогрейных котлов является?
3. Что недопустимо в эксплуатации водогрейных котлов?
4. Какие виды коррозии наружных поверхностей наблюдаются у водогрейных котлов?
5. Что необходимо для предотвращения поверхностного кипения в трубах водогрейного котла ?

## Лабораторная работа № 6

### Определение мощности котла.

Цель работы: изучить основные виды тепловой мощности котла.

#### Теоретическая часть

Тепловая мощность котельной представляет собой суммарную теплопроизводительность котельной по всем видам теплоносителей, отпускаемых с котельной через тепловую сеть внешним потребителям.

Различают установленную, рабочую и резервную тепловые мощности.

Установленная тепловая мощность - сумма тепловых мощностей всех установленных в котельной котлов при работе их в номинальном (паспортном) режиме.

Рабочая тепловая мощность - тепловая мощность котельной при работе ее с фактической тепловой нагрузкой в данный момент времени.

В резервной тепловой мощности различают тепловую мощность явного и скрытого резерва.

Тепловая мощность явного резерва - сумма тепловых мощностей установленных в котельной котлов, находящихся в холодном состоянии.

Тепловая мощность скрытого резерва - разность между установленной и рабочей тепловыми мощностями.

#### Практическая часть

1. Включить питание стенда.
2. Запустить ПО NTC-14.02.exe на ПК.
3. Настроить параметры топлива и теплоносителя в окне [Настройки].
4. Настроить (если требуется) параметры работы насосов.
5. Настроить параметры нагрева теплоносителя в настройках котла.
6. Открыть окно котла.
7. Выбрать тип топлива – [Газ].
8. Открыть краны В1, В4, В5, краны В2, В3 закрыть.

9. Установить переключатель скорости на корпусе циркуляционного насоса в положение I.

10. Запустить котел.

11. Изменяя уровень мощности котла от 20 до 100% с шагом 20%, снять для каждого значения мощности показания индикатора мощности котла и величину расхода теплоносителя. Данные занести в таблицу 1. Каждое измерение производить после выхода величины тепловой мощности в установившийся режим.

12. Остановить котел нажав кнопку [Стоп] или [Остановка].

13. Для каждой строки таблицы 1 определить разность  $T_2 - T_1$ . Заполнить таблицу 1.

14. Повторить если требуется опыт для другой величины расхода теплоносителя. Расход теплоносителя регулировать краном В5 и переключением скорости насоса.

Таблица 1

Мощность котла	Тепловая мощность котла	Расход теплоносителя	Тепловой напор
$P_{\%}$	$P_k$	$F$	$(T_2 - T_1)$
-	кВт	л/мин	$^{\circ}\text{C}$

Тепловая мощность котла рассчитывается в ПО по формуле (3) и отображается на индикаторе около котла (рисунок 1).

Расчет тепловой мощности котла [кВт]:

$$P_k = \frac{\Delta T \cdot F \cdot \rho \cdot c}{60} = \frac{1}{60} (T_2 - T_1) \cdot F \cdot \rho \cdot c, \quad (3)$$

где  $F$  [л/мин] – расход теплоносителя;

$T_1$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] – температура теплоносителя перед котлом;

$T_2$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] – температура теплоносителя после котла;

$\rho$  [кг/л] – плотность теплоносителя;

$c$  [кДж/(кг·К)] – теплоемкость воды.

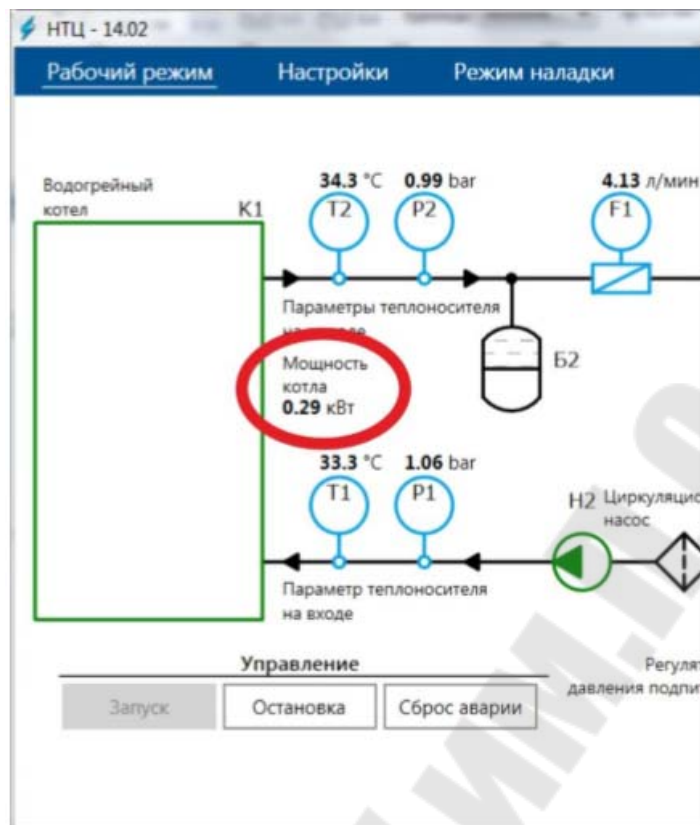


Рис. 1

15. Выключить питание стенда.

### Контрольные вопросы

1. Что собой представляет тепловая мощность котельной?
2. На какие виды подразделяется тепловая мощность?
3. На какие виды подразделяется резервная тепловая мощность?

## Лабораторная работа № 7

### Определение тепловой нагрузки.

Цель работы: определение составляющих величин тепловой нагрузки.

#### Теоретическая часть

Тепловая нагрузка котельной- потребность в тепле (паре, горячей воде), представляющая собой сумму расходов отдельными потребителями и на собственные нужды, транспортные потери. Различают расчётную нагрузку, по которой определяют производительность и количество котлов в котельной, и текущую нагрузку, соответствующую данному периоду времени, по которой определяют режимы работы котлов.

Тепловая нагрузка котельной по характеру распределения во времени классифицируется на сезонную и круглогодичную. Сезонная (расходы теплоты на отопление и вентиляцию) зависит в основном от климатических условий и имеет сравнительно постоянный суточный и переменный годовой график нагрузки. Круглогодичная (расходы теплоты на горячее водоснабжение и технологические нужды), практически не зависит от температуры наружного воздуха и имеет очень неравномерный суточный и сравнительно постоянный годовой график потребления теплоты.

Расчётную тепловую нагрузку котельной отопительно-производственного типа определяют отдельно для холодного и тёплого периодов года. В зимнее время она складывается из максимальных расходов теплоты на все виды теплоснабжения:

$$\Phi_p = k_3 (\sum \Phi_{от} + \sum \Phi_v + \sum \Phi_{г.в} + \sum \Phi_m), \quad (1)$$

где  $\Phi_{от}$ ,  $\Phi_v$ ,  $\Phi_{г.в}$ ,  $\Phi_m$  – максимальные потоки теплоты, расходуемой всеми потребителями системы теплоснабжения соответственно на отопление, вентиляцию, горячее водоснабжение и технологические нужды, Вт;

$k_3$  – коэффициент запаса, учитывающий потери теплоты в тепловых сетях, расход теплоты на собственные нужды котельной и резерв на возможное увеличение теплоснабжения хозяйством,  $k_3 = 1,2$ .

В летнее время нагрузку котельной составляют максимальные расходы теплоты на технологические нужды и горячее водоснабжение.

$$\Phi_{p.l} = k_z (\sum \Phi_{z.g} + \sum \Phi_m), \quad (2)$$

Суммарные расходы теплоты на все виды теплопотребления определяют по приближенным формулам.

### Практическая часть

1. Включить питание стенда.
2. Запустить ПО NTC-14.02.exe на ПК.
3. Настроить параметры топлива и теплоносителя в окне [Настройки].
4. Настроить (если требуется) параметры работы насосов.
5. Настроить параметры нагрева теплоносителя в настройках котла.
6. Открыть окно котла.
7. Выбрать тип топлива – [Газ].
8. Открыть краны В1, В4, В5, краны В2, В3 закрыть.
9. Установить переключатель скорости на корпусе циркуляционного насоса в положение I.
10. Запустить котел.
11. Изменяя настройку температуры T2 теплоносителя на выходе котла, снять для каждого значения температуры показания индикатора мощности нагрузки и значение окружающей температуры. Данные занести в таблицу 1.
12. Остановить котел нажав кнопку [Стоп] или [Остановка].
13. Для каждой строки таблицы 1 определить разность T3-T5 и удельную мощность по (3). Заполнить таблицу 1.
14. Повторить если требуется опыт для другой величины расхода теплоносителя.

Таблица 1

#### Характеристики нагрузки

Температура теплоносителя	Окружающая температура	Мощность нагрузки	Разность температур	Удельная мощность нагрузки
T2	T5	$P_n$	(T3-T5)	$P_{n, уд}$
°C	°C	кВт	°C	кВт/°C
30				
40				
50				



Расчет удельной мощности нагрузки [кВт/°С]:

$$P_{н\_уд} = \frac{P_n}{T_3 - T_5}, \quad (3)$$

Тепловая мощность нагрузки рассчитывается по формуле (4) и отображается на индикаторе около нагрузки (рисунок 1).

Расчет тепловой мощности нагрузки [кВт]:

$$P_k = \frac{\Delta T \cdot F \cdot \rho \cdot c}{60} = \frac{1}{60} (T_2 - T_1) \cdot F \cdot \rho \cdot c, \quad (4)$$

где  $F$  [л/мин] – расход теплоносителя;

$T_3$  [°С] – температура теплоносителя перед нагрузкой;

$T_4$  [°С] – температура теплоносителя после нагрузки;

$\rho$  [кг/л] – плотность теплоносителя;

$c$  [кДж/(кг·К)] – теплоемкость воды.

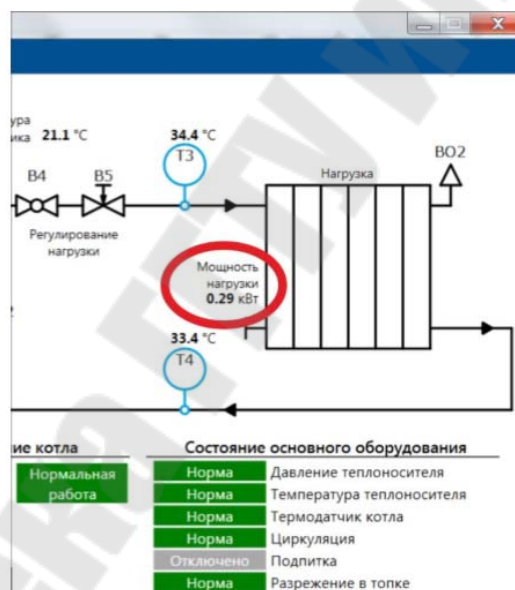


Рис. 1

15. Выключить питание стенда.

### Контрольные вопросы

1. Что такое тепловая нагрузка котельной?
2. На какие виды классифицируется тепловая нагрузка по характеру распределения во времени?
3. От чего зависит расход теплоты на отопление и вентиляцию?
4. Что представляет собой круглогодичная тепловая нагрузка?

## Литература

1. Сидельский Л.Н., Юренев В.Н. Котельные установки промышленных предприятий. М. Энергоиздат, 1988.
2. Липов Ю.М. и др. Компоновка и тепловой расчет парового котла.
3. Зах Р.Г. Котельные установки. М. Энергия, 1968.
4. Безгрешнов А.Н. и др. Расчет паровых котлов в примерах и задачах. М.: Энергоиздат, 1991.
5. Роддатис К.Ф. Котельные установки. М. : Энергия, 1977.

## Содержание

Лабораторная работа № 1 .....	3
Лабораторная работа № 2 .....	7
Лабораторная работа № 3 .....	13
Лабораторная работа № 4 .....	19
Лабораторная работа № 5 .....	23
Лабораторная работа № 6 .....	28
Лабораторная работа № 7 .....	31
Литература .....	34

**Вальченко Николай Адамович**

**КОТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

**Практикум  
по выполнению лабораторных работ  
для студентов специальностей  
1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика»  
и 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация  
энергооборудования организаций»  
дневной и заочной форм обучения**

Подписано к размещению в электронную библиотеку  
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного  
учебно-методического документа 23.02.22.

Пер. № 7Е.  
<http://www.gstu.by>