

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
“ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ”

КАФЕДРА «ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕПЛОФИЗИКА»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
для практических занятий по дисциплине  
"Вторичные энергоресурсы и энергокомбинирование"  
(для студентов очной и заочной форм обучения  
направления подготовки 22.04.02 «Металлургия» магистерской программы  
«Промышленная теплотехника»)

Донецк-2018

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
“ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ”

КАФЕДРА «ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕПЛОФИЗИКА»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
для практических занятий по дисциплине  
" Вторичные энергоресурсы и энергокомбинирование "  
(для студентов очной и заочной форм обучения  
направления подготовки 22.04.02 «Металлургия» магистерской программы  
«Промышленная теплотехника»)

РАССМОТРЕНО  
на заседании кафедры  
технической теплофизики  
Протокол №12 от 31.05.2018 г.

УДК 669: 532.516.13

Рецензент:

Гридин Сергей Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики ГОУВПО «ДОННТУ».

Составители:

Курбатов Юрий Леонидович – профессор кафедры технической теплофизики ГОУВПО «ДОННТУ»;

Олешкевич Татьяна Геннадиевна – аспирант кафедры технической теплофизики ГОУВПО «ДОННТУ»;

Гнитиёв Павел Александрович – доцент кафедры технической теплофизики ГОУВПО «ДОННТУ».

Методические указания для практических занятий по дисциплине " Вторичные энергоресурсы и энергокомбинирование " [Электронный ресурс] для студентов для студентов очной и заочной форм обучения направления подготовки 22.04.02 «Металлургия» магистерской программы «Промышленная теплотехника» / ГОУВПО «ДОННТУ», Каф.технической теплофизики; сост. Ю.Л. Курбатов, Т.Г. Олешкевич, П.А. Гнитиёв – Донецк: ДОННТУ, 2018. – Систем. требования Acrobat Reader.

Методические рекомендации содержат теоретические положения по вопросам использования вторичных энергоресурсов в методической печи, расчета сухого тушения кокса, и экономическая эффективность применения тепловой изоляции паропровода. Также приведены методики и порядок выполнения расчетов. Методические указания помогут студентам углубить теоретические знания и получить необходимые практические навыки.

УДК 669: 532.516.13

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| 1. РАСЧЕТ ВЭР МЕТОДИЧЕСКОЙ ПЕЧИ ..... | 4  |
| 2. СУХОЕ тушения кокса .....          | 11 |
| 3. РАСЧЕТ паропроводов .....          | 19 |
| ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК .....                 | 22 |

# 1. РАСЧЕТ ВЭР МЕТОДИЧЕСКОЙ ПЕЧИ

## Описание схемы ВЭР

схема использования ВЭР продуктов сгорания, идущих, приведена на рис.1. Методическая печь для нагрева слябов МНЛЗ перед прокаткой состоит из методической (не отапливаемой), сварочной с верхним и нижним отоплением и томильной с односторонним отоплением. Холодный сляб пороляганга подается к столу загрузки, откуда заталкивается толкателем в методическую зону печи. При этом сляб металла перемещается на ширину сляба, а последний (горячий) сляб выталкивается из печи и по склизу передается на рольганг прокатного состояния.

Движение греющих газов (продуктов сгорания топлива) и металла (слябов) нагреваемой происходит в противотоке. Идущие из методической зоны печи газы при температуре 800-1000 °С являются вторичными энергетическими ресурсами, которые и используются по схеме на рис.1.

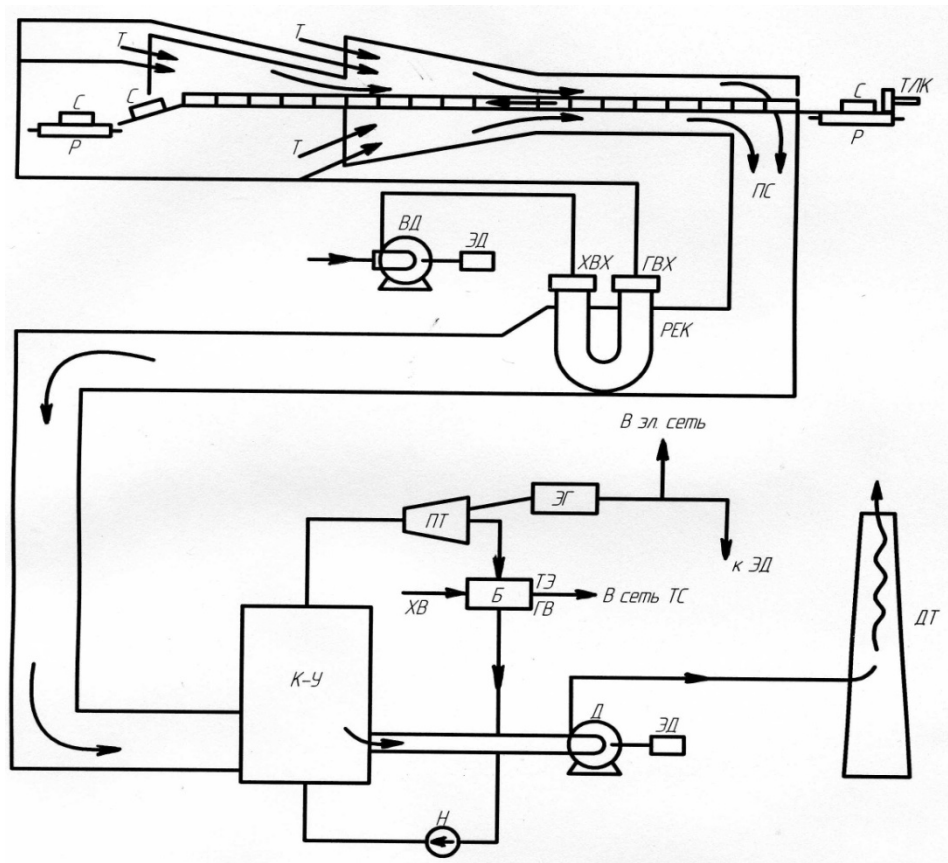
В методической печи с нижним отоплением сляб располагается на охлаждаемых подовых трубах и если применяется испарительное охлаждение, то используется ВЭР охлаждающей среды для получения пара. Таким образом, в печи используется два типа ВЭР газов, идущие и испарительное охлаждения.

ВЭР газов, идущие используются в два этапа: в рекуператоре и котлоутилизаторах. На I этапе за счет ВЭР в рекуператоре холодный воздух, подаваемый вентилятором, подогревается, а горячий воздух подается к горелкам томильной зоны печи и к горелкам верхней и нижней сварочных зон.

Газ (продукты сгорания), что идет, в рекуператоре охлаждаются до 500-700 °С. На II этапе за счет ВЭР в котле-утилизаторе производится пара энергетических параметров ( $p > 3,9$  МПа), используемых в паровой турбине с противодавлением. паровая турбина приводит в действие электрогенератор, а выработанная электроэнергия используется для привода нагнетателей

(вентилятора, дымососа, Насосов) и других потребностей. Остаток электроэнергии может быть товарным и передаваться в электрическую сеть. Отработанный пар при давлении выше атмосферного и температуре более 100 °С конденсируется и охлаждается в бойлере, а теплота конденсации и охлаждения используется для нагрева сетевой воды системы теплоснабжения. часть тепловой энергии горячей воды может быть товарной.

после котла-утилизатора газы (продукты сгорания) охлаждены до температуры 120-200 °С поступают в дымосос, который преодолевает аэродинамические опоры на пути методической зоны печи, то есть все этапы использования ВЭР, и выбрасывает эти газы в атмосферу через дымовую трубу.



Т - топливо, С - сляб, ТЛК - толкатель, Р - рольганг, ПС - продукты сгорания отходящих РЭК - рекуператор, Хвх - холодный воздух, Гвх - горячий воздух, ИД - вентилятордутьевой, ЭД - электродвигатель, К-В - котел-утилизатор, Д - дымосос, ДТ - дымоход, ПТ - паровая турбина, Б - бойлер-конденсатор, Н - насос, ХВ - холодная вода, ГВ - горячая вода, ГЭ - тепловая энергия горячей воды, ТС - теплоснабжение, ЭГ - электрогенератор, ЭЭ - электрическая энергия.

Рисунок 1 -Схема использования теплоты продуктов сгорания (ВЭР) нагревательной методической печи

### Задание

1. Определить тепловую мощность ВЭР, теплоту продуктов сгорания топливной нагнетательной методической печи.
2. оценить степень использования ВЭР на отдельных этапах и в целом по схеме.
3. рассчитать объемы производства товарной электрической и тепловой энергии.

### Методика и последовательность расчета

1. Определение расхода топлива

$$V = \frac{M}{Q_H^p}, \frac{M^3}{c},$$

где M - тепловая мощность печи, МВт

$Q_H^p$  - теплота сгорания топлива,  $\frac{МДж}{M^3}$

2. расчет горения топлива - проводим по упрощенным (эмпирическим) формулам.

2.1 Теоретическое количество воздуха для естественно-доменной смеси газов  $Q_H^p < 12 \frac{МДж}{M^3}$ :

$$L_0 = 0,24 \cdot Q_H^p - 0,2, \frac{M^3}{M^3},$$

- действительное количество воздуха

$$L_d = \alpha \cdot L_0, \frac{M^3}{M^3},$$

- выход продуктов сгорания

$$V_d = 0,225 \cdot Q_H^p + 0,765 + (\alpha - 1) \cdot L_0, \frac{M^3}{M^3}.$$

2.2 Теоретическое количество воздуха для естественно-доменной смеси газов  $Q_H^p > 12 \frac{МДж}{M^3}$ :

$$L_0 = 0,26 \cdot Q_H^p - 0,25, \frac{M^3}{M^3},$$

- действительное количество воздуха

$$L_d = \alpha \cdot L_0, \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3},$$

- выход продуктов сгорания

$$V_d = 0,27 \cdot Q_H^p + 0,25 + (\alpha - 1) \cdot L_0, \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}.$$

2.3 Теоретическое количество воздуха для коксодоменной смеси газов

$$L_0 = 0,24 \cdot Q_H^p - 0,2, \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3},$$

- действительное количество воздуха

$$L_d = \alpha \cdot L_0, \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3},$$

- выход продуктов сгорания

$$V_d = 0,225 \cdot Q_H^p + 0,765 + (\alpha - 1) \cdot L_0, \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}.$$

3 Определение тепловой мощности продуктов сгорания, идущие из печи

$Q_{\text{ВЕР1}}$ :

$$Q_{\text{ВЕР1}} = B \cdot V_d \cdot C_d \cdot t_{\text{yx}}, \text{Вт}$$

Теплоемкость продуктов сгорания определяется интерполяцией по таблице 2. $C_d$

4. Расчет тепловой мощности ВЭР, использованных в рекуператоре на подогрев воздуха

$$Q_{\text{рек}} = B \cdot L_d \cdot C_v \cdot (t_{\text{ГВХ}} - t_{\text{ХВХ}}), \text{Вт}$$

где - температура воздуха до и после  $t_{\text{ХВХ}}$  та  $t_{\text{ГВХ}}$  рекуператора ° С.

$C_v$  - теплоемкость воздуха, Дж / (м<sup>3</sup>К) (таблица 2).

5. коэффициент внутреннего использования ВЭР (на первом этапе)

$$\eta_1 = \frac{Q_{\text{рек}}}{Q_{\text{ВЕР1}}}.$$

6. Определение тепловой мощности ВЭР перед котлом-утилизатором (на втором этапе использования)

$$Q_{\text{ВЕР2}} = (Q_{\text{ВЕР1}} - Q_{\text{рек}}) \cdot 0,98, \text{Вт}$$

где 0,98 - коэффициент, учитывающий тепловые потери на участке от печи к котлу-утилизатора.



7. Расчет температуры продуктов сгорания перед котлом-утилизатором  $t_{\text{ку-н}}$ .

$$Q_{\text{ВЕР2}} = B \cdot V_{\text{д}} \cdot C_{\text{д}} \cdot t_{\text{ку-н}}, \text{ Вт}$$

откуда

$$i_{\text{ку-н}} = C_{\text{д}} \cdot t_{\text{ку-н}} = \frac{Q_{\text{ВЕР2}}}{B \cdot V_{\text{д}}}$$

Зная по таблице 2 принимаем ориентировочно температуру продуктов сгорания перед котлом-утилизатором и теплоемкость продуктов сгорания. Зная и определяем температуру  $i_{\text{ку-н}} t_{\text{ку-н}} C_{\text{д}} i_{\text{ку-н}} C_{\text{д}} t_{\text{ку-н}}$

Если, делается следующее приближение.  $\frac{t'-t}{t} \cdot 100 > 2\%$

8. Тепловая мощность ВЭР, использованная в котле-утилизаторе

$$Q_{\text{КУ}} = B \cdot V_{\text{д}} \cdot (C_{\text{д.н.}} \cdot t_{\text{ку-н}} - C_{\text{д.к.}} \cdot t_{\text{ку-к}}) \cdot 0,98, \text{ Вт}$$

где - температура продуктов сгорания после К-У.  $t_{\text{ку-к}}$

9. Использование ВЭР в паровой турбине для выработки электроэнергии

$$Q_{\text{Е}} = \eta_{\text{пт}} \cdot Q_{\text{КУ}}, \text{ Вт}$$

10. Использование ВЭР в бойлере-конденсаторе для выработки тепловой энергии (теплоснабжение)

$$Q_{\text{Т}} = \eta_{\text{Б}} \cdot Q_{\text{КУ}}, \text{ Вт}$$

11. Коэффициент использования ВЭР на втором этапе

$$\eta_2 = \frac{Q_{\text{Е}} + Q_{\text{Т}}}{Q_{\text{ВЕР2}}}$$

12. Общий коэффициент использования ВЭР

$$\eta_{\text{ВЕР}} = \frac{Q_{\text{рек}} + Q_{\text{Е}} + Q_{\text{Т}}}{Q_{\text{ВЕР1}}}$$

13. Определение мощности вентилятора

$$N_{\text{В}} = \frac{B \cdot L_{\text{д}} \cdot P_{\text{В}}}{\eta_{\text{В}}} \cdot \frac{273 + t_{\text{хвх}}}{273}, \text{ Вт}$$

где давление вентилятора, Па,  $P_{\text{В}}$  –

$\eta_{\text{В}}$  – КПД вентилятора.

#### 14. Определение мощности дымососа

$$N_{\text{д}} = \frac{B \cdot V_{\text{д}} \cdot P_{\text{д}}}{\eta_{\text{д}}} \cdot \frac{273 + t_{\text{ку-к}}}{273}, \text{Вт}$$

где давление дымососа, Па,  $P_{\text{д}}$  –

$\eta_{\text{д}}$  – КПД дымососа.

15. Общая электрическая мощность тягодутьевых средств по сравнению с выработкой электроэнергии

$$N = N_{\text{В}} + N_{\text{д}}, \text{Вт}$$

сравниваем  $N \leq$  або  $\geq Q_{\text{Е}}$

Мощность товарной электроэнергии

$$Q_{\text{Е.ТОВ.}} = Q_{\text{Е}} - N, \text{Вт}$$

ВЫВОДЫ:

1. Сколько составляют ВЭР методической нагревательной печи?
2. Как используют ВЭР на первом этапе и на втором. Общий коэффициент использования ВЭР.
3. Использование ВЭР позволяет обеспечить электроэнергией электродвигатели тягодутьевых средств? Какая часть производимой электроэнергии может быть товарной?
4. Использование ВЭР для теплоснабжения дает возможность получить товарную тепловую энергию в виде горячей воды? Какой мощностью?
5. Почему использование ВЭР методической печи положительно в плане экологии?

Таблица 1 - Исходные данные

| Вариант | М, МВт | $Q_H^p$ , МДж / м <sup>3</sup> | $t_{yx}$ , °С | $t_{ку-к}$ , °С | $t_{ГВХ}$ , °С | $t_{ХВХ}$ , °С | $\eta_{пт}$ | $\eta_B$ | $P_B$ , мм.в.ст | $P_D$ , мм.в.ст |
|---------|--------|--------------------------------|---------------|-----------------|----------------|----------------|-------------|----------|-----------------|-----------------|
| 1       | 40     | 8,5                            | 1000          | 120             | 350            | 0              | 0,32        | 0,58     | 320             | 220             |
| 2       | 45     | 8,8                            | 990           | 130             | 360            | 5              | 0,33        | 0,57     | 300             | 200             |
| 3       | 50     | 9,0                            | 980           | 140             | 370            | 10             | 0,34        | 0,56     | 280             | 180             |
| 4       | 55     | 9,2                            | 970           | 150             | 370            | 15             | 0,35        | 0,55     | 270             | 170             |
| 5       | 60     | 9,4                            | 960           | 160             | 380            | 20             | 0,36        | 0,55     | 260             | 160             |
| 6       | 65     | 9,6                            | 950           | 180             | 380            | 20             | 0,37        | 0,55     | 270             | 170             |
| 7       | 70     | 9,8                            | 940           | 120             | 370            | 15             | 0,38        | 0,54     | 280             | 180             |
| 8       | 65     | 10,4                           | 920           | 130             | 370            | 10             | 0,37        | 0,54     | 290             | 190             |
| 9       | 60     | 10,6                           | 900           | 140             | 360            | 5              | 0,36        | 0,55     | 300             | 200             |
| 10      | 55     | 10,8                           | 880           | 150             | 360            | 0              | 0,35        | 0,55     | 310             | 210             |
| 11      | 50     | 11,0                           | 870           | 160             | 350            | 0              | 0,34        | 0,56     | 320             | 220             |
| 12      | 45     | 11,5                           | 860           | 170             | 350            | 5              | 0,33        | 0,57     | 330             | 230             |
| 13      | 40     | 11,7                           | 850           | 180             | 340            | 5              | 0,32        | 0,58     | 340             | 240             |
| 14      | 70     | 12,0                           | 840           | 120             | 340            | 10             | 0,32        | 0,58     | 350             | 250             |
| 15      | 65     | 12,2                           | 830           | 130             | 360            | 10             | 0,33        | 0,57     | 340             | 240             |
| 16      | 60     | 12,5                           | 820           | 140             | 360            | 15             | 0,34        | 0,55     | 330             | 230             |
| 17      | 55     | 8,8                            | 810           | 160             | 370            | 15             | 0,34        | 0,55     | 320             | 220             |
| 18      | 50     | 9,0                            | 800           | 170             | 370            | 20             | 0,33        | 0,55     | 310             | 210             |
| 19      | 45     | 9,2                            | 960           | 180             | 380            | 20             | 0,32        | 0,55     | 300             | 200             |
| 20      | 40     | 9,6                            | 940           | 140             | 380            | 0              | 0,33        | 0,54     | 300             | 210             |
| 21      | 40     | 10,0                           | 920           | 150             | 370            | 5              | 0,34        | 0,54     | 290             | 200             |
| 22      | 45     | 10,4                           | 900           | 160             | 370            | 10             | 0,35        | 0,55     | 290             | 190             |
| 23      | 45     | 10,8                           | 880           | 170             | 360            | 15             | 0,36        | 0,54     | 280             | 190             |
| 24      | 50     | 11,2                           | 1000          | 180             | 360            | 0              | 0,37        | 0,53     | 280             | 200             |
| 25      | 50     | 11,6                           | 980           | 170             | 350            | 5              | 0,38        | 0,53     | 320             | 220             |
| 26      | 55     | 12,0                           | 960           | 160             | 350            | 10             | 0,32        | 0,56     | 310             | 210             |
| 27      | 55     | 11,6                           | 940           | 160             | 360            | 15             | 0,33        | 0,57     | 300             | 190             |
| 28      | 60     | 11,0                           | 920           | 150             | 370            | 5              | 0,34        | 0,56     | 290             | 200             |
| 29      | 60     | 10,6                           | 900           | 150             | 370            | 10             | 0,35        | 0,55     | 280             | 190             |
| 30      | 65     | 10,0                           | 880           | 140             | 360            | 15             | 0,36        | 0,54     | 270             | 180             |
| 31      | 70     | 9,8                            | 940           | 120             | 370            | 15             | 0,38        | 0,54     | 280             | 180             |
| 32      | 45     | 11,5                           | 860           | 170             | 350            | 5              | 0,33        | 0,57     | 330             | 230             |
| 33      | 50     | 9,0                            | 800           | 170             | 370            | 20             | 0,33        | 0,55     | 310             | 210             |
| 34      | 50     | 11,2                           | 1000          | 180             | 360            | 0              | 0,37        | 0,53     | 280             | 200             |
| 35      | 55     | 12,0                           | 960           | 160             | 350            | 10             | 0,32        | 0,56     | 310             | 210             |

Коэффициент расхода воздуха  $\alpha = 1,05 \div 1,10$ .

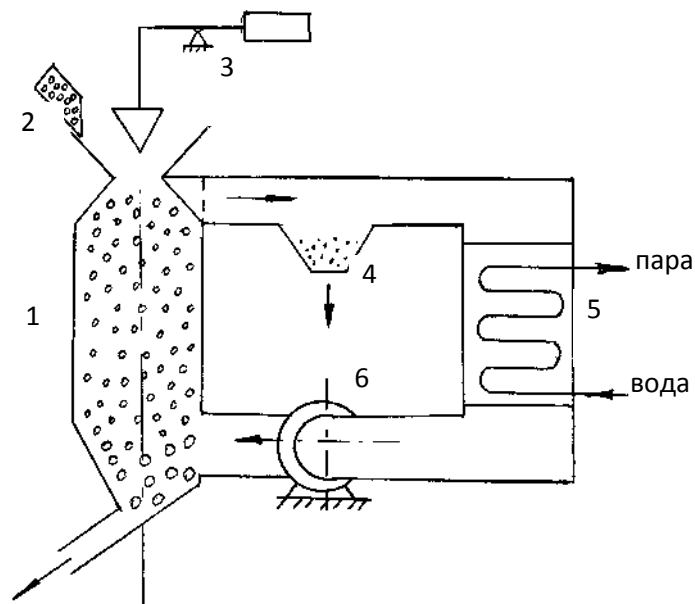
КПД и =  $0,6 \div 0,7 \eta_B \eta_D$

Таблица 2 - теплоемкость и энтальпия воздуха и продуктов сгорания

| t, °C | Теплоемкость, кДж / (м3К) |                        | Энтальпия<br>продуктов<br>сгорания ид,<br>кДж / м3 |
|-------|---------------------------|------------------------|--|
|       | Воздух, св                | Продуктов сгорания, сд |  |
| 0     | 1,294                     | 1,436                  | 0  |
| 100   | 1,303                     | 1,446                  | 144,6  |
| 200   | 1,321                     | 1,466                  | 293,2  |
| 300   | 1,347                     | 1,496                  | 448,8  |
| 400   | 1,378                     | 1,529                  | 661,6  |
| 500   | 1,409                     | 1,564                  | 778,0  |
| 600   | 1,438                     | 1,596                  | 957,6  |
| 700   | 1,466                     | 1,627                  | 1138,9   |
| 800   | 1,490                     | 1,654                  | 1323,2   |
| 900   | 1,510                     | 1,676                  | 1508,4   |
| 1000  | 1,528                     | 1,696                  | 1696,0   |

## 2. СУХОЕ тушения кокса

Рассчитать геометрические и теплотехнические параметры камеры сухого тушения кокса (рис. 2).



1 - тушильный бункер; 2 - скип с коксом; 3 - затвор; 4 - сборник пыли; 5 - парогенератор; 6 - вентилятор

## Рисунок 2 - Установка сухого тушения кокса

Сухое тушение кокса имеет преимущества перед мокрым тушением, а именно:

- обеспечивается более высокая твердость кокса и увеличивается на 15-20% выход крупных фракций;
- повышается теплота сгорания за счет снижения влаги до 1-2% по сравнению с 5-10% при мокром тушении;
- экономится около 40 кг условного топлива на 1 т кокса за счет получения 400 кг пары энергетических параметров;
- повышается энергетическая ценность отходов кокса (коксовая пыль, орех)
- снижается расход воды на 1 т произведенного кокса;
- улучшаются условия работы тушильного вагона и снижается коррозия металлоконструкций;
- значительно снижаются вредные выбросы в атмосферу и улучшается экологическая обстановка на коксохимзаводе.

Целью расчета является определение экономии условного топлива при использовании сухого тушения кокса.

### Методика и последовательность расчета

#### 1. Тепло охлаждения кокса

$$Q_{о.к.} = Q_{г.к.} - Q_{х.к.} = G_k(C_1 \cdot t_1 - C_2 \cdot t_2), \text{кВт}$$

где - количество охлаждаемого кокса, кг / с;  $G_k$

$C_1$ ,  $C_2$  - теплоемкость кокса при температуре загрузки и выгрузки соответственно, кДж / (кг · К) (табл 3);

$Q_{г.к.}$  - тепло кокса, поступающего к установке, кВт;

$Q_{х.к.}$  - тепло кокса, что оставляет установку, кВт.

#### 2. Тепло угара кокса

$$Q_{у.к.} = \frac{G_k \cdot \varphi_k \cdot Q_H^p}{100}, \text{ кВт}$$

где - угар кокса при тушении;  $\varphi_k$

$Q_H^p$  - теплота сгорания кокса, кДж / кг;

3. Тепло нагрева циркулирующих инертных газов

$$Q_{ц.г.} = V_{ц.г.} (C' \cdot t' - C'' \cdot t''), \text{ кВт}$$

где - объем газов, циркулирующих в системе, м<sup>3</sup> / с;  $V_{ц.г.}$

$C', C''$  - теплоемкость газов на выходе и входе в камеру тушения, кДж / (м<sup>3</sup> · К)

$t', t''$  - температуры газов на выходе и входе в камеру тушения, °С.

4. Потери тепла с утечкой газов в атмосферу

$$Q_{у.г.} = G_k \cdot \varphi_k (C_{ц.г.} \cdot t_{ц.г.} - C_{в.з.} \cdot t_{в.з.}) \cdot V_{в.з.}, \text{ кВт}$$

где - теплоемкость циркулирующих уходящих газов в атмосферу кДж / (м<sup>3</sup>  $C_{ц.г.}$  · К)

$t_{ц.г.}$  - температура циркулирующих газов, °С;

$C_{в.з.}$  - теплоемкость воздуха, кДж / (м<sup>3</sup> · К)

$t_{в.з.}$  - температура воздуха, °С;

$V_{в.з.}$  - объем воздуха для сжигания (угара) 1 кг кокса по реакции



$$V_{в.з.} = \frac{m \cdot 22,4}{12} \cdot 4,76 = 8,9 \cdot m, \frac{\text{ м}^3}{\text{ кг}},$$

где  $m$  - коэффициент, учитывающий содержание углерода в коксе кг / кг;

4,76 - объем воздуха, приходящейся на 1 м<sup>3</sup> кислорода, м<sup>3</sup>.

5. Потери тепла в атмосферу поверхностью камеры тушения

$$Q_{п} = (\alpha_{из} + \alpha_{к}) \cdot (t_{п} - t_{в.з.}) \cdot F, \text{ кВт}$$

где - коэффициенты теплоотдачи излучением и конвекцией в атмосферу. Для практических расчетов можно принять  $\alpha_{из} + \alpha_{к} = 23$

$t_{п}$  - температура (средняя) поверхности камеры, °С.

6. Из уравнения теплового баланса

$$Q_{о.к.} + Q_{у.к.} = Q_{ц.г.} + Q_{у.г.} + Q_{п}$$

определяем объем газов, циркулирующих в системе:

$$V_{ц.г.} = \frac{Q_{о.к.} + Q_{у.к.} - Q_{у.г.} - Q_{п.}}{C' \cdot t' - C'' \cdot t''}, \frac{м^3}{с}$$

$$Q_{ц.г.} = V_{ц.г.} (C' \cdot t' - C'' \cdot t''), \text{кВт}$$

Коэффициент полезного действия камеры тушения рассчитывается без учета тепла угара кокса:  $\eta_{к.т.}$

$$\eta_{к.т.} = \frac{Q_{о.к.}}{Q_{г.к.}} \cdot 100, \%$$

С учетом потерь тепла обмуровки котла и газоходами, составляющих 1,5-2%, КПД установки сухого тушения составит  $\eta_y = \eta_{к.т.} (0,95 \div 0,98), \%$ .

7. Время тушения кокса определяется по уравнению:

$$\tau = \frac{(C_1 \cdot t_1 - C_2 \cdot t_2) \cdot \rho_k}{1,1 \Delta t_{ср} \cdot K_F \cdot S_F},$$

где  $\rho_k$  - объемная масса кокса, кг / м<sup>3</sup>;

1,1 - коэффициент объемного разрыхления засыпи в подвижном слое;

$\Delta t_{ср}$  - средняя логарифмическая разность температур кокса и газа, °С;

$S_F$  - удельная поверхность кокса, м<sup>2</sup> / м<sup>3</sup>;

$K_F$  - коэффициент теплопередачи, рассчитываемый по формуле:

$$K_F = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_F} + \frac{r}{2\lambda}},$$

где  $r$  - радиус куска кокса, м;

$\lambda$  - средний коэффициент теплопроводности куска кокса, Вт / (м · К)

$\alpha_F$  - суммарный коэффициент теплопередачи от кокса к газу, Вт / (м<sup>2</sup> · К).

$$\alpha_F = \alpha_{из} + \alpha_k$$

где  $\alpha_{из}$  - коэффициент теплоотдачи излучением от кокса к газу, для практических расчетов можно принять равным 2,3 Вт / (м<sup>2</sup> · К)

$\alpha_k$  - коэффициент теплопередачи конвекцией от кокса к газу, Вт / (м<sup>2</sup> · К)

$$\alpha_k = \frac{9,7 \cdot W_0^{0,5}}{d_{ср}^{0,33}}, \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$$

где  $W_0$  - скорость газов в межкусковом пространстве, м / с;

$d_{cp}$  - гидравлический диаметр межкускового пространства, м.

$$W_0 = \frac{V_{ц.г.}}{F_k \cdot f_{св}}, \text{ м/с}$$

где  $F_k$  - сечение камеры тушения, принимается в интервале 25- 35 м<sup>2</sup> с последующим уточнением;

$f_{св}$  - свободное пересечение камеры, доля от общего сечения  $F_k$

Средняя логарифмическая разность температур кокса и газа:

$$\Delta t_{cp} = \frac{(t_1 - t') - (t_2 - t'')}{\ln \frac{t_1 - t'}{t_2 - t''}}, \text{ } ^\circ\text{C.}$$

9. Объем рабочей части камеры (без учета кожух):

$$V_k = \frac{G_k \cdot \tau_p}{M_{vk}}, \text{ м}^3,$$

где  $\tau_p$  - расчетная продолжительность тушения, что с учетом долидного коэффициента 1,7, учитывающий неравномерность востока кокса и распределения дутья, равна  $\tau_p = 1,7\tau$ , с;

$M_{vk}$  - объемная масса кокса, кг / м<sup>3</sup>.

10. Пересечение камеры тушения рассчитывается по формуле:

$$F_k = \frac{V_{ц.г.}}{W}, \text{ м}^2,$$

где  $W$  - скорость газа приведена к нормальным условиям. В расчете на свободное пересечение камеры скорость газа допускается в пределах 0,5 - 0,9 м / с.

Сравнить полученное значение с принятым в пункте 8 и при большом отклонении (более 10%) сделать перечисления, начиная с пункта 8.  $F_k$

11. Высота рабочей части камеры

$$H = \frac{V_k}{F_k}, \text{ м.}$$

12. Объем кожух определяется из условия непрерывной работы парогенератора без снижения производительности по паре:  $V_{\phi}$



$$V_{\phi} = \frac{2 \cdot \tau_{ц} \cdot n \cdot G_p}{K(\tau_k - Z \cdot \tau_{ц}) \cdot M_{vk}}, \text{ м}^3$$

где - продолжительность циклической остановки, ч;  $\tau_{ц}$

$n$  - количество печей в батарее, шт;

$G_p$  - разовая выдача кокса из одной печи, кг;

$\tau_k$  - период коксования, ч;

$2$  - количество батарей в блоке;

$Z$  - количество циклических остановок;

$K$  - расчетное количество камер тушения.

Величина  $K$  определяется по формуле:

$$K = \frac{G_B}{G_K}$$

где - производительность коксового блока и камер тушения.  $G_B$  и  $G_K$

13. Экономия условного топлива составит:

$$B = \frac{V_{ц.г.} (C' \cdot t' - C'' \cdot t'') \eta_y}{29300 \cdot G_K}, \text{ кг/кг}$$

Таблица 3 теплоемкость кокса

|                         |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $t, ^\circ\text{C}$     | 1100  | 1050  | 1000  | 950   | 300   | 250   | 200   | 150   |
| $C,$<br>кДж / кг ·<br>К | 1,521 | 1,488 | 1,455 | 1,422 | 0,996 | 0,963 | 0,930 | 0,897 |

Таблица 4 - теплоемкость циркулирующих газов

|                                     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $t, ^\circ\text{C}$                 | 100  | 150  | 200  | 250  | 600  | 650  | 700  | 750  | 800  |
| $C,$<br>кДж / м <sup>3</sup> ·<br>К | 1,35 | 1,36 | 1,37 | 1,39 | 1,41 | 1,43 | 1,44 | 1,46 | 1,48 |

Варианты задания для расчета приведены в таблице 5.

|   |  |
|---|--|
| п / №   |  |
| Производительность<br>коковского блока гб, т /<br>сутки     |  |
| Производительность<br>камеры тушения Гк, т /<br>сутки       |  |
| Разовая выдача кокса из<br>одной<br>печи ГР ,, т            |  |
| Температура кокса при<br>загрузке, t1, °С                   |  |
| Температура кокса при<br>выгрузке, t2 °С                    |  |
| Угар кокса при тушении,<br>фК%                              |  |
| Теплота сгорания кокса,<br>Qнр, МДж / кг                    |  |
| Температура газов на<br>выходе из камеры тушения,<br>t', °С |  |
| Температура газов на входе<br>в камеру тушения, t", °С      |  |
| Температура<br>циркулирующих газов, tц.,<br>°С              |  |
| Температура воздуха, tВЗ,<br>°С                             |  |
| Внешняя поверхность<br>камеры, F, м2                        |  |

Таблица 5 - Исходные данные

|    |      |      |    |      |     |      |      |     |     |     |    |     |
|----|------|------|----|------|-----|------|------|-----|-----|-----|----|-----|
| 1  | 4000 | 1000 | 10 | 1100 | 160 | 0,12 | 28,2 | 700 | 140 | 550 | 15 | 130 |
| 2  | 4100 | 1050 | 11 | 1120 | 170 | 0,14 | 28,4 | 720 | 150 | 560 | 16 | 140 |
| 3  | 4200 | 1080 | 12 | 1140 | 180 | 0,16 | 28,6 | 730 | 160 | 570 | 17 | 150 |
| 4  | 4300 | 1100 | 13 | 1160 | 190 | 0,18 | 28,8 | 740 | 170 | 580 | 18 | 160 |
| 5  | 4400 | 1150 | 14 | 1180 | 200 | 0,10 | 29,0 | 750 | 180 | 590 | 19 | 170 |
| 6  | 4500 | 1200 | 15 | 1200 | 210 | 0,12 | 29,2 | 750 | 190 | 600 | 20 | 180 |
| 7  | 4600 | 1230 | 16 | 1220 | 220 | 0,14 | 29,4 | 760 | 200 | 610 | 21 | 190 |
| 8  | 4700 | 1250 | 17 | 1240 | 230 | 0,16 | 29,6 | 770 | 210 | 620 | 22 | 200 |
| 9  | 4800 | 1300 | 10 | 1260 | 230 | 0,18 | 29,8 | 780 | 220 | 630 | 23 | 210 |
| 10 | 4900 | 1330 | 11 | 1280 | 160 | 0,10 | 30,0 | 800 | 130 | 640 | 24 | 220 |
| 11 | 5000 | 1360 | 12 | 1260 | 170 | 0,12 | 30,2 | 780 | 140 | 630 | 25 | 230 |
| 12 | 5100 | 1400 | 13 | 1240 | 180 | 0,14 | 30,4 | 760 | 150 | 620 | 26 | 240 |
| 13 | 5200 | 1420 | 14 | 1220 | 190 | 0,16 | 30,6 | 740 | 160 | 610 | 27 | 250 |
| 14 | 5300 | 1440 | 15 | 1200 | 200 | 0,18 | 30,8 | 720 | 170 | 600 | 28 | 260 |
| 15 | 5400 | 1460 | 16 | 1180 | 210 | 0,10 | 30,9 | 700 | 180 | 590 | 29 | 270 |
| 16 | 5500 | 1480 | 10 | 1160 | 220 | 0,12 | 31,0 | 720 | 190 | 580 | 30 | 280 |
| 17 | 5600 | 1500 | 11 | 1140 | 230 | 0,14 | 31,2 | 730 | 200 | 570 | 31 | 290 |
| 18 | 5700 | 1550 | 12 | 1120 | 240 | 0,16 | 31,4 | 740 | 210 | 560 | 32 | 300 |
| 19 | 5800 | 1580 | 13 | 1100 | 180 | 0,18 | 31,6 | 720 | 160 | 550 | 33 | 290 |
| 20 | 5900 | 1600 | 14 | 1120 | 190 | 0,12 | 31,8 | 700 | 170 | 560 | 34 | 280 |
| 21 | 6000 | 1650 | 15 | 1140 | 200 | 0,14 | 32,0 | 720 | 180 | 570 | 35 | 270 |
| 22 | 6100 | 1700 | 16 | 1180 | 210 | 0,16 | 31,0 | 740 | 190 | 580 | 36 | 260 |
| 23 | 6200 | 1750 | 12 | 1200 | 220 | 0,18 | 30,0 | 760 | 200 | 590 | 37 | 250 |
| 24 | 6300 | 1800 | 14 | 1250 | 230 | 0,10 | 29,0 | 770 | 210 | 600 | 38 | 240 |

Продолжение таблицы 5

| №<br>П / П | температура поверхности<br>камеры, tП, °С | Свободный сечение<br>камеры, f, % | Объемная масса кокса, кг /<br>м <sup>3</sup> М <sub>ук</sub> | Удельная поверхность<br>кокса, SF, м <sup>2</sup> | Гидравлический диаметр<br>мижкус - ного<br>пространства, dCP, г · 10-3 | Содержание углерода в<br>коксе, m, кг / кг | Радиус куска кокса, r, м | Коэффициент<br>теплопроводности кокса, λ,<br>Вт · м / К | Количество печей в<br>батарее, n | Продолжительность<br>циклической остановки,<br>τЦ, ч. | Период коксования, τК, ч. | Количество циклических<br>остановок, Z |
|------------|---|-----------------------------------|--|---|--|--|--------------------------|---|----------------------------------|---|---------------------------|--|
| 1          | 60  | 62                                | 450  | 60  | 32   | 0,75                                       | 0,025                    | 0,41  | 40                               | 0,71  | 13                        | 2                                      |
| 2          | 62  | 63                                | 460  | 61  | 33   | 0,80                                       | 0,026                    | 0,42  | 50                               | 0,72  | 14                        | 3                                      |
| 3          | 64  | 64                                | 470  | 62  | 34   | 0,85                                       | 0,027                    | 0,43  | 60                               | 0,73  | 15                        | 4                                      |
| 4          | 66  | 65                                | 480  | 63  | 35   | 0,90                                       | 0,028                    | 0,44  | 40                               | 0,74  | 16                        | 2                                      |
| 5          | 68  | 66                                | 490  | 64  | 36   | 0,95                                       | 0,029                    | 0,45  | 50                               | 0,75  | 17                        | 3                                      |
| 6          | 70  | 67                                | 500  | 65  | 37   | 0,70                                       | 0,030                    | 0,46  | 60                               | 0,76  | 13                        | 4                                      |
| 7          | 72  | 68                                | 510  | 66  | 38   | 0,75                                       | 0,031                    | 0,47  | 40                               | 0,77  | 14                        | 2                                      |
| 8          | 74  | 70                                | 520  | 67  | 39   | 0,80                                       | 0,032                    | 0,48  | 50                               | 0,78  | 15                        | 3                                      |
| 9          | 76  | 62                                | 530  | 68  | 40   | 0,85                                       | 0,033                    | 0,49  | 60                               | 0,79  | 16                        | 4                                      |
| 10         | 74  | 63                                | 540  | 69  | 32   | 0,90                                       | 0,034                    | 0,50  | 40                               | 0,80  | 17                        | 2                                      |
| 11         | 72  | 64                                | 550  | 70  | 33   | 0,95                                       | 0,035                    | 0,40  | 50                               | 0,70  | 13                        | 3                                      |
| 12         | 70  | 65                                | 540  | 60  | 34   | 0,75                                       | 0,025                    | 0,41  | 60                               | 0,71  | 14                        | 4                                      |
| 13         | 68  | 66                                | 530  | 61  | 35   | 0,80                                       | 0,026                    | 0,42  | 40                               | 0,72  | 15                        | 2                                      |
| 14         | 66  | 67                                | 520  | 62  | 36   | 0,85                                       | 0,027                    | 0,43  | 50                               | 0,73  | 16                        | 3                                      |
| 15         | 64  | 68                                | 510  | 63  | 37   | 0,90                                       | 0,028                    | 0,44  | 60                               | 0,74  | 17                        | 4                                      |
| 16         | 62  | 69                                | 500  | 64  | 38   | 0,95                                       | 0,029                    | 0,45  | 40                               | 0,75  | 13                        | 2                                      |
| 17         | 60  | 70                                | 490  | 65  | 39   | 0,75                                       | 0,030                    | 0,46  | 50                               | 0,76  | 14                        | 3                                      |
| 18         | 62  | 69                                | 480  | 66  | 40   | 0,80                                       | 0,031                    | 0,47  | 60                               | 0,77  | 15                        | 4                                      |
| 19         | 64  | 68                                | 470  | 67  | 32   | 0,85                                       | 0,032                    | 0,48  | 40                               | 0,78  | 16                        | 2                                      |
| 20         | 66  | 67                                | 460  | 68  | 33   | 0,90                                       | 0,033                    | 0,49  | 50                               | 0,79  | 17                        | 3                                      |
| 21         | 68  | 66                                | 450  | 69  | 34   | 0,95                                       | 0,034                    | 0,50  | 60                               | 0,80  | 13                        | 4                                      |
| 22         | 70  | 65                                | 500  | 70  | 35   | 0,70                                       | 0,035                    | 0,51  | 40                               | 0,81  | 14                        | 2                                      |
| 23         | 72  | 64                                | 510  | 65  | 36   | 0,80                                       | 0,036                    | 0,52  | 50                               | 0,82  | 15                        | 3                                      |
| 24         | 74  | 63                                | 520  | 60  | 37   | 0,85                                       | 0,037                    | 0,53  | 60                               | 0,83  | 16                        | 4                                      |

### 3. РАСЧЕТ паропроводов

Определить экономическую эффективность применения тепловой изоляции паропровода. Расчетная схема изолированного паропровода приведена на рисунке 3.

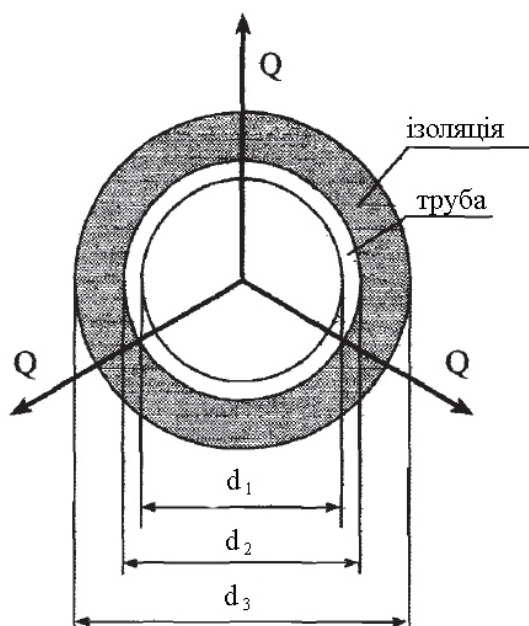


Рисунок 3 - Расчетная схема паропровода

#### Методика и последовательность расчета

1. Принимаем физические параметры материалов:

- теплопроводность стали  $\lambda_{ст} = 40 \div 60 \frac{\text{Вт}}{\text{мК}}$ ;
- теплопроводность шлаковаты  $\lambda_{із} = 0,05 \div 0,09 \frac{\text{Вт}}{\text{мК}}$ .

2. Поверхность теплообмена паропровода без изоляции:

$$F_1 = \pi \cdot d_2 \cdot l, \text{ м}^2$$

где внешний диаметр паропровода, г.  $d_2$  –

$l$  – длина паропровода., г.

3. Коэффициент теплопередачи (без изоляции):

$$k_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_2}}, \text{Вт/м}^2\text{К}$$

где коэффициент теплоотдачи от пара к стенке и от поверхности паропровода к внешней среде соответственно,  $\alpha_1, \alpha_2 - \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$ ;

$\delta_{ст}$  – толщина стінки, м.

4. Потери теплоты паропроводом без изоляции:

$$Q_1 = k_1 \cdot F_1 \cdot (t_{пп} - t_{п}), \text{Вт}$$

где температура перегретого пара,  $t_{пп} - ^\circ\text{С}$ ;

$t_{п}$  – температура окружающего воздуха,  $^\circ\text{С}$ .

5. Поверхность теплообмена с изоляцией:

$$F_2 = \pi \cdot d_3 \cdot l, \text{м}^2$$

де  $d_3$  – диаметр трубопровода с изоляцией, м.

6. Коэффициент теплопередачи (с изоляцией):

$$k_2 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{\delta_{из}}{\lambda_{из}} + \frac{1}{\alpha_2}}, \text{Вт/м}^2\text{К}$$

где толщина слоя изоляции, м.  $\delta_{из} -$

7. Потери теплоты паропроводом с изоляцией:

$$Q_2 = k_2 \cdot F_2 \cdot (t_{пп} - t_{п}), \text{Вт}$$

8. Уменьшение потерь теплоты за счет выполнения изоляции составит:

$$\frac{Q_1}{Q_2}$$

9. Экономия тепла составит:

$$\Delta Q = Q_1 - Q_2, \text{Вт}$$

10. Годовая экономия теплоты составит:

$$\Delta Q_{\text{рік}} = 3600 \cdot \Delta Q \cdot 24 \cdot 360, \text{Дж/рік}$$

11. Годовая экономия топлива (природного газа):

$$V_{\text{т}} = \frac{\Delta Q_{\text{рік}}}{Q_{\text{н}}^{\text{п}} \cdot \eta}, \text{м}^3/\text{рік}$$

где теплота сжигания природного газа,  $\text{Дж} / \text{м}^3$ ;  $Q_{\text{н}}^{\text{п}} -$

$\eta$  – коэффициент полезного действия котельного агрегата,  $\eta = 0,7 \div 0,9$

Варианты задания для расчета приведены в таблице 6.

Таблица 6 - Исходные данные для расчета

| № варианта | Внутренний диаметр паропровода, мм $d_1$ , | Внешний диаметр паропровода, мм $d_2$ , | Диаметр паропровода с изоляцией мм $d_3$ , | Длина паропровода, $l$ , м | Коэффициент теплоотдачи от пара к стенке, $\alpha_1, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$ ; | Коэффициент теплоотдачи от поверхности паропровода к внешней среде $\alpha_2, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$ ; | Температура перегретого пара, |
|------------|--|---|--|----------------------------|--|---|-------------------------------|
| 1          | 200  | 210                                     | 310  | 100                        | 80   | 8   | 400                           |
| 2          | 210  | 220                                     | 320  | 200                        | 90   | 9   | 420                           |
| 3          | 220  | 230                                     | 330  | 300                        | 100  | 10  | 440                           |
| 4          | 230  | 240                                     | 340  | 250                        | 50   | 11  | 450                           |
| 5          | 240  | 250                                     | 350  | 350                        | 60   | 13  | 460                           |
| 6          | 250  | 260                                     | 360  | 400                        | 70   | 15  | 470                           |
| 7          | 260  | 270                                     | 370  | 450                        | 80   | 18  | 480                           |
| 8          | 270  | 280                                     | 400  | 500                        | 90   | 20  | 490                           |
| 9          | 280  | 290                                     | 410  | 200                        | 100  | 25  | 500                           |
| 10         | 290  | 300                                     | 420  | 250                        | 110  | 20  | 520                           |
| 11         | 300  | 310                                     | 410  | 300                        | 40   | 15  | 550                           |
| 12         | 200  | 210                                     | 310  | 350                        | 50   | 5   | 560                           |
| 13         | 210  | 220                                     | 320  | 380                        | 60   | 7   | 570                           |
| 14         | 220  | 230                                     | 330  | 400                        | 70   | 9   | 580                           |
| 15         | 230  | 240                                     | 340  | 200                        | 80   | 11  | 590                           |
| 16         | 240  | 250                                     | 350  | 250                        | 90   | 15  | 600                           |
| 17         | 250  | 260                                     | 360  | 300                        | 100  | 20  | 400                           |
| 18         | 260  | 270                                     | 370  | 350                        | 110  | 10  | 450                           |
| 19         | 270  | 280                                     | 400  | 330                        | 40   | 8   | 470                           |
| 20         | 280  | 290                                     | 410  | 300                        | 60   | 6   | 480                           |
| 21         | 290  | 300                                     | 420  | 200                        | 80   | 12  | 500                           |
| 22         | 300  | 310                                     | 410  | 500                        | 90   | 15  | 520                           |
| 23         | 210  | 240                                     | 340  | 150                        | 100  | 20  | 550                           |

## ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

- 1 Кривандин В.А. Теплотехника металлургического производства / Кривандин В.А., Белоусов В.В., Сборщиков С. и др., Т1. Т2. - М .: МИСиС, 2001, 736 с.
- 2 Курбатов Ю.Л. Нагнетатели и тепловые двигатели в Теплоэнергетика / Курбатов Ю.Л., Масс Н.С., Кравцов В.В. - Донецк: НОРД - ПРЕСС, 2007, 288 с.
- 3 Семененко Н.А. Вторичные энергоресурсы промышленности и энерготехнологической Комбинирование / Семененко Н.А. - М .: Энергоатомиздат, 1985, 304 с.
4. Казанцев Е.И. Промышленные печи / Е.И. Казанцев - М .: Металлургия, 1975. - 368с.