

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

КАФЕДРА «ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕПЛОФИЗИКА»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
для самостоятельной работы по дисциплине  
"Теория очистки газов и жидкостей"  
(для студентов 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 самостоятельной работы по дисциплине  
“Теория очистки газов и жидкостей”

(для студентов 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.

УТВЕРЖДЕНО  
на заседании Учебно-  
издательского  
совета ДОННТУ  
Протокол № от

Донецк – 2018

УДК 669: 532.516.13

Рецензент:

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

Составители:

Захаров Николай Иванович – профессор кафедры технической теплофизики ГОУВПО «ДОННТУ»;

Сапронова Елена Витальевна – старший преподаватель кафедры технической теплофизики ГОУВПО «ДОННТУ».

Методические указания для самостоятельной работы по дисциплине ""Теория очистки газов и жидкостей" [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. Н.И. Захаров, Е.В. Сапронова – Донецк: ДОННТУ, 2018. – Систем. требования Acrobat Reader.

Включают методику и численный пример расчета энергосберегающей установки в доменном производстве.

Методические указания помогут студентам углубить теоретические знания и получить необходимые практические навыки.

УДК 669: 532.516.13

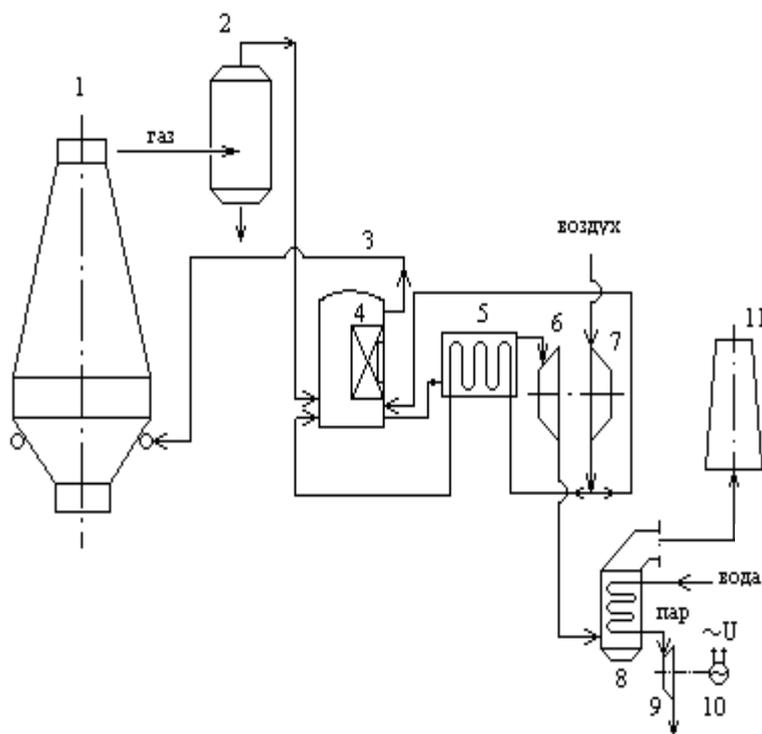
## РАСЧЕТ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЙ УСТАНОВКИ В ДОМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Схема энергосберегающей установки основана на комплексном использовании избыточного давления, физического и химического тепла уходящих продуктов сгорания.

Из доменной печи 1 газ поступает на очистку 2, затем направляется в Каупер 3, где сжигается, а продукты сгорания нагревают огнеупорную насадку 4, регенеративные теплообменники.

На выходе из Каупера продукты сгорания доменного газа, имея высокую температуру и давление, проходят последовательно теплообменник 5, газотурбинную установку 6, а затем котел-утилизатор 8 и выбрасываются в дымовую трубу 11.

Атмосферный воздух сжимается турбокомпрессором 7. Часть сжатого воздуха, нагревается в теплообменнике 5 и направляется в топку Каупера для организации сжигания доменного газа. Другая часть направляется в насадку Каупера, где нагревается до высокой температуры и затем подается в фурменные зону доменной печи 1.



- 1 - доменная печь; 2 - сухая газоочистка (циклон) 3 - воздухонагреватели (Каупер) 4 - регенеративная насадка; 5 - рекуперативный теплообменник; 6 - газотурбинная установка; 7 - турбокомпрессор; 8 - котел-утилизатор; 9 - паровая турбина; 10 - электронагреватель; 11 - дымоход

Рисунок 1 - Схема комбинированной установки сжатия и нагрева доменного дутья и выработки пара электроэнергетических параметров

## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ:

1. Теплоемкости:  $C_{вз} = 1,34$ ;  $C_{г} = 1,46$ ;  $C_{пс} = 1,57$ ,  $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3\text{К}}$
2. Расход дутья:  $V'_{дв} = 50\text{м}^3/\text{с}$
3. Объем доменной печи:  $V = 2000\text{ м}^3$
4. Давление дутья:  $P_{д} = 0,5\text{ МПа}$
5. Температура дутья:  $t_{д} = 1202^{\circ}\text{C}$
6. Температура доменного газа на выходе из печи:  $t_{г} = 302^{\circ}\text{C}$
7. Температура холодного воздуха:  $t'_{вз} = 22^{\circ}\text{C}$
8. Температура продуктов сгорания под куполом каупера:  $t_{пс}^{\text{квп}} = 1582^{\circ}\text{C}$
9. Состав доменного газа:  $\text{CO} = 22,1\%$ ;  $\text{H}_2 = 15,4\%$ ;  $\text{CH}_4 = 0,3\%$ ;  
 $\text{N}_2 = 35,05\%$ ;  $\text{CO}_2 = 22,1\%$ ;  $\text{H}_2\text{O} = 11,75\%$ .
10. Внутренний КПД газовой турбины и воздушного турбокомпрессора:  $\eta = 0,9$ ;
11. Коэффициент использования тепла в топочной камере каупера:  $\eta = 0,85$ ;
12. Состав продуктов сгорания доменного газа, (у % по объему):  
 $\text{CO}_2 = 19,5$ ;  $\text{H}_2\text{O} = 14,3$ ;  $\text{N}_2 = 64,6$ ;  $\text{O}_2 = 1,6$ .
13. Давление продуктов сгорания перед и после газовой турбины:  
 $P'_{гт} = 0,38\text{ МПа}$ ;  $P''_{гт} = 0,11\text{ МПа}$ .
14. Данные для расчета котла-утилизатора на отходящих газах и паротурбогенератора:
  - Давление перегретого пара:  $P_{пг} = 5\text{ МПа}$ ;
  - температура перегретого пара:  $t_{пг} = 452^{\circ}\text{C}$ ;
  - КПД парогенератора:  $\eta_{пг} = 0,98$ ;
  - температура продуктов сгорания на выходе из котла-утилизатора:  
 $t''_{пс} = 120^{\circ}\text{C}$ ;
  - удельный расход пара на производство 1кВт/год электроэнергии:  
 $d = 4\text{ кг/кВт}\cdot\text{год}$ .

## РАСЧЕТ

1. Теоретический расход воздуха для сжигания доменного газа  
$$V_{вх}^0 = \frac{(\% \text{CO} + \% \text{H}_2) \cdot 0,5 + \% \text{CH}_4 \cdot 1,5}{21} = \frac{(22,1 + 15,4) \cdot 0,5 + 0,3 \cdot 1,5}{21} = 0,917\text{ м}^3/\text{м}^3$$

2. Температура сжатого воздуха после компрессора:

$$T''_{вз} = T'_{вз} \cdot \left( \frac{P_{д}}{P_0} \right)^{\frac{n-1}{n}} \cdot \eta_{к}$$

где  $n$  - показатель политропный процесса при сжатии воздуха,  $n = 1,4$ ;

$$P_0 - \text{атмосферное давление, } P_0 = 0,1\text{ МПа}; T''_{вз} = 295 \cdot \left( \frac{0,5}{0,1} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} \cdot 0,9 = 420\text{ К}$$

$$t''_{\text{ВЗ}} = 147^\circ\text{C}$$

3. Коэффициент расхода воздуха при сжигании доменного газа в каупере определяется из уравнения теплового баланса процесса горения:

$$\alpha \cdot V_{\text{ВХ}}^0 \cdot C_{\text{ВЗ}} \cdot (t_{\text{ВЗ}} - t'_{\text{ВЗ}}) + Q_{\text{Н}}^{\text{P}} + C_{\text{Г}} \cdot (t_{\text{Г}} - t_0^{\text{K}}) = \frac{V_{\text{ПС}} \cdot C_{\text{ПС}} \cdot (t_{\text{ПС}} - t_0^{\text{ПС}})}{\eta_{\text{ГОР}}}$$

откуда:

$$\alpha = \frac{V_{\text{ПС}} \cdot C_{\text{ПС}} \cdot (t_{\text{ПС}} - t_0^{\text{ПС}}) - \eta_{\text{ГОР}} \cdot Q_{\text{Н}}^{\text{P}} + C_{\text{Г}} \cdot (t_{\text{Г}} - t_0^{\text{Г}}) \cdot \eta_{\text{ГОР}}}{\eta_{\text{ГОР}} \cdot V_{\text{ВХ}}^0 \cdot C_{\text{ВЗ}} \cdot (t_{\text{ВЗ}} - t'_{\text{ВЗ}})}$$

где - теоретический расход воздуха и продуктов сгорания в каупере,  $\text{м}^3 / \text{м}^3$ ;  
 $t_{\text{ВЗ}}$   $t_{\text{Г}}$   $t_{\text{ПС}}$  - соответственно температура воздуха, доменного газа, продуктов сгорания под куполом Каупера,  $^\circ\text{C}$ ;

- начальная температура газовых сред, равная  $22^\circ\text{C}$ ;

$C_{\text{ВЗ}}$   $C_{\text{Г}}$   $C_{\text{ПС}}$  - теплоемкость воздуха, доменного газа и продуктов сгорания,  $\text{кДж}/\text{м}^3 \text{K}$ ;

$Q_{\text{Н}}^{\text{P}}$  - теплота сжигания доменного газа,  $\text{кДж} / \text{м}^3$ ;

$\eta_{\text{ГОР}}$  - коэффициент использования тепла в топочной камере Каупера.

1. Для определения  $\alpha$  рассчитаем:

4.1 Теоретический расход продуктов сгорания доменного газа:

$$V_{\text{ПС}}^{\text{T}} = \frac{\% \text{CO} + \% \text{H}_2 + 2 \cdot \% \text{CH}_4 + \% \text{N}_2 + \% \text{CO}_2 + \% \text{H}_2\text{O}}{100} + 0,79 \cdot V_{\text{ВХ}}^0 =$$

$$= \frac{22,1 + 15,4 + 2 \cdot 0,3 + 35,05 + 22,1 + 11,75}{100} + 0,79 \cdot 0,917 = 1,07 + 0,72 = 1,79 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

4.2 Теплота сжигания доменного газа:

$$Q_{\text{Н}}^{\text{P}} = \frac{12654 \cdot \% \text{CO} + 10768 \cdot \% \text{H}_2 + 35825 \cdot \% \text{CH}_4}{100} =$$

$$= \frac{12654 \cdot 22,1 + 10768 \cdot 15,4 + 35825 \cdot 0,3}{100} = 4561, \text{кДж}/\text{м}^3$$

откуда

$$\alpha = \frac{1,79 \cdot 1,57 \cdot (1582 - 22) - 4561 \cdot 0,85 - 1,46 \cdot (302 - 22) \cdot 0,85}{0,85 \cdot 0,917 \cdot 1,34 \cdot (147 - 22)} = 1,23$$

5. Действительный расход продуктов сгорания доменного газа:

$$V_{\text{ПС}}^{\text{Д}} = V_{\text{ПС}}^{\text{T}} + V_{\text{ВЗ}}^{\text{T}} \cdot (\alpha - 1) = 1,79 + 0,917 \cdot (1,23 - 1) = 2,01, \text{м}^3/\text{м}^3$$

6. Температура продуктов сгорания за газовой турбиной:

$$T_{\text{ГТ}}' = T_{\text{ГТ}}'' \left( \frac{P_{\text{ГТ}}'}{P_{\text{ГТ}}''} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} \cdot \frac{1}{\eta_{\text{К}}}$$

$$T_{\text{ГТ}}'' = \frac{T_{\text{ГТ}}' \cdot \eta_{\text{К}}}{\left( \frac{P_{\text{ГТ}}'}{P_{\text{ГТ}}''} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}}} = \frac{(825 + 273) \cdot 0,9}{\left( \frac{0,38}{0,11} \right)^{\frac{0,4}{1,4}}} = 710, \text{K}$$

7. Расход доменного газа на привод дутьевого компрессора определяется с баланса мощности на валу турбокомпрессора:

$$V_{\text{ДГ}} = \frac{V'_{\text{ДУ}} \cdot \frac{C_{\text{ВЗ}} \cdot (t''_{\text{ВЗ}} - t'_{\text{ВХ}})}{\eta_{\text{К}}}}{V^{\text{Д}}_{\text{ПС}} \cdot C_{\text{ПС}} \cdot (t'_{\text{ГТ}} - t''_{\text{ГТ}}) \cdot \eta_{\text{К}} - \frac{\alpha \cdot V^0_{\text{ВЗ}} \cdot C_{\text{ВЗ}} \cdot (t''_{\text{ВЗ}} - t'_{\text{ВЗ}})}{\eta_{\text{К}}}} =$$

$$= \frac{50 \cdot \frac{1,34 \cdot (420 - 295)}{0,97}}{2,01 \cdot 1,57 \cdot (825 - 437) \cdot 0,97 - \frac{1,23 \cdot 0,917 \cdot 1,34 \cdot (420 - 295)}{0,97}} = 8,7, \text{ м}^3/\text{с}$$

8. Расход воздуха для сжигания доменного газа в кауперов:

$$V_{\text{ВОЗ}}^{\text{К}} = \alpha \cdot V^0_{\text{ВЗ}} \cdot V_{\text{ДГ}} = 1,23 \cdot 0,917 \cdot 8,7 = 9,8, \text{ м}^3/\text{с}$$

9. Расход продуктов сгорания на выходе из Каупера:

$$V_{\text{ПС}}^{\text{К}} = V_{\text{ПС}} \cdot V_{\text{ДГ}} = 2,01 \cdot 8,7 = 17,5, \text{ м}^3/\text{с}$$

10. Эффективная мощность газовой турбины:

$$N_{\text{Э}}^{\text{Т}} = V_{\text{ПС}}^{\text{К}} \cdot C_{\text{ПС}} \cdot (t'_{\text{ГТ}} - t''_{\text{ГТ}}) \cdot \eta_{\text{К}}^{\text{М}} = 17,5 \cdot 1,57 \cdot (825 - 437) \cdot 0,97 =$$

$$= 10333, \text{ кВт} = 10,3 \text{ МВт}$$

11. Эффективная мощность турбокомпрессора:

$$N_{\text{Э}}^{\text{К}} = (V'_{\text{ДУ}} + V_{\text{ВОЗ}}^{\text{К}}) \cdot C_{\text{ВЗ}} \cdot (t''_{\text{ВХ}} - t'_{\text{ВХ}}) = (50 + 9,8) \cdot 1,34 \cdot (420 - 295) =$$

$$= 10016, \text{ кВт} = 10,0 \text{ МВт}$$

12. Мощность, затрачиваемая на сжатие воздуха для подачи в доменную печь (доменное дутье):

$$N'_{\text{Д}} = \frac{N_{\text{Э}}^{\text{К}}}{V'_{\text{ДУ}} + V_{\text{ВОЗ}}^{\text{К}}} \cdot V'_{\text{ДУ}} = \frac{10,0}{50 + 9,8} \cdot 50 = 8,4, \text{ МВт}$$

13. Мощность, затрачиваемая на сжатие воздуха для горения доменного газа в каупере:

$$N''_{\text{Д}} = \frac{N_{\text{Э}}^{\text{К}}}{V'_{\text{ДУ}} + V_{\text{ВОЗ}}^{\text{К}}} \cdot V_{\text{ВОЗ}}^{\text{К}} = \frac{10}{50 + 9,8} \cdot 9,8 = 1,6, \text{ МВт}$$

14. Расчет паропроизводительности парогенератора на отходящих газах, после газовой турбины:

$$D = \frac{V_{\text{ПС}}^{\text{К}} \cdot C_{\text{ПС}} \cdot (t''_{\text{ГТ}} - t'''_{\text{ГТ}}) \cdot \eta_{\text{ПГ}}}{i_{\text{ПГ}} - i} = \frac{17,5 \cdot 1,57 \cdot (437 - 120) \cdot 0,98}{3315 - 419} = 2,95, \text{ кг/с}$$

15. Установленная мощность парогенератора:

$$N_{\text{ПГ}} = \frac{3600 \cdot D}{d} = \frac{3600 \cdot 2,95}{4} = 2655, \text{ кВт}.$$