

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

КАФЕДРА «ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕПЛОФИЗИКА»

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

для выполнения самостоятельной работы студентов (СРС)  
и индивидуальных заданий по дисциплине  
«Специальные вопросы сжигания и термической переработки топлива»  
(для студентов очной и заочной форм обучения направлений подготовки  
22.04.02 «Металлургия» магистерской программы «Промышленная  
теплотехника»)

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

КАФЕДРА «ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕПЛОФИЗИКА»

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

для выполнения самостоятельной работы студентов (СРС)  
и индивидуальных заданий по дисциплине  
«Специальные вопросы сжигания и термической переработки топлива»  
(для студентов очной и заочной форм обучения направлений подготовки  
22.04.02 «Металлургия» магистерской программы «Промышленная  
теплотехника»)

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

## УДК 66.041 (071)

Методические указания для выполнения самостоятельной работы студентов (СРС) и индивидуальных заданий по дисциплине «Специальные вопросы сжигания и термической переработки топлива» (для студентов очной и заочной форм обучения направлений подготовки 22.04.02 «Металлургия» магистерской программы «Промышленная теплотехника») / Дробышевская И. П. – Донецк : ДонНТУ, 2018. – 49 с.

Методические указания содержат комплекс материалов для руководства самостоятельной работой студентов и порядок выполнения индивидуальных заданий по расчету диффузионной и кинетической горелок, а также расчет воздушной или кислородной конверсий углеводородного топлива.

Составила

И. П. Дробышевская, ст. преп.

Рецензент

С. В. Гридин, к.т.н., доцент

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИЗУЧЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ	6
2 ПОДГОТОВКА К АУДИТОРНЫМ ЗАНЯТИЯМ	7
3 САМОСТОЯТЕЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ РАЗДЕЛОВ КУРСА	8
4 ЗАДАНИЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ	10
5 РАСЧЕТ ДИФФУЗНОЙ ГОРЕЛКИ	14
6 РАСЧЕТ КИНЕТИЧЕСКОЙ ГОРЕЛКИ	27
7 РАСЧЕТ ВОЗДУШНОЙ КОНВЕРСИИ	38
8 ЗАКЛЮЧЕНИЕ	45
9 ПЕРЕЧЕНЬ ВОПРОСОВ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ	47
ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК	48

## ВВЕДЕНИЕ

Самостоятельная работа студентов по дисциплине «Специальные вопросы сжигания и термической переработки топлива» составляет более 50% от общей трудоемкости и включает следующие формы:

- подготовка к аудиторным занятиям;
- самостоятельное изучение теоретического материала;
- выполнение индивидуальных заданий.

В методических указаниях представлены многовариантные задания с общим для всех вариантов условием.

Данные для расчетов к каждому варианту приведены в приложении А. Также в приложении дана необходимая для расчетов справочная информация.

## 1 ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИЗУЧЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Дисциплина «Специальные вопросы сжигания и термической переработки топлива» является одной из важнейших дисциплин для специальности «Промышленная теплотехника» и рассматривает следующие вопросы: методы сжигания топлива; специальные вопросы сжигания топлива в топках различных установок; топливосжигающие устройства для сжигания газов и пылеугольного топлива; форсунки для сжигания жидкого топлива.

Целью дисциплины является формирование комплекса знаний и представлений о горелочных устройствах, их назначении, конструкции, организации рабочего процесса и требованиях, предъявляемых к ним.

В результате освоения дисциплины студент должен

знать: способы сжигания топлива; классификацию и основные теплотехнические характеристики горелочных устройств; конструкции и принцип действия различных видов горелочных устройств; разновидности термической переработки газообразного, жидкого и твердого топлив;

уметь: выполнять расчеты воздушной и кислородной конверсии углеводородов; разработать мероприятия по увеличению тепловой мощности действующего теплотехнического агрегата (без реконструкции); решать задачи по переводу отопления теплотехнической установки с одного вида топлива на другой; выполнять расчеты по определению скорости истечения газов низкого и высокого давления через отверстия и насадки.

## 2 ПОДГОТОВКА К АУДИТОРНЫМ ЗАНЯТИЯМ

### *Подготовка к лекциям*

Эта работа состоит из самостоятельного изучения лекционного материала студентом, и в ней необходимо выделить следующие аспекты:

- студент должен готовиться к каждой лекции, изучая материал предыдущей лекции дома и при необходимости повторяя материал других лекций;
- необходимо, чтобы студент изучал соответствующий материал не только используя текст лекции, записанной в аудиторных условиях, но и с помощью предложенных учебников;
- студент должен быть готов ответить на вопросы для самопроверки, приведенные в разделе 9 этих методических указаний, соответствующие материалам предыдущей лекции.

### 3 САМОСТОЯТЕЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ РАЗДЕЛОВ КУРСА

При изучении каждой дисциплины ряд разделов выдается студентам для самостоятельного усвоения, в то же время этот материал выносится в вопрос модульных контролей, зачетов (или экзаменов, если это предусмотрено).

Целью такого шага, с одной стороны, является привлечение студентов к самостоятельной ответственной и в то же время творческой работы, с другой – освобождение части времени аудиторных занятий для более глубокого усвоения важнейших моментов курса.

Перечень вопросов, вынесенных для самостоятельного изучения:

- Типы газовых горелок и область их применения. Общие рекомендации при выборе типа горелок.

- Расчет газогорелочных устройств. Выбор числа и производительности горелок.

- Термическая переработка газообразного топлива. Крекинг.

- Теоретические основы и особенности горения топлив.

- Термический крекинг жидких топлив.

- Пиролиз жидких топлив.

- Общие сведения о свойствах, применении и физико-химических процессах производства генераторных газов.

- Существующие методы газификации угля, технические характеристики газогенераторов.

- Особые случаи сжигания топлив. Сжигание водоугольного топлива.

- Защита атмосферного воздуха от вредных примесей при сжигании органического топлива.

В результате самостоятельного изучения предложенных разделов студент должен:

- изучив предложенную литературу, сделать конспект рассматриваемого материала;

- усвоить изученный материал и быть готовым ответить на соответствующие вопросы для самопроверки;
- уяснить место изученного материала в общей структуре курса и место полученных знаний и умений в будущей профессиональной деятельности.

#### 4 ЗАДАНИЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ

В методических указаниях предложена методика расчета диффузионной и кинетической горелок, а также расчет воздушной или кислородной конверсии одного из видов газообразного топлива типа  $C_mH_n$  или смесей этих газов.

Исходными данными для проектирования служат: заданные производительность газогорелочного устройства ( $Q_r$ ), состав газообразного топлива, его температура ( $t_r$ ) и давление ( $P_r$ ) перед горелкой; для конверсии вид газа  $C_mH_n$ ,  $\alpha$ - для воздушной конверсии;  $k$  - для кислородной.

Расчет диффузионной горелки включает:

- краткое описание заданных газогорелочных устройств, их преимущества, недостатки и область применения с приведением схем рассчитанной горелки;
- расчет сжигания газа (или их смесей);
- определение расхода газа, воздуха и температуры смеси;
- расчет воздушного канала горелки;
- расчет газовыпускных отверстий;
- определения размеров газового коллектора;
- определение возможного отрыва пламени;
- работа горелки в нерасчетных условиях;
- расчет длины факела горелки;
- выбор дымососа и вентилятора).

Расчет кинетической горелки включает описание и схему кинетической горелки, расчет сжигания газа, расчет расхода газа, воздуха, определения температуры смеси, определение возможности проскока и отрыва, работа горелки в нерасчетных условиях, расчет длины факела горелки;

Расчет воздушной (кислородной) конверсии включает описание процесса конверсии, определение равновесного состава продуктов конверсии и ее температуры.

### Задание

для выполнения индивидуального задания по курсу «Специальные вопросы сжигания и термической переработки топлива»

Данные для расчета:

1. Диффузная горелка:

Состав коксового газа, %

CO; H<sub>2</sub>; CO<sub>2</sub> N<sub>2</sub>; CH<sub>4</sub>

Коэффициент расхода воздуха  $\alpha$

Тепловая мощность горелки Q<sub>г</sub>

Температура газа t<sub>г</sub>

Содержание влаги в газе W.

Данные для пересчета газогорелочного устройства:

Теплота сгорания газа Q<sub>н</sub><sup>p</sup>

Давление газа перед горелкой P<sub>г</sub>

плотность газа  $\rho_{г}$

2. Кинетическая горелка:

Состав газа, %

CH<sub>4</sub>; C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>; C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>; N<sub>2</sub>; O<sub>2</sub>; CO<sub>2</sub>

Коэффициент расхода воздуха  $\alpha$

Тепловая мощность горелки Q<sub>г</sub>

Температура газа t<sub>г</sub>

Содержание влаги в газе W.

Данные для пересчета газогорелочного устройства:

Теплота сгорания газа  $Q^p_{\text{H}}$

Давление газа перед горелкой  $P_{\text{Г}}$

плотность газа  $\rho_{\text{Г}}$

3. Конверсия: (получение защитной среды)

Газ –  $C_mH_n$

Коэффициент расхода воздуха  $\alpha$  (для воздушной конверсии) или  $k$  (для кислородной конверсии).

Ориентировочная температура конверсии  $t_{\text{конв}}, ^\circ\text{C}$



$$K_{C-P} = \frac{100}{100 + 0,1242 \cdot W}$$

Рабочий состав газа, %:

$$CO^P = K_{C-P} \cdot CO^C$$

$$H_2^P = K_{C-P} \cdot H_2^C$$

$$CO_2^P = K_{C-P} \cdot CO_2^C$$

$$N_2^P = K_{C-P} \cdot N_2^C$$

$$CH_4^P = K_{C-P} \cdot CH_4^C$$

$$H_2O^P = K_{C-P} \cdot 0,1242 \cdot W$$

---


$$\sum = 100\%$$

Теплота сгорания коксового газа,  $\frac{МДж}{м^3}$

$$Q_H^P = 0,127CO + 0,108H_2 + 0,357CH_4$$

- теоретически необходимо количество воздуха для сжигания газа:

$$V_0 = 0,0476 \cdot \left[ 0,5CO + 0,5H_2 + 1,5H_2S + \sum \left( m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n - O_2^T \right], \frac{м^3_{в-ха}}{м^3_{газа}}$$

теоретически необходимо количество влажного воздуха для сжигания газа:

$$V_0^{ВЛ} = V_0 \cdot (1 + 0,001242 \cdot d_v) \cdot \frac{м^3_{в-ха}}{м^3_{газа}}$$

где  $d_v$  - влагосодержание сухого воздуха, г/м<sup>3</sup>.

действительный расход сухого воздуха

$$V_D = \alpha \cdot V_0 \cdot \frac{м^3_{в-ха}}{м^3_{газа}}$$

действительный расход влажного воздуха:

$$V_D^{ВЛ} = \alpha \cdot V_0^{ВЛ} \cdot \frac{м^3_{в-ха}}{м^3_{газа}}$$

где  $\alpha$  - коэффициент расхода воздуха.

Определение количества продуктов сгорания при сжигании 1 м<sup>3</sup> газа

$$V_{\text{д}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{O}_2} + V_{\text{N}_2},$$

где  $V_{\text{д}}$  - объем продуктов сгорания, м<sup>3</sup> дыма/м<sup>3</sup> газа.

$$V_{\text{CO}_2} = 0,01 \cdot (\text{CO} + \text{CO}_2^{\text{T}} + \text{CH}_4) \cdot \frac{\text{м}^3 \text{CO}_2}{\text{м}^3 \text{дыма}};$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,01 \cdot (\text{H}_2 + 2\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}^{\text{в-ха}}) \cdot \frac{\text{м}^3 \text{H}_2\text{O}}{\text{м}^3 \text{дыма}};$$

$$\text{H}_2\text{O}^{\text{в-ха}} = 0,1242 \cdot d_{\text{в}} \cdot V_{\text{д}}^{\text{с}} \cdot \frac{\text{м}^3 \text{H}_2\text{O}}{\text{м}^3 \text{в-ха}};$$

$$V_{\text{N}_2} = 0,01 \cdot (\text{N}_2^{\text{T}} + \text{N}_2 \cdot V_{\text{д}}^{\text{с}}) \cdot \frac{\text{м}^3 \text{N}_2}{\text{м}^3 \text{дыма}}.$$

где  $\text{N}_2^{\text{T}}$ ,  $\text{N}_2$  - содержание азота в газе и в воздухе, %

$$V_{\text{O}_2}^{\text{ИЗБ}} = 0,01 \cdot \text{O}_2^{\text{B}} (\alpha - 1) \cdot V_0^{\text{с}} \cdot \frac{\text{м}^3 \text{O}_2^{\text{ИЗБ}}}{\text{м}^3 \text{диму}};$$

$$V_{\text{д}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{O}_2}^{\text{ИЗБ}} + V_{\text{N}_2} \cdot \frac{\text{м}^3 \text{диму}}{\text{м}^3 \text{газу}}.$$

состав продуктов горения, %:

$$\text{CO}_2 = \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_{\text{д}}} \cdot 100;$$

$$\text{H}_2\text{O} = \frac{V_{\text{H}_2\text{O}}}{V_{\text{д}}} \cdot 100;$$

$$\text{N}_2 = \frac{V_{\text{N}_2}}{V_{\text{д}}} \cdot 100;$$

$$\text{O}_2 = \frac{V_{\text{O}_2}}{V_{\text{д}}} \cdot 100;$$

---


$$\Sigma = 100\%$$

Для оценки точности расчета просчитывается материальный баланс процесса горения.

$$m_{\Gamma} + m_{\text{В}} = m_{\text{Д}} \pm \Delta m,$$

где  $m_{\Gamma}$ ,  $m_{\text{В}}$ ,  $m_{\text{Д}}$  – соответственно массы газа, воздуха и продуктов горения, кг

$$m_{\Gamma} = 1 \cdot \rho_{\Gamma}; \quad m_{\text{в}} = V_{\text{д}} \cdot \rho_{\text{в}}; \quad m_{\text{д}} = V_{\text{д}} \cdot \rho_{\text{д}}.$$

где  $\rho_{\Gamma}$ ,  $\rho_{\text{в}}$ ,  $\rho_{\text{д}}$  – плотности газа, воздуха и продуктов горения, кг/м<sup>3</sup>

$$\rho = \frac{M_{\text{CO}_2} \cdot \% \text{CO}_2 + M_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \% \text{H}_2\text{O} + \dots}{100 \cdot 22,4},$$

где  $\rho$  – плотность, кг / м<sup>3</sup>;

$M_{\text{CO}_2}$ ,  $M_{\text{H}_2\text{O}}$  – соответственно молекулярные массы.

Для определения плотности влажного воздуха находим его состав

$$K_{\text{C-В}} = \frac{100}{100 + 0,1242 \cdot d_{\text{в}}}.$$

$$\text{O}_2^{\text{п}} = K_{\text{C-В}} \cdot \text{O}_2;$$

$$\text{N}_2^{\text{п}} = K_{\text{C-В}} \cdot \text{N}_2;$$

$$\text{H}_2\text{O}^{\text{п}} = K_{\text{C-В}} \cdot 0,1242 \cdot d_{\text{в}}.$$

---


$$\sum = 100\%$$

Плотность воздуха, кг / м<sup>3</sup>

$$\rho_{\text{В}} = \frac{M_{\text{N}_2} \cdot \% \text{N}_2 + M_{\text{O}_2} \cdot \% \text{O}_2 + M_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \% \text{H}_2\text{O}}{100 \cdot 22,4},$$

$$m_{\text{В}} = V_{\text{Д}}^{\text{ВЛ}} \cdot \rho_{\text{В}}, \text{ кг.}$$

Плотность газа; кг / м<sup>3</sup>

$$\rho_{\Gamma} = \frac{\left( M_{CO_2} \cdot \%CO_2 + M_{CO} \cdot \%CO + M_{H_2} \cdot \%H_2 + \right. \\ \left. + M_{N_2} \cdot \%N_2 + M_{CH_4} \cdot \%CH_4 + M_{H_2O} \cdot \%H_2O \right)}{100 \cdot 22,4},$$

масса газа  $m_{\Gamma} = 1 \cdot \rho_{\Gamma}$ , кг.

Плотность продуктов горения; кг / м<sup>3</sup>

$$\rho_{\delta} = \frac{\left( M_{CO_2} \cdot \%CO_2 + M_{N_2} \cdot \%N_2 + M_{O_2} \cdot \%O_2 + M_{H_2O} \cdot \%H_2O \right)}{100 \cdot 22,4},$$

Масса продуктов горения газа  $m_{\delta} = V_{\delta} \cdot \rho_{\delta}$ , кг.

Невязки баланса:

$$\Delta m = \frac{(m_B + m_{\Gamma}) - m_D}{m_B + m_{\Gamma}} \cdot 100\% < 0,5\%$$

Расчет горения топлива выполнен с достаточной точностью.

### 5.3 Расчет расхода газа и воздуха. Определение температуры смеси.

Расход газа на горелку,  $\frac{m^3}{c}$

$$V_0^{\Gamma} = \frac{Q_{НОМ}}{Q_H^P}$$

где  $Q_H^P$  – теплота сгорания топлива, кДж / м<sup>3</sup>;

$Q_{НОМ}$  – тепловая мощность горелки, кВт (МВт)

Расход воздуха для сжигания газа,  $\frac{m^3}{c}$

$$V_B^0 = \alpha \cdot V_O^B - \alpha \cdot V_{\Gamma}^0$$

Плотность и расход газа и воздуха при рабочих условиях

$$\rho_{\Gamma} = \rho_{\Gamma}^0 \cdot \frac{273}{273 + t_{\Gamma}} \cdot \frac{101,32 + P_{\Gamma}}{101,32}, \quad \text{кг/м}^3; \quad \rho_B = \rho_B^0 \cdot \frac{273}{273 + t_B}, \quad \text{кг/м}^3;$$

$$V_{\Gamma} = V_{\Gamma}^0 \cdot \frac{273 + t_{\Gamma}}{273} \cdot \frac{101,32}{101,32 + P_{\Gamma}}, \quad \text{м}^3/\text{с}; \quad V_B = V_B^0 \cdot \frac{273 + t_B}{273}, \quad \text{м}^3/\text{с}.$$

Действительные массовые расходы газа и воздуха, кг/с

$$G_{\Gamma} = V_{\Gamma} \cdot \rho_{\Gamma}, \quad G_{\text{В}} = V_{\text{В}} \cdot \rho_{\text{В}},$$

Температура смеси определяется методом последовательных приближений

$$I_{\text{см}} = I_{\Gamma} + I_{\text{В}}$$

где  $I_{\text{см}}, I_{\Gamma}, I_{\text{В}}$  – соответственно энтальпии смеси, газа и воздуха,  $\text{кДж} / \text{м}^3$ .

$$I_{\Gamma}^{t=15^{\circ}\text{C}} = 0,01 \cdot V_{\Gamma}^0 (ct)_{\Gamma} = 0,01 \cdot V_{\Gamma}^0 \left( \begin{array}{l} \%CO \cdot (ct)_{CO} + \%H_2 \cdot (ct)_{H_2} + \%CO_2 (ct)_{CO_2} + \\ + \%N_2 (ct)_{N_2} + \%CH_4 (ct)_{CH_4} + \%H_2O (ct)_{H_2O} \end{array} \right),$$

где  $(ct)_{CO}, (ct)_{H_2} \dots$  – энтальпии компонентов газа, взятые при температуре газа,  $\text{кДж} / \text{м}^3$ .

$$I_{\text{В}}^{t=20^{\circ}\text{C}} = 0,01 \cdot V_{\text{В}}^0 (ct)_{\text{В}} = 0,01 \cdot V_{\text{В}}^0 [\%O_2 (ct)_{O_2} + \%N_2 (ct)_{N_2} + \%H_2O (ct)_{H_2O}]$$

$$I_{\text{см}} = I_{\Gamma} + I_{\text{В}} .$$

Принимаем температуру смеси  $t_{\text{см}} = 19^{\circ}\text{C}$ .

Теплоемкость газа и воздуха при температуре смеси  $t_{\text{см}} = 19^{\circ}\text{C}$ :

$$C_{\Gamma}^{t_{\text{см}}=19^{\circ}\text{C}} = 0,01 \cdot \left( \begin{array}{l} \%CO \cdot C_{CO} + \%H_2 \cdot C_{H_2} + \%CO_2 \cdot C_{CO_2} + \\ + \%N_2 \cdot C_{N_2} + \%CH_4 \cdot C_{CH_4} + \%H_2O \cdot C_{H_2O} \end{array} \right), \quad \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}$$

$$C_{\text{В}}^{t_{\text{см}}=19^{\circ}\text{C}} = 0,01 \cdot (\%O_2 \cdot C_{O_2} + \%N_2 \cdot C_{N_2} + \%H_2O \cdot C_{H_2O}), \quad \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}$$

$$I_{\text{см}} = (V_{\text{В}} C_{\text{В}}^{t_{\text{см}}} + V_{\Gamma} C_{\Gamma}^{t_{\text{см}}}) t_{\text{см}}, \quad \text{кДж} / \text{м}^3$$

Так как  $I_{\text{см}} \approx I_{\Gamma} + I_{\text{В}}$ , то окончательно температуру смеси принимаем равной  $19^{\circ}\text{C}$ .

Определяем расход смеси,  $\text{м}^3 / \text{с}$

$$V_{\text{см}} = \frac{V_{\text{В}}^0 + V_{\Gamma}^0}{273} \cdot (273 + t_{\text{см}}) .$$

Плотность смеси,  $\text{кг} / \text{м}^3$

$$\rho_{\text{см}} = \frac{G_{\Gamma} + G_{\text{В}}}{V_{\text{см}}} .$$

#### 5.4 Расчет воздушного канала горелки

Выбор коллектора или подвода воздуха производится по экономически целесообразной массовой скорости:  $\rho \cdot W = 20 \div 24 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$ . Принимаем  $\rho W = \dots$

$$\text{скорость воздуха } W_B = \frac{\rho \cdot W}{\rho_B}, \text{ м/с} .$$

$$\text{Пересечение воздушного канала } F_B = \frac{V_B}{W_B}, \text{ м}^2 .$$

$$\text{С другой стороны } D_B = \sqrt{\frac{4 \cdot F_B}{\pi}}, \text{ м} .$$

Диаметр кратера горелки

$$\text{принимаем } \frac{D_{кр}}{D_B} = 0,7 \div 0,8 \rightarrow D_{кр} = 0,75 \cdot D_B, \text{ м} .$$

Принимаем давление воздуха  $P_B = 1000 \text{ Па}$ , тогда  $P_B^{разр} = 0,9 \cdot P_B, \text{ Па}$  .

С другой стороны

$$P_B^{РАЗР} = (1 + \zeta_{конф}) \cdot \frac{W_{см}^2 \rho_{см}}{2}, \text{ Па} ,$$

$$\text{где } \zeta_{конф} - \text{сопротивление конфузора } \zeta_{конф} = 0,5 \sin \frac{\beta}{2} \left[ 1 - \left( \frac{D_{кр}}{D_B} \right)^2 \right] ,$$

$\beta = 30^\circ$  - центральный угол конфузора.

Скорость смеси, м / с

$$W_{см} = \sqrt{\frac{2 \cdot P_B^{РАЗР}}{(1 + \zeta_{конф}) \cdot \rho_{см}}} .$$

По скорости смеси и расходе смеси определяем площадь сечения кратера,  $\text{м}^2$

$$f_{кр} = \frac{V_{см}}{W_{см}} .$$

Тогда диаметр кратера  $d_{KP} = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{KP}}{\pi}}$ , м .

Принятое значение диаметра кратера соответствует расчетному, то есть пересчет не нужен.

### 5.5 Расчет газовыпускных отверстий

Оптимальная глубина проникновения газовых струй в воздушный поток (при периферической подачи газа), м

тогда  $h=0,2 \div 0,25 \cdot D_B$  - периферийная подача газа;

$h = \frac{b}{2} = 0,25(D_B - D_\Gamma)$  - центральная подача газа

Оптимальное количество отверстий будет при  $1,1 \leq \frac{t}{D_{СТР}} \leq 2,5$  .

принимаем  $\frac{t}{D_{СТР}} = 1,5$ , Тогда оптимальное число отверстий будет равняться

$$n = \frac{\pi \cdot (D_{II} - 2h)}{0,75 \cdot h \cdot \frac{t}{D_{СТР}}}, шт .$$

По формуле Иванова диаметр газовыпускных отверстий, м

$$d = \frac{K_s \cdot K_\psi \cdot V_\Gamma \cdot \sqrt{\frac{\rho_\Gamma}{\rho_B}}}{0,785 \cdot h \cdot \eta \cdot \varepsilon \cdot n \cdot W_B} ,$$

где  $K_s$  – коэффициент, учитывающий влияние шага между отверстиями на величину  $h$ , предварительно принимаем  $K_s = 1,56$ ;

$K_\psi$  – коэффициент, учитывающий влияние на величину  $h$  угла атаки газовой струи,  $K_\psi = 1$ ;

$\eta$  – коэффициент, учитывающий увеличение скорости потока, сносит, через присадку газа  $\eta = \frac{G_B + G_\Gamma}{G_B}$  ;

$\varepsilon$  – коэффициент сжатия струи при витіканні из отверстия, м<sup>3</sup> / с.

Шаг между отверстиями  $S = \frac{\pi \cdot D_B}{n}, \text{ м}$ .

$K_s = 1,5 + 0,026 \cdot \frac{s}{d}$  - периферийная подача газа;

$K_s = 1,71 - \frac{n-1}{35}$  - центральная подача газа

Потому что  $K_s$  расчетный совпадает с принятым, то считаем, что расчет выполнен с достаточной точностью.

Скорость утечки газа, м / с

$$W_r = \frac{V_r}{0,785 \cdot d^2 \cdot \varepsilon \cdot n \cdot 10^{-6}}.$$

Максимальная скорость утечки газа при  $P_r > 10000$  Па определяется по формуле, м / с

$$W_r^{MAX} = \varphi \cdot \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot \frac{P_a}{\rho} \cdot \left(1 - \left(\frac{P_0}{P_a}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right)},$$

где  $\varphi = 0,97$  - коэффициент скорости, учитывающий потери при переходе механической энергии в тепловую;

$k$  - показатель адиабаты, для газа,  $k$

$P_a$  - абсолютное давление газа, Па;

$$P_a = P_0 + P_1;$$

где  $P_0$  - давление среды, Па;

$P_1$  - избыточное давление газа, Па.

Потому что  $W_r > W_r^{MAX}$ , То размещаемый давление газа перед горелкой обеспечивает необходимую скорость его утечки из газовыпускных отверстий.

## 5.6 Определение размеров газового коллектора

Суммарная площадь отверстий,  $\text{м}^2$

$$\sum f_{OTB} = n \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}, \text{ т.к } f_{OTB} = \frac{V_r}{W_r} = \frac{\pi d^2}{4 W_r}$$

При односторонней подачи газа для того, чтобы неравномерность распределения газа по газовыпускным отверстиям была 10 - 12%, отношение должно равняться: при одностороннем подводе газа:

$$\frac{\sum f_{OTB}}{F_K} = 0,06 \div 0,08$$

При двустороннем подводе газа:

$$\frac{\sum f_{OTB}}{F_K} = 0,38 \div 0,43 ,$$

тогда  $F_K = \frac{\sum f_{OTB}}{0,08}, \text{ м}^2 .$

Диаметр газового патрубка, м

$$d_r = \sqrt{\frac{V_r}{0,785 \cdot W_r}}$$

Длина газового коллектора:

$$L_r = (2 \div 3) \cdot d_{ГАЗОПР} .$$

Внутренний диаметр газового коллектора, м

$$D_K = D_{В.нар} + \frac{2 \cdot F_K}{L_K}$$

Ширина коллектора, м

$$B_K = \frac{D_K - D_{В.нар}}{2}$$

## 5.7 Определение возможного отрыва пламени от горелки

Отрыв пламени от горелки при холодном воздухе, м / с

$$W_{OT} = 0,0575 \cdot 10^2 \cdot a^{-2} \cdot U_n^{1,5} \left( \frac{D_{кр}}{a} \right)^{0,5}$$

где  $U_n$  – номинальная скорость распространения пламени, м / с.

$a$  - коэффициент температуропроводности. для воздуха  
 $a = 21,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с} .$

$$U_n = \frac{r_1 U_{n1} + r_2 U_{n2} + \dots + r_n U_{nm}}{r_1 + r_2 + \dots + r_n} \cdot \left( \frac{100 - 1,2CO_2 - N_2}{100} \right)$$

где  $U_{n1}, U_{n2}, U_{nm}$  – скорость распространения фронта пламени для чистых газов, м / с.

$r_1, r_2, \dots, r_n$  – содержание данного газа в смеси, %.

$$U_n = \frac{r_1 U_{n1} + r_2 U_{n2} + \dots + r_n U_{nm}}{r_1 + r_2 + \dots + r_n} \cdot \left( \frac{100 - 1,2CO_2 - N_2}{100} \right), \text{ м/с.}$$

Отрыв пламени от горелки при подогреве воздуха

$$W_{от} = 0,575 \cdot 10^2 \cdot a^{-2} \cdot U_n^{1,5} \left( \frac{D_{кр}}{a} \right)^{0,5} \cdot \left( \frac{T}{T_0} \right)^{0,8}$$

Так как  $W_{см} < W_{от}$ , То отрыва пламени от горелки не будет.

При обогащении воздуха кислородом,  $W_{от}$ .

$$W_{от} = 0,575 \cdot 10^2 \cdot a^{-2} \cdot U_n^{1,5} \left( \frac{D_{кр}}{a} \right)^{0,5} \cdot \left( \frac{X_{O_2}^B}{X_B^{21}} \right)^{2,25};$$

где  $T$  - температура подогрева воздуха, К;

$T_0$  - температура холодного воздуха, К;

$X_{O_2}^B$  - обогащения воздуха кислородом;

$X_B^{21}$  - обычный воздух.

## 5.8 Работа горелки в нерасчетных условиях

Работа газовых горелок любых типов не будет нарушена при равенстве чисел Воббе основного и заменяющего газа. Число Воббе определяется по формуле:

$$W_0 = \frac{Q_H^P}{\sqrt{\rho_{\Gamma}}} , \quad W_0' = \frac{Q_H^P}{\sqrt{\rho_{\Gamma}}} .$$

Так как числа Воббе отличаются на допустимую величину, то при переводе газогорелочного устройства из основного газа на заменяющее ГГУ полный перерасчет делать не нужно, а перерасчитывается только диаметр газового сопла, м

$$d' = d \cdot \sqrt{\frac{Q_H^P}{(Q_H^P)'} \cdot \frac{P \cdot \rho'}{P' \cdot \rho_r}}$$

### 5.9 Расчет длины факела горелки

Длина факела горелки определяется по методике, описанной в работе [3, с.275], м

$$L_\phi = \frac{d}{2} \sqrt{\frac{W_{CM}^2}{W_{PII}^2} - 1}$$

где  $W_{CM}$  – средняя скорость истечения смеси из сопла горелки, м / с;

$W_{PII}$  – средняя скорость распространения фронта пламени, м / с;

$d$  - диаметр сопла, м.

### 5.10 Выбор вентилятора и дымоcоса

Для выбора вентилятора принимаем потери давления в воздушном тракте  $P_p$  Па. Для надежности берем запас мощности 20%, тогда полное давление, что должен создать вентилятор

$$\sum P_{ВТР} = 1,2 \div 1,25 P_{II}$$

Часовой расход воздуха, м<sup>3</sup>/ч

$$V_B = V_o^B \cdot V_r \cdot 3600$$

С учетом запаса мощности производительности, м<sup>3</sup>/ч

$$V_{ВЕНТ} = 1,4 \cdot V_B$$

Выбираем вентилятор ВД-6, имеет следующие характеристики: производительность - 6800 м<sup>3</sup>/ч, полное давление - 9,8 кПа, частота вращения - 970 об/мин.

Для выбора дымососа суммарные потери давления принимаем равными 500 Па. Расчетное разряжение, которое необходимо создать дымососом

$$H_p = 1,4 \cdot 500 = 700 \text{ Па} .$$

Производительность дымососа, м<sup>3</sup>/ч:

$$V_{\text{дым}} = V_{\text{д}} \cdot V_{\text{г}} \cdot 3600 \cdot K$$

где  $K = 1,2 \div 1,4$  - коэффициент запаса.

Выбираем по  $H_p$  и  $V_{\text{дым}}$  дымосос Д-9, имеющий следующие характеристики: производительность - 18000 м<sup>3</sup>/ч, полное давление - 4,3 кПа, частота вращения - 730 об/мин.

## 6 РАСЧЕТ КИНЕТИЧЕСКОЙ ГОРЕЛКИ

### 6.1 Описание кинетической горелки

Кинетические горелки – это горелки с полным предварительным смешением. Они обеспечивают полное предварительное смешение топлива с воздухом, необходимым для полного сжигания топлива, при малейшем, по сравнению с горелками других типов, коэффициенте расхода воздуха. Поэтому горелки с предварительным смешением при аналогичном топливе обеспечивают самую высокую температуру горения.

Горелки подобного типа применяют при сжигании газа с низкой теплотой сгорания и в тех случаях, когда необходимо нагревать металл с большой скоростью. Их целесообразно использовать также при сжигании топлива, не дающего светящегося пламени. Такие горелки обеспечивают концентрированное выделение тепла в сравнительно небольшом объеме, дают короткий факел и создают зону достаточно высоких температур вблизи горелки.

Кинетические горелки целесообразно применять при необходимости равномерного нагрева и рассредоточенных мелких горелок. В этом случае отпадает необходимость в установке вентиляторов, воздуховодов и устройств для регулирования подачи воздуха.

Основные преимущества, недостатки и область применения, конструкция горелки представлены на рисунке 2.

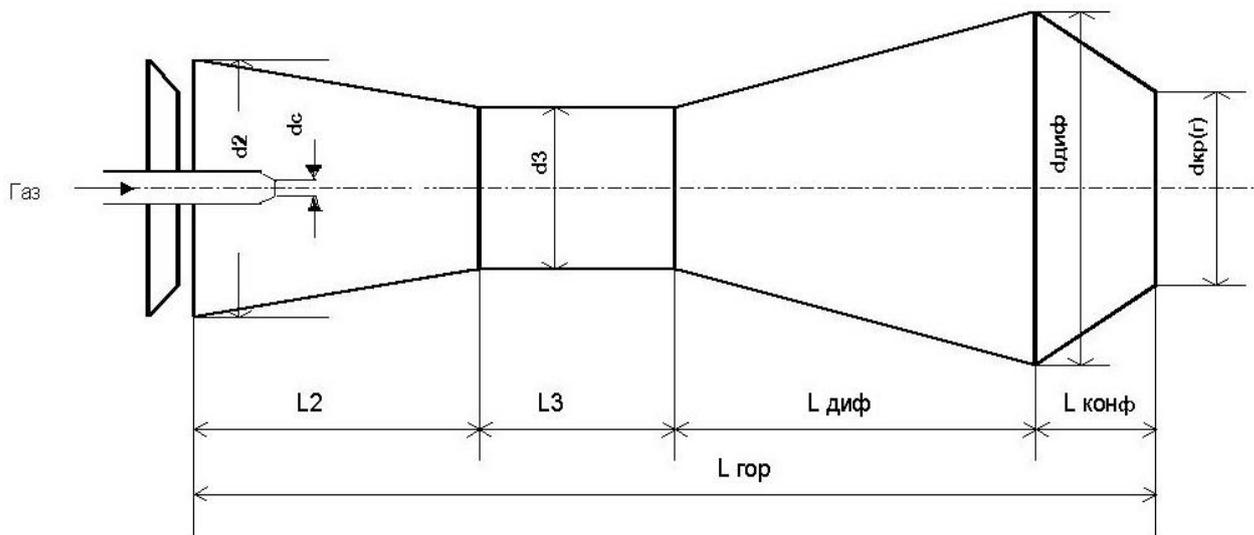


Рисунок 2 – Схема кинетической горелки

## 6.2 Расчет горения топлива

Топливо - любая смесь (пропан-бутановая или иная).

Определение рабочего состава топлива производится с помощью коэффициента пересчета из сухого состава газа на рабочий состав:

$$K_{C-P} = \frac{100}{100 + 0,1242 \cdot W_T}.$$

Рабочий состав газа, %

$$C_3H_8^P = K_{C-P} \cdot C_3H_8^C;$$

$$C_4H_{10}^P = K_{C-P} \cdot C_4H_{10}^C;$$

$$CH_4^P = K_{C-P} \cdot CH_4^C;$$

$$H_2O^P = K_{C-P} \cdot 0,1242 \cdot W_T$$

---


$$\Sigma = 100\%$$

Теплота сгорания газа,  $\frac{МДж}{м^3}$

$$Q_H^P = 357 \cdot CH_4 + 911 \cdot C_3H_8 + 1185 \cdot C_4H_{10}$$

Теоретически необходимое количество воздуха для сжигания газа,  $\frac{\text{м}^3_{\text{в-ха}}}{\text{м}^3_{\text{газа}}}$ .

$$V_0 = \frac{1 + \frac{N_2}{O_2}}{100} \cdot \left[ \sum \left( m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n \right]$$

Теоретически необходимо количество влажного воздуха для сжигания газа  $\frac{\text{м}^3_{\text{в-ха}}}{\text{м}^3_{\text{газа}}}$ .

$$V_0^{B.I} = V_0 \cdot (1 + 0,001242 \cdot d_v)$$

где  $d_v$  - влагосодержание сухого воздуха, г/м<sup>3</sup>. При  $t = 20$  °C равно 18,9°C.

действительный расход сухого воздуха,  $\frac{\text{м}^3_{\text{в-ха}}}{\text{м}^3_{\text{газа}}}$ .

$$V_d = \alpha \cdot V_0$$

действительный расход влажного воздуха,  $\frac{\text{м}^3_{\text{в-ха}}}{\text{м}^3_{\text{газа}}}$ .

$$V_d^{B.I} = \alpha \cdot V_0^{B.I}$$

где  $\alpha$  - коэффициент расхода воздуха.

Определение количества продуктов сгорания при сжигании 1 м<sup>3</sup> газа.

$$V_d = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{SO_2} + V_{O_2} + V_{N_2},$$

где  $V_d$  - объем продуктов горения, м<sup>3</sup> дыма/м<sup>3</sup> газа.

$$V_{CO_2} = 0,01 \cdot \left( \sum m C_m H_n \right) \cdot \frac{\text{м}^3_{CO_2}}{\text{м}^3_{\text{дыма}}};$$

$$V_{H_2O} = 0,01 \cdot \left( \sum \frac{n}{2} \cdot C_m H_n + H_2O_{\text{топ}} + 0,1242 \cdot V_D^C \cdot d_v \right) \cdot \frac{\text{м}^3_{H_2O}}{\text{м}^3_{\text{дыма}}};$$

$$V_{N_2} = 0,01 \cdot \left( N_2^{\text{в-ха}} \cdot V_D^C \right) \cdot \frac{\text{м}^3_{N_2}}{\text{м}^3_{\text{дыма}}};$$

$$V_{O_2} = 0,01 \cdot O_2^B (\alpha - 1) \cdot V_0, \frac{\text{м}^3 \text{O}_2}{\text{м}^3 \text{дыма}}$$

$$V_{\text{д}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{O_2} + V_{N_2}, \frac{\text{м}^3 \text{дыма}}{\text{м}^3 \text{газа}}$$

состав продуктов сгорания, %:

$$CO_2 = \frac{V_{CO_2}}{V_{\text{д}}} \cdot 100;$$

$$H_2O = \frac{V_{H_2O}}{V_{\text{д}}} \cdot 100;$$

$$N_2 = \frac{V_{N_2}}{V_{\text{д}}} \cdot 100;$$

$$O_2 = \frac{V_{O_2}}{V_{\text{д}}} \cdot 100;$$

---


$$\Sigma = 100\%$$

Для оценки точности расчета просчитывается материальный баланс процесса горения.

$$m_{\text{г}} + m_{\text{в}} = m_{\text{д}} \pm \Delta m,$$

где  $m_{\text{г}}, m_{\text{в}}, m_{\text{д}}$  – соответственно массы газа, воздуха и продуктов горения, кг

$$m_{\text{г}} = 1 \cdot \rho_{\text{г}}; \quad m_{\text{в}} = V_{\text{д}} \cdot \rho_{\text{в}}; \quad m_{\text{д}} = V_{\text{д}} \cdot \rho_{\text{д}}$$

где  $\rho_{\text{г}}, \rho_{\text{в}}, \rho_{\text{д}}$  – плотности газа, воздуха и продуктов горения.

$$\rho = \frac{M_{\text{CO}_2} \cdot \% CO_2 + M_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \% H_2O + \dots}{100 \cdot 22,4},$$

где  $\rho$  – плотность, кг / м<sup>3</sup>;

$M_{\text{CO}_2}, M_{\text{H}_2\text{O}}$  – соответственно молекулярные массы.

Для определения плотности воздуха находим его состав:

$$K_{\text{с-в}} = \frac{100}{100 + 0,1242 \cdot d_{\text{с}}}$$

$$O_2^P = K_{C-B} \cdot O_2;$$

$$N_2^P = K_{C-B} \cdot N_2;$$

$$H_2O^P = K_{C-B} \cdot 0,1242 \cdot d_B.$$

---


$$\Sigma = 100\%$$

Плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>

$$\rho_{В} = \frac{M_{N_2} \cdot \% N_2 + M_{O_2} \cdot \% O_2 + M_{H_2O} \cdot \% H_2O}{100 \cdot 22,4}$$

$$m_{II} = V_{\delta}^{B.II} \cdot \rho_{II}, \text{ кг.}$$

Плотность газа, кг/м<sup>3</sup>

$$\rho_{Г} = \frac{\left( M_{CH_4} \cdot \% CH_4 + M_{C_3H_8} \cdot \% C_3H_8 + \right. \\ \left. + M_{C_4H_{10}} \cdot \% C_4H_{10} + M_{H_2O} \cdot \% H_2O \right)}{100 \cdot 22,4}$$

Масса газа, кг.  $m_{Г} = 1 \cdot \rho_{Г}$

Плотность продуктов горения: , кг/м<sup>3</sup>

$$\rho_{\delta} = \frac{(M_{CO_2} \cdot \% CO_2 + M_{N_2} \cdot \% N_2 + M_{O_2} \cdot \% O_2 + M_{H_2O} \cdot \% H_2O)}{100 \cdot 22,4}$$

Масса продуктов горения газа, кг.

$$m_{\delta} = V_{\delta} \cdot \rho_{\delta}$$

Невязки баланса:

$$\Delta m = \frac{(m_{В} + m_{Г}) - m_{Д}}{m_{В} + m_{Г}} \cdot 100\% < 0,5\%$$

Расчет горения топлива выполнен с достаточной точностью.

### 6.3 Расчет расхода газа и воздуха. Определение температуры смеси

Расход газа на горелку, м<sup>3</sup>/с,

$$V_0^Г = \frac{Q_{НОМ}}{Q_H^P}$$

где  $Q_H^P$  – теплота сгорания топлива, кДж / м<sup>3</sup>;

$Q_{НОМ}$  – тепловая мощность горелки, кВт (МВт)

Расход воздуха для сжигания газа,  $м^3/с$

$$V_B = \alpha \cdot V_B^0 \cdot V_G^0$$

Плотность ( $кг/м^3$ ) и расход газа и воздуха ( $м^3/с$ ) при рабочих условиях

$$\rho_G = \rho_G^0 \cdot \frac{273}{273 + t_G}; \quad \rho_B = \rho_B^0 \cdot \frac{273}{273 + t_B}; \quad V_G = V_G^0 \cdot \frac{273 + t_G}{273}; \quad V_B = V_B^0 \cdot \frac{273 + t_B}{273}.$$

Действительные массовые расходы газа и воздуха,  $кг/с$

$$G_G = V_G \cdot \rho_G; \quad G_B = V_B \cdot \rho_B.$$

Температура смеси определяется методом последовательных приближений.

$$I_{CM} = I_G + I_B,$$

где  $I_{CM}, I_G, I_B$  – соответственно энтальпии смеси, газа и воздуха,  $\frac{кДж}{м^3}$ .

$$I_G^{t=20^\circ C} = 0,01 \cdot V_G^0 (ct)_G = 0,01 \cdot V_G^0 \left( \%CH_4 \cdot (ct)_{CH_4} + \%C_3H_8 \cdot (ct)_{C_3H_8} + \right. \\ \left. + \%C_4H_{10} (ct)_{C_4H_{10}} + \%H_2O (ct)_{H_2O} \right); \quad \frac{кДж}{м^3},$$

где  $(ct)_{CO}, (ct)_{H_2} \dots$  – энтальпии компонентов газа, взятых при температуре газа,  $\frac{кДж}{м^3}$ .

$$I_B^{t=20^\circ C} = 0,01 \cdot V_B^0 (ct)_B = 0,01 \cdot V_B^0 \left( O_2 (ct)_{O_2} + \%N_2 (ct)_{N_2} + \%H_2O (ct)_{H_2O} \right); \quad \frac{кДж}{м^3}$$

Принимаем температуру смеси  $t_{CM} = 20^\circ C$ .

Теплоемкость газа и воздуха при температуре смеси  $t_{CM} = 20^\circ C$

$$C_G^{t=20^\circ C} = 0,01 \cdot \left( \%CH_4 \cdot C_{CH_4} + \%C_3H_8 \cdot C_{C_3H_8} + \right. \\ \left. + \%C_4H_{10} \cdot C_{C_4H_{10}} + \%H_2O \cdot C_{H_2O} \right), \quad \frac{кДж}{м^3 \cdot K}.$$

$$C_B^{t_{CM}=20^\circ C} = 0,01 \cdot (\%O_2 \cdot CO_2 + \%N_2 \cdot CN_2 + \%H_2O \cdot CH_2O), \quad \frac{кДж}{м^3 \cdot K}.$$

$$I_{CM} = \left( V_B C_B^{t_{CM}} + V_G C_G^{t_{CM}} \right) \cdot t_{CM}, \quad \frac{кДж}{м^3}$$

Потому что  $I_{CM} \approx I_G + I_B$ , То окончательно температуру смеси принимаем равной  $20^\circ C$ .

Определяем расход смеси ,  $м^3/с$

$$V_{см} = \frac{V_B^0 + V_G^0}{273} \cdot (273 + t_{см}) .$$

Плотность смеси,  $кг / м^3$

$$\rho_{см} = \frac{G_G + G_B}{V_{см}} .$$

#### 6.4 Определение конструктивных размеров горелки

Объемный коэффициент инжекции

$$i = \alpha' \cdot V_0 ,$$

где  $\alpha'$  – коэффициент первичного расхода воздуха.

Скорость утечки газа,  $м / с$

$$W_G = \varphi \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P_G}{\rho_G}} .$$

Площадь газового сопла,  $м^2$

$$f_C = \frac{V_G}{W_G} .$$

Диаметр газового сопла,  $м$

$$d_C = d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot f_C}{\pi}} .$$

Диаметр смесителя,  $г$ .

$$d_{см} = d_3 = d_1 \cdot \sqrt{(1+i) \cdot \left(1+i \cdot \frac{\rho_B}{\rho_G}\right) \cdot \left(1+\frac{\xi}{2}\right)}$$

где  $\xi = 0,2$  – суммарный коэффициент сопротивления по тракту горелки.

Диаметр входного отверстия для воздуха,  $м$

$$d_2 = 1,5 \div 2 d_3 .$$

Диаметр кратера горелки,  $м$

$$d_{кр} = d_{ввх} = 1,05 \div 1,1 \cdot d_3 .$$

Диаметр входного сечения диффузора для горелок низкого давления, м

$$d_4 = 2,0 \div 2,2 d_3.$$

Длина конфузора, м  $L_1 = (1,5 \div 2,0) \cdot d_3$

Длина смесителя, г.  $L_2 = (1,0 \div 1,5) \cdot d_3.$

Длина диффузора :, г.  $L_3 = \frac{d_4 - d_3}{2 \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}}$

Длина конфузора, м  $L_4 = d_{\text{ВЫХ}}.$

## 6.5 Определение возможности проскока и отрыва пламени от горелки

Скорость проскока пламени при холодном воздухе , м/с.

$$W_{\text{ПП}} = 7,75 \cdot 10^{-3} \cdot U_n^2 \frac{d_{\text{КР}}}{a}$$

где  $U_n$  – номинальная скорость распространения пламени, м / с;

$a$  - коэффициент температуропроводности;  $a = 21,4 \cdot 10^{-6}$ ,  $\text{м}^2 / \text{с}$  - как для воздуха

$$U_n = \frac{r_1 U_{n1} + r_2 U_{n2} + \dots + r_n U_{nn}}{r_1 + r_2 + \dots + r_n} \cdot \left( \frac{100 - 1,2 \text{CO}_2 - N_2}{100} \right),$$

где  $U_{n1}, U_{n2}, U_{nn}$  – скорость распространения фронта пламени для чистых газов, м / с;

$r_1, r_2, \dots, r_n$  – содержание данного газа в смеси, %;

$\frac{100 - 1,2 \text{CO}_2 - N_2}{100}$  - поправка на балласт.

Скорость проскока при подогреве воздуха ( $t = 20 \div 400^\circ \text{C}$ )

$$W_{\text{ПП}} = 7,75 \cdot 10^{-3} \cdot U_n^2 \cdot \frac{D_{\text{КР}}}{a} \left( \frac{T}{T_0} \right)^{1,65}$$

Скорость истечения смеси из горелки:  $W_{\text{СМ}} = \frac{V_{\text{СМ}}}{f_{\text{СМ}}} = \frac{0,586}{0,785 \cdot d_{\text{КР}}^2}$ , м/с.

Потому что  $W_{\text{СМ}} > W_{\text{ПП}}$ , То проскока пламени в горелку не будет.

Так как  $W_{CM} < W_{ВД}$ , то отрыва пламени от горелки будет.

Скорость проектирования при обогащении воздуха кислородом:

$$W_{ПП} = 7,75 \cdot 10^{-3} \cdot U_n^2 \cdot \frac{D_{KP}}{a} \left( \frac{X^{II}_{O_2}}{X^{21}_{O_2}} \right)^{2,25}$$

Скорость отрыва пламени рассчитывается также как и диффузионной горелки.

### 6.6 Работа горелки в нерасчетных условиях.

В практике проектирования и эксплуатации газовых горелок нередко приходится сталкиваться с необходимостью пересчета их в связи с переходом на другой газ.

Работа горелок на другом газе с параметрами газа ( $Q_n^p, P_2, \rho_2$ ), отличными от расчетных, приводит к изменению их тепловой мощности и может привести к ухудшению качества сжигания.

Колебания теплоты сгорания газа на 10% заметно влияют на показатели процесса горения. Чаще всего в практике имеет место изменение давления газа, но бывают случаи, когда необходимо перевести тепловой агрегат на отопление с одного вида газа на другой. При этом для того, чтобы сохранить производительность горелки, необходимо изменить его выходное сечение или давление газа перед соплом. Работа газовых горелок любых типов не будет нарушена при равенстве чисел Воббе основного газа и заменяющего газа. Число Воббе – отношение теплоты сгорания газа ( $Q_n^p$ ) к корню квадратному из его плотности:

$$W_0 = \frac{Q_n^p}{\sqrt{\rho}}$$

Возможны следующие варианты:

- изменение давления газа ( $Q_n^p, \rho_2 - const$ )

$$d' = d \sqrt{\frac{P}{P'}}$$

где  $d, d'$  - существующий и расчетный диаметры горелки, м;

$P, P'$  - давление основного газа и газа, который заменяется, Па;

- переход на другой газ, то есть изменяются параметры газа ( $Q_H^P, P, \rho$ )

$$d' = d \sqrt{\frac{Q_H^P}{(Q_H^P)'} \cdot \sqrt{\frac{P \cdot \rho'}{P' \cdot \rho}}}$$

где  $Q_H^P$  и  $(Q_H^P)'$  - теплота сгорания основного и заменяющего газа, кДж/м<sup>3</sup>;

-  $\rho, \rho'$  - плотность основного и заменяющего газов, кг/м<sup>3</sup>.

- меняется теплота сгорания и плотность газа, давление не меняется

$$d' = d \sqrt{\frac{Q_H^P}{(Q_H^P)'} \cdot \sqrt{\frac{\rho'}{\rho}}}$$

- меняются  $Q_H^P$  и  $\rho$  газа при сохранении диаметра горелки необходимо изменить давление газа перед соплом:

$$P' = P \cdot \frac{\rho}{\rho'} \left[ \frac{Q_H^P}{(Q_H^P)'} \right]^2, \text{ Па}$$

## 6.7 Расчет длины факела горелки

Длина факела горелки определяется по методике, описанной в работе [3, с.268], м:

$$L_\Phi = 0,54 \cdot d_0 \sqrt{\left( Q_H^P + \frac{\rho_0^e \cdot V_0^e}{\rho_0^e} \cdot i_B \right) \cdot V_0^e}$$

Где  $d_0$  - диаметр газового сопла, м;

$V_0^e$  - теоретически необходимое количество воздуха для сжигания 1 м<sup>3</sup> газа, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;

$i_B = 26$  кДж/кг - энтальпия воздуха при 20°C;

$\rho_0^g, \rho_0^z$  - плотность воздуха и газа при нормальных условиях, кДж/кг;

$Q_H^p$  - теплота сгорания газа, кДж / кг.

Б.И. Китаев и П.В. Левченко рекомендуют формулу для видимой длины горящего турбулентного факела

$$L_{\phi} = 14 \cdot K \cdot W_{\Gamma}^{0,34} \cdot d_0^{0,83}$$

где  $W_{\Gamma}$  - скорость газа из сопла, м / с;

$d_0$  - диаметр сопла, м;

$K = \frac{0,24}{4187} \cdot Q_H^p$  - коэффициент, зависящий от теплоты сгорания газа.

По данным Е.И. Казанцева и И.Д. Семикина длина турбулентного факела при сжигании различных газовых смесей в движущемся воздухе, может быть определена:

$$L_{\phi} = \frac{W_0}{2,4 + 0,925 \cdot W_{\Gamma} + W_B} \cdot (5,6 + 0,005 \cdot Q_H^p) \cdot d_0$$

## 7 РАСЧЕТ ВОЗДУШНОЙ КОНВЕРСИИ

### 7.1 Описание процесса конверсии

Конверсия - превращение, что происходит с углеводным газообразным топливом под действием температуры, в присутствии окислителя (воздух, кислород, пар, углекислый газ и их смеси) с целью получения газа с определенными свойствами. Конверсия углеводородов применяется для получения защитных сред в нагревательных и термических печах, а также в металлургии для получения защитных газов.

В процессе конверсии в присутствии окислителей углеводороды превращаются или в метан, или в водород и окись углерода. Метан, как основной продукт конверсии образуется на первой стадии конверсии углеводородов. Основными продуктами конверсии является окись углерода (CO) и водород (H<sub>2</sub>). Как окислитель при конверсии используют воздух, технический кислород, водяной пар, углекислый газ или их смеси. В зависимости от вида окислителя различают воздушный, кислородную, паровую и углекислотную конверсии.

В общем виде уравнение конверсии углеводородов имеет вид:



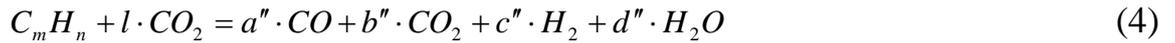
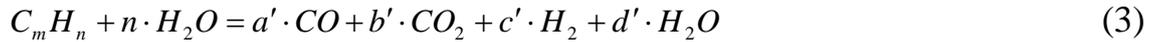
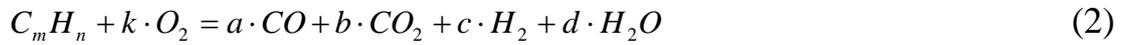
Процессы конверсии углеводородов осуществляют при отношении кислорода к углероду больше единицы, чтобы избежать выделения в системе углерода.

Наличие углерода в продуктах конверсии резко снижает активность катализаторов, применяемых при конверсии углеводородов, и затрудняет очистки технологических газов.

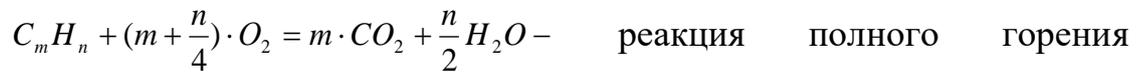
В связи с этим конверсию углеводородов следует вести таким образом, чтобы избежать сажеобразования.

7.2 Определение равновесного состава продуктов конверсии и ее температуры.

Конверсия углеводородов  $C_mH_n$  протекает по следующим реакциям:



где  $a, b, c, d$  – количество соответствующих компонентов в продуктах конверсии,  $m^3$ .



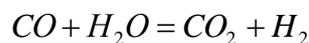
углеводорода типа  $C_mH_n$  при определенном  $\alpha$ .

Для определения равновесного состава продуктов конверсии ацетилена по уравнениям (1 - 4) необходимо составить балансовые уравнения по углероду, водороду и кислороду:

$$a + b = m, \quad c + d = n/2, \quad a + 2b + d = 2 \cdot k \cdot \alpha,$$

где  $k = (m + n / 4)$

В этих уравнениях неизвестные величины  $a, b, c, d$  и для их пребывания трех перечисленных выше уравнений недостаточно. Эту задачу можно решить, дополнительно воспользовавшись константой равновесия реакции водяного газа



$$k_p = \frac{P_{CO_2} \cdot P_{H_2}}{P_{CO} \cdot P_{H_2O}} \quad (5)$$

где  $P_{CO_2}, P_{H_2}, P_{CO}, P_{H_2O}$  – парциальные давления продуктов конверсии.

$$P_{CO_2} = \frac{b}{a + b + c + d} \cdot P_{ОБЩ}; \quad P_{CO} = \frac{a}{a + b + c + d} \cdot P_{ОБЩ};$$

$$P_{H_2O} = \frac{d}{a + b + c + d} \cdot P_{ОБЩ}, \quad P_{H_2} = \frac{c}{a + b + c + d} \cdot P_{ОБЩ};$$

где  $P_{\text{ОБЩ}}$  – давление в аппарате конверсии.

Подставив значения парциальных давлений в уравнение (5) получим

$$k_p = \frac{b \cdot c}{a \cdot d} .$$

Значение константы равновесия реакции водяного газа для различных температур можно найти в термодинамических справочниках или рассчитать по уравнению

$$\lg k_p = \frac{2170,66}{T} + 5,094 \cdot 10^{-4} \cdot T - 8,163 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 \dots - 2,4417$$

Задаемся температурой конверсии,  $t_{\text{КОНВ}} = 1600^\circ\text{C}$ . Для этой температуры  $\lg k_p = -0,615$ , тогда  $k_p = 0,242$ . Решая систему из 4-х уравнений, получим а, б, с, d.

Проверка константы равновесия водяного газа

$$k_p = \frac{b \cdot c}{a \cdot d} .$$

Равновесный состав продуктов конверсии

$$V_{\text{ПК}} = V_{\text{CO}} + V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2}, \frac{\text{м}^3 \text{ПК}}{\text{м}^3 \text{газу}} .$$

$$V_{\text{N}_2} = 3,76 \cdot k \cdot \alpha_{\text{O}_2}; \frac{\text{м}^3 \text{N}_2}{\text{м}^3 \text{газу}},$$

где  $k$  - коэффициент, стоящий в уравнении полного горения углеводородов типа  $\text{C}_m\text{H}_n$ .

Состав продуктов конверсии, %:

$$\text{CO} = \frac{a}{V_{\text{ПК}}} \cdot 100; \text{CO}_2 = \frac{b}{V_{\text{ПК}}} \cdot 100; \text{H}_2 = \frac{c}{V_{\text{ПК}}} \cdot 100; \text{H}_2\text{O} = \frac{d}{V_{\text{ПК}}} \cdot 100; \text{N}_2 = \frac{V_{\text{N}_2}}{V_{\text{ПК}}} \cdot 100.$$

---

$$\Sigma = 100\%$$

Определяем температуру процесса конверсии,  $^\circ\text{C}$

$$t_{\text{КОН}} = \frac{Q_{\text{КОН}}}{c_0^{\text{т.КОН}} \cdot V_{\text{ПК}}}$$

где  $Q_{\text{КОН}}$  – тепловой эффект процесса конверсии,  $\text{кДж} / \text{м}^3$ .

$c_0^{t_{\text{кон}}}$  – теплоемкость продуктов конверсии,  $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}$ .

Составим тепловой баланс

$$C_m H_n + (m + \frac{n}{4}) \cdot O_2 = m \cdot CO_2 + \frac{n}{2} H_2O + Q_1$$

$$C_m H_n + O_2 = m \cdot CO + \frac{n}{2} H_2 + Q_2$$

$$CO + 0,5 \cdot O_2 = CO_2 + Q_3$$

$$H_2O + 0,5 \cdot O_2 = H_2O + Q_4$$

Значение тепловых эффектов реакций находятся по справочнику [3, с. 191], [2, с. 290].

Согласно закону Гесса:

$$Q_1 = Q_2 + mQ_3 + \frac{n}{2} Q_4,$$

$$Q_2 = Q_1 - mQ_3 - \frac{n}{2} Q_4,$$

$$Q_2 = Q_1 - m \cdot 12627 - \frac{n}{2} 10785, \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}.$$

$$Q_{\text{кон}} = Q_2 + b \cdot 12627 + d \cdot 10785, \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}.$$

Теплоемкость продуктов конверсии,  $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}$ .

$$C_{\text{ПК}}^{t_{\text{кон}}} = 0,01 \cdot \left( \%CO \cdot C_{CO}^{t_{\text{кон}}} + \%H_2 \cdot C_{H_2}^{t_{\text{кон}}} + \%CO_2 \cdot C_{CO_2}^{t_{\text{кон}}} + \%N_2 \cdot C_{N_2}^{t_{\text{кон}}} + \%H_2O \cdot C_{H_2O}^{t_{\text{кон}}} \right)$$

Определяем температуру конверсии, °С.

$$t_{\text{кон}} = \frac{Q_{\text{кон}}}{c_0^{t_{\text{кон}}} \cdot V_{\text{ПК}}}$$

Так как принята и расчетная температуры значительно отличаются, то делаем следующее приближение. Принимаем  $t = \dots$  °С. Должно быть  $t_{\text{расч}} = t_{\text{пр}} \pm 5$  °С.

$$\lg k_p = \frac{2170,66}{T} + 5,094 \cdot 10^{-4} \cdot T - 8,163 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 \dots - 2,4417$$

Для выбранной температуры  $\lg k_p = \dots$ , тогда  $k_p = \dots$ .

Решаем систему уравнений (1-5) и определяем а, b, с, d.

Проверка константы равновесия водяного газа  $K_p$

Равновесный состав продуктов конверсии,  $\frac{m^3_{ПК}}{m^3_{газу}}$

$$V_{ПК} = V_{CO} + V_{CO_2} + V_{H_2} + V_{H_2O} + V_{N_2}$$

$$V_{N_2} = 3,76 \cdot k \cdot \alpha_{O_2}, \frac{m^3_{N_2}}{m^3_{газу}} \cdot$$

состав продуктов конверсии, %:

$$CO = \frac{a}{V_{ПК}} \cdot 100; CO_2 = \frac{b}{V_{ПК}} \cdot 100; H_2 = \frac{c}{V_{ПК}} \cdot 100; H_2O = \frac{d}{V_{ПК}} \cdot 100; N_2 = \frac{V_{N_2}}{V_{ПК}} \cdot 100.$$

---


$$\Sigma = 100\%$$

$$Q_{кон} = Q_2 + b \cdot 12627 + d \cdot 10785, \frac{кДж}{m^3}$$

Теплоемкость продуктов конверсии,  $\frac{кДж}{m^3 \cdot K}$

$$C_{ПК}^{t_{кон}} = 0,01 \cdot \left( \%CO \cdot C_{CO}^{t_{кон}} + \%H_2 \cdot C_{H_2}^{t_{кон}} + \%CO_2 \cdot C_{CO_2}^{t_{кон}} + \%N_2 \cdot C_{N_2}^{t_{кон}} + \%H_2O \cdot C_{H_2O}^{t_{кон}} \right)$$

Определяем температуру конверсии,  $t_{кон} = \frac{Q_{кон}}{C_0^{t_{кон}} \cdot V_{ПК}}, ^\circ C.$

Так как принятая и расчетная температуры отличаются, то делаем следующее приближение. Принимаем  $t_{кон} = \dots^\circ C.$

$$\lg k_p = \frac{2170,66}{T} + 5,094 \cdot 10^{-4} \cdot T - 8,163 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 \dots - 2,4417$$

Для выбранной температуры  $\lg k_p = \dots$ ,  $k_p = \dots$ .

Решаем систему уравнений:

$$\begin{cases} a + b =; c + d =; \\ a + 2b + d = 2k \cdot \alpha =; \\ k_p = \frac{b \cdot c}{a \cdot d}. \end{cases}$$

и определяем a, b, c, d.

Проверка константы равновесия водяного газа  $k_p$

Равновесный состав продуктов конверсии,  $\frac{m^3 \text{ПК}}{m^3 \text{газу}}$

$$V_{\text{ПК}} = V_{CO} + V_{CO_2} + V_{H_2} + V_{H_2O} + V_{N_2}$$

$$V_{N_2} = 3,76 \cdot k \cdot \alpha_{O_2} = 3,76 \cdot 2,5 \cdot 0,41; \frac{m^3 N_2}{m^3 \text{газу}} .$$

состав продуктов конверсии, %:

$$CO = \frac{a}{V_{\text{ПК}}} \cdot 100 =; CO_2 = \frac{b}{V_{\text{ПК}}} \cdot 100 =; H_2 = \frac{c}{V_{\text{ПК}}} \cdot 100 =; H_2O = \frac{d}{V_{\text{ПК}}} \cdot 100 =;$$

$$N_2 = \frac{V_{N_2}}{V_{\text{ПК}}} \cdot 100 = .$$

---


$$\Sigma = 100\%$$

$$Q_{\text{кон}} = Q_2 + b \cdot 12627 + d \cdot 10785, \frac{\text{кДж}}{m^3} .$$

Теплоемкость продуктов конверсии,  $\frac{\text{кДж}}{m^3 \cdot K}$

$$C_{\text{ПК}}^{t_{\text{кон}}} = 0,01 \cdot \left( \%CO \cdot C_{CO}^{t_{\text{кон}}} + \%H_2 \cdot C_{H_2}^{t_{\text{кон}}} + \%CO_2 \cdot C_{CO_2}^{t_{\text{кон}}} + \%N_2 \cdot C_{N_2}^{t_{\text{кон}}} + \%H_2O \cdot C_{H_2O}^{t_{\text{кон}}} \right)$$

Определяем температуру конверсии по формуле

$$t_{\text{кон}} = \frac{Q_{\text{кон}}}{C_0^{t_{\text{кон}}} \cdot V_{\text{ПК}}} .$$

Принята и расчетная температуры отличаются на допустимую величину. Окончательную температуру конверсии принимаем равной  $t_{\text{кон}} = \dots \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Определение объема сухих продуктов конверсии путем охлаждения их до точки росы

$$V'_{ПК} = V_{ПК} - d; \frac{м^3_{нк}}{м^3_{газу}}$$

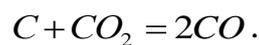
состав сухих продуктов конверсии, %

$$CO = \frac{a}{V'_{ПК}} \cdot 100 =; CO_2 = \frac{b}{V'_{ПК}} \cdot 100 =; H_2 = \frac{c}{V'_{ПК}} \cdot 100 =; N_2 = \frac{V_{N_2}}{V'_{ПК}} \cdot 100 = .$$

---


$$\Sigma = 100\%$$

После определения температуры конверсии определяем процентный состав продуктов конверсии, а потом восстанавливаем  $CO_2$  до  $CO$  углеродом при  $t = 1200^{\circ}C$  по реакции:



Объем продуктов конверсии,  $\frac{м^3_{нк}}{м^3_{газу}}$

$$V''_{ПК} = a + 2b + c + N_2$$

$$V_{N_2} = 3,76 \cdot k \cdot \alpha_{O_2}, \frac{м^3_{N_2}}{м^3_{газу}} .$$

окончательный состав продуктов конверсии, %

$$CO = \frac{a + 2b}{V''_{ПК}} \cdot 100 =; H_2 = \frac{c}{V''_{ПК}} \cdot 100 =; N_2 = \frac{V_{N_2}}{V''_{ПК}} \cdot 100 = .$$

---


$$\Sigma = 100\%$$

## 8 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При выполнении индивидуального задания был произведен расчет диффузионной и кинетической горелок.

Техническая характеристика диффузионного горелки, м:

- диаметр воздушного канала горелки,  $D_{II} =$
- диаметр кратера горелки,  $D_{KP} =$
- диаметр газового патрубка,  $d_{Г} =$
- диаметр газовыпускных отверстий,  $d =$
- диаметр газового коллектора,  $D_K =$
- длина газового коллектора,  $L_K =$

В расчетном горелке отрыва пламени не будет, потому что  $W_{CM} < W_{ВД}$  (..... < ..... ).

Длина факела составит...

Для данного горелки выбран вентилятор - ВД-6, и дымосос - Д-9.

Техническая характеристика кинетического горелки, м:

- диаметр газового сопла горелки,  $d_c =$
- диаметр входного отверстия для воздуха,  $d_2 =$
- диаметр кратера горелки,  $d_{KP} =$
- диаметр смесителя горелки,  $d_3 =$
- диаметр входного сечения диффузора:  $d_4 =$
- длина конфузора,  $L_1 =$
- длина смесителя,  $L_2 =$
- длина диффузора,  $L_3 =$

В результате проверки расчетного горелки на возможность отрыва и проскока пламени установлено, что отрыв пламени невозможен, так как  $W_{CM} > W_{ПР}$  (..... > ..... ).

Не будет тоже и отрыва пламени, так как  $W_{CM} < W_{ВД}$  (..... < .....).

Длина факела составит .... м.

Была рассчитана воздушная (кислородная) конверсия, то есть найдена температура конверсии (воздушной при  $\alpha = \dots$  или кислородной  $k = \dots$ ) и определен окончательный состав продуктов конверсии.

## 9 ПЕРЕЧЕНЬ ВОПРОСОВ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

- Защита атмосферного воздуха от вредных примесей при сжигании органического топлива

1. Назовите типы газовых горелок.
2. Область применения диффузионных и кинетических горелок.
3. Преимущества и недостатки диффузионных и кинетических горелок.
4. Рекомендации при выборе типа газовых горелок.
5. В каких случаях используют комбинированные горелки?
6. Какие виды переработки жидких топлив вы знаете?
7. В чем сущность крекинга жидкого топлива?
8. Что такое пиролиз жидкого топлива?
9. Что такое газогенератор, в чем сущность процесса газификации твердых органических топлив?
10. Какие реакции протекают в зоне горения и в зоне восстановления?
11. Назовите методы газификации угля.
12. Что такое водоугольное топливо?
13. Преимущества и недостатки использования ВУТ.
14. Назовите основные источники выбросов вредных веществ в атмосферу.
15. Какие методы применяют при очистке газов от сернистых соединений?
16. Рекомендации по защите атмосферного воздуха от вредных примесей при сжигании топлива.

ПРИЛОЖЕНИЕ А – Исходные данные

№	Горелка	$\alpha$	$Q_r$ , МВт	P	$t_r$	Пересчет ГГУ			Состав газа, %								Конверсия		
						$(Q_{H^P})'$	P'	$\rho'$	CO	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	N	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	Газ	$\alpha$ , k	$t_k$
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>
1	диффуз.	1,17	3,0	2,0	15	4	4	2,1	6,0	51	4	14	25	-	-	-	CH <sub>4</sub>	$\alpha=0,3$	900
	кинетич.	1,06	2,8	52,0	20	3	42	0,73	-	-	3	3	94	-	-	-			
2	диффуз.	1,19	3,2	2,2	25	6	13	2,2	5,2	51	4	14	25,8	-	-	-	CH <sub>4</sub>	k=0,55	1400
	кинетич.	1,07	3,0	50	10	6	40	0,75	-	-	2,7	3,7	93,6	-	-	-			
3	диффуз.	1,2	4,1	2,4	15	8	14	2,0	4	52	4	14	26	-	-	-	CH <sub>4</sub>	k=0,61	1300
	кинетич.	1,08	3,4	48	20	8	38	0,78	-	-	-	-	-	-	40	60			
4	диффуз.	1,21	4,6	2,6	25	10	15	1,8	6	52	6	10	26	-	-	-	CH <sub>4</sub>	k=0,65	1450
	кинетич.	1,09	3,9	44	10	12	34	0,8	-	-	-	-	-	-	45	55			
5	диффуз.	1,22	4,8	28	20	14	16	1,9	6	52	6	12	24	-	-	-	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	$\alpha=0,45$	1800
	кинетич.	1,1	4,2	42	15	10	32	0,85	-	-	-	-	-	3	45	52			
6	диффуз.	1,24	5,2	3,0	25	16	30	1,85	6	51	6	13	24	-	-	-	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	$\alpha=0,5$	1900
	кинетич.	1,11	4,5	40	10	12	17	0,9	-	-	-	-	1	-	46	53			
7	диффуз.	1,26	3,5	1,8	15	18	28	1,75	5	51	5	15	24	-	-	-	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	k=1,05	2000
	кинетич.	1,0	4,7	38	20	14	18	0,95	-	-	-	-	2	2	42	54			
8	диффуз.	1,28	5,7	1,6	25	20	26	1,7	5	50	5	15	25	-	-	-	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	k=1,1	2400
	кинетич.	1,02	4,9	36	10	16	20	1,0	-	-	-	-	2	2	50	46			
9	диффуз.	1,3	5,9	1,4	15	22	24	1,65	4	52	4	15	25	-	-	-	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	$\alpha=0,35$	1200
	кинетич.	1,04	5,1	34	20	18	22	1,05	-	-	-	-	-	4	52	44			
10	диффуз.	1,32	5,2	1,2	25	24	22	1,6	4	52	5	14	25	-	-	-	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	$\alpha=0,4$	1300
	кинетич.	1,06	5,3	32	10	26	24	1,1	-	-	-	-	1	-	55	44			
11	диффуз.	1,34	2,5	1,0	15	26	20	1,55	4	52	6	13	25	-	-	-	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	k=1,1	1400
	кинетич.	1,08	2,3	30	18	22	26	1,2	-	-	-	-	1	1	56	42			

Продолжение таблицы

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>	<i>13</i>	<i>14</i>	<i>15</i>	<i>16</i>	<i>17</i>	<i>18</i>	<i>19</i>	<i>20</i>
12	диффуз.	1,36	2,0	3,2	20	28	18	1,5	4	52	6	13	25	-	-	-	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	k=1,2	1500
	кинетич.	1,1	1,8	28	10	24	28	1,25	-	-	-	-	1	1	60	38			
13	диффуз.	1,38	2,1	3,4	15	30	16	1,45	4,5	49	9	12,5	25	-	-	-	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	α=0,35	1350
	кинетич.	1,11	1,9	55	20	26	30	1,3	-	1	4	3	92	-	-	-			
14	диффуз.	1,4	5,5	3,6	25	35	14	1,4	4,5	50	10	10,5	25	-	-	-	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	α=0,4	1400
	кинетич.	1,12	2,0	50	30	28	32	1,35	-	1,5	2,5	3,5	92,5	-	-	-			
15	диффуз.	1,2	5,0	3,8	10	38	12	1,35	4,5	51	9	10,5	25	-	-	-	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	k=1,55	1500
	кинетич.	1,1	2,4	60	15	30	34	1,4	-	3	1	1,5	94,5	-	-	-			
16	диффуз.	1,22	5,9	3,8	20	41	10	1,45	4,5	48	12	10,5	25	-	-	-	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	k=1,6	1600
	кинетич.	1,16	2,7	65	25	27	36	0,7	-	3	1	1	95	-	-	-			

## ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

- 1.Парахин Н.Ф., Шелудченко В.И., Кравцов В.В. Промышленные способы сжигания и переработки топлив. - Донецк, Норд-Пресс, 2006. - 303с.
- 2.Казанцев Е.И. Промышленные печи - М.: Металлургия, 1975. - 365с.
- 3.Ионин А.А., Газоснабжение: Учеб. для вузов. - четвёртый изд., Перераб. и доп. - М.: Стройиздат, 1989. - 439 с.
- 4.Бирюков А.Б. Сжигание и термическая переработка органических топлив. Твёрдое топливо : учеб. пособ. для вузов / А.Б. Бирюков, И.П. Дробышевская, Ю.Е. Рубан; ГВУЗ «ДОННТУ». – Донецк : Изд-во «Ноулидж». Донецкое отд-ние, 2014. – 232 с.