

Министерство образования и науки РФ  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
Магнитогорский Государственный технический университет  
им. Г.И.Носова

Кафедра химической технологии  
неметаллических материалов и  
физической химии

**Методические указания к курсовой работе**  
по дисциплине «Коксование углей»

**Расчет материального, теплового баланса и гидравлического режима процесса коксования угольной шихты в коксовых печах**

Составил: старший преподаватель  
Горохов А.В.

## Задание на курсовой проект.

### Вариант 1

Технический анализ шихты: влага шихты  $W^p_{ш} = 8\%$ ; зола шихты  $A^c_{ш} = 8,5\%$ ; общее содержание серы в шихте  $S^c_{ш} = 0,6\%$ ; выход летучих веществ  $V^r_{ш} = 25,0\%$ . Насыпная масса сухой шихты  $\gamma^c_{ш} = 800 \text{ кг/м}^3$ . Элементный состав шихты, % на горючую массу:  $C^r_{ш} = 87,5\%$ ;  $H^r_{ш} = 4,8\%$ ;  $O^r_{ш} = 4,2\%$ ;  $N^r_{ш} = 1,5\%$ ;  $S^r_{ш} = 2,0\%$ .

Таблица 1 - Состав газов

| Компоненты газа               | Отопительный газ, % объём. на сухую массу $Q^p_n = 7,0 \text{ МДж/м}^3$ |                     | Обратный коксовый, % объём. на сухую массу |
|-------------------------------|---|---------------------|--|
|                               | доменный  | коксовый            |  |
| H <sub>2</sub>                | 6,2   | 55,98               | 55,98                                      |
| CH <sub>4</sub>               | 0,66  | 26,95               | 26,95                                      |
| CO                            | 26,85   | 7,56                | 7,56                                       |
| CO <sub>2</sub>               | 18,2  | 4,35                | 4,35                                       |
| C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | ---   | 0,8                 | 0,8  |
| N <sub>2</sub>                | 46,03   | 1,26                | 1,26                                       |
| H <sub>2</sub> S              | 1,56  | 0,9                 | 0,9  |
| O <sub>2</sub>                | 0,5   | 2,2                 | 2,2  |
| W <sup>p</sup>                | 78 г/м <sup>3</sup>   | 28 г/м <sup>3</sup> | ---  |

Коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 1,5$ .

Коэффициенты перехода элементов из шихты в газ: азота  $k_N = 0,16$ ; серы  $k_S = 0,29$ ; кислорода  $k_O = 0,505$ . Коэффициент выхода газа  $k_r = 2,7$ .

Выход летучих из кокса  $V^c_k = 0,9\%$ . Размеры камеры коксования: высота  $h = 4,98 \text{ м}$ ; длина  $L = 15,14 \text{ м}$ ; средняя ширина  $b_{cp} = 0,41 \text{ м}$ ; ширина с машинной стороны  $b_{mc} = 0,385 \text{ м}$ ; ширина с коксовой стороны  $b_{kc} = 0,435 \text{ м}$ ; толщина свода камер  $h_{л} = 1,032 \text{ м}$ ; полная высота камеры  $h_k = 6,0 \text{ м}$ ; высота регенератора и зоны косых ходов  $h_p = 3,2 \text{ м}$ . Расстояние между осями камер  $A = 1,32 \text{ м}$ . Число загрузочных люков  $n_1 = 3$ ; поверхность загрузочного люка  $f_{зл} = 0,36 \text{ м}^2$ . Число смотровых лючков  $n_2 = 28$ ; поверхность смотрового лючка  $f_{сл} = 0,04 \text{ м}^2$ . Продолжительность оборота печи  $\tau = 15$  часов. Число камер в батарее  $n = 65$ .

Масса расчётной единицы шихты фактической влажности  $E = 1000 \text{ кг}$ . Теплоёмкость горючей массы шихты  $c_{ш} = 1,09 \text{ кДж/(кг*К)}$ , теплоёмкость золы  $c_z = 0,71 \text{ кДж/(кг*К)}$ ; средняя теплоёмкость кокса  $c_k = 1,486 \text{ кДж/(кг*К)}$ ; энтальпия сероводорода  $I_{H_2S} = 1230,98 \text{ кДж/м}^3$  при  $t_{хпк} = 700 \text{ }^\circ\text{C}$ ; теплоёмкость аммиака  $c_{NH_3} = 2,688 \text{ кДж/(кг*К)}$ .

Температура загружаемой шихты  $t_{ш} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ , температура отопительного газа  $t_{отоп} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ , температура окружающей среды  $t_b = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ; конечная температура кокса  $t_k = 1050 \text{ }^\circ\text{C}$ ; температура химических продуктов коксования  $t_{хпк} = 700 \text{ }^\circ\text{C}$ . Упругость водяных паров при  $t_b$   $P_{нас} = 1227,97 \text{ Па}$ . Относительная влажность воздуха  $\phi = 0,75$ . Барометрическое давление  $B = 98500 \text{ Па}$ . Скорость ветра  $w = 5 \text{ м/с}$ .

Температуры поверхности участков коксовой печи приведены в таблице 2.

Исходные данные для гидравлического расчета коксовых печей приведены в таблице 3. Таблицы 2 и 3 (см. методичку).

Таблица 2 - Температуры поверхности участков коксовой печи

| Участок поверхности коксовой печи                      | Температура, °С |
|--|-----------------|
| Загрузочные люка $t_1$                                 | 240             |
| Свод камеры $t_2$                                      | 120             |
| Смотровые лючки $t_3$                                  | 200             |
| Свод обогревательного простенка $t_4$                  | 140             |
| Лобовая стенка к.с. $t_{5кc}$                          | 90              |
| Лобовая стенка м.с. $t_{5мc}$                          | 80              |
| Двери с коксовой стороны $t_6$                         | 120             |
| Двери с машинной стороны $t_7$                         | 110             |
| Торцевая стена обогревательного простенка с к.с. $t_8$ | 140             |
| Торцевая стена обогревательного простенка с м.с. $t_9$ | 120             |
| Стена регенератора $t_{10}$                            | 70              |

Таблица 3 - Исходные данные для гидравлического расчета коксовых печей

| Участок отопительной системы | Сечение F, м <sup>2</sup> | Длина L, м | Диаметр эквивалентный D, м | Температура, °С |
|------------------------------|---------------------------|------------|----------------------------|-----------------|
| Восходящий поток             |                           |            |                            |                 |
| Подовый канал                | 0,141                     | 6,923      | 0,351                      | 100             |
| Колосниковая решетка         |                           |            |                            | 100             |
| Минимальные                  | 0,00096                   | ---        | 0,035                      |                 |
| Средние                      | 0,00241                   | 0,102      | 0,0525                     |                 |
| Максимальные                 | 0,00385                   | ---        | 0,07                       |                 |
| Насадка регенератора         | 1,13                      | 2,145      | 0,03                       | 100 - 1200      |
| Наднасадочное пространство   |                           |            |                            | 1200            |
| Минимальные                  | 0,248                     | ---        | ---                        |                 |
| Средние                      | 1,732                     | 0,12       | 0,501                      |                 |
| Максимальные                 | 2,8                       | ---        | ---                        |                 |
| Косой ход (короткий)         |                           |            |                            | 1230            |
| На входе                     | 0,025                     | ---        | ---                        |                 |
| Среднее                      | 0,012                     | 1,2        | 0,109                      |                 |
| На выходе                    | 0,0063                    | ---        | ---                        |                 |
| Вертикал                     | 0,218                     | 3,96       | 0,445                      | 1500            |
| Перевальное окно             | 0,114                     | ---        | 0,333                      | 1400            |
| Шахточка вертикала           | ---                       | 1,936      | ---                        | 1000            |

| Участок отопительной системы | Сечение F, м <sup>2</sup> | Длина L, м | Диаметр эквивалентный D, м | Температура, °С        |
|------------------------------|---------------------------|------------|----------------------------|------------------------|
| <b>Нисходящий поток</b>      |                           |            |                            |                        |
| Вертикал                     | 0,218                     | 3,96       | 0,445                      | 1350                   |
| Косой ход (длинный)          |                           |            |                            | 1320                   |
| На входе                     | 0,0063                    | ---        | ---                        |                        |
| Среднее                      | 0,012                     | 1,54       | 0,109                      |                        |
| На выходе                    | 0,025                     | ---        | ---                        |                        |
| Надсадочное пространство     |                           |            |                            | 1300                   |
| Минимальные                  | 0,248                     | ---        | ---                        |                        |
| Средние                      | 1,732                     | 0,12       | 0,501                      |                        |
| Максимальные                 | 2,8                       | ---        | ---                        |                        |
| Насадка регенератора         | 1,13                      | 2,145      | 0,03                       | 1300 - t <sub>пс</sub> |
| Колосниковая решетка         |                           |            |                            | t <sub>пс</sub>        |
| Минимальные                  | 0,00096                   | ---        | 0,035                      |                        |
| Средние                      | 0,00241                   | 0,102      | 0,0525                     |                        |
| Максимальные                 | 0,00385                   | ---        | 0,07                       |                        |
| Подовый канал                | 0,141                     | 6,923      | 0,351                      | (t <sub>пс</sub> - 50) |

### Расчет материального баланса [3], с.174 - 183.

1. Пересчитаем элементный состав шихты и выход летучих с горючей массы на сухую. Коэффициент пересчёта  $x = (100 - A_{ш}^c)/100 = (100 - 8,5)/100 = 0,915$ . Тогда элементный анализ на сухую массу, %:  $C_{ш}^c = 80,06$  %;  $H_{ш}^c = 4,39$  %;  $O_{ш}^c = 3,84$  %;  $N_{ш}^c = 1,38$  %;  $S_{ш}^c = 1,83$  %; выход летучих веществ  $V_{ш}^c = 22,88$  %.

2. Найдем содержание водорода в коксе на горючую массу по формуле:

$$H_{к}^r = V_{к}^c * 100 / (100 - A_{ш}^c) = 0,9 * 100 / (100 - 8,5) = 0,98 \text{ \%}$$

3. Рассчитаем выход кокса по эмпирической формуле

$$G_{к}^c = 94,92 - 0,84 * V_{ш}^c + 7,7 * H_{к}^r = 94,92 - 0,84 * 22,88 + 7,7 * 0,98 = 83,25 \text{ \%}$$

4. Рассчитаем припёк кокса по формуле

$$a = 47,1 - 0,58 * (100 - V_{ш}^c) * 100 / (100 - V_{к}^c) = 47,1 - 0,58 * (100 - 22,88) * 100 / (100 - 0,9) = 1,96 \text{ \%}$$

5. Рассчитаем плотность сухого обратного газа по данным плотности его компонентов и составу:

$$\gamma = 0,01 * (2/22,4 * H_2 + 16/22,4 * CH_4 + 28/22,4 * CO + 44/22,4 * CO_2 + 28/22,4 * C_2H_4 + 28/22,4 * N_2 + 34/22,4 * H_2S + 32/22,4 * O_2) = 0,01 * (2/22,4 * 55,98 + 16/22,4 * 26,95 + 28/22,4 * 7,56 + 44/22,4 * 4,35 + 28/22,4 * 0,8 + 28/22,4 * 1,26 + 34/22,4 * 0,9 + 32/22,4 * 2,2) = 0,493 \text{ кг/м}^3$$

6. Рассчитаем выход смолы на сухую массу:

$$G_{см}^c = (-18,36 + 1,53 * V_{ш}^r - 0,0126 * (V_{ш}^r)^2) * (100 - A_{ш}^c) / 100 = (-18,36 + 1,53 * 25 - 0,0126 * 25^2) * (100 - 8,5) / 100 = 3,331 \text{ \%}$$

7. Рассчитаем выход сырого бензола на сухую массу:

$$G_{\text{б}}^{\text{с}} = (-1,61 + 0,144 * V_{\text{ш}}^{\text{г}} - 0,0016 * (V_{\text{ш}}^{\text{г}})^2) * (100 - A_{\text{ш}}^{\text{с}}) / 100 = (-1,61 + 0,144 * 25 - 0,0016 * 25^2) * (100 - 8,5) / 100 = 0,906 \%$$

8. Рассчитаем выход аммиака на сухую массу:

$$G_{\text{NH}_3}^{\text{с}} = k_{\text{N}} * N_{\text{ш}}^{\text{с}} * 17/14 = 0,16 * 1,38 * 17/14 = 0,268 \%$$

9. Рассчитаем выход сероводорода на сухую массу:

$$G_{\text{H}_2\text{S}}^{\text{с}} = k_{\text{S}} * S_{\text{ш}}^{\text{с}} * 34/32 = 0,29 * 1,83 * 34/32 = 0,564 \%$$

10. Рассчитаем выход пирогенетической влаги на сухую массу:

$$G_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{с}} = k_{\text{O}} * O_{\text{ш}}^{\text{с}} * 18/16 = 0,505 * 3,84 * 18/16 = 1,534 \%$$

11. Рассчитаем выход сухого газа:

$$G_{\text{г}}^{\text{с}} = k_{\text{г}} * (V_{\text{ш}}^{\text{с}})^{0,5} = 2,7 * 22,88^{0,5} = 12,915 \%$$

12. Рассчитаем невязку баланса:

$$\Delta = 100 - G_{\text{к}}^{\text{с}} - G_{\text{см}}^{\text{с}} - G_{\text{б}}^{\text{с}} - G_{\text{NH}_3}^{\text{с}} - G_{\text{H}_2\text{S}}^{\text{с}} - G_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{с}} - G_{\text{г}}^{\text{с}} = 100 - 83,25 - 3,331 - 0,906 - 0,268 - 0,564 - 1,534 - 12,915 = -2,768 \%$$

Невязка баланса менее 5 %, т.е. баланс верный. Если баланс имеет невязку более  $\pm 5 \%$ , то коэффициенты перехода элементов из шихты в газ можно принять другие, чем в задании для: азота  $k_{\text{N}} = 0,07 - 0,16$ ; серы  $k_{\text{S}} = 0,17 - 0,29$ ; кислорода  $k_{\text{O}} = 0,334 - 0,505$ . Коэффициент выхода газа  $k_{\text{г}} = 2,54 - 2,99$  для приведения ошибки в норму.

13. Рассчитаем выход прямого коксового газа совместно с подсосанным воздухом из 1 тонны сухой шихты:

$$V_{\text{г}}' = G_{\text{г}}^{\text{с}} * 10 / \gamma = 12,915 * 10 / 0,493 = 261,97 \text{ м}^3/\text{т шихты.}$$

14. Рассчитаем количество подсосанного воздуха:

$$V_{\text{возд}} = (V_{\text{г}}' * N_2 - 0,035 / \gamma_{\text{N}_2} * N_{\text{ш}}^{\text{с}} * 1000) / 79 = (261,97 * 1,26 - 0,35 / 1,25 * 1,38 * 1000) / 79 = 3,69 \text{ м}^3/\text{т шихты.}$$

15. Рассчитаем выход прямого коксового газа совместно без подсосанного воздуха из 1 тонны сухой шихты:

$$V_{\text{г}} = V_{\text{г}}' - V_{\text{возд}} = 261,97 - 3,69 = 258,28 \text{ м}^3/\text{т шихты.}$$

16. Рассчитаем полезный объем камеры коксования:

$$V_{\text{пол}} = h * l * b_{\text{ср}} = 4,98 * 15,14 * 0,41 = 30,9 \text{ м}^3.$$

Сведем материальный баланс в таблицу 4.

17. Рассчитаем разовую загрузку сухой и влажной шихты в камеру:

$$G_{\text{ш}}^{\text{с}} = V_{\text{пол}} * \gamma_{\text{ш}}^{\text{с}} = 30,9 * 800 / 1000 = 24,72 \text{ т.}$$

Тогда влажной шихты:

$$G_{\text{ш}}^{\text{п}} = G_{\text{ш}}^{\text{с}} * 100 / (100 - W_{\text{ш}}^{\text{п}}) = 24,72 * 100 / (100 - 8) = 26,87 \text{ т.}$$

18. Рассчитаем годовую производительность коксовой печи по сухой шихте:

$$V_{\text{ш1}}^{\text{с}} = G_{\text{ш}}^{\text{с}} * 24 * 365 / \tau = 24,72 * 24 * 365 / 15 = 14436 \text{ т/год.}$$

19. Рассчитаем годовую производительность коксовой батареи по сухой шихте:

$$V_{\text{ш}}^{\text{с}} = V_{\text{ш1}}^{\text{с}} * n = 14436 * 65 = 938371,2 \text{ т/год.}$$

20. Рассчитаем годовую производительность коксовой батареи по сухому коксу:

$$V_{\text{к}}^{\text{с}} = V_{\text{ш}}^{\text{с}} * G_{\text{к}}^{\text{с}} / 100 = 938371,2 * 83,25 / 100 = 781194 \text{ т/год.}$$

Таблица 4 – Материальный баланс процесса коксования

| Приходные статьи |         | Расходные статьи             |         |
|------------------|---------|------------------------------|---------|
| Статья           | Процент | Статья                       | Процент |
| 1. Сухой уголь   | 100     | 1. Валовый кокс              | 83,25   |
|                  |         | 2. Коксовый газ              | 12,915  |
|                  |         | 2. Каменноугольная смола     | 3,331   |
|                  |         | 4. Бензолные углеводороды    | 0,906   |
|                  |         | 5. Аммиак                    | 0,268   |
|                  |         | 6. Сероводород               | 0,564   |
|                  |         | 7. Избыточная аммиачная вода | 1,534   |
|                  |         | 8. Невязка баланса           | - 2,768 |
| Итого            | 100     | Итого                        | 100     |

### Расчет теплового баланса процесса коксования [3], с.183 - 195.

При расчёте теплового баланса примем для упрощения, что в регенераторе подогревается только воздух, подаваемый на горение.

21. Переведём состав сухих отопительных газов на рабочий. Переводной коэффициент:

- для коксового газа:  $X_{кг} = (100 - W^p * 0,1242) / 100 = (100 - 28 * 0,1242) / 100 = 0,9652$ ;

- для доменного газа:  $X_{дг} = (100 - W^p * 0,1242) / 100 = (100 - 78 * 0,1242) / 100 = 0,9031$ .

Тогда составы газов на рабочую массу будут:

Коксовый газ:

$$H^p_2 = 55,98 * 0,9652 = 54,03\%$$

$$CH^p_4 = 26,95 * 0,9652 = 26,01\%$$

$$CO^p = 7,56 * 0,9652 = 7,3\%$$

$$CO^p_2 = 4,35 * 0,9652 = 4,2\%$$

$$C_2 H^p_4 = 0,8 * 0,9652 = 0,77\%$$

$$N^p_2 = 1,26 * 0,9652 = 1,22\%$$

$$H_2 S^p = 0,9 * 0,9652 = 0,87\%$$

$$O^p_2 = 2,2 * 0,9652 = 2,12\%$$

$$W^p_{к.з.} = 3,48 \%$$

Сумма 100 %

Доменный газ:

$$H^p_2 = 6,2 * 0,9031 = 5,60\%$$

$$CH^p_4 = 0,66 * 0,9031 = 0,60\%$$

$$CO^p = 26,85 * 0,9031 = 24,25\%$$

$$CO^p_2 = 18,2 * 0,9031 = 16,44\%$$

$$N^p_2 = 46,03 * 0,9031 = 41,56\%$$

$$O^p_2 = 0,5 * 0,9031 = 0,45\%$$

$$H_2 S^p = 1,56 * 0,9031 = 1,41\%$$

$$W^p_{д.з.} = 9,69\%$$

100 %

22. Рассчитаем теплоту сгорания газов:

$$Q_{\text{H}}^{\text{P}} = 0,01 * ( \text{H}_2^{\text{P}} * Q_{\text{H}_2}^{\text{P}} + \text{CH}_4^{\text{P}} * Q_{\text{CH}_4}^{\text{P}} + \text{CO}^{\text{P}} * Q_{\text{CO}}^{\text{P}} + \text{C}_2 \text{H}_4^{\text{P}} * Q_{\text{C}_2\text{H}_4}^{\text{P}} + \text{H}_2 \text{S}^{\text{P}} * Q_{\text{H}_2\text{S}}^{\text{P}} ),$$

где  $\text{H}_2^{\text{P}}$ ,  $\text{CH}_4^{\text{P}}$ ,  $\text{CO}^{\text{P}}$ ,  $\text{C}_2 \text{H}_4^{\text{P}}$ ,  $\text{H}_2 \text{S}^{\text{P}}$  – процентный состав горючих компонентов;

$Q_{\text{H}_2}^{\text{P}}$ ,  $Q_{\text{CH}_4}^{\text{P}}$ ,  $Q_{\text{CO}}^{\text{P}}$ ,  $Q_{\text{C}_2\text{H}_4}^{\text{P}}$ ,  $Q_{\text{H}_2\text{S}}^{\text{P}}$  – низшие теплоты сгорания чистых компонентов смеси, ккал/м<sup>3</sup> (см. Приложение 1).

$$Q_{\text{H}_{\text{к.з.}}}^{\text{P}} = 0,01 * (54,03 * 2577 + 26,01 * 8558 + 7,3 * 3016 + 0,77 * 14105 + 0,87 * 5534) * 4,187 = 16727,95 \text{ кДж/м}^3$$

$$Q_{\text{H}_{\text{д.з.}}}^{\text{P}} = 0,01 * (5,6 * 2577 + 0,6 * 8558 + 24,25 * 3016 + 1,41 * 5534) * 4,187 = 4208,23 \text{ кДж/м}^3.$$

**23.** Найдём доли каждого газа в смеси:

$$a_{\text{к.з.}} = \frac{Q_{\text{H}_{\text{д.з.}}}^{\text{P}} - Q_{\text{H}_{\text{см}}}^{\text{P}}}{Q_{\text{H}_{\text{д.з.}}}^{\text{P}} - Q_{\text{H}_{\text{к.з.}}}^{\text{P}}} = (4208,23 - 7000) / (4208,23 - 16727,95) = 0,223;$$

$$a_{\text{д.з.}} = 1 - a_{\text{к.з.}} = 0,777.$$

**24.** Составим смесь газов по методу аддитивности:

$$\text{H}_{2_{\text{см}}}^{\text{P}} = 54,03 * 0,223 + 5,6 * 0,777 = 16,4\%;$$

$$\text{CH}_{4_{\text{см}}}^{\text{P}} = 26,01 * 0,223 + 0,6 * 0,777 = 6,27\%;$$

$$\text{CO}_{\text{см}}^{\text{P}} = 7,3 * 0,223 + 24,45 * 0,777 = 20,63\%;$$

$$\text{CO}_{2_{\text{см}}}^{\text{P}} = 4,2 * 0,223 + 16,44 * 0,777 = 13,71\%;$$

$$\text{C}_2 \text{H}_{4_{\text{см}}}^{\text{P}} = 0,77 * 0,223 = 0,17\%;$$

$$\text{N}_{2_{\text{см}}}^{\text{P}} = 1,22 * 0,223 + 41,56 * 0,777 = 32,41\%;$$

$$\text{H}_2 \text{S}_{\text{см}}^{\text{P}} = 0,87 * 0,223 + 1,41 * 0,777 = 1,29\%;$$

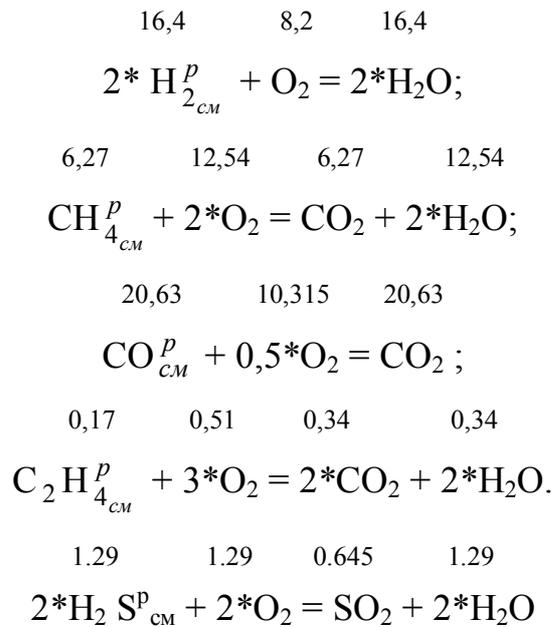
$$\text{O}_{2_{\text{см}}}^{\text{P}} = 2,12 * 0,223 + 0,45 * 0,777 = 0,82\%;$$

$$\text{W}_{\text{см}}^{\text{P}} = 3,48 * 0,223 + 9,69 * 0,777 = 8,31\%.$$

**25.** Найдём количество кислорода, пошедшего на горение смеси.

Расчёт будем вести на 100 м<sup>3</sup> смеси.

Записываем уравнения горения топлива:



Тогда количество кислорода, пошедшего на горение смеси:

$$V_{\text{O}_2} = 8,2 + 12,54 + 10,315 + 0,51 + 1,29 - 0,82 = 32,04 \text{ м}^3 / 100 \text{ м}^3.$$

**26.** Найдем количество азота из следующих соображений. Будем считать, что воздух состоит из 79% азота и 21% кислорода.

$$V_{\text{N}_2} = 32,04 * \frac{79}{21} = 120,51 \text{ м}^3 / 100 \text{ м}^3$$

**27.** Тогда количество воздуха теоретическое:

$$V_0^T = V_{\text{O}_2} + V_{\text{N}_2} = 32,04 + 120,51 = 152,55 \text{ м}^3 / 100 \text{ м}^3.$$

и действительное  $V_0^{\text{л}} = V_0^T * \alpha = 152,55 * 1,5 = 228,83 \text{ м}^3 / 100 \text{ м}^3 = 2,29 \text{ м}^3 / \text{м}^3$ .

**28.** Найдем влагосодержание воздуха  $x_{\text{возд}}$  по формуле:

$$X_{\text{возд}} = 0,622 * \varphi * P_{\text{нас}} / (B - \varphi * P_{\text{нас}}) = 0,622 * 0,75 * 1227,97 / (98000 - 0,75 * 1227,97) = 0,0059 \text{ кг/кг}.$$

**29.** Определим, какое количество водяного пара ( $\text{м}^3 / 100 \text{ м}^3$ ) поступает с воздухом в процесс горения:

$$V_{\text{H}_2\text{O}_{\text{возд}}} = x * V_0^T * 22,4 / M_{\text{H}_2\text{O}},$$

где 22,4 – мольный объем при нормальных условиях,  $\text{м}^3 / \text{кмоль}$ ;

$M_{\text{H}_2\text{O}}$  – молекулярная масса воды,  $\text{кг/кмоль}$ .

$$V_{\text{H}_2\text{O}_{\text{возд}}} = 0,0059 * 152,55 * 22,4 / 18 = 1,12 \text{ м}^3 / 100 \text{ м}^3.$$

**30.** Определим количество состав продуктов сгорания. Для этого заполним таблицу 5 продуктов горения,  $\text{м}^3 / 100 \text{ м}^3$ .

**31.** Избыточное количество кислорода определяется по формуле:

$$V_{\text{O}_2}^{\text{изб}} = V_{\text{O}_2} * (\alpha_{\text{max}} - 1) = 32,04 * (1,5 - 1) = 16,02 \text{ м}^3 / 100 \text{ м}^3.$$

**32.** Рассчитаем энтальпию влажного отопительного газа по формуле:

$$\begin{aligned}
 I_{\text{отоп}} = & 0,01 * (I_{\text{H}_2} * \text{H}_{2\text{см}}^P + I_{\text{CH}_4} * \text{CH}_{4\text{см}}^P + I_{\text{CO}} * \text{CO}_{\text{см}}^P + I_{\text{CO}_2} * \text{CO}_{2\text{см}}^P + I_{\text{C}_2\text{H}_4} * \text{C}_2 \text{H}_{4\text{см}}^P + I_{\text{N}_2} * \\
 & \text{N}_{2\text{см}}^P + I_{\text{H}_2\text{S}} * \text{H}_2 \text{S}_{\text{см}}^P + I_{\text{O}_2} * \text{O}_2^P + I_{\text{H}_2\text{O}} * \text{H}_2\text{O}) = 0,01 * (64,48 * 16,4 + 82,695 * 6,27 +
 \end{aligned}$$

$$65,105 \cdot 20,63 + 86,0 \cdot 13,71 + 105,305 \cdot 0,17 + 65,065 \cdot 32,41 + 77,04 \cdot 1,29 + 65,965 \cdot 0,82 + 75,09 \cdot 8,31) = 70,023 \text{ кДж/м}^3.$$

Таблица 5 – Состав и количество продуктов сгорания

| Компоненты смеси              | Количество, % | CO <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> O | SO <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | Σ             |
|-------------------------------|---------------|-----------------|------------------|-----------------|----------------|----------------|---------------|
| H <sub>2</sub>                | 16,4          |                 | 16,4             |                 |                |                |               |
| CH <sub>4</sub>               | 6,27          | 6,27            | 12,54            |                 |                |                |               |
| CO                            | 20,63         | 20,63           |                  |                 |                |                |               |
| CO <sub>2</sub>               | 13,71         | 13,71           |                  |                 |                |                |               |
| C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | 0,17          | 0,34            | 0,34             |                 |                |                |               |
| N <sub>2</sub>                | 32,41         |                 |                  |                 | 32,41          |                |               |
| N <sub>2</sub> из воздуха     |               |                 |                  |                 | 120,51         |                |               |
| H <sub>2</sub> S              | 1,29          |                 | 1,29             | 0,645           |                |                |               |
| H <sub>2</sub> O              | 8,31          |                 | 8,31             |                 |                |                |               |
| H <sub>2</sub> O из воздуха   |               |                 | 1,12             |                 |                |                |               |
| α = 1                         |               | <b>40,95</b>    | <b>40,0</b>      | <b>0,645</b>    | <b>152,92</b>  |                | <b>234,52</b> |
| α = 1,5                       |               | 40,95           | 40,56            | 0,645           | 213,18         | 16,02          | <b>311,36</b> |
| Доли a <sub>1</sub>           |               | 0,1315          | 0,1303           | 0,0021          | 0,6848         | 0,0515         | <b>1,0</b>    |

Количество продуктов сгорания  $V_{\text{пр.г}} = 3,11 \text{ м}^3/\text{м}^3$ .

33. Представим схему расчёта теплового баланса коксовых печей в таблице 6.

Таблица 6 – Схема теплового баланса коксовых печей

| Приходная часть                     |                | Расходная часть                      |                 |
|-------------------------------------|----------------|--------------------------------------|-----------------|
| Статья                              | Обозначение    | Статья                               | Обозначение     |
| Теплота сгорания отопительного газа | Q <sub>1</sub> | Теплота нагрева кокса                | Q <sub>5</sub>  |
| Теплота отопительного газа          | Q <sub>2</sub> | Теплота нагрева коксового газа       | Q <sub>6</sub>  |
| Теплота воздуха                     | Q <sub>3</sub> | Теплота нагрева паров смолы          | Q <sub>7</sub>  |
| Теплота угольной шихты              | Q <sub>4</sub> | Теплота нагрева паров сырого бензола | Q <sub>8</sub>  |
|                                     |                | Теплота нагрева паров аммиака        | Q <sub>9</sub>  |
|                                     |                | Теплота нагрева сероводорода         | Q <sub>10</sub> |
|                                     |                | Теплота нагрева паров воды           | Q <sub>11</sub> |
|                                     |                | Потери тепла с продуктами горения    | Q <sub>12</sub> |
|                                     |                | Потери тепла в окружающую среду      | Q <sub>13</sub> |

34. Рассчитаем теплоёмкость сухой шихты по формуле

$$C_{\text{ш}}^c = (1 - A_{\text{ш}}^c/100) * c_{\text{ш}} + A_{\text{ш}}^c/100 * c_3 = (1 - 8,5/100) * 1,09 + 8,5/100 * 0,71 = 1,06 \text{ кДж/(кг*К)}$$

### Приходная часть баланса

35. Рассчитаем теплоту сгорания отопительного газа:

$$Q_1 = Q_{\text{н}}^p * G,$$

где  $G$  – неизвестное количество отопительного газа,  $\text{м}^3/\text{т}$  шихты.

$$Q_1 = Q_{\text{н}}^p * G = 7000 * G \text{ кДж/т.}$$

36. Теплота отопительного газа  $Q_2 = I_{\text{отоп}} * G = 70,023 * G \text{ кДж/т.}$

37. Теплота воздуха, поступающего на горение:

$$Q_3 = I_{\text{возд}} * V_0^d * G = 13,05 * 2,29 * G = 29,88 * G \text{ кДж/т.}$$

38. Теплота угольной шихты:

$$Q_4 = C_{\text{ш}}^c * E * t_{\text{ш}} = 1,06 * 1000 * 10 = 10600 \text{ кДж/кг} = 10,6 \text{ кДж/т.}$$

### Расходная часть баланса

39. Рассчитаем тепло нагрева кокса по формуле:

$$Q_5 = G_{\text{к}}^c * 10 * c_{\text{к}} * t_{\text{к}} * (100 - W_{\text{ш}}^p)/100 = 83,25 * 10 * 1,486 * 1050 * (100 - 8)/100 = 1195034 \text{ кДж/т}$$

40. Рассчитаем энтальпию сухого коксового газа, выходящего из камеры коксования при температуре  $t_{\text{хпк}} = 700 \text{ }^\circ\text{C}$ :

$$I_{\text{г}} = 0,01 * (I_{\text{H}_2} * \text{H}_2^c + I_{\text{CH}_4} * \text{CH}_4^c + I_{\text{CO}} * \text{CO}^c + I_{\text{CO}_2} * \text{CO}_2^c + I_{\text{C}_2\text{H}_4} * \text{C}_2\text{H}_4^c + I_{\text{N}_2} * \text{N}_2^c + I_{\text{H}_2\text{S}} * \text{H}_2\text{S}^c + I_{\text{O}_2} * \text{O}_2^c) = 0,01 * (920,3 * 55,98 + 1667,68 * 26,95 + 961,33 * 7,56 + 1475,41 * 4,35 + 2233,35 * 0,8 + 940,36 * 1,26 + 1230,98 * 0,9 + 1005,24 * 2,2) = 1164,39 \text{ кДж/м}^3.$$

41. Рассчитаем тепло нагрева сухого коксового газа:

$$Q_6 = I_{\text{г}} * G_{\text{г}}^c * 10 * (100 - W_{\text{ш}}^p)/100 = 1164,39 * 12,915 * 10 * (100 - 8)/100 = 138350,5 \text{ кДж/т.}$$

42. Рассчитаем среднюю теплоёмкость паров смолы по эмпирической формуле:

$$c_{\text{см}} = (0,305 + 0,392 * 10^{-3} * t_{\text{хпк}}) * 4,1868 = (0,305 + 0,392 * 10^{-3} * 700) * 4,1868 = 2,4258 \text{ кДж/(кг*К)}.$$

43. Рассчитаем тепло нагрева смолы:

$$Q_7 = (418,6 + c_{\text{см}} * t_{\text{хпк}}) * G_{\text{см}}^c * 10 * (100 - W_{\text{ш}}^p)/100 = (418,6 + 2,4258 * 700) * 3,331 * 10 * (100 - 8)/100 = 64865,47 \text{ кДж/т.}$$

**44.** Рассчитаем среднюю теплоёмкость паров сырого бензола по эмпирической формуле, с учётом того, что среднединамическая молекулярная масса сырого бензола  $M_{сб} = 84,6$  кг/кмоль:

$$c_{сб} = (20,7 + 0,026 * t_{хпк}) * 4,1868 / M_{сб} = (20,7 + 0,026 * 700) * 4,1868 / 84,6 = 1,9251 \text{ кДж/(кг*К)}.$$

**45.** Рассчитаем тепло нагрева паров сырого бензола:

$$Q_8 = (431,2 + c_{сб} * t_{хпк}) * G_6^c * 10 * (100 - W_{ш}^p) / 100 = (431,2 + 1,9251 * 700) * 0,906 * 10 * (100 - 8) / 100 = 14826,4 \text{ кДж/т}.$$

**46.** Рассчитаем тепло нагрева аммиака:

$$Q_9 = c_{NH_3} * t_{хпк} * G_{NH_3}^c * 10 * (100 - W_{ш}^p) / 100 = 2,688 * 700 * 0,268 * 10 * (100 - 8) / 100 = 4639,27 \text{ кДж/т}.$$

**47.** Рассчитаем тепло нагрева сероводорода:

$$Q_{10} = I_{H_2S} * M_{H_2S} / 22,4 * G_{H_2S}^c * 10 * (100 - W_{ш}^p) / 100 = 1230,98 * 34 / 22,4 * 0,564 * 10 * (100 - 8) / 100 = 9695,02 \text{ кДж/т}.$$

**48.** Рассчитаем количество тепла, уносимое парами воды:

$$Q_{11} = (r + I_{H_2O} * M_{H_2O} / 22,4) * (G_{H_2O}^c * 10 * (100 - W_{ш}^p) / 100 + W_{ш}^p * 10),$$

где  $r$  – теплота парообразования воды, кДж/кг;

$I_{H_2O}$  – энтальпия паров воды при  $(t_{хпк} - 100) ^\circ\text{C}$ , кДж/м<sup>3</sup>.

$$Q_{11} = (2491 + 964,68 * 18 / 22,4) * (1,534 * 10 * (100 - 8) / 100 + 8 * 10) = 307390,2 \text{ кДж/т}.$$

**49.** Рассчитаем температуру продуктов сгорания после регенератора при обогреве печей коксовым или смешанным газом по эмпирической формуле:

$$t_{пс} = 4420 / (\tau - z / 60) + 50,$$

где  $z$  – время обработки печи, мин.  $z = (\tau - 2) * 60 / n = (15 - 2) * 60 / 65 = 12$  мин.

$$t_{пс} = 4420 / (15 - 12 / 60) + 50 = 349 ^\circ\text{C}.$$

Если батарея отапливается доменным газом, то  $t_{пс} = 5750 / (\tau - z / 60) - 105$ .

**50.** Рассчитаем энтальпию продуктов сгорания при  $t_{пс} = 349 ^\circ\text{C}$ :

$$I_{пс} = I_{H_2O} * H_2O + I_{CO_2} * CO_2 + I_{N_2} * N_2 + I_{O_2} * O_2 = 492,525 * 0,1303 + 670,84 * 0,1336 + 459,65 * 0,6848 + 479,665 * 0,0515 = 493,27 \text{ кДж/м}^3.$$

**51.** Рассчитаем плотность продуктов сгорания:

$\rho_{\text{пс}} = \rho_{\text{H}_2\text{O}} * \text{H}_2\text{O} + \rho_{\text{CO}_2} * \text{CO}_2 + \rho_{\text{SO}_2} * \text{SO}_2 + \rho_{\text{N}_2} * \text{N}_2 + \rho_{\text{O}_2} * \text{O}_2 = 18/22,4 * 0,1303 + 44/22,4 * 0,1315 + 64/22,4 * 0,0021 + 28/22,4 * 0,6848 + 32/22,4 * 0,0515 = 1,2986 \text{ кг/м}^3$ . Тогда  $I_{\text{пс}} = 493,27 * 1,2986 = 640,56 \text{ кДж/кг}$ .

**52.** Рассчитаем тепло, удаляемых продуктов сгорания:

$$Q_{12} = I_{\text{пс}} * V_{\text{пр.г}} * G = 640,56 * 3,11 * G = 1992,1 * G \text{ кДж/т.}$$

**53.** Рассчитаем коэффициент теплоотдачи конвекцией при скорости ветра  $w > 5 \text{ м/с}$ :

$$\alpha_{\text{к}} = (5,3 + 3,6 * w) * 1,163 = (5,3 + 3,6 * 6) * 1,163 = 31,28 \text{ Вт/(м}^2 * \text{К)}.$$

Если  $w \leq 5 \text{ м/с}$ :  $\alpha_{\text{к}} = 6,47 * w^{0,78} * 1,163$ .

**54.** Определим площадь загрузочных люков:

$$F_1 = n_1 * f_{\text{зл}} = 3 * 0,36 = 1,08 \text{ м}^2.$$

**55.** Определим коэффициент теплоотдачи излучением от загрузочного люка:

$$\alpha_1 = (((t_1 + 273)/100)^4 - ((t_{\text{в}} + 273)/100)^4) * C / (t_1 - t_{\text{в}}),$$

где  $C$  – коэффициент излучения серого тела,  $\text{Вт/(м}^2 * \text{К}^4)$ .

$$\alpha_1 = (((240 + 273)/100)^4 - ((10 + 273)/100)^4) * 5,35 / (240 - 10) = 14,62 \text{ Вт/(м}^2 * \text{К)}.$$

**56.** Определим площадь свода камеры:

$$F_2 = b_{\text{ср}} * L - F_1 = 0,41 * 15,14 - 1,08 = 5,13 \text{ м}^2.$$

**57.** Определим коэффициент теплоотдачи излучением от свода камеры, двери с коксовой стороны (к.с.), торцевой стены обогревательного простенка с м.с.:

$$\alpha_2 = \alpha_6 = \alpha_9 = (((t_2 + 273)/100)^4 - ((t_{\text{в}} + 273)/100)^4) * 5,35 / (t_2 - t_{\text{в}}) = (((120 + 273)/100)^4 - ((10 + 273)/100)^4) * 5,35 / (120 - 10) = 8,48 \text{ Вт/(м}^2 * \text{К)}.$$

**58.** Определим площадь смотровых лючков:

$$F_3 = n_2 * f_{\text{сл}} = 28 * 0,07 = 1,96 \text{ м}^2.$$

**59.** Определим коэффициент теплоотдачи излучением от смотровых лючков:

$$\alpha_3 = (((t_3 + 273)/100)^4 - ((t_{\text{в}} + 273)/100)^4) * 5,35 / (t_3 - t_{\text{в}}) = (((200 + 273)/100)^4 - ((10 + 273)/100)^4) * 5,35 / (200 - 10) = 12,29 \text{ Вт/(м}^2 * \text{К)}.$$

**60.** Определим площадь свода обогревательного простенка:

$$F_4 = (A - b_{\text{ср}}) * L - F_3 = (1,32 - 0,41) * 15,14 - 1,96 = 11,82 \text{ м}^2.$$

**61.** Определим коэффициент теплоотдачи излучением от свода обогревательного простенка:

$$\alpha_4 = \alpha_8 = \left( \frac{(t_3 + 273)}{100} \right)^4 - \left( \frac{(t_B + 273)}{100} \right)^4 * 5,35 / (t_3 - t_B) = \left( \frac{(140 + 273)}{100} \right)^4 - \left( \frac{(10 + 273)}{100} \right)^4 * 5,35 / (140 - 10) = 9,33 \text{ Вт}/(\text{м}^2 * \text{К}).$$

**62.** Определим площадь лобовой стенки с коксовой и машинной сторон:

$$F_5 = A * h_{\text{л}} = 1,32 * 1,032 = 1,36 \text{ м}^2.$$

**63.** Определим коэффициент теплоотдачи излучением от лобовой стенки с коксовой стороны:

$$\alpha_{5\text{кк}} = \left( \frac{(t_{5\text{кк}} + 273)}{100} \right)^4 - \left( \frac{(t_B + 273)}{100} \right)^4 * 5,35 / (t_{5\text{кк}} - t_B) = \left( \frac{(90 + 273)}{100} \right)^4 - \left( \frac{(10 + 273)}{100} \right)^4 * 5,35 / (90 - 10) = 7,32 \text{ Вт}/(\text{м}^2 * \text{К}).$$

**64.** Определим коэффициент теплоотдачи излучением от лобовой стенки с машинной стороны:

$$\alpha_{5\text{мс}} = \left( \frac{(t_{5\text{мс}} + 273)}{100} \right)^4 - \left( \frac{(t_B + 273)}{100} \right)^4 * 5,35 / (t_{5\text{мс}} - t_B) = \left( \frac{(80 + 273)}{100} \right)^4 - \left( \frac{(10 + 273)}{100} \right)^4 * 5,35 / (80 - 10) = 6,97 \text{ Вт}/(\text{м}^2 * \text{К}).$$

**65.** Определим площадь поверхности двери с коксовой стороны:

$$F_6 = h_{\text{к}} * b_{\text{кк}} = 6,0 * 0,435 = 2,61 \text{ м}^2.$$

**66.** Определим площадь поверхности двери с машинной стороны:

$$F_7 = h_{\text{к}} * b_{\text{мс}} = 6,0 * 0,385 = 2,31 \text{ м}^2.$$

**67.** Определим коэффициент теплоотдачи излучением от двери с машинной стороны:

$$\alpha_7 = \left( \frac{(t_7 + 273)}{100} \right)^4 - \left( \frac{(t_B + 273)}{100} \right)^4 * 5,35 / (t_7 - t_B) = \left( \frac{(110 + 273)}{100} \right)^4 - \left( \frac{(10 + 273)}{100} \right)^4 * 5,35 / (110 - 10) = 8,08 \text{ Вт}/(\text{м}^2 * \text{К}).$$

**68.** Определим площадь поверхности торцевой стена обогревательного простенка с к.с.:

$$F_8 = h_{\text{к}} * (A - b_{\text{кк}}) = 6,0 * (1,32 - 0,435) = 5,31 \text{ м}^2.$$

**69.** Определим площадь поверхности торцевой стена обогревательного простенка с м.с.:

$$F_9 = h_{\text{к}} * (A - b_{\text{мс}}) = 6,0 * (1,32 - 0,385) = 5,61 \text{ м}^2.$$

**70.** Определим площадь поверхности стены регенератора:

$$F_{10} = h_p * 2 * A = 3,2 * 2,0 * 1,32 = 8,45 \text{ м}^2.$$

**71.** Определим коэффициент теплоотдачи излучением от стены регенератора:

$$\alpha_{10} = (((t_{10} + 273)/100)^4 - ((t_B + 273)/100)^4) * 5,35 / (t_{10} - t_B) = (((70 + 273)/100)^4 - ((10 + 273)/100)^4) * 5,35 / (70 - 10) = 6,62 \text{ Вт}/(\text{м}^2 * \text{К}).$$

**72.** Определим тепло, теряемое конвекцией и лучеиспусканием загрузочными люками:

$$q_1 = 3,6 * (\alpha_k + \alpha_1) * F_1 * (t_1 - t_B) = 3,6 * (31,28 + 14,62) * 1,08 * (240 - 10) = 41046,6 \text{ кДж}/\text{ч}.$$

**73.** Определим тепло, теряемое конвекцией и лучеиспусканием сводом камеры:

$$q_2 = 3,6 * (\alpha_k + \alpha_2) * F_2 * (t_2 - t_B) = 3,6 * (31,28 + 8,48) * 5,13 * (120 - 10) = 80772,6 \text{ кДж}/\text{ч}.$$

**74.** Определим тепло, теряемое конвекцией и лучеиспусканием смотровыми лючками:

$$q_3 = 3,6 * (\alpha_k + \alpha_3) * F_3 * (t_3 - t_B) = 3,6 * (31,28 + 12,29) * 1,96 * (200 - 10) = 58411,68 \text{ кДж}/\text{ч}.$$

**75.** Определим тепло, теряемое конвекцией и лучеиспусканием сводом обогревательного простенка:

$$q_4 = 3,6 * (\alpha_k + \alpha_4) * F_4 * (t_4 - t_B) = 3,6 * (31,28 + 9,33) * 11,82 * (140 - 10) = 224644,8 \text{ кДж}/\text{ч}.$$

**76.** Определим тепло, теряемое конвекцией и лучеиспусканием лобовой стенкой:

$$q_{5\text{кс}} = 3,6 * (\alpha_k + \alpha_{5\text{кс}}) * F_5 * (t_{5\text{кс}} - t_B) = 3,6 * (31,28 + 7,32) * 1,36 * (90 - 10) = 15118,85 \text{ кДж}/\text{ч}.$$

$$q_{5\text{мс}} = 3,6 * (\alpha_k + \alpha_{5\text{мс}}) * F_5 * (t_{5\text{мс}} - t_B) = 3,6 * (31,28 + 6,97) * 1,36 * (80 - 10) = 13109,04 \text{ кДж}/\text{ч}.$$

$$q_5 = q_{5\text{кс}} + q_{5\text{мс}} = 15118,85 + 13109,04 = 28227,89 \text{ кДж}/\text{ч}.$$

**77.** Определим тепло, теряемое конвекцией и лучеиспусканием дверью с коксовой стороны:

$$q_6 = 3,6 * (\alpha_k + \alpha_6) * F_6 * (t_6 - t_B) = 3,6 * (31,28 + 8,48) * 2,61 * (120 - 10) = 41094,35 \text{ кДж}/\text{ч}.$$

**78.** Определим тепло, теряемое конвекцией и лучеиспусканием дверью с машинной стороны:

$$q_7 = 3,6 * (\alpha_k + \alpha_7) * F_7 * (t_7 - t_B) = 3,6 * (31,28 + 8,08) * 2,31 * (110 - 10) = 32731,78 \text{ кДж}/\text{ч}.$$

**79.** Определим тепло, теряемое конвекцией и лучеиспусканием торцевой стеной обогревательного простенка с к.с.:

$$q_8 = 3,6 * (\alpha_k + \alpha_8) * F_8 * (t_8 - t_B) = 3,6 * (31,28 + 9,33) * 5,31 * (140 - 10) = 100919,1 \text{ кДж}/\text{ч}.$$

**80.** Определим тепло, теряемое конвекцией и лучеиспусканием торцевой стеной обогревательного простенка с м.с.:

$$q_9 = 3,6 * (\alpha_k + \alpha_9) * F_9 * (t_9 - t_B) = 3,6 * (31,28 + 8,48) * 5,61 * (120 - 10) = 88329,23 \text{ кДж}/\text{ч}.$$

**81.** Определим тепло, теряемое конвекцией и лучеиспусканием торцевой стеной обогревательного простенка с м.с.:

$$q_{10} = 3,6 * (\alpha_k + \alpha_{10}) * F_{10} * (t_{10} - t_b) = 3,6 * (31,28 + 6,62) * 8,45 * (70 - 10) = 69175,08 \text{ кДж/ч.}$$

**82.** Суммарные потери тепла конвекцией и лучеиспусканием печным массивом:

$$q_{\text{сум}} = \sum q_i = 41046,6 + 80772,6 + 58411,68 + 224644,8 + 28227,89 + 41094,35 + 32731,78 + 100919,1 + 88329,23 + 69175,08 = 765353,11 \text{ кДж/ч.}$$

**83.** Рассчитаем потери тепла конвекцией и лучеиспусканием и теплопроводностью в грунт (примем 10% от потерь наружными поверхностями) печным массивом, отнесенные к тонне шихты:

$$Q_{13} = q_{\text{сум}} * 1,1 * E * \tau / (b_{\text{ср}} * L * h * \gamma_{\text{ш}}^c) = 765353,11 * 1,1 * 1000 * 15 / (0,41 * 15,14 * 4,98 * 800) = 510642,24 \text{ кДж/т.}$$

Таблица 7 – Тепловой баланс коксовой печи

| Приходная часть                     |                       | Расходная часть                      |                        |
|-------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------|------------------------|
| Статья                              | кДж/т (%)             | Статья                               | кДж/т (%)              |
| Теплота сгорания отопительного газа | 3077257,97<br>98,59 % | Теплота нагрева кокса                | 1195034<br>(38,29 %)   |
| Теплота отопительного газа          | 30782,69<br>0,989 %   | Теплота нагрева коксового газа       | 138350,5<br>(4,43 %)   |
| Теплота воздуха                     | 13135,5<br>(0,42)     | Теплота нагрева паров смолы          | 64865,47<br>(2,08 %)   |
| Теплота угольной шихты              | 10,6<br>(0,001%)      | Теплота нагрева паров сырого бензола | 14826,4<br>(0,48 %)    |
|                                     |                       | Теплота нагрева паров аммиака        | 4639,27<br>(0,15 %)    |
|                                     |                       | Теплота нагрева сероводорода         | 9695,02<br>(0,31 %)    |
|                                     |                       | Теплота нагрева паров воды           | 307390,2<br>(9,85 %)   |
|                                     |                       | Потери тепла с продуктами горения    | 875743,66<br>(28,06 %) |
|                                     |                       | Потери тепла в окружающую среду      | 510642,24<br>(16,36 %) |
| Итого                               | 3121186,76            | Итого                                | 3121186,8              |

**84.** Приравняем приходную часть и расходную часть теплового баланса и найдём расход отопительного газа G:

$$7000 \cdot G + 70,023 \cdot G + 29,88 \cdot G + 10,6 = 1195034 + 138350,5 + 64865,47 + 14826,4 + 4639,27 + 9695,02 + 307390,2 + 1992,1 \cdot G + 510642,24;$$

$$7000 \cdot G + 70,023 \cdot G + 29,88 \cdot G - 1992,1 \cdot G = 1195034 + 138350,5 + 64865,47 + 14826,4 + 4639,27 + 9695,02 + 307390,2 + 510642,24 - 10,6;$$

$$G = 2245432,5 / 5107,803 = 439,61 \text{ м}^3/\text{т}.$$

**85.** Подставим полученное значение расхода отопительного газа и сведём тепловой баланс в таблицу 7.

**86.** Рассчитаем теплотехнический к.п.д. обогрева коксовых печей:

$$\eta_{\text{тепл}} = (Q_{\text{сум}} - Q_{12} - Q_{13}) \cdot 100 / Q_{\text{сум}} = (3121186,76 - 875743,66 - 510642,24) \cdot 100 / 3121186,76 = 55,58 \%$$

**87.** Рассчитаем термический к.п.д. обогрева коксовых печей:

$$\eta_{\text{терм}} = (Q_{\text{сум}} - Q_{12}) \cdot 100 / Q_{\text{сум}} = (3121186,76 - 875743,66) \cdot 100 / 3121186,76 = 71,94 \%$$

**88.** Рассчитаем удельный расход тепла на коксование 1 кг шихты фактической влажности:

$$q_{\text{ш}}^{\text{п}} = Q_1 / E = 3077257,97 / 1000 = 3077,26 \text{ кДж/кг}.$$

### **Расчёт гидравлического режима коксовой печи [4], с.88 - 103.**

При расчёте гидравлического режима коксовой печи для упрощения примем, что в регенераторе подогревается только воздух, поступающий на горение.

**89.** Рассчитаем количество газа, подаваемого на один простенок:

$$V_{\text{г}} = b_{\text{ср}} \cdot L \cdot h \cdot \gamma_{\text{ш}}^{\text{с}} \cdot q_{\text{ш}}^{\text{п}} / \tau / Q_{\text{н}}^{\text{п}} = 0,41 \cdot 15,14 \cdot 4,98 \cdot 800 \cdot 3077,26 / 15 / 7000 = 724,78 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

**90.** Рассчитаем количество газа, подаваемое на коксовую сторону по эмпирической формуле:

$$V_{\text{гкс}} = V_{\text{г}} \cdot (7 + 0,4) \cdot 1,123 / (7 + 0,4) \cdot 1,123 + (8 + 0,4) = 360,44 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

**91.** Через подовый канал одного регенератора с коксовой стороны на восходящем потоке проходит воздух в количестве:

$$V_{\text{в}} = V_{\text{гкс}} \cdot V_{\text{д}}^{\text{д}} / 3600 = 360,44 \cdot 2,29 / 3600 = 0,229 \text{ м}^3/\text{с}.$$

**92.** Через подовый канал одного регенератора с коксовой стороны на нисходящем потоке проходят продукты сгорания в количестве:

$$V_{\text{пг}} = V_{\text{гкс}} \cdot V_{\text{пр.г}} / 3600 = 360,44 \cdot 3,11 / 3600 = 0,311 \text{ м}^3/\text{с}.$$

**93.** Рассчитаем расход воздуха в коротком косом ходе по эмпирической формуле:

$$V_{\text{вккх}} = V_{\text{в}} \cdot (1 - 2,8 / (2,8 + 12)) / 12 = 0,229 \cdot (1 - 2,8 / (2,8 + 12)) / 12 = 0,01547 \text{ м}^3/\text{с}.$$

**94.** Рассчитаем расход продуктов горения в вертикале по эмпирической формуле:

$$V'_{\text{пгв}} = V_{\text{пг}} \cdot (1 - 1,4 / (1,4 + 6)) / 6 = 0,311 \cdot (1 - 1,4 / (1,4 + 6)) / 6 = 0,04203 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Или с учётом рециркуляции равной 1,8:  $V_{\text{пгв}} = V'_{\text{пгв}} \cdot 1,8 = 0,04203 \cdot 1,8 = 0,07565 \text{ м}^3/\text{с}.$

**95.** Рассчитаем расход продуктов горения в длинном косом ходе:

$$V_{\text{пгдкх}} = V'_{\text{пгв}} / 2 = 0,04203 / 2 = 0,021015 \text{ м}^3/\text{с}.$$

### **Расчёт гидравлического сопротивления отопительной системы**

#### *Восходящий поток*

**96.** Рассчитаем вязкость воздуха при 100 °С по формуле Сазерленда:

$$\mu_{100} = \mu_0 \cdot (1 + C/273) / (1 + C/T) \cdot (T/273)^{0,5},$$

где  $\mu_0$  – динамическая вязкость воздуха при  $T_0 = 273$  К (приложение 4);

$C$  – постоянная Сазерленда (приложение 4).

$$\mu_{100} = \mu_0 * (1 + C/273) / (1 + C/T) * (T/273)^{0,5} = 1,721 * 10^{-5} * (1 + 122/273) / (1 + 122/373) * (373/273)^{0,5} = 2,19 * 10^{-5} \text{ Па*с.}$$

**97.** Рассчитаем плотность воздуха при  $100$  °С:

$$\rho_{100} = \rho_v * 273 / (t + 273) = 1,285 * 273 / (100 + 273) = 0,94 \text{ кг/м}^3.$$

**98.** Рассчитаем скорость воздуха в подовом канале:

$$W_{\text{пк}} = V_v / F_{\text{пк}} = 0,229 / 0,141 = 1,62 \text{ м/с.}$$

**99.** Рассчитаем критерий Рейнольдса в подовом канале для воздуха:

$$Re_{\text{пк}} = W_{\text{пк}} * d_{\text{пк}} * \rho_{100} / \mu_{100} = 1,62 * 0,351 * 0,94 / 2,19 * 10^{-5} = 24406,5.$$

**100.** Рассчитаем коэффициент сопротивления трению в подовом канале по формуле Добрехотова:

$$\lambda_{\text{пк}} = 0,175 / Re_{\text{пк}}^{0,12} = 0,175 / 24406,5^{0,12} = 0,0521.$$

**101.** Рассчитаем потери на трение в подовом канале регенератора:

$$\Delta p_1 = k_{\text{пк}} * \lambda_{\text{пк}} * L_{\text{пк}} * W_{\text{пк}}^2 * \rho_0 * T_{\text{пк}} / (d_{\text{пк}} * 2 * g * T_0) * 9,81,$$

где  $k_{\text{пк}}$  – коэффициент для подового канала;

$L_{\text{пк}}$  – длина канала, м;

$d_{\text{пк}}$  – эквивалентный диаметр канала, м.

$$\Delta p_1 = k_{\text{пк}} * \lambda_{\text{пк}} * L_{\text{пк}} * W_{\text{пк}}^2 * \rho_0 * T_{\text{пк}} / (d_{\text{пк}} * 2 * g * T_0) * 9,81 = 1/3 * 0,0521 * 6,923 * 1,62^2 * 1,285 * 373 / (0,351 * 2 * 9,81 * 273) * 9,81 = 0,789 \text{ Па.}$$

**102.** Рассчитаем скорость воздуха в отверстии колосниковой решётки:

$$W_{\text{кр}} = V_v / F_{\text{кр}} / n_{\text{кр}},$$

где  $F_{\text{кр}}$  – минимальная площадь сечения колосникового отверстия, м<sup>2</sup>;

$n_{\text{кр}}$  – число колосниковых отверстий.

$$W_{\text{кр}} = V_v / F_{\text{кр}} / n_{\text{кр}} = 0,229 / 0,00096 / 92 = 2,59 \text{ м/с.}$$

**103.** Рассчитаем потери на повороте  $90$ °:

$$\Delta p_{\text{пов}90} = \xi_{\text{пов}90} * W_{\text{кр}}^2 * \rho_0 * T_{\text{кр}} / (2 * g * T_0) * 9,81,$$

где  $\xi_{\text{пов}90}$  – местное сопротивление на повороте  $90$ °  $\xi_{\text{пов}90} = 1,5$  для квадратных сечений [2] приложение V, с.352.

$$\Delta p_{\text{пов}90} = \xi_{\text{пов}90} * W_{\text{кр}}^2 * \rho_0 * T_{\text{кр}} / (2 * g * T_0) * 9,81 = 1,5 * 2,59^2 * 1,285 * 373 / (2 * 9,81 * 273) * 9,81 = 8,83 \text{ Па.}$$

**104.** Рассчитаем местное сопротивление при сужении потока при входе в колосниковую решётку:

$$\xi_{\text{суж}} = 0,5 * (1 - F_{\text{кр}} / b_{\text{пк}} / (L_{\text{пк}} / n_{\text{кр}})),$$

где  $b_{\text{пк}}$  – ширина подового канала, м.

$$\xi_{\text{суж}} = 0,5 * (1 - F_{\text{кр}} / b_{\text{пк}} / (L_{\text{пк}} / n_{\text{кр}})) = 0,5 * (1 - 0,00096 / 0,258 / (6,923 / 92)) = 0,4753.$$

**105.** Рассчитаем потери при сужении потока при входе в колосниковую решётку:

$$\Delta p_{\text{суж}} = \xi_{\text{суж}} * W_{\text{кр}}^2 * \rho_0 * T_{\text{кр}} / (2 * g * T_0) * 9,81 = 0,4753 * 2,59^2 * 1,285 * 373 / (2 * 9,81 * 273) * 9,81 = 2,799 \text{ Па.}$$

**106.** Рассчитаем критерий Рейнольдса в отверстии колосниковой решётки для воздуха:

$$Re_{\text{кр}} = W_{\text{кр}} * d_{\text{кр}} * \rho_{100} / \mu_{100} = 2,59 * 0,035 * 0,94 / 2,19 * 10^{-5} = 3890,9.$$

**107.** Рассчитаем коэффициент сопротивления трению в отверстии колосниковой решётки по формуле Добрехотова:

$$\lambda_{\text{кр}} = 0,175 / Re_{\text{кр}}^{0,12} = 0,175 / 3890,9^{0,12} = 0,0649, \text{ тогда } \xi_{\text{тр}} = 0,045.$$

**108.** Рассчитаем местное сопротивление на расширение и трение в диффузоре:

$$\xi_{\text{диф}} = \xi_{\text{расш}} + \xi_{\text{тр}} = 0,199 + 0,045 = 0,244.$$

**109.** Рассчитаем потери в диффузоре колосниковой решётки:

$$\Delta p_{\text{диф}} = \xi_{\text{диф}} * W_{\text{кр}}^2 * \rho_0 * T_{\text{кр}} / (2 * g * T_0) * 9,81 = 0,244 * 2,59^2 * 1,285 * 373 / (2 * 9,81 * 273) * 9,81 = 1,437 \text{ Па}.$$

**110.** Рассчитаем коэффициент местного сопротивления при расширении потока при выходе из колосниковой решётки в насадку регенератора:

$$\xi_{\text{расш}} = 1 - F'_{\text{кр}} / F_{\text{нас}} / n_{\text{кр}} = 1 - 0,00385 / (1,13 / 92) = 0,6865.$$

**111.** Рассчитаем скорость воздуха в отверстии колосниковой решётки:

$$W'_{\text{кр}} = V_{\text{в}} / F'_{\text{кр}} / n_{\text{кр}},$$

где  $F'_{\text{кр}}$  – максимальная площадь сечения колосникового отверстия,  $\text{м}^2$ ;

$n_{\text{кр}}$  – число колосниковых отверстий.

$$W'_{\text{кр}} = V_{\text{в}} / F'_{\text{кр}} / n_{\text{кр}} = 0,229 / 0,00385 / 92 = 0,65 \text{ м/с}.$$

**112.** Рассчитаем потери напора при расширении потока при выходе из колосниковой решётки в насадку регенератора:

$$\Delta p_{\text{расш}} = \xi_{\text{расш}} * (W'_{\text{кр}})^2 * \rho_0 * T_{\text{кр}} / (2 * g * T_0) * 9,81 = 0,6865 * 0,65^2 * 1,285 * 373 / (2 * 9,81 * 273) * 9,81 = 0,255 \text{ Па}.$$

**113.** Потери в колосниковой решётке рассчитываем по диффузорному отверстию, обладающему наибольшим сопротивлением:

$$\Delta p_2 = \Delta p_{\text{пов90}} + \Delta p_{\text{суж}} + \Delta p_{\text{диф}} + \Delta p_{\text{расш}} = 8,83 + 2,799 + 1,437 + 0,255 = 13,321 \text{ Па}.$$

**114.** Рассчитаем скорость воздуха в насадке регенератора:

$$W_{\text{рег}} = V_{\text{в}} / F_{\text{нас}} = 0,229 / 1,13 = 0,203 \text{ м/с}.$$

**115.** Рассчитаем среднюю температуру в регенераторе:

$$T^{\text{ср}}_{\text{рег}} = (100 + 1200) / 2 + 273 = 923 \text{ К}.$$

**116.** Рассчитаем потери на трение в насадке регенератора:

$$\Delta p_3 = k_{\text{рег}} * c_{\text{рег}} * L_{\text{рег}} * W_{\text{рег}}^2 * \rho_0 * T^{\text{ср}}_{\text{рег}} / (d^{1,25}_{\text{рег}} * V / 133,3) * 9,81,$$

где  $k_{\text{рег}}$  – коэффициент для перевода из британских мер ( $k_{\text{рег}} = 0,18$ );

$c_{\text{рег}}$  – коэффициент, зависящий от типа насадки (для фасонной  $c_{\text{рег}} = 0,34$ ; для прямоугольной  $c_{\text{рег}} = 0,22$ );

$L_{\text{рег}}$  – длина канала, м;

$d_{\text{рег}}$  – эквивалентный диаметр канала, м.

$$\Delta p_3 = k_{\text{рег}} * c_{\text{рег}} * L_{\text{рег}} * W_{\text{рег}}^2 * \rho_0 * T^{\text{ср}}_{\text{рег}} / (d^{1,25}_{\text{рег}} * V / 133,3) * 9,81 = 0,18 * 0,34 * 2,145 * 0,203^2 * 1,285 * 923 / (0,03^{1,25} * 98500 / 133,3) * 9,81 = 6,822 \text{ Па}.$$

**117.** Рассчитаем коэффициент местного сопротивления при выходе из насадки регенератора в наднасадочное пространство:

$$\xi_{\text{ннас}} = 1 - F_{\text{нас}} / F_{\text{ннас}} = 1 - 1,13 / 2,8 = 0,596.$$

**118.** Рассчитаем потери напора при выходе из насадки регенератора в наднасадочное пространство:

$$\Delta p_{4\text{в}} = \xi_{\text{ннас}} * W_{\text{рег}}^2 * \rho_0 * T_{\text{рег}} / (2 * g * T_0) * 9,81 = 0,596 * 0,203^2 * 1,285 * 1473 / (2 * 9,81 * 273) * 9,81 = 0,085 \text{ Па}.$$

**119.** Рассчитаем вязкость воздуха при  $1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$  по формуле Сазерленда:

$$\mu_{1200} = \mu_0 * (1 + C / 273) / (1 + C / T) * (T / 273)^{0,5} = 1,721 * 10^{-5} * (1 + 122 / 273) / (1 + 122 / 1473) * (1473 / 273)^{0,5} = 5,34 * 10^{-5} \text{ Па*с}.$$

**120.** Рассчитаем плотность воздуха при  $1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$\rho_{1200} = \rho_{\text{в}} * 273 / (t + 273) = 1,285 * 273 / (1200 + 273) = 0,238 \text{ кг/м}^3.$$

**121.** Рассчитаем скорость воздуха в наднасадочном пространстве:

$$W_{\text{ннас}} = V_{\text{в}} / F_{\text{ннас}} = 0,229 / 1,732 = 0,13 \text{ м/с.}$$

**122.** Рассчитаем критерий Рейнольдса в наднасадочном пространстве для воздуха:

$$Re_{\text{ннас}} = W_{\text{ннас}} * d_{\text{ннас}} * \rho_{1200} / \mu_{1200} = 0,13 * 0,501 * 0,238 / 5,34 / 10^{-5} = 290,28.$$

**123.** Рассчитаем коэффициент сопротивления трению в наднасадочном пространстве регенератора по формуле Доброхотова:

$$\lambda_{\text{ннас}} = 0,175 / Re_{\text{ннас}}^{0,12} = 0,175 / 290,28^{0,12} = 0,0886.$$

**124.** Рассчитаем потери на трение в наднасадочном пространстве регенератора:

$$\Delta p_{4\text{тр}} = \lambda_{\text{ннас}} * L_{\text{ннас}} * W_{\text{ннас}}^2 * \rho_0 * T_{\text{ннас}} / (d_{\text{ннас}} * 2 * g * T_0) * 9,81 = 0,0886 * 0,12 * 0,13^2 * 1,285 * 1473 / (0,501 * 2 * 9,81 * 273) * 9,81 = 0,0012 \text{ Па. Тогда:}$$

$$\Delta p_4 = \Delta p_{4\text{в}} + \Delta p_{4\text{тр}} = 0,085 + 0,0012 = 0,00862 \text{ Па.}$$

**125.** Рассчитаем скорость воздуха при входе в короткий косой ход:

$$W_{\text{кх вх}} = V_{\text{вккх}} / F_{\text{кх вх}} = 0,01547 / 0,025 = 0,619 \text{ м/с.}$$

**126.** Рассчитаем потери напора на повороте  $45^\circ$  к косому ходу:

$$\Delta p_{\text{пов}45} = \xi_{\text{пов}45} * W_{\text{кх вх}}^2 * \rho_0 * T_{\text{кх}} / (2 * g * T_0) * 9,81,$$

где  $\xi_{\text{пов}45}$  – местное сопротивление на повороте  $45^\circ$   $\xi_{\text{пов}45} = 0,32$  для квадратных сечений [2] приложение V, с.352.

$$\Delta p_{\text{пов}45} = \xi_{\text{пов}45} * W_{\text{кх вх}}^2 * \rho_0 * T_{\text{кх}} / (2 * g * T_0) * 9,81 = 0,32 * 0,619^2 * 1,285 * 1503 / (2 * 9,81 * 273) * 9,81 = 0,434 \text{ Па.}$$

**127.** Рассчитаем местное сопротивление при сужении потока при входе в короткий косой ход:

$$\xi_{\text{суж}} = 0,5 * (1 - F_{\text{кх вх}} / F'_{\text{ннас}}),$$

где  $F'_{\text{ннас}}$  – площадь сечения при выходе из наднасадочного пространства.

$$\xi_{\text{суж}} = 0,5 * (1 - F_{\text{кх вх}} / F'_{\text{ннас}}) = 0,5 * (1 - 0,025 / 0,248) = 0,4496.$$

**128.** Рассчитаем потери напора при сужении потока при входе в короткий косой ход:

$$\Delta p_{\text{суж кх}} = \xi_{\text{суж}} * W_{\text{кх вх}}^2 * \rho_0 * T_{\text{кх}} / (2 * g * T_0) * 9,81 = 0,4496 * 0,619^2 * 1,285 * 1503 / (2 * 9,81 * 273) * 9,81 = 0,609 \text{ Па.}$$

**129.** Рассчитаем вязкость воздуха при  $1230^\circ\text{C}$  по формуле Сазерленда:

$$\mu_{1230} = \mu_0 * (1 + C / 273) / (1 + C / T) * (T / 273)^{0,5} = 1,721 * 10^{-5} * (1 + 122 / 273) / (1 + 122 / 1503) * (1503 / 273)^{0,5} = 5,4 * 10^{-5} \text{ Па*с.}$$

**130.** Рассчитаем плотность воздуха при  $1230^\circ\text{C}$ :

$$\rho_{1230} = \rho_{\text{в}} * 273 / (t + 273) = 1,285 * 273 / (1230 + 273) = 0,233 \text{ кг/м}^3.$$

**131.** Рассчитаем скорость воздуха в коротком косом ходе:

$$W_{\text{кх}} = V_{\text{вккх}} / F_{\text{кх}} = 0,01547 / 0,012 = 1,29 \text{ м/с.}$$

**132.** Рассчитаем критерий Рейнольдса в коротком косом ходе для воздуха:

$$Re_{\text{кх}} = W_{\text{кх}} * d_{\text{кх}} * \rho_{1230} / \mu_{1230} = 1,29 * 0,109 * 0,233 / 5,4 / 10^{-5} = 606,71.$$

**133.** Рассчитаем коэффициент сопротивления трению в коротком косом ходе по формуле Доброхотова:

$$\lambda_{\text{кх}} = 0,175 / Re_{\text{кх}}^{0,12} = 0,175 / 606,71^{0,12} = 0,0811.$$

**134.** Рассчитаем потери на трение в коротком косом ходе:

$$\Delta p_{\text{кх тр}} = \lambda_{\text{кх}} * L_{\text{кх}} * W_{\text{кх}}^2 * \rho_0 * T_{\text{кх}} / (d_{\text{кх}} * 2 * g * T_0) * 9,81 = 0,0811 * 1,2 * 1,29^2 * 1,285 * 1503 / (0,109 * 2 * 9,81 * 273) * 9,81 = 5,256 \text{ Па.}$$

**135.** Рассчитаем потери напора на повороте  $45^\circ$  в коротком косом ходе:

$$\Delta p_{\text{пов}45\text{кх}} = \xi_{\text{пов}45} * W_{\text{кх}}^2 * \rho_0 * T_{\text{кх}} / (2 * g * T_0) * 9,81 = 0,32 * 1,29^2 * 1,285 * 1503 / (2 * 9,81 * 273) * 9,81 = 1,884 \text{ Па.}$$

**136.** Рассчитаем коэффициент местного сопротивления при плавном сужении струи на уровне регистра и рассекателя:

$$\xi_{\text{суж рег}} = k_{\text{рег}} * (1 - F_{\text{кк вых}} / F_{\text{кк}}),$$

где  $k_{\text{рег}}$  – коэффициент для сужения струи в регистре и рассекателе.

$$\xi_{\text{суж рег}} = k_{\text{рег}} * (1 - F_{\text{кк вых}} / F_{\text{кк}}) = 0,01081 * (1 - 0,0063 / 0,012) = 0,005135.$$

**137.** Рассчитаем скорость воздуха на выходе из короткого косога хода:

$$W_{\text{кк вых}} = V_{\text{вккк}} / F_{\text{кк вых}} = 0,01547 / 0,0063 = 2,46 \text{ м/с.}$$

**138.** Рассчитаем потери напора за счёт плавного сужения струи на уровне регистра и рассекателя:

$$\Delta p_{\text{суж рег}} = \xi_{\text{суж рег}} * W_{\text{кк вых}}^2 * \rho_0 * T_{\text{кк}} / (2 * g * T_0) * 9,81 = 0,005135 * 2,46^2 * 1,285 * 1503 / (2 * 9,81 * 273) * 9,81 = 0,109 \text{ Па.}$$

**139.** Рассчитаем потери напора при выходе воздуха в вертикал, с учётом того, что регистр и рассекатель закрывают половину сечения вертикала:

$$\Delta p_{\text{вых верт}} = (1 - F_{\text{кк вых}} / F_{\text{верт}} * 0,5) * W_{\text{кк вых}}^2 * \rho_0 * T_{\text{кк}} / (2 * g * T_0) * 9,81 = (1 - 0,0063 / 0,218 * 0,5) * 2,46^2 * 1,285 * 1503 / (2 * 9,81 * 273) * 9,81 = 21,097 \text{ Па.}$$

**140.** Общая потеря напора в коротком косом ходе:

$$\Delta p_5 = \Delta p_{\text{пов45}} + \Delta p_{\text{суж кк}} + \Delta p_{\text{кк тр}} + \Delta p_{\text{пов45кк}} + \Delta p_{\text{суж рег}} + \Delta p_{\text{вых верт}} = 0,434 + 0,609 + 5,256 + 1,884 + 0,109 + 21,097 = 29,389 \text{ Па.}$$

**141.** Рассчитаем вязкость продуктов сгорания при  $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ :

$$\ln \mu_{\text{пр}} = \ln \mu_{\text{H}_2\text{O}} * \text{H}_2\text{O} + \ln \mu_{\text{CO}_2} * \text{CO}_2 + \ln \mu_{\text{SO}_2} * \text{SO}_2 + \ln \mu_{\text{N}_2} * \text{N}_2 + \ln \mu_{\text{O}_2} * \text{O}_2 = \ln(0,818 * 10^{-5}) * 0,1303 + \ln(1,384 * 10^{-5}) * 0,1315 + \ln(1,354 * 10^{-5}) * 0,0021 + \ln(1,667 * 10^{-5}) * 0,6848 + \ln(1,943 * 10^{-5}) * 0,0515 = -11,1139. \text{ Тогда } \mu_{\text{пр}} = 1,4904 * 10^{-5} \text{ Па*с.}$$

**142.** Постоянную Сазерленда рассчитаем по методу аддитивности:

$$C_{\text{пр}} = C_{\text{пгдг}} * a_{\text{дг}} + C_{\text{пгкг}} * a_{\text{кг}} = 167 * 0,777 + 237 * 0,223 = 183.$$

**143.** Рассчитаем вязкость продуктов сгорания при  $1500 \text{ } ^\circ\text{C}$  по формуле Сазерленда:

$$\mu_{1500} = \mu_{\text{пр}} * (1 + C_{\text{пр}} / 273) / (1 + C_{\text{пр}} / T) * (T / 273)^{0,5} = 1,4904 * 10^{-5} * (1 + 183 / 273) / (1 + 183 / 1773) * (1773 / 273)^{0,5} = 5,75 * 10^{-5} \text{ Па*с.}$$

**144.** Рассчитаем плотность продуктов сгорания при  $1500 \text{ } ^\circ\text{C}$ :

$$\rho_{1500} = \rho_{\text{пр}} * 273 / (t + 273) = 1,2986 * 273 / (1500 + 273) = 0,2 \text{ кг/м}^3.$$

**145.** Рассчитаем скорость продуктов сгорания в вертикале:

$$W_{\text{верт}} = V_{\text{пгв}} / F_{\text{верт}} = 0,07565 / 0,218 = 0,35 \text{ м/с.}$$

**146.** Рассчитаем критерий Рейнольдса в вертикале для продуктов горения:

$$\text{Re}_{\text{верт}} = W_{\text{верт}} * d_{\text{верт}} * \rho_{1500} / \mu_{1500} = 0,35 * 0,445 * 0,2 / 5,75 * 10^{-5} = 541,74.$$

**147.** Рассчитаем коэффициент сопротивления трению в вертикале по формуле Доброхотова:

$$\lambda_{\text{верт}} = 0,175 / \text{Re}_{\text{верт}}^{0,12} = 0,175 / 541,74^{0,12} = 0,0822.$$

**148.** Рассчитаем потери на трение в вертикале:

$$\Delta p_6 = \lambda_{\text{верт}} * L_{\text{верт}} * W_{\text{верт}}^2 * \rho_{\text{пр}} * T_{\text{верт}} / (d_{\text{верт}} * 2 * g * T_0) * 9,81 = 0,0822 * 3,96 * 0,35^2 * 1,2986 * 1773 / (0,445 * 2 * 9,81 * 273) * 9,81 = 0,378 \text{ Па.}$$

**149.** Рассчитаем скорость продуктов сгорания в перевальном окне:

$$W_{\text{по}} = V_{\text{пгв}} / F_{\text{по}} = 0,07565 / 0,114 = 0,66 \text{ м/с.}$$

**150.** Рассчитаем потери напора при повороте на  $90^\circ$  в перевальное окно:

$$\Delta p_{\text{пов90по}} = \xi_{\text{пов90}} * W_{\text{по}}^2 * \rho_{\text{пр}} * T_{\text{по}} / (2 * g * T_0) * 9,81 = 1,5 * 0,66^2 * 1,2986 * 1673 / (2 * 9,81 * 273) * 9,81 = 2,6 \text{ Па.}$$

**151.** Рассчитаем потери напора при сужении в перевальном окне:

$$\Delta p_{\text{суж по}} = 0,5 * (1 - F_{\text{по}} / F_{\text{верт}}) * W_{\text{по}}^2 * \rho_{\text{пг}} * T_{\text{по}} / (2 * g * T_0) * 9,81 = 0,5 * (1 - 0,114 / 0,218) * 0,66^2 * 1,2986 * 1673 / (2 * 9,81 * 273) * 9,81 = 0,413 \text{ Па.}$$

### *Нисходящий поток*

**152.** Рассчитаем потери напора при расширении при выходе из перевального окна:

$$\Delta p_{\text{расш по}} = (1 - F_{\text{по}} / F_{\text{верт}}) * W_{\text{по}}^2 * \rho_{\text{пг}} * T_{\text{по}} / (2 * g * T_0) * 9,81 = (1 - 0,114 / 0,218) * 0,66^2 * 1,2986 * 1673 / (2 * 9,81 * 273) * 9,81 = 0,827 \text{ Па.}$$

**153.** Рассчитаем потери напора при повороте на  $90^0$  из перевального окна в вертикал:  $\Delta p_{\text{пов90по}} = 2,6 \text{ Па.}$

**154.** Суммарные потери в перевальном окне:

$$\Delta p_7 = 2 * \Delta p_{\text{пов90по}} + \Delta p_{\text{суж по}} + \Delta p_{\text{расш по}} = 2 * 2,6 + 0,413 + 0,827 = 6,44 \text{ Па.}$$

**155.** Рассчитаем вязкость продуктов сгорания при  $1350^0\text{C}$  по формуле Сазерленда:

$$\mu_{1350} = \mu_{\text{пг}} * (1 + C_{\text{пг}} / 273) / (1 + C_{\text{пг}} / T) * (T / 273)^{0,5} = 1,4904 * 10^{-5} * (1 + 183 / 273) / (1 + 183 / 1623) * (1623 / 273)^{0,5} = 5,45 * 10^{-5} \text{ Па*с.}$$

**156.** Рассчитаем плотность продуктов сгорания при  $1350^0\text{C}$ :

$$\rho_{1350} = \rho_{\text{пг}} * 273 / (t + 273) = 1,2986 * 273 / (1350 + 273) = 0,218 \text{ кг/м}^3.$$

**157.** Рассчитаем критерий Рейнольдса в вертикале для продуктов горения:

$$Re_{\text{верт}} = W_{\text{верт}} * d_{\text{верт}} * \rho_{1500} / \mu_{1500} = 0,35 * 0,445 * 0,218 / 5,45 * 10^{-5} = 623.$$

**158.** Рассчитаем коэффициент сопротивления трению в вертикале по формуле Доррхотова:

$$\lambda_{\text{верт}} = 0,175 / Re_{\text{верт}}^{0,12} = 0,175 / 623^{0,12} = 0,0809.$$

**159.** Рассчитаем потери на трение в вертикале:

$$\Delta p_8 = \lambda_{\text{верт}} * L_{\text{верт}} * W_{\text{верт}}^2 * \rho_{\text{пг}} * T_{\text{верт}} / (d_{\text{верт}} * 2 * g * T_0) * 9,81 = 0,0809 * 3,96 * 0,35^2 * 1,2986 * 1623 / (0,445 * 2 * 9,81 * 273) * 9,81 = 0,34 \text{ Па.}$$

**160.** Рассчитаем скорость воздуха на входе в длинный косой ход:

$$W_{\text{дкх вх}} = V_{\text{пгдкх}} / F_{\text{кх вых}} = 0,021015 / 0,0063 = 3,34 \text{ м/с.}$$

**161.** Рассчитаем потери напора при входе продуктов горения в длинный косой ход, с учётом того, что регистр и рассекатель закрывают половину сечения:

$$\Delta p_{\text{дкх вх}} = 0,5 * (1 - F_{\text{кх вых}} / F_{\text{верт}} * 0,5) * W_{\text{дкх вх}}^2 * \rho_{\text{пг}} * T_{\text{дкх}} / (2 * g * T_0) * 9,81 = 0,5 * (1 - 0,0063 / 0,218 * 0,5) * 3,34^2 * 1,2986 * 1593 / (2 * 9,81 * 273) * 9,81 = 20,828 \text{ Па.}$$

**162.** Рассчитаем коэффициент местного сопротивления при плавном расширении струи на уровне регистра и рассекателя:

$$\xi_{\text{расш рег}} = k_{\text{рег расш}} * (1 - F_{\text{кх вых}} / F_{\text{кх}}),$$

где  $k_{\text{рег расш}}$  – коэффициент для расширения струи на уровне регистра и рассекателя.

$$\xi_{\text{суж рег}} = k_{\text{рег}} * (1 - F_{\text{кх вых}} / F_{\text{кх}}) = 0,1747 * (1 - 0,0063 / 0,012) = 0,083.$$

**163.** Рассчитаем потери напора за счёт плавного расширения струи на уровне регистра и рассекателя:

$$\Delta p_{\text{расш рег}} = \xi_{\text{расш рег}} * W_{\text{дкх вх}}^2 * \rho_{\text{пг}} * T_{\text{дкх}} / (2 * g * T_0) * 9,81 = 0,083 * 3,34^2 * 1,2986 * 1593 / (2 * 9,81 * 273) * 9,81 = 3,508 \text{ Па.}$$

**164.** Рассчитаем вязкость продуктов сгорания при  $1320^0\text{C}$  по формуле Сазерленда:

$$\mu_{1320} = \mu_{\text{пг}} * (1 + C_{\text{пг}} / 273) / (1 + C_{\text{пг}} / T) * (T / 273)^{0,5} = 1,4904 * 10^{-5} * (1 + 183 / 273) / (1 + 183 / 1593) * (1593 / 273)^{0,5} = 5,39 * 10^{-5} \text{ Па*с.}$$

**165.** Рассчитаем плотность продуктов сгорания при  $1320^0\text{C}$ :

$$\rho_{1320} = \rho_{\text{пг}} * 273 / (t + 273) = 1,2986 * 273 / (1320 + 273) = 0,22 \text{ кг/м}^3$$

**166.** Рассчитаем скорость продуктов горения в длинном косом ходе:

$$W_{\text{дкх}} = V_{\text{пгдкх}} / F_{\text{кх}} = 0,021015 / 0,012 = 1,75 \text{ м/с.}$$

- 167.** Рассчитаем критерий Рейнольдса в длинном косом ходе для продуктов горения:  
 $Re_{дкх} = W_{дкх} * d_{кх} * \rho_{1320} / \mu_{1320} = 1,75 * 0,109 * 0,22 / 5,39 * 10^{-5} = 778,57$ .
- 168.** Рассчитаем коэффициент сопротивления трению в длинном косом ходе по формуле Доброхотова:  
 $\lambda_{дкх} = 0,175 / Re_{дкх}^{0,12} = 0,175 / 778,57^{0,12} = 0,0787$ .
- 169.** Рассчитаем потери на трение в длинном косом ходе:  
 $\Delta p_{дкх тр} = \lambda_{дкх} * L_{дкх} * W_{дкх}^2 * \rho_{пг} * T_{дкх} / (d_{кх} * 2 * g * T_0) * 9,81 = 0,0787 * 1,54 * 1,75^2 * 1,2986 * 1593 / (0,109 * 2 * 9,81 * 273) * 9,81 = 12,902$  Па.
- 170.** Рассчитаем потери напора на повороте  $45^0$  в длинном косом ходе:  
 $\Delta p_{пов45дкх} = \xi_{пов45} * W_{дкх}^2 * \rho_{пг} * T_{дкх} / (2 * g * T_0) * 9,81 = 0,32 * 1,75^2 * 1,2986 * 1593 / (2 * 9,81 * 273) * 9,81 = 3,713$  Па.
- 171.** Рассчитаем скорость продуктов горения при выходе из длинного косоугольного хода:  
 $W_{дкх} = V_{пгдкх} / F_{вых дкх} = 0,021015 / 0,025 = 0,84$  м/с.
- 172.** Рассчитаем местное сопротивление при расширении потока при выходе из длинного косоугольного хода в наднасадочное пространство:  
 $\xi_{расш дкх} = 1 - F_{вых дкх} / F'_{ннас}$ ,  
где  $F'_{ннас}$  – площадь сечения при входе в наднасадочное пространство.  
 $\xi_{расш дкх} = 1 - F_{вых дкх} / F'_{ннас} = 1 - 0,025 / 0,248 = 0,899$ .
- 173.** Рассчитаем потери напора при расширении потока при выходе в наднасадочное пространство:  
 $\Delta p_{расш дкх} = \xi_{расш дкх} * W_{дкх}^2 * \rho_{пг} * T_{дкх} / (2 * g * T_0) * 9,81 = 0,899 * 0,84^2 * 1,2986 * 1593 / (2 * 9,81 * 273) * 9,81 = 2,403$  Па.
- 174.** Рассчитаем потери напора на повороте  $45^0$  при выходе из длинного косоугольного хода в наднасадочное пространство:  
 $\Delta p_{пов45н} = \xi_{пов45} * W_{дкх}^2 * \rho_{пг} * T_{дкх} / (2 * g * T_0) * 9,81 = 0,32 * 0,84^2 * 1,2986 * 1593 / (2 * 9,81 * 273) * 9,81 = 0,855$  Па.
- 175.** Общая потеря напора в длинном косом ходе:  
 $\Delta p_9 = \Delta p_{дкх вх} + \Delta p_{расш рег} + \Delta p_{дкх тр} + \Delta p_{пов45дкх} + \Delta p_{расш дкх} + \Delta p_{пов45н} = 20,828 + 3,508 + 12,902 + 3,713 + 2,403 + 0,855 = 44,209$  Па.
- 176.** Рассчитаем вязкость продуктов горения при  $1300^0C$  по формуле Сазерленда:  
 $\mu_{1300} = \mu_{пг} * (1 + C_{пг}/273) / (1 + C_{пг}/T) * (T/273)^{0,5} = 1,4904 * 10^{-5} * (1 + 183/273) / (1 + 183/1573) * (1573/273)^{0,5} = 5,35 * 10^{-5}$  Па\*с.
- 177.** Рассчитаем плотность продуктов сгорания при  $1300^0C$ :  
 $\rho_{1300} = \rho_{пг} * 273 / (t + 273) = 1,2986 * 273 / (1300 + 273) = 0,225$  кг/м<sup>3</sup>.
- 178.** Рассчитаем скорость продуктов сгорания в наднасадочном пространстве:  
 $W_{ннас} = V_{пг} / F_{ннас} = 0,331 / 1,732 = 0,19$  м/с.
- 179.** Рассчитаем критерий Рейнольдса в наднасадочном пространстве для продуктов сгорания:  
 $Re_{ннас} = W_{ннас} * d_{ннас} * \rho_{1300} / \mu_{1300} = 0,19 * 0,501 * 0,225 / 5,35 * 10^{-5} = 400,33$ .
- 180.** Рассчитаем коэффициент сопротивления трению в наднасадочном пространстве регенератора по формуле Доброхотова:  
 $\lambda_{ннас} = 0,175 / Re_{ннас}^{0,12} = 0,175 / 400,33^{0,12} = 0,0853$ .
- 181.** Рассчитаем потери на трение в наднасадочном пространстве регенератора при движении продуктов сгорания:

$$\Delta p_{10\text{тр}} = \lambda_{\text{ннас}} * L_{\text{ннас}} * W_{\text{ннас}}^2 * \rho_{\text{пг}} * T_{\text{нн}} / (d_{\text{ннас}}^2 * g * T_0) * 9,81 = 0,0853 * 0,12 * 0,19^2 * 1,2986 * 1573 / (0,501^2 * 9,81 * 273) * 9,81 = 0,0028 \text{ Па.}$$

**182.** Рассчитаем коэффициент местного сопротивления при выходе из наднасадочного пространства в насадку регенератора:

$$\xi_{\text{ннас}} = 0,5 * (1 - F_{\text{нас}} / F_{\text{ннас}}) = 0,5 * (1 - 1,13 / 2,8) = 0,298.$$

**183.** Рассчитаем потери напора при выходе из из наднасадочного пространства в насадку регенератора:

$$\Delta p_{10\text{в}} = \xi_{\text{ннас}} * W_{\text{ннас}}^2 * \rho_{\text{пг}} * T_{\text{нн}} / (2 * g * T_0) * 9,81 = 0,298 * 0,19^2 * 1,2986 * 1573 / (2 * 9,81 * 273) * 9,81 = 0,0402 \text{ Па.}$$

**184.** Суммарные потери в наднасадочном пространстве регенератора:

$$\Delta p_{10} = \Delta p_{10\text{тр}} + \Delta p_{10\text{в}} = 0,0028 + 0,0402 = 0,043 \text{ Па.}$$

**185.** Рассчитаем скорость продуктов сгорания в насадке регенератора:

$$W_{\text{рег пг}} = V_{\text{пг}} / F_{\text{нас}} = 0,331 / 1,13 = 0,29 \text{ м/с.}$$

**186.** Рассчитаем среднюю температуру продуктов сгорания в регенераторе:

$$T_{\text{рег пг}}^{\text{ср}} = (350 + 1300) / 2 + 273 = 1098 \text{ К.}$$

**187.** Рассчитаем потери на трение в насадке регенератора:

$$\Delta p_{11} = k_{\text{рег}} * c_{\text{рег}} * L_{\text{рег}} * W_{\text{рег пг}}^2 * \rho_{\text{пг}} * T_{\text{рег пг}}^{\text{ср}} / (d_{\text{рег}}^{1,25} * V / 133,3) * 9,81,$$

где  $k_{\text{рег}}$  – коэффициент для перевода из британских мер ( $k_{\text{рег}} = 0,18$ );

$c_{\text{рег}}$  – коэффициент, зависящий от типа насадки (для фасонной  $c_{\text{рег}} = 0,34$ ; для прямоугольной  $c_{\text{рег}} = 0,22$ );

$L_{\text{рег}}$  – длина канала, м;

$d_{\text{рег}}$  – эквивалентный диаметр канала, м.

$$\Delta p_{11} = k_{\text{рег}} * c_{\text{рег}} * L_{\text{рег}} * W_{\text{рег пг}}^2 * \rho_{\text{пг}} * T_{\text{рег пг}}^{\text{ср}} / (d_{\text{рег}}^{1,25} * V / 133,3) * 9,81 = 0,18 * 0,34 * 2,145 * 0,29^2 * 1,2986 * 1098 / (0,03^{1,25} * 98500 / 133,3) * 9,81 = 16,738 \text{ Па.}$$

**188.** Рассчитаем скорость продуктов горения в отверстии колосниковой решётки:

$$W_{\text{кр пг}} = V_{\text{пг}} / F_{\text{кр}} / n_{\text{кр}},$$

где  $F_{\text{кр}}$  – минимальная площадь сечения колосникового отверстия, м<sup>2</sup>;

$n_{\text{кр}}$  – число колосниковых отверстий.

$$W_{\text{кр пг}} = V_{\text{пг}} / F_{\text{кр}} / n_{\text{кр}} = 0,331 / 0,00096 / 92 = 3,74 \text{ м/с.}$$

**189.** Рассчитаем местное сопротивление при сужении потока при входе в колосниковую решётку продуктов сгорания:

$$\xi_{\text{суж кр}} = 0,5 * (1 - F_{\text{кр}} * n_{\text{кр}} / F_{\text{нас}}) = 0,5 * (1 - 0,00096 * 92 / 1,13) = 0,461.$$

**190.** Рассчитаем потери при сужении потока при входе в колосниковую решётку:

$$\Delta p_{\text{суж кр}} = \xi_{\text{суж кр}} * W_{\text{кр пг}}^2 * \rho_{\text{пг}} * T_{\text{кр пг}} / (2 * g * T_0) * 9,81 = 0,461 * 3,74^2 * 1,2986 * 623 / (2 * 9,81 * 273) * 9,81 = 9,554 \text{ Па.}$$

**191.** Рассчитаем вязкость продуктов горения при 350 °С по формуле Сазерленда:

$$\mu_{350} = \mu_{\text{пг}} * (1 + C_{\text{пг}} / 273) / (1 + C_{\text{пг}} / T) * (T / 273)^{0,5} = 1,4904 * 10^{-5} * (1 + 183 / 273) / (1 + 183 / 623) * (623 / 273)^{0,5} = 2,91 * 10^{-5} \text{ Па*с.}$$

**192.** Рассчитаем плотность продуктов сгорания при 350 °С:

$$\rho_{350} = \rho_{\text{пг}} * 273 / (t + 273) = 1,2986 * 273 / (350 + 273) = 0,569 \text{ кг/м}^3.$$

**193.** Рассчитаем критерий Рейнольдса в отверстии колосниковой решётки для продуктов сгорания:

$$\text{Re}_{\text{кр пг}} = W_{\text{кр пг}} * d_{\text{кр}} * \rho_{350} / \mu_{350} = 3,74 * 0,035 * 0,569 / 2,91 * 10^{-5} = 2559,5.$$

**194.** Рассчитаем коэффициент сопротивления трению в отверстии колосниковой решётки продуктов горения по формуле Доброхотова:

$$\lambda_{кр\text{ пг}} = 0,175 / Re_{кр\text{ пг}}^{0,12} = 0,175 / 2559,5^{0,12} = 0,0682, \text{ тогда } \xi_{гр} = 0,047.$$

**195.** Рассчитаем местное сопротивление на расширение и трение в диффузоре:

$$\xi_{диф} = \xi_{расш} + \xi_{гр} = 0,199 + 0,047 = 0,246.$$

**196.** Рассчитаем потери в диффузоре колосниковой решётки:

$$\Delta p_{диф\text{ пг}} = \xi_{диф} * W_{кр\text{ пг}}^2 * \rho_{пг} * T_{кр\text{ пг}} / (2 * g * T_0) * 9,81 = 0,246 * 3,74^2 * 1,2986 * 623 / (2 * 9,81 * 273) * 9,81 = 5,099 \text{ Па}.$$

**197.** Рассчитаем местное сопротивление при расширении потока при выходе из колосниковой решётки в подовый канал:

$$\xi_{расш\text{ пк}} = 1 - F_{кр\text{ макс}} * n_{кр} / b_{пк} / L_{пк},$$

где  $b_{пк}$  – ширина подового канала, м.

$$\xi_{расш\text{ пк}} = 1 - F_{кр\text{ макс}} * n_{кр} / b_{пк} / L_{пк} = 1 - 0,00385 * 92 / 0,258 / 6,923 = 0,8017.$$

**198.** Рассчитаем скорость дымовых газов при выходе из отверстий колосниковой решётки:

$$W_{кр\text{ вых}} = V_{пг} / F_{кр\text{ вых}} / n_{кр} = 0,331 / 0,00385 / 92 = 0,93 \text{ м/с}$$

**199.** Рассчитаем потери при расширении потока при выходе в подовый канал:

$$\Delta p_{расш\text{ пк}} = \xi_{расш\text{ пк}} * W_{кр\text{ вых}}^2 * \rho_{пг} * T_{кр\text{ пг}} / (2 * g * T_0) * 9,81 = 0,8017 * 0,93^2 * 1,2986 * 623 / (2 * 9,81 * 273) * 9,81 = 1,027 \text{ Па}.$$

**200.** Рассчитаем потери на повороте  $90^\circ$  в подовый канал:

$$\Delta p_{пов90\text{ пг}} = \xi_{пов90} * W_{кр\text{ вых}}^2 * \rho_{пг} * T_{кр\text{ пг}} / (2 * g * T_0) * 9,81 = 1,5 * 0,93^2 * 1,2986 * 623 / (2 * 9,81 * 273) * 9,81 = 1,922 \text{ Па}.$$

**201.** Суммарные потери напора в колосниковом отверстии:

$$\Delta p_{12} = \Delta p_{суж\text{ кр}} + \Delta p_{диф\text{ пг}} + \Delta p_{расш\text{ пк}} + \Delta p_{пов90\text{ пг}} = 9,554 + 5,099 + 1,027 + 1,922 = 17,6 \text{ Па}.$$

**202.** Рассчитаем вязкость продуктов горения при  $300^\circ\text{C}$  по формуле Сазерленда:

$$\mu_{300} = \mu_{пг} * (1 + C_{пг} / 273) / (1 + C_{пг} / T) * (T / 273)^{0,5} = 1,4904 * 10^{-5} * (1 + 183 / 273) / (1 + 183 / 573) * (573 / 273)^{0,5} = 2,73 * 10^{-5} \text{ Па*с}.$$

**203.** Рассчитаем плотность продуктов сгорания при  $300^\circ\text{C}$ :

$$\rho_{300} = \rho_{пг} * 273 / (t + 273) = 1,2986 * 273 / (300 + 273) = 0,618 \text{ кг/м}^3.$$

**204.** Рассчитаем скорость продуктов сгорания в подовом канале:

$$W_{пк\text{ пг}} = V_{пг} / F_{пк} = 0,331 / 0,141 = 2,35 \text{ м/с}.$$

**205.** Рассчитаем критерий Рейнольдса в подовом канале для продуктов сгорания:

$$Re_{пк\text{ пг}} = W_{пк\text{ пг}} * d_{пк} * \rho_{300} / \mu_{300} = 2,35 * 0,351 * 0,618 / 2,73 * 10^{-5} = 18672.$$

**206.** Рассчитаем коэффициент сопротивления трению в подовом канале для продуктов горения по формуле Доброхотова:

$$\lambda_{пк\text{ пг}} = 0,175 / Re_{пк\text{ пг}}^{0,12} = 0,175 / 18672^{0,12} = 0,0538.$$

**207.** Рассчитаем потери напора в подовом канале при движении продуктов сгорания:

$$\Delta p_{13} = k_{пк} * \lambda_{пк\text{ пг}} * L_{пк} * W_{пк\text{ пг}}^2 * \rho_{пг} * T_{пк\text{ пг}} / (d_{пк} * 2 * g * T_0) * 9,81 = 1/3 * 0,0538 * 6,923 * 2,35^2 * 1,2986 * 573 / (0,351 * 2 * 9,81 * 273) * 9,81 = 2,662 \text{ Па}.$$

**208.** Сведём потери напора на участках отопительной системы печи в таблицу 8.

## Расчёт гидростатических подпоров

### *Восходящий поток*

**209.** Рассчитаем подпор в подовом канале (от оси до верха):

$$\Delta p_{01} = 0,5 * H_{пк} * (\rho_{в} * T_0 / (t_{в} + 273) - \rho_{в} * T_0 / T_{пк}) = 0,5 * 0,546 * (1,285 * 273 / 283 - 1,285 * 273 / 373) * 9,81 = 0,801 \text{ Па}.$$

**210.** Рассчитаем подпор в колосниковой решетке:

$$\Delta p_{02} = (L_{кр} + 0,04) * (\rho_B * T_0 / (t_B + 273) - \rho_B * T_0 / T_{пк}) = (0,102 + 0,04) * (1,285 * 273 / 283 - 1,285 * 273 / 373) * 9,81 = 0,417 \text{ Па.}$$

**211.** Рассчитаем подпор в насадке регенератора:

$$\Delta p_{03} = L_{нр} * (\rho_B * T_0 / (t_B + 273) - \rho_B * T_0 / T_{рег}^{cp}) = 2,145 * (1,285 * 273 / 283 - 1,285 * 273 / 923) * 9,81 = 18,086 \text{ Па.}$$

**212.** Рассчитаем подпор в наднасадочном пространстве регенератора (до «глазка»):

$$\Delta p_{04} = (L_{ннас} + 0,037) * (\rho_B * T_0 / (t_B + 273) - \rho_B * T_0 / T_{ннас}) = (0,12 + 0,037) * (1,285 * 273 / 283 - 1,285 * 273 / 1473) * 9,81 = 1,542 \text{ Па.}$$

**213.** Рассчитаем подпор в коротком косом ходе:

$$\Delta p_{05} = L_{кх} * (\rho_B * T_0 / (t_B + 273) - \rho_B * T_0 / T_{кх}) = 1,2 * (1,285 * 273 / 283 - 1,285 * 273 / 1503) * 9,81 = 11,845 \text{ Па.}$$

**214.** Рассчитаем подпор в вертикале:

$$\Delta p_{06} = L_{верт} * (\rho_B * T_0 / (t_B + 273) - \rho_{пг} * T_0 / T_{верт}) = 3,96 * (1,285 * 273 / 283 - 1,2986 * 273 / 1773) * 9,81 = 40,388 \text{ Па.}$$

**215.** Рассчитаем подпор в шахточке вертикала:

$$\Delta p_{07} = (L_{шах} + 0,142) * (\rho_B * T_0 / (t_B + 273) - \rho_{пг} * T_0 / T_{шах}) = (1,936 + 0,142) * (1,285 * 273 / 283 - 1,2986 * 273 / 1273) * 9,81 = 19,592 \text{ Па.}$$

### *Нисходящий поток*

**216.** Рассчитаем подпор в вертикале:

$$\Delta p_{08} = L_{верт} * (\rho_B * T_0 / (t_B + 273) - \rho_{пг} * T_0 / T_{нверт}) = 3,96 * (1,285 * 273 / 283 - 1,2986 * 273 / 1623) * 9,81 = 39,67 \text{ Па.}$$

**217.** Рассчитаем подпор в длинном косом ходе:

$$\Delta p_{09} = L_{дкх} * (\rho_B * T_0 / (t_B + 273) - \rho_{пг} * T_0 / T_{дкх}) = 1,54 * (1,285 * 273 / 283 - 1,2986 * 273 / 1593) * 9,81 = 15,365 \text{ Па.}$$

**218.** Рассчитаем подпор в наднасадочном пространстве регенератора:

$$\Delta p_{010} = (L_{ннас} + 0,037) * (\rho_B * T_0 / (t_B + 273) - \rho_{пг} * T_0 / T_{нн}) = (0,12 + 0,037) * (1,285 * 273 / 283 - 1,2986 * 273 / 1573) * 9,81 = 1,562 \text{ Па.}$$

**219.** Рассчитаем подпор в насадке регенератора:

$$\Delta p_{011} = L_{нр} * (\rho_B * T_0 / (t_B + 273) - \rho_{пг} * T_0 / T_{рег}^{cp}) = 2,145 * (1,285 * 273 / 283 - 1,2986 * 273 / 1098) * 9,81 = 19,29 \text{ Па.}$$

**220.** Рассчитаем подпор в колосниковой решётке:

$$\Delta p_{012} = (L_{кр} + 0,04) * (\rho_B * T_0 / (t_B + 273) - \rho_{пг} * T_0 / T_{кр пг}) = (0,102 + 0,04) * (1,285 * 273 / 283 - 1,2986 * 273 / 623) * 9,81 = 0,934 \text{ Па.}$$

**221.** Рассчитаем подпор в подовом канале (до оси):

$$\Delta p_{013} = 0,5 * H_{пк} * (\rho_B * T_0 / (t_B + 273) - \rho_{пг} * T_0 / T_{пк пг}) = 0,5 * 0,546 * (1,285 * 273 / 283 - 1,2986 * 273 / 573) * 9,81 = 1,66 \text{ Па.}$$

**222.** Полученные значения подпоров занесём в таблицу 8.

**223.** Для построения гидравлической кривой определим давления в характерных точках отопительной системы, которыми являются (см. рисунок 1):

- на восходящем потоке: подовый канал регенератора – 1; «глазок» регенератора – 2»; под вертикала – 3; верх вертикала – 4; верх печей (под крышкой шахточки) – 5;
- на нисходящем потоке: верх вертикала – 6; под вертикала – 7; «глазок» регенератора – 8; подовый канал – 9.

Таблица 8 – Сопротивления и гидростатические подпоры отопительной системы печи в Паскалях

| Участки отопительной системы | Восходящий поток |        | Нисходящий поток |        |
|------------------------------|------------------|--------|------------------|--------|
|                              | сопротивление    | подпор | сопротивление    | подпор |
| Подовый канал регенератора   | 0,789            | 0,801  | 2,662            | 1,66   |
| Колосниковая решётка         | 13,321           | 0,417  | 17,60            | 0,934  |
| Насадка регенератора         | 6,822            | 18,086 | 16,738           | 19,29  |
| Наднасадочное пространство   | 0,0086           | 1,542  | 0,043            | 1,562  |
| Косой ход                    | 29,389           | 11,845 | 44,209           | 15,365 |
| Вертикал (до оси перевала)   | 0,378            | 40,388 | 0,34             | 39,67  |
| Перевальное окно             | ---              |        | 6,44             |        |
| Шахточка вертикала           | ---              | 19,592 | ---              | 19,592 |
| Итого                        | 50,71            | 92,671 | 88,03            | 98,07  |

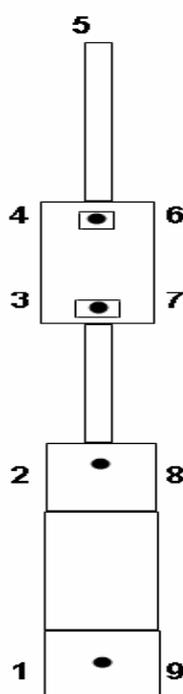


Рисунок 1 – Характерные точки отопительной системы:

- на восходящем потоке: 1 - подовый канал регенератора; 2 - «глазок» регенератора; 3 - под вертикала; 4 - верх вертикала; 5 - верх печей (под крышкой шахточки);  
 - на нисходящем потоке: 6 - верх вертикала; 7 - под вертикала; 8 - «глазок» регенератора; 9 - подовый канал.

### ***Восходящий поток***

**224.** При общем сопротивлении отопительной системы на восходящем потоке равном 50,71 Па и гидростатическом подпоре 92,812 Па для обеспечения под крышкой шахточки абсолютного давления, равного атмосферному ( $p_5 = 0$ ), в подовом канале регенератора на восходящем потоке должно быть следующее давление:

$$p_5 = p_1 + 92,671 - 50,71. \text{ Тогда } p_1 = - 41,961 \text{ Па.}$$

**225.** В «глазке» регенератора на восходящем потоке давление:

$$p_2 = p_1 + \Delta p_{01} + \Delta p_{02} + \Delta p_{03} + \Delta p_{04} - \Delta p_1 - \Delta p_2 - \Delta p_3 - \Delta p_4 = - 41,961 + 0,801 + 0,417 + 18,086 + 1,542 - 0,789 - 13,321 - 6,822 - 0,0086 = - 42,056 \text{ Па.}$$

**226.** На поду вертикала давление:

$$p_3 = p_2 + \Delta p_{05} - \Delta p_5 = - 42,056 + 11,845 - 29,389 = - 59,6 \text{ Па.}$$

**227.** На верху вертикала давление:

$$p_4 = p_3 + \Delta p_{06} - \Delta p_6 = - 59,6 + 40,388 - 0,378 = - 19,59 \text{ Па.}$$

**228.** Проверим давление под крышкой шахточки вертикала:

$$p_5 = p_4 + \Delta p_{07} = - 19,59 + 19,592 = 0,002 \text{ Па.}$$

Погрешность удовлетворительная.

### ***Нисходящий поток***

**229.** На верху вертикала давление:

$$p_6 = p_4 - \Delta p_7 = - 19,59 - 6,44 = - 26,03 \text{ Па.}$$

**230.** На поду вертикала давление:

$$p_7 = p_6 - \Delta p_8 - \Delta p_{08} = - 26,03 - 0,34 - 39,67 = - 66,04 \text{ Па.}$$

**231.** В «глазке» регенератора на восходящем потоке давление:

$$p_8 = p_7 - \Delta p_9 - \Delta p_{09} = - 66,04 - 44,209 - 15,365 = - 125,614 \text{ Па.}$$

**232.** В подовом канале регенератора давление:

$$p_9 = p_8 - \Delta p_{010} - \Delta p_{011} - \Delta p_{012} - \Delta p_{013} - \Delta p_{10} - \Delta p_{11} - \Delta p_{12} - \Delta p_{13} = - 125,614 - 1,562 - 19,29 - 0,934 - 1,66 - 0,043 - 16,738 - 17,60 - 2,662 = - 186,103 \text{ Па.}$$

**233.** На основании полученных данных строим гидравлическую кривую отопительной системы коксовых печей, отапливаемых смесью коксового и доменного газа (рисунок 2).

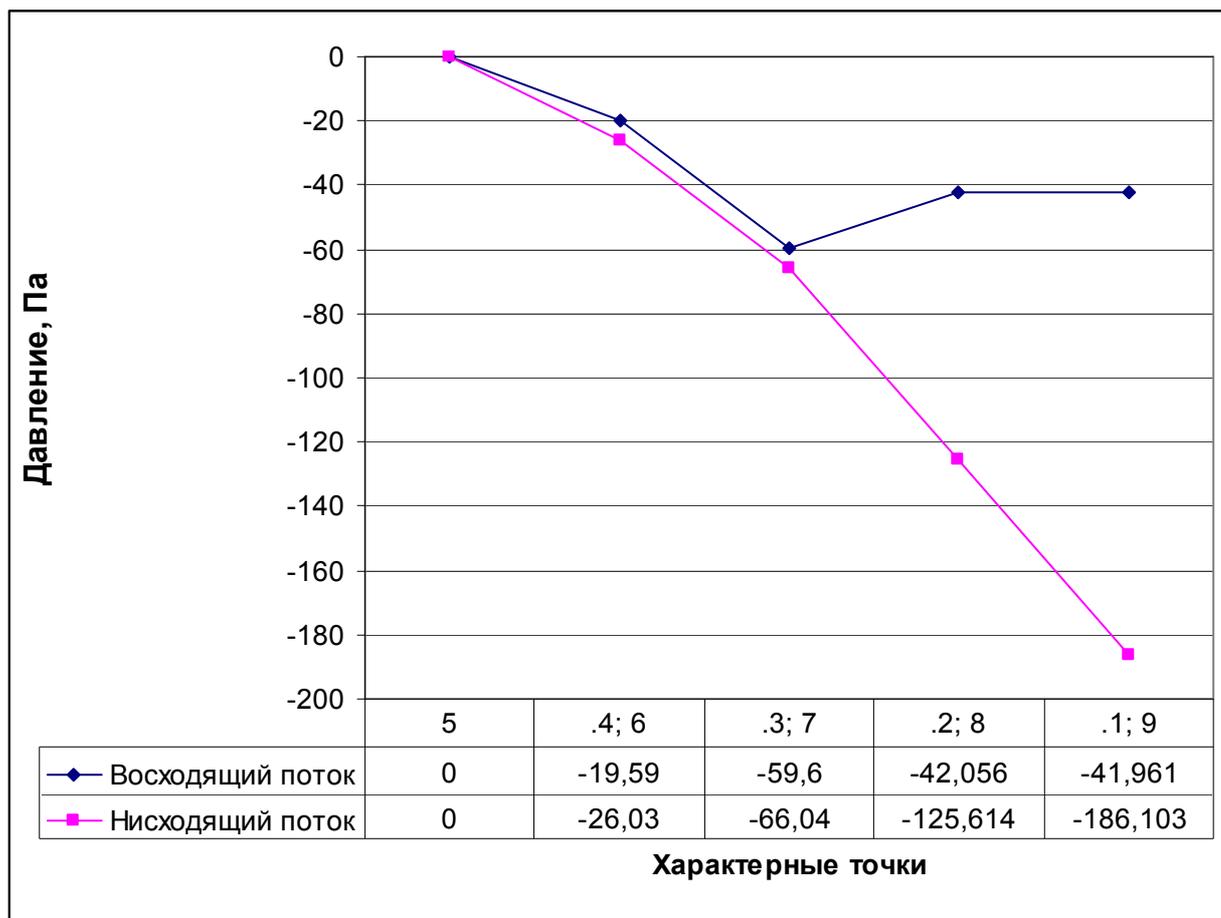


Рисунок 2 – Гидравлическая кривая отопительной системы коксовых печей ПВР  $V = 30,9 \text{ м}^3$ , отапливаемых смесью коксового и доменного газов.

Таблица 9 - Теплоты сгорания чистых компонентов топлива

| Горючий компонент              | Низшая теплота сгорания $Q^p_n$ , ккал/м <sup>3</sup> |
|--------------------------------|---|
| CO                             | 3016  |
| H <sub>2</sub>                 | 2577  |
| CH <sub>4</sub>                | 8558  |
| C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>  | 14105   |
| C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>  | 15235   |
| C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>  | 21802   |
| C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | 28345   |
| C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> | 34900   |
| H <sub>2</sub> S               | 5534  |

Приложение 2

Таблица 10 - Энтальпия 1 м<sup>3</sup> воздуха и газов (кДж/м<sup>3</sup>) при различных температурах и постоянном давлении 101325 Па [2], с.347 – 348.

| t, °C | воздух  | CO <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> O | N <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | CO      | H <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> S | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> |
|-------|---------|-----------------|------------------|----------------|----------------|---------|----------------|------------------|-----------------|-------------------------------|
| 100   | 130,51  | 172,00          | 150,18           | 130,13         | 131,93         | 130,21  | 128,96         | 154,08           | 165,39          | 210,61                        |
| 200   | 261,94  | 361,67          | 303,47           | 260,60         | 267,38         | 262,10  | 259,59         | 314,86           | 353,38          | 465,59                        |
| 300   | 395,42  | 564,24          | 461,36           | 392,41         | 407,48         | 395,67  | 390,65         | 482,34           | 567,75          | 758,68                        |
| 400   | 532,08  | 777,44          | 523,69           | 526,89         | 551,85         | 632,58  | 520,86         | 658,19           | 808,93          | 1088,62                       |
| 500   | 672,01  | 1001,78         | 791,55           | 664,58         | 700,17         | 672,01  | 653,17         | 841,59           | 984,78          | 1446,61                       |
| 600   | 814,96  | 1236,76         | 964,68           | 805,06         | 851,64         | 816,46  | 786,41         | 1032,51          | 1071,84         | 1828,88                       |
| 700   | 960,75  | 1475,41         | 1143,64          | 940,36         | 1005,24        | 961,33  | 920,30         | 1230,98          | 1667,68         | 2233,35                       |
| 800   | 1109,05 | 1718,95         | 1328,11          | 1094,65        | 1162,32        | 1112,06 | 1055,12        | 1436,98          | 1996,36         | 2672,98                       |
| 900   | 1259,36 | 1972,43         | 1517,87          | 1243,55        | 1319,67        | 1262,38 | 1190,78        | 1646,75          | 2336,35         | 3105,08                       |
| 1000  | 1411,86 | 2226,75         | 1713,32          | 1393,86        | 1480,11        | 1415,20 | 1327,28        | 1863,21          | 2696,43         | 3567,32                       |
| 1100  | 1565,94 | 2485,34         | 1913,67          | 1546,14        | 1641,02        | 1570,54 | 1469,22        | 2081,77          | 3062,79         |                               |
| 1200  | 1721,36 | 2746,44         | 2118,78          | 1699,76        | 1802,76        | 1728,39 | 1612,83        | 2306,20          | 3446,74         |                               |
| 1300  | 1879,27 | 3010,58         | 2328,01          | 1857,74        | 1966,05        | 1883,31 | 1758,12        | 2531,04          |                 |                               |
| 1400  | 2036,87 | 3276,75         | 2540,25          | 2012,36        | 2129,93        | 2045,76 | 1905,08        | 2760,91          |                 |                               |
| 1500  | 2196,19 | 3545,34         | 2758,39          | 2170,55        | 2296,78        | 2200,26 | 2011,85        | 2995,80          |                 |                               |
| 1600  | 2356,68 | 3815,86         | 2979,13          | 2328,65        | 2463,97        | 2364,82 | 2204,04        |                  |                 |                               |
| 1700  | 2517,60 | 4087,10         | 3203,05          | 2486,28        | 2632,09        | 2526,85 | 2356,02        |                  |                 |                               |
| 1800  | 2680,01 | 4360,67         | 3429,90          | 2646,74        | 2800,48        | 2690,56 | 2509,69        |                  |                 |                               |
| 1900  | 2841,43 | 4634,76         | 3657,85          | 2808,22        | 2971,30        | 2848,00 | 2657,07        |                  |                 |                               |
| 2000  | 3006,26 | 4910,51         | 3889,72          | 2970,25        | 3142,76        | 3014,64 | 2813,66        |                  |                 |                               |
| 2100  | 3169,77 | 5186,81         | 4121,79          | 3131,96        | 3314,85        | 3174,16 | 2971,93        |                  |                 |                               |
| 2200  | 3338,21 | 5464,20         | 4358,83          | 3295,84        | 3487,44        | 3343,73 | 3131,88        |                  |                 |                               |
| 2300  | 3500,54 | 5746,39         | 4485,34          | 3457,20        | 3662,33        | 3505,36 | 3293,49        |                  |                 |                               |
| 2400  | 3665,80 | 6023,25         | 4724,37          | 3620,58        | 3837,64        | 3666,82 | 3456,79        |                  |                 |                               |
| 2500  | 3835,29 | 6303,53         | 5076,74          | 3786,09        | 4014,29        | 3840,58 | 3620,76        |                  |                 |                               |

**Приложение 3**

Таблица 11 - Физические свойства дымовых газов CO<sub>2</sub> – 13 %; H<sub>2</sub>O – 11 %, N<sub>2</sub> – 76 %. В = 101325 Па [2], с.349.

| <b>t, °С</b> | <b>ρ, кг/м<sup>3</sup></b> | <b>c<sub>p</sub>,<br/>кДж/кг*К</b> | <b>λ*10<sup>2</sup>,<br/>Вт/м*К</b> | <b>a*10<sup>6</sup>,<br/>м<sup>2</sup>/с</b> | <b>v *10<sup>6</sup>,<br/>м<sup>2</sup>/с</b> | <b>μ *10<sup>6</sup>,<br/>Па*с</b> |
|--------------|----------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|--|---|------------------------------------|
| 0            | 1,295                      | 1,042                              | 2,28                                | 16,9   | 12,20   | 15,8                               |
| 100          | 0,950                      | 1,068                              | 3,13                                | 30,8   | 21,54   | 20,4                               |
| 200          | 0,748                      | 1,097                              | 4,01                                | 48,9   | 32,80   | 24,5                               |
| 300          | 0,617                      | 1,122                              | 4,84                                | 69,9   | 45,81   | 28,2                               |
| 400          | 0,525                      | 1,151                              | 5,70                                | 94,3   | 60,38   | 31,7                               |
| 500          | 0,457                      | 1,185                              | 6,56                                | 121,1  | 76,30   | 34,8                               |
| 600          | 0,405                      | 1,214                              | 7,42                                | 150,9  | 93,51   | 37,9                               |
| 700          | 0,363                      | 1,239                              | 8,27                                | 183,8  | 112,1   | 40,7                               |
| 800          | 0,330                      | 1,264                              | 9,15                                | 219,7  | 131,8   | 43,4                               |
| 900          | 0,301                      | 1,290                              | 10,00                               | 258,0  | 152,5   | 45,9                               |
| 1000         | 0,275                      | 1,306                              | 10,90                               | 303,4  | 174,3   | 48,4                               |
| 1100         | 0,257                      | 1,323                              | 11,75                               | 345,5  | 197,1   | 50,7                               |
| 1200         | 0,240                      | 1,340                              | 12,62                               | 392,4  | 221,0   | 53,0                               |

Таблица 12 - Физические свойства некоторых газов и газовых смесей [4], с.171

| Наименование                  | Плотность, кг/м <sup>3</sup> | Динамическая вязкость, 10 <sup>5</sup> Па*с | Постоянная Сазерленда С |
|-------------------------------|------------------------------|---|-------------------------|
| CO <sub>2</sub>               | 1,977                        | 1,384                                       | 254                     |
| H <sub>2</sub> S              | 1,539                        | 1,166                                       | 331                     |
| C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | 1,261                        | 0,945                                       | 225                     |
| O <sub>2</sub>                | 1,429                        | 1,943                                       | 110                     |
| CO                            | 1,25                         | 1,656                                       | 100                     |
| CH <sub>4</sub>               | 0,717                        | 1,036                                       | 164                     |
| H <sub>2</sub>                | 0,09                         | 0,836                                       | 71                      |
| N <sub>2</sub>                | 1,25                         | 1,667                                       | 102                     |
| Водяной пар                   | 0,8035                       | 0,818                                       | 961                     |
| Воздух                        | 1,285                        | 1,721                                       | 122                     |
| Коксовый газ                  | 0,43                         | 1,03  | 129                     |
| Доменный газ                  | 1,257                        | 1,9   | 135                     |
| П.г. коксового газа           | 1,215                        | 1,49  | 237                     |
| П.г. доменного газа           | 1,38 – 1,39                  | 1,6   | 167                     |

**Список литературы:**

1. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов. Л.: Химия, 1987, 576 с.
2. Мастрюков Б.С. Теплотехнические расчеты промышленных печей. Издательство. М.: Металлургия, 1972, 360 с .
3. Чистяков А.Н. Технология коксохимического производства в задачах и вопросах. М.: Металлургия, 1983, 296 с.
4. Жидко А.С. Тепловой и гидравлический расчет коксовых печей. Учебное пособие. Харьков: Харьковская типография, 1974, 121 с.
5. Вирозуб И.В., Лейбович Р.Е. Расчёты коксовых печей и процессов коксования. Киев: Вища школа, 1970, 266 с.