



Челябинский металлургический комбинат

_____ № _____

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Алгоритм расчета доменного, коксового и природного газов

СОГЛАСОВАНО:

Начальник УВСИТЦУ

_____ К.С.Теличко

«___» _____ 2017 г.

СОГЛАСОВАНО:

Начальник ГЦ

_____ С.А.Салдаев

«___» _____ 2017 г.

ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЯ

к Математическому обеспечению алгоритма расчета доменного, коксового и природного газов №125-10 от 19.04.2017 г.

СОГЛАСОВАНО:

УВСИТЦУ:

Начальник отдела автоматизации

И.Н.Резепин

Начальник бюро программирования

А.А.Загиров

Начальник бюро ДПиУЭ

А.В.Суковичин

ГЦ:

Заместитель начальника цеха

Д.В.Первухин

РАЗРАБОТАЛ:

Математик

Н.А.Иванов

Оглавление

| | | |
|--------|--|----|
| 1 | Введение | 6 |
| 2 | Алгоритм расчета расхода среды | 6 |
| 2.1 | Исходные данные | 6 |
| 2.2 | Порядок расчета расхода среды | 6 |
| 2.2.1 | Расчет характеристик расходомерного узла | 6 |
| 2.2.2 | Расчет коэффициента поправки на закругление входной кромки СУ K_n | 8 |
| 2.2.3 | Расчет коэффициента скорости входа E | 9 |
| 2.2.4 | Расчет абсолютного давления среды P | 9 |
| 2.2.5 | Расчет абсолютной температуры среды T | 10 |
| 2.2.6 | Расчет молярной доли компонентов x_i | 10 |
| 2.2.7 | Расчет вязкости μ | 11 |
| 2.2.8 | Расчет псевдо-критической температуры ДГ и КГ $T_{пк}$ | 12 |
| 2.2.9 | Расчет псевдо-критического давления ДГ и КГ $P_{пк}$ | 12 |
| 2.2.10 | Расчет фактора сжимаемости в рабочих условиях Z | 13 |
| 2.2.11 | Расчет фактора сжимаемости при стандартных условиях Z_c | 15 |
| 2.2.12 | Расчет коэффициента сжимаемости K | 15 |
| 2.2.13 | Расчет плотности при стандартных условиях ρ_c | 15 |
| 2.2.14 | Расчет плотности в рабочих условиях ρ | 16 |
| 2.2.15 | Расчет показателя адиабаты k | 17 |
| 2.2.16 | Расчет коэффициента расширения ε | 17 |
| 2.2.17 | Расчет перепада давления на СУ ΔP | 17 |
| 2.2.18 | Расчет коэффициента истечения C | 18 |
| 2.2.19 | Расчет коэффициента истечения C' | 18 |
| 2.2.20 | Расчет коэффициента шероховатости $K_{ш}$ | 18 |
| 2.2.21 | Расчет коэффициента шероховатости $K'_{ш}$ | 21 |
| 2.2.22 | Расчет критерия Рейнольдса Re | 21 |
| 2.2.23 | Расчет объёмного расхода среды приведённого к стандартным условиям Q_c | 22 |
| 3 | Граничные условия применения расчётных методик | 22 |
| 3.1 | Для диафрагм с угловым и трёх радиусным способом отбора давления | 22 |
| 3.2 | Для диафрагм с фланцевым способом отбора давления | 22 |
| 3.3 | Для расчета физических свойств ПГ | 22 |
| 4 | Константы | 23 |
| 5 | Список используемой литературы | 24 |

Аннотация

В математическом обеспечении приводятся алгоритмы расчета объёмных расходов доменного, коксового и природного газов, а также связанных с ними величин.

Обозначения:

С – при стандартных условиях

К – критический параметр

Пк – псевдо-критический параметр

Пр – приведённый параметр

ПГ – природный газ

ДГ- доменный газ

КГ – коксовый газ

СУ – сужающее устройство

ИТ – измерительный трубопровод

1 Введение

Приведённые ниже алгоритмы по доменному и коксовому газам позволяют с большей точностью проводить вычисления объёмного расхода приведённого к стандартным условиям, в сравнении с алгоритмами, приведёнными в РД-50-213-80, которые использовались ранее. Алгоритм по расчету теплофизических свойств природного газа приведён из ГОСТ 30319.2-2015 который вступает в силу с 2017-01-01.

2 Алгоритм расчета расхода среды

2.1 Исходные данные

Входные данные, приходящие с датчиков:

- давление среды избыточное $P_{\text{дат}}$,
- барометрическое давление $P_{\text{бар}}$,
- температура t (в градусах С),
- перепад давления в СУ ΔP .

Входные данные, вводимые с клавиатуры:

- объёмная доля каждого компонента ДГ (кроме азота N_2 , для него объем рассчитывается как: $100 - \text{сумма остальных}$) $r_i(\%)$,
- объёмная доля каждого компонента КГ (кроме азота N_2 и кислорода O_2 для них объем рассчитывается как: $(100 - \text{сумма остальных})/2$) $r_j(\%)$,
- диаметр ИТ при 20 град. С D_{20} ,
- материал ИТ (марка стали),
- шероховатость ИТ Ra (мм),
- диаметр СУ при 20 град. С d_{20} ,
- материал СУ (марка стали),
- начальный радиус закругления входной кромки r_H (мм),
- время эксплуатации расходомерного узла τ_T (лет),
- метод отбора перепада давления на СУ (угловой, трех радиусный или фланцевый),
- тип газа (ДГ, КГ, ПГ).

Необходимо выполнить проверку исходных данных (см. 3.1,3.2,3.3).

Выходные данные:

- объёмный расход приведённый к стандартным условиям Q_c ($\text{м}^3/\text{ч}$).

2.2 Порядок расчета расхода среды

2.2.1 Расчет характеристик расходомерного узла

Исходные данные для расчета:

- температура t ,
- диаметр ИТ при 20 град. С D_{20} ,
- материал ИТ (марка стали),
- диаметр СУ при 20 град. С d_{20} ,
- материал СУ (марка стали).

Порядок расчета:

- рассчитываем действительный диаметр ИТ D ,

- рассчитываем действительный диаметр СУ d (при расчетах использовать t в градусах Цельсия !),
- рассчитываем действительный относительный диаметр СУ β .

Диаметры ИТ D (мм), СУ d (мм) при рабочей температуре определяются по формуле [1]:

$$d = d_{20} K_{cy}$$

$$D = D_{20} K_T$$

$$K_{cy} = 1 + \alpha_t t - 20$$

$$K_T = 1 + \alpha_t (t - 20)$$

$$\alpha_t = 10^{-6} * (a_0 + a_1 * \frac{t}{1000} + a_2 * (\frac{t}{1000})^2)$$

Где α_t - температурный коэффициент расширения материала измерительного трубопровода (1/град),

a_0 , a_1 , a_2 – коэффициенты из таблицы №1 для материала ИТ и СУ соответственно.

Таблица №1 Значения коэффициентов a_0 , a_1 , a_2 [1]

| Марка стали | Значения постоянных коэффициентов | | |
|-----------------|-----------------------------------|-------|-------|
| | a_0 | a_1 | a_2 |
| 8 | 10,9 | 7,7 | 2,4 |
| 10 | 10,8 | 9 | 4,2 |
| 15 | 11,1 | 7,9 | 3,9 |
| 15M | 10,7 | 13 | 13 |
| 16M | 11,1 | 8,4 | 3,7 |
| 20 | 11,1 | 7,7 | 3,4 |
| 20M | 10,7 | 13 | 13 |
| 25 | 12,2 | 0 | 0 |
| 30 | 10,2 | 10,4 | 5,6 |
| 35 | 10,2 | 10,4 | 5,6 |
| X6CM | 10,1 | 2,7 | 0 |
| X7CM | 10,1 | 2,7 | 0 |
| 12MX | 11,3 | 3,8 | 0 |
| 12X1MФ | 10 | 9,6 | 6 |
| 12X17 | 9,4 | 7,4 | 6 |
| 12X18H9T | 15,6 | 8,3 | 6,5 |

| Марка стали | Значения постоянных коэффициентов | | |
|-------------------|-----------------------------------|-------|-------|
| | a_0 | a_1 | a_2 |
| 12X18H10T | 15,6 | 8,3 | 6,5 |
| 14X17H2 | 9,4 | 7,5 | 7,8 |
| 15XMA | 11,1 | 8,5 | 5,2 |
| 15X1M1Ф | 10,4 | 8,1 | 4,4 |
| 15X5M | 10,1 | 2,7 | 0 |
| 15X12ЕНМФ | 9,8 | 3 | 0 |
| 15X18H9 | 15,7 | 5,7 | 0 |
| 20X23H13 | 15,5 | 1,7 | 0 |
| 36X18H25C2 | 12 | 10 | 5,4 |

Относительный диаметр отверстия СУ.

Относительный диаметр отверстия СУ β при рабочей температуре определяется по формуле:

$$\beta = d / D$$

Необходимо выполнить проверку исходных данных (см. 3.1, 3.2).

2.2.2 Расчет коэффициента поправки на закругление входной кромки СУ K_n

Исходные данные для расчета:

- начальный радиус закругления входной кромки r_n (для расчета переводим в метры),
- диаметр СУ при рабочей температуре d (для расчета переводим в метры),
- время эксплуатации расходомерного узла τ_T (лет).

Порядок расчета:

- рассчитываем радиус закругления входной кромки диафрагмы r_k ,
- рассчитываем коэффициент поправки на входную кромку K_n .

Коэффициента поправки на закругление входной кромки определяется по формуле [2]:

$$K_n = 0,9826 + \left(\frac{r_k}{d} + 0,0007773 \right)^{0,6}, \text{ если } r_k > 4 * 10^{-4}d$$

$$r_k = a - a - r_n e^{-\tau_t}^3, \text{ где } a=0,000195.$$

Иначе: $K_n = 1$

2.2.3 Расчет коэффициента скорости входа E

Исходные данные для расчета:

- действительный относительный диаметр СУ β .

Коэффициент скорости входа определяется по формуле [1]:

$$E = \frac{1}{\sqrt{(1 - \beta^4)}}$$

2.2.4 Расчет абсолютного давления среды P

Исходные данные для ДГ и КГ:

- давление среды избыточное $P_{\text{дат}}$, барометрическое $P_{\text{бар}}$.

Расчет [9]:

Давление в трубопроводе измеряется датчиками избыточного или абсолютного давления в различных единицах измерения.

В расчетах по ДГ и КГ используют абсолютное давление в паскалях (Па)!!!.

В связи с этим производят ряд вычислений для выполнения этих требований. Измерение датчиком избыточного давления:

$$P_{\text{изб}} = P_{\text{дат}} \cdot k$$

$$P = P_{\text{изб}} + P_{\text{бар}} \cdot k$$

где P - абсолютное давление,
 $P_{\text{изб}}$ - избыточное давление,
 $P_{\text{дат}}$ - показания датчика,
 $P_{\text{бар}}$ - показания датчика атмосферного давления,
 $k = 1000000$, если датчик $P_{\text{дат}}$ проградуирован в МПа,
 $k = 98066,5$ если датчик проградуирован в кгс/см²,
 $k = 9,80665$ если датчик проградуирован в кгс/м²,
 $k = 1$ если датчик проградуирован в Па,
 $k = 100000$ если датчик проградуирован в бар,
 $k = 101048$ если датчик проградуирован в атмосферах.

Измерение датчиком абсолютного давления.

$$P = P_{\text{дат}} \cdot k$$

Таким же образом осуществляется перевод перепада давления в Па.

Исходные данные для ПГ:

- давление среды избыточное $P_{\text{дат}}$, барометрическое $P_{\text{бар}}$.

Расчет:

В расчетах по ПГ используют абсолютное давление в мегапаскалях(МПа)!!!.

В связи с этим производят ряд вычислений для выполнения этих требований.

$$p_{изб} = p_{\partial am} \cdot k$$

$$p = p_{изб} + p_{бар} \cdot k$$

где $k = 1$, если датчик $p_{\partial am}$ проградуирован в МПа,
 $k = 9,80665 \cdot 10^{-2}$, если датчик проградуирован в кгс/см²,
 $k = 1,33322 \cdot 10^{-4}$ если датчик проградуирован в мм ртутного столба,
 $k = 9,80665 \cdot 10^{-6}$ если датчик проградуирован в мм водяного столба,
 $k = 1 \cdot 10^{-6}$ если датчик проградуирован в Па,
 $k = 1 \cdot 10^{-1}$ если датчик проградуирован в бар,
 $k = 1,01048 \cdot 10^{-1}$ если датчик проградуирован в атмосферах.

Измерение датчиком абсолютного давления.

$$p = p_{\partial am} \cdot k$$

Необходимо выполнить проверку исходных данных (см. 3.3).

2.2.5 Расчет абсолютной температуры среды T

Исходные данные для расчета:

- температура t (градусов С).

Абсолютная температура T , градусов Кельвина, рассчитывается по формуле:

$$T = t + 273,15 \quad \{1\} \quad [3]$$

Необходимо выполнить проверку исходных данных (см. 3.3).

Расчет приведенной температуры $T_{пр}$ для ДГ, КГ. [6].

Исходные данные для расчета:

- критическая температура каждого компонента газовой смеси $T_{ki}(K)$ (см. таблицу №4.1),
- температура среды абсолютная $T(K)$ (см. {1}),
- тип газовой смеси (ДГ, КГ) (см. 2.1).

Приведённая температура каждого компонента газовой смеси рассчитывается по формуле:

$$T_{при} = \frac{T}{T_{ki}}$$

2.2.6 Расчет молярной доли компонентов x_i

Исходные данные для расчета:

- объёмная доля i -ого компонента r_i (%) (см. таблицу №1),
- фактор сжимаемости при стандартных условиях i -ого компонента Z_{ci} (см. таблицу №4.1),
- тип газовой смеси (ДГ, КГ) (см. 2.1).

Расчет x_i ДГ и КГ [4] :

$$x_i = \left(\frac{r_i z_{ci}}{\sum_j r_j z_{cj}} \right)$$

2.2.7 Расчет вязкости μ

Исходные данные для КГ, ДГ :

- критическое давление P_{ki} (МПа) (см. 2.2.4),
- критическая температура T_{ki} (К) (см. таблицу №4.1),
- молярная масса i -ого компонента M_i (кг/моль) (см. таблицу №4.1),
- приведённая температура T_{pri} (см. 2.2.5),
- тип газовой смеси (ДГ, КГ, ПГ) (см. 2.1),

Порядок расчета вязкости μ ДГ и КГ [7]:

- рассчитываем критическую динамическую вязкость i -ого компонента среды μ_{ki} ,
- рассчитываем динамическую вязкость i -ого компонента среды μ_i ,
- рассчитываем динамическую вязкость газовой смеси μ .

Критическая динамическая вязкость i -ого компонента среды μ_{ki} рассчитывается по формуле:

$$\mu_{ki} = \frac{1,61 M_i^{0,5} P_{ki}^{2,3}}{T_{ki}^6}$$

Динамическая вязкость i -ого компонента среды μ_i рассчитывается по формуле:

$$\mu_i = \begin{cases} \mu_{ki} T_{pri}^{0,965} & \text{при } T_{pri} < 1 \\ \mu_{ki} T_{pri}^{(0,71 + \frac{0,29}{T_{pri}})} & \text{при } T_{pri} > 1 \end{cases}$$

Динамическая вязкость газовой смеси μ рассчитывается по формуле:

$$\mu = \sum_i \frac{x_i \mu_i}{\sum_j x_j \Phi_{ij}}$$

$$\Phi_{ij} = \frac{1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_j}\right)^{1/2} * \left(\frac{M_j}{M_i}\right)^{1/4}}{8 * \left(1 + \frac{M_i}{M_j}\right)^{1/2}}$$

Исходные данные для ПГ:

- абсолютное давление P (МПа) (см. 2.2.4),
- абсолютная температура T (К) (см. 2.2.5),
- плотность при стандартных условиях ρ_c (кг/м³) (см. таблицу №4.2),
- молярные доли углекислого газа и азота x_y , x_a соответственно (см. таблицу №4.2).

Расчет μ ПГ [5]:

Псевдо-критические температура и давление природного газа $T_{пк}$, $P_{пк}$ рассчитываются по формулам:

$$T_{пк} = 88,25(0,9915 + 1,759\rho_c - x_y - 1,681x_a)$$

$$P_{пк} = 2,9585(1,608 - 0,05994\rho_c + x_y - 0,392x_a)$$

Приведённые температура и давление T_n , P_n рассчитываются по формулам:

$$T_n = \frac{T}{T_{пк}}$$

$$P_n = \frac{P}{P_{пк}}$$

Коэффициенты C_μ , μ_T рассчитываются по формулам:

$$C_\mu = 1 + \frac{P_n^2}{30*(T_n - 1)}$$

$$\mu_T = 3,24 * \frac{\bar{T} + 1,37 - 9,09\rho_c^{0,125}}{\rho_c + 2,08 - 1,5(x_a + x_y)}$$

Динамическая вязкость μ рассчитывается по формуле:

$$\mu = \mu_T * C_\mu$$

2.2.8 Расчет псевдо-критической температуры ДГ и КГ $T_{пк}$

Исходные данные для расчета:

- молярная доля i -ого компонента x_i (см. таблицу №4.1),
- критическая температура i -ого компонента $T_{ки}$ (К) (см. таблицу №4.1),
- критическое давление i -ого компонента $P_{ки}$ (Па) (см. таблицу №4.1),
- тип газовой смеси (ДГ, КГ) (см. 2.1).

Расчет $T_{пк}$ ДГ и КГ [6]:

$$T_{пк} = \left(\frac{\left[\sum_i x_i \left(\frac{T_{ки}^{2,5}}{P_{ки}} \right)^{0,5} \right]^2}{\sum_i x_i \left(\frac{T_{ки}}{P_{ки}} \right)} \right)^{\frac{2}{3}}$$

2.2.9 Расчет псевдо-критического давления ДГ и КГ $P_{пк}$

Исходные данные для расчета:

- молярная доля i -ого компонента x_i (см. таблицу №4.1),
- критическая температура i -ого компонента $T_{ки}$ (К) (см. таблицу №4.1),
- критическое давление i -ого компонента $P_{ки}$ (Па) (см. таблицу №4.1),
- псевдо-критическая температура $T_{пк}$ (К) (см. 2.2.8),
- тип газовой смеси (ДГ, КГ) (см. 2.1).

Расчет $P_{пк}$ ДГ и КГ [6]:

$$P_{nk} = \left(\frac{T_{nk}}{\sum_i x_i \left(\frac{T_{ki}}{P_{ki}} \right)} \right)$$

2.2.10 Расчет фактора сжимаемости в рабочих условиях Z

Исходные данные для расчета Z ДГ и КГ :

- псевдо-критическая температура $T_{пк}$ (К) (см. 2.2.8),
- давление абсолютное P (Па) (см. 2.2.4),
- псевдо-критическое давление среды $P_{пк}$ (Па) (см. 2.2.9),
- температура абсолютная T (К) (см. 2.2.5),
- константы R, Ω_b, Ω_a (см. 4),
- тип газовой смеси (ДГ, КГ, ПГ) (см. 2.1).

Расчет Z ДГ и КГ [6]:

$$a = \frac{\Omega_a R^2 T_{nk}^{2,5}}{P_{nk}}$$

$$b = \frac{\Omega_b R T_{nk}}{P_{nk}}$$

$$A = \frac{aP}{R^2 T^{2,5}}$$

$$B = \frac{bP}{RT}$$

$$q = \frac{A - B - 3AB - B^2}{3} - \frac{2}{27}$$

$$z = \frac{1}{3} + 2 * \sqrt[3]{-\frac{q}{2}}$$

Исходные данные для расчета Z ПГ:

- плотность природного газа при стандартных условиях ρ_c (кг/м³) (см. 2.2.13),
- молярные доли CO_2, N_2, CH_4 (x_y, x_a, x_3) (см. таблицу №4.2),
- фактор сжимаемости природного газа при стандартных условиях Z_c (см. 2.2.11),
- температура абсолютная T (К) (см. 2.2.5),
- абсолютное давление P (МПа) (см. 2.2.4).

Расчет Z ПГ [5]:

$$M_3 = (24,05525z_c \rho_c - 28,0135x_a - 44,01x_y) x_3,$$

$$H_3 = 128,64 + 47,479M_3,$$

$$C^* = 0,92 + 0,0013(T - 270),$$

$$B^* = 0,72 + 1,875 * 10^{-5}(320 - T)^2$$

$$C_{233} = 3,58783 * 10^{-3} + 8,06674 * 10^{-6}T - 3,25798 * 10^{-8}T^2,$$

$$C_{223} = 5,52066 * 10^{-3} - 1,68609 * 10^{-5}T + 1,57169 * 10^{-8}T^2$$

$$C_3 = 2,0513 * 10^{-3} + 3,4888 * 10^{-5}T - 8,3703 * 10^{-8}T^2,$$

$$C_2 = 7,8498 * 10^{-3} - 3,9895 * 10^{-5}T + 6,1187 * 10^{-8}T^2,$$

$$C_1 = -0,302488 + 1,95861 * 10^{-3}T - 3,16302 * 10^{-6}T^2 + \\ + 6,46422 * 10^{-4} - 4,22876 * 10^{-6}T + 6,88157 * 10^{-9}T^2 \quad H_3 + \\ + -3,32805 * 10^{-7} + 2,2316 * 10^{-9}T - 3,67713 * 10^{-12}T^2 \quad H_3^2,$$

$$B_3 = -0,86834 + 4,0376 * 10^{-3}T - 5,1657 * 10^{-6}T^2,$$

$$B_{23} = -0,339693 + 1,61176 * 10^{-3}T - 2,04429 * 10^{-6}T^2,$$

$$B_2 = -0,1446 + 7,4091 * 10^{-4}T - 9,1195 * 10^{-7}T^2,$$

$$B_1 = -0,425468 + 2,865 * 10^{-3}T - 4,62073 * 10^{-6}T^2 + \\ + 8,77118 * 10^{-4} - 5,56281 * 10^{-6}T + 8,81514 * 10^{-9}T^2 \quad H_3 + \\ + (-8,24747 * 10^{-7} + 4,31436 * 10^{-9}T - 6,08319 * 10^{-12}T^2)H_3^2,$$

$$C_m = x_3^3 C_1 + 3x_3^2 x_a C^* \quad C_1^2 C_2^{-1} \quad + 2,76x_3^2 x_y \quad C_1^2 C_3^{-1} \quad + \\ + 3x_a^2 x_3 C^* (C_2^2 C_1)^{-1} \quad + 6,6x_3 x_a x_y (C_1 C_2 C_3)^{-1} \quad + 2,76x_y^2 x_3 (C_3^2 C_1)^{-1} \quad + \\ + x_a^3 C_2 + 3x_a^2 x_y C_{223} + 3x_y^2 x_a C_{233} + x_y^3 C_3 \quad ,$$

$$B_m = x_3^2 B_1 + x_3 x_a B^* \quad B_1 + B_2 \quad - 1,73x_3 x_y \quad B_1 B_3^{-0,5} + x_a^2 B_2 + \\ + 2x_a x_y B_{23} + x_y^2 B_3,$$

$$b = \frac{10^3 P}{2,7715 T}$$

$$C_0 = b^2 C_m$$

$$B_0 = b B_m$$

$$A_0 = 1 + 1,5(B_0 + C_0)$$

$$A_2 = [A_0 - (A_0^2 - A_1^3)^{0,5}]^{-1} \quad 3$$

$$A_1 = 1 + B_0$$

$$z = (1 + A_2 + \frac{A_1}{A_2})^{-1} \quad 3$$

2.2.11 Расчет фактора сжимаемости при стандартных условиях Z_c

Исходные данные для расчета Z_c ДГ и КГ:

- псевдо-критическая температура T_{pk} (К) (см. 2.2.8),
- давление абсолютное при стандартных условиях P_c (Па) (см. 4),
- псевдо-критическое давление среды P_{pk} (Па) (см. 2.2.9),
- температура абсолютная при стандартных условиях T_c (К) (см. 4),
- константы R, Ω_b, Ω_a (см. 4),
- тип газовой смеси (ДГ, КГ) (см. 2.1).

Расчет Z_c ДГ и КГ [6]:

$$\begin{aligned}a &= \frac{\Omega_a R^2 T_{nk}^{2,5}}{P_{nk}} \\b &= \frac{\Omega_b R T_{nk}}{P_{nk}} \\A_c &= \frac{a P_c}{R^2 T_c^{2,5}} \\B_c &= \frac{b P_c}{R T_c} \\q_c &= \frac{A_c - B_c - 3 A_c B_c - B_c^2}{3} - \frac{2}{27} \\z_c &= \frac{1}{3} + 2 * \sqrt[3]{-\frac{q_c}{2}}\end{aligned}$$

Исходные данные для расчета Z_c ПГ:

- плотность природного газа при стандартных условиях ρ_c (кг/м³) (см. 2.2.13),
- молярные доли CO₂, N₂ (x_y, x_a) (см. таблицу №4.2).

Расчет Z_c ПГ [5]:

$$z_c = 1 - (0,0741\rho_c - 0,006 - 0,063x_a - 0,0575x_y)^2$$

2.2.12 Расчет коэффициента сжимаемости K

- фактора сжимаемости в рабочих условиях Z (см. 2.2.10),
- фактора сжимаемости при стандартных условиях Z_c (см. 2.2.11),
- тип газовой смеси (ДГ, КГ, ПГ) (см. 2.1).

Расчет K для ДГ, ПГ, КГ [5]:

$$K = \frac{Z}{Z_c}$$

2.2.13 Расчет плотности при стандартных условиях ρ_c

Исходные данные для расчета ρ_c ДГ и КГ:

- фактор сжимаемости при стандартных условиях Z_c (см. 2.2.11),
- плотность i -ого компонента при стандартных условиях ρ_{ci} (кг/м³), (см. таблицу №4.1),

- молярная доля i -ого компонента x_i (см. таблицу №4.1),
- тип газовой смеси (ДГ, КГ) (см. 2.1).

Расчет ρ_c ДГ и КГ [4]:

$$\rho_c = \frac{\sum_i x_i \rho_{ci}}{z_c}$$

Исходные данные для расчета ρ_c ПГ:

- коэффициенты \bar{b}_i (см. таблицу №4.2),
- молярная масса i -ого компонента природного газа M_i (кг/кмоль) (см. таблицу №4.2),
- молярная доля i -ого компонента природного газа (x_a, x_y, x_z, x_i) (см. таблицу №4.2),
- универсальная газовая постоянная R (Дж/моль) (см. 4),
- абсолютная температура при стандартных условиях T_c (К) (см. 4),
- абсолютное давление при стандартных условиях P_c (МПа) (см. 4).

Расчет ρ_c ПГ [8]:

$$z_{\text{смеси}} = 1 - \left(\sum_i x_i \bar{b}_i \right)^2$$

$$\rho_c = \frac{10^3 P_c \sum_i x_i M_i}{R T_c z_{\text{смеси}}}$$

Необходимо выполнить проверку исходных данных (см. 3.3).

2.2.14 Расчет плотности в рабочих условиях ρ

Исходные данные для расчета ρ ДГ и КГ:

- абсолютное давление P (Па) (см. 2.2.4),
- абсолютная температура T (К) (см. 2.2.5),
- абсолютная температура при стандартных условиях T_c (К) (см. 4),
- абсолютное давление при стандартных условиях P_c (Па) (см. 4),
- Плотность при стандартных условиях ρ_c (кг/м³) (см. 2.2.13),
- Коэффициент сжимаемости K (см. 2.2.12),
- тип газовой смеси (ДГ, КГ) (см. 2.1).

Расчет ρ ДГ и КГ [4]:

$$\rho = \frac{\rho_c P T_c}{P_c T K}$$

Исходные данные для расчета ρ ПГ:

- абсолютное давление P (МПа) (см. 2.2.4),
- абсолютная температура T (К) (см. 2.2.5),
- плотность при стандартных условиях ρ_c (кг/м³) (см. 2.2.13),
- фактора сжимаемости в рабочих условиях Z (см. 2.2.10),
- фактора сжимаемости при стандартных условиях Z_c (см. 2.2.11),

- универсальная газовая постоянная R (Дж/моль) (см. 4).

Расчет ρ ПГ [5]:

$$M_m = 24,05525z_c\rho_c$$

$$\rho = \frac{10^3 M_m P}{RTz}$$

2.2.15 Расчет показателя адиабаты k

Исходные данные для расчета k ДГ и КГ:

- показателя адиабаты i -ого компонента k_i (см. таблицу №4.1),
- молярная доля i -ого компонента x_i (см. таблицу №4.1).

Расчет k ДГ и КГ [4]:

$$k = \sum_i x_i k_i$$

Исходные данные для расчета k ПГ:

- абсолютное давление P (МПа) (см. 2.2.4),
- абсолютная температура T (К) (см. 2.2.5),
- плотность при стандартных условиях ρ_c (кг/м³) (см. 2.2.13),
- молярная доля N_2 x_a (см. таблицу №4.2).

Расчет k ПГ [5]:

$$k = 1,556 + 0,074x_a - 3,9 \cdot 10^{-4}T + 1 - 0,68x_a - 0,208\rho_c + (P/T)^{1,43} [384 - x_a + P/T^{0,8} + 26,4x_a]$$

2.2.16 Расчет коэффициента расширения ε

Исходные данные для расчета:

- показатель адиабаты k (см. 2.2.15),
- относительный диаметр отверстия СУ β (см. 2.2.1),
- перепад давления на СУ ΔP (для расчета используем в Па) (см. 2.2.17).

Коэффициент расширения ε рассчитывается по формуле [2]:

$$\varepsilon = 1 - (0,351 + 0,256\beta^4 + 0,93\beta^8) \left(1 - \left(1 - \frac{\Delta P}{P}\right)^{\frac{1}{k}}\right)$$

2.2.17 Расчет перепада давления на СУ ΔP

Если в систему приходит рабочий расход, то необходимо произвести расчет перепада давления на СУ.

Исходные данные для расчета:

- текущий расход Q (см. 2.1),
- максимальный и минимальный перепад давления на диафрагме ΔP_{max} , ΔP_{min} , максимальный расход Q_{max} , минимальный расход Q_{min} (см. паспорт расходомерного узла).

Расчет ΔP :

$$\Delta P = \left(\frac{Q}{Q_{max} - Q_{min}} \right)^2 \cdot \Delta P_{max} + \Delta P_{min}$$

2.2.18 Расчет коэффициента истечения **C**

Исходные данные для расчета:

- критерий Рейнольдса Re (см. 2.2.22),
- относительный диаметр отверстия СУ β (см. 2.2.1),
- действительный диаметр ИТ D (см. 2.2.1),
- метод отбора перепада давления на СУ (угловой, трех радиусный или фланцевый) (см. 2.1).

Расчет C [2]:

$$C_{Re} = 0,5961 + 0,0261\beta^2 - 0,216\beta^8 + 0,000521\left(\frac{10^6\beta}{Re}\right)^{0,7} + 0,0188 + \\ + 0,0063A \beta^{3,5} \frac{10^6}{Re}^{0,3} + (0,043 + 0,08e^{-10L_1} - 0,123e^{-7L_1})(1 - 0,11A)\frac{\beta^4}{1-\beta^4} - \\ - 0,031(M_1 - 0,8M_1^{1,1})\beta^{1,3} + M_2$$

$$A = \left(\frac{19000\beta}{Re}\right)^{0,8}$$

$$M_1 = \frac{2L_2}{1 - \beta}$$

$L_1 = 1$; $L_2 = 0,47$ – для трёхрадиусного способа отбора давления

$L_1 = L_2 = \frac{0,0254}{D}$ – для фланцевого способа отбора давления

$L_1 = L_2 = 0$ – для углового метода отбора давления

$$M_2 = 0,011 \cdot 0,75 - \beta^{2,8} - \frac{D}{0,0254} \quad \text{при } D < 0,07112\text{м}$$

$$M_2 = 0 \quad \text{при } D \geq 0,07112\text{м}$$

2.2.19 Расчет коэффициента истечения **C'**

Исходные данные для расчета:

- коэффициент истечения C (рассчитывается при $Re = 1 \cdot 10^6$) (см. 2.2.18).

Расчет C' [1]:

$$C' = C \text{ (при } Re = 1 \cdot 10^6 \text{)}$$

2.2.20 Расчет коэффициента шероховатости **K_ш**

Исходные данные для расчета:

- диаметр ИТ D (в метрах) (см. 2.2.1),
- диаметр СУ d (в метрах) (см. 2.2.1),
- шероховатость ИТ Ra (в метрах) (см. 2.1),
- критерий Рейнольдса Re (см. 2.2.22),

- относительный диаметр отверстия $\text{СУ } \beta$ (см. 2.2.1).

Порядок расчета коэффициента шероховатости K_w [2]:

- рассчитываем Ra_{max} ,
- рассчитываем Ra_{min} ,
- рассчитываем K_w .

Ra_{max} рассчитывается по формуле:

$$Ra_{max} = \begin{cases} \frac{(0,718866\beta^{-3,887}+0,364)}{10^4} D & \text{при } Re \leq 10^4 \\ \frac{(A_0\beta^{A_1}+A_2)}{10^4} D & \text{при } Re > 10^4 \text{ и } \beta < 0,65 \\ \frac{A_0 0,65^{A_1}+A_2}{10^4} D & \text{при } Re > 10^4 \text{ и } \beta \geq 0,65 \end{cases}$$

$$\text{Если } Ra_{max} \geq \frac{15D}{10^4}, \text{ то принимаем } Ra_{max} = \frac{15D}{10^4}$$

$$A_i = \sum_{k=0}^3 B_k \lg(Re)^k \quad (\text{см. таблицу №2}).$$

Таблица №2. Значение коэффициентов B_k .

| | A_0 | A_1 | A_2 |
|-------|---------------------------|-----------|-----------|
| | $Re \in (10^4; 10^5]$ | | |
| B_0 | 8,87 | 6,7307 | -10,244 |
| B_1 | -3,7114 | -5,5844 | 5,7094 |
| B_2 | 0,41841 | 0,732485 | 0,76477 |
| B_3 | 0 | 0 | 0 |
| | $Re \in (10^5; 3 * 10^6]$ | | |
| B_0 | 27,23 | -25,928 | 1,7622 |
| B_1 | -11,458 | 12,426 | -3,8765 |
| B_2 | 1,6117 | -2,09397 | 1,05567 |
| B_3 | -0,07567 | 0,106143 | -0,076764 |
| | $Re \in (3 * 10^6; 10^8]$ | | |
| B_0 | 16,5416 | 322,594 | -92,029 |
| B_1 | -6,60709 | -132,2 | 37,935 |
| B_2 | 0,88147 | 17,795 | -5,1885 |
| B_3 | -0,039226 | -0,799765 | 0,23583 |

Ra_{min} рассчитывается по формуле:

$$Ra_{min} = \begin{aligned} & (7,1592 - 12,387\beta - 2,0118 - 3,469\beta \lg Re) \frac{D}{10^4} + \\ & + \frac{D}{10^4} (0,1382 - 0,23762\beta \lg Re)^2, \\ & \text{при } \beta < 0,65 \\ & -0,892353 + 0,24308 \lg Re - 0,0162562 \lg Re^2 \frac{D}{10^4}, \\ & \text{при } \beta \geq 0,65 \end{aligned}$$

$K_{ш}$ рассчитывается по формуле:

$$K_{ш} = 1, \text{ если } Ra \in [Ra_{min}; Ra_{max}]$$

$$\text{Иначе, } K_{ш}(Re) = 1 + 5,22\beta^{3,5}(\gamma - \gamma^*)$$

$$\gamma = (1,74 - 2\lg(\frac{2A_{ш}}{D} - \frac{37,36\lg(K_d + 3,33333K_r)}{Re}))^{-2}$$

$$\gamma^* = (1,74 - 2\lg(\frac{2A_{ш}}{D} - \frac{37,36\lg(K_d + 3,33333K_r)}{Re}))^{-2}$$

где коэффициенты $A_{ш}, K_d, K_r$ для γ и γ^* определяются из таблицы №3.

Таблица №3. Значения величин $A_{ш}, K_d, K_r$.

| | γ | γ^* |
|---------|---------------------------|--|
| $A_{ш}$ | πRa | πRa_{max} при $Ra > Ra_{max}$ πRa_{min} при $Ra < Ra_{min}$ |
| K_d | $\frac{0,26954\pi Ra}{D}$ | $\frac{0,26954\pi Ra_{max}}{D}$ при $Ra > Ra_{max}$ $\frac{0,26954\pi Ra_{min}}{D}$ при $Ra < Ra_{min}$ |
| K_r | $\frac{5,035}{Re}$ | $\frac{5,035}{Re}$ |

2.2.21 Расчет коэффициента шероховатости $K'_{ш}$

Исходные данные для расчета:

- коэффициент шероховатости $K_{ш}$ (рассчитывается при $Re = 1 \cdot 10^6$) (см. 2.2.20).

Расчет $K'_{ш}$ [1]:

$$K'_{ш} = K_{ш} \text{ (при } Re = 1 \cdot 10^6 \text{)}$$

2.2.22 Расчет критерия Рейнольдса Re

Исходные данные для расчета:

- диаметр ИТ D (в метрах) (см. 2.2.1),
- диаметр СУ d (в метрах) (см. 2.2.1),
- динамическая вязкость среды μ (Па*с) (см. 2.2.7),
- коэффициент поправки на шероховатость ИТ $K'_{ш}$ (при числе Рейнольдса $Re = 1 \cdot 10^6$) (см. 2.2.21),
- коэффициент на притупление входной кромки СУ K_n (см. 2.2.2),
- коэффициент истечения C' (при числе Рейнольдса $Re = 1 \cdot 10^6$),
- коэффициент скорости входа E (см. 2.2.3),
- коэффициент расширения ε (см. 2.2.16),
- плотность среды ρ (кг/м³) (см. 2.2.14),
- перепад давления ΔP (см. 2.2.17),
- тип газовой смеси (ДГ, КГ, ПГ) (см. 2.1).

Порядок расчета [1]:

$$Re = \frac{Re^*}{C' K'_{ш}} CK_{ш} - \text{общая итерационная формула}$$

$$Re^* = \frac{1}{D\mu} d^2 C' E K'_{ш} K_n \varepsilon (2\Delta P \rho)^{0,5} - \text{модифицированное число Рейнольдса}$$

1.) рассчитываем Re^* .

2.) вычисляем $C = C(\text{при } Re = Re^*)$, $K_{ш} = K_{ш}(\text{при } Re = Re^*)$ и подставив в

$$Re_1 = \frac{Re^*}{C' K'_{ш}} CK_{ш} - \text{получаем приближение для числа } Re$$

$$3.) \delta_1 = \frac{Re_1 - Re^*}{Re_1}, \text{ если } \delta_1 \leq 10^{-4}, \text{ то } Re = Re_1.$$

$$\text{Иначе } Re_2 = \frac{Re^*}{C' K'_{ш}} CK_{ш}, \text{ где } C = C(\text{при } Re = Re_1), K_{ш} = K_{ш}(\text{при } Re = Re_1).$$

$$4.) \delta_2 = \frac{Re_2 - Re_1}{Re_2}, \text{ если } \delta_2 \leq 10^{-4}, \text{ то } Re = Re_2.$$

Иначе $C = C(\text{при } Re = Re_n)$, $K_{ш} = K_{ш}(\text{при } Re = Re_n)$.

$$5.) Re_{n+1} = \frac{Re^*}{C' K'_{ш}} CK_{ш}, \text{ при } \frac{Re_{n+1} - Re_n}{Re_{n+1}} \leq 10^{-4} \text{ принимаем } Re = Re_{n+1}.$$

Далее определяем истинные значения C и $K_{ш}$, подставляя в них найденное Re .

Необходимо выполнить проверку исходных данных (см. 3).

2.2.23 Расчет объемного расхода среды приведённого к стандартным условиям Q_c

Исходные данные для расчета:

- диаметр СУ d (в метрах) (см. 2.2.1),
- коэффициент скорости входа E (см. 2.2.3),
- коэффициент расширения ε (см. 2.2.16),
- плотность среды ρ (кг/м³) (см. 2.2.14),
- лотность среды при стандартных условиях ρ_c (кг/м³) (см. 2.2.13),
- перепад давления ΔP (Па) (см. 2.2.17),
- коэффициент поправки на шероховатость ИТ K_w (см. 2.2.20),
- коэффициент поправки на притупление входной кромки СУ K_n (см. 2.2.2),
- коэффициент истечения C (см. 2.2.18),
- тип газовой смеси (ДГ, КГ, ПГ) (см. 2.1).

Объёмный расход среды приведённый к стандартным условиям Q_c рассчитывается по формуле [1]:

$$Q_c = \frac{3600\pi d^2}{4\rho_c} K_w K_n E C \varepsilon (2\rho \Delta P)^{0,5}$$

3 Граничные условия применения расчётных методик

3.1 Для диафрагм с угловым и трёх радиусным способом отбора давления [2]

$$\begin{aligned}d_{20} &\geq 12,5 \text{ мм} \\ 50 \text{ мм} &\leq D_{20} \leq 1000 \text{ мм} \\ 0,1 &\leq \beta \leq 0,75 \\ Re &\geq 5000 \text{ при } \beta \leq 0,56 \\ Re &\geq 16000\beta^2 \text{ при } \beta > 0,56 \\ \Delta P/P &\leq 0,25\end{aligned}$$

3.2 Для диафрагм с фланцевым способом отбора давления [2]

$$\begin{aligned}d_{20} &\geq 12,5 \text{ мм} \\ 50 \text{ мм} &\leq D_{20} \leq 1000 \text{ мм} \\ 0,1 &\leq \beta \leq 0,75 \\ Re &\geq 5000 \text{ при } \beta \leq 0,56 \\ Re &\geq 1,7 * 10^5 \beta^2 D \text{ при } \beta > 0,56 \\ \Delta P/P &\leq 0,25\end{aligned}$$

3.3 Для расчета физических свойств ПГ [5]

$$\begin{aligned}0,66 &\leq \rho_c, \text{ кг/м}^3 \leq 1,05 \\ 0 &\leq x_a \leq 0,20 \\ 0 &\leq x_y \leq 0,20 \\ 250 &\leq T, \text{ К} \leq 350 \\ 0,1 &\leq P, \text{ МПа} \leq 7,5\end{aligned}$$

В случае нарушения границ, выдать сообщение об ошибке в файл report!

4 Константы

Таблица №4.1. Физические характеристики компонент ДГ и КГ [4,6].

| Доменный газ | $M_i(\text{кг/моль})$ | z_{ci} | $\rho_{ci}(\text{кг/м}^3)$ | $T_{ki}(\text{К})$ | $P_{ki}(\text{Па})$ | k_i |
|------------------------|-----------------------|----------|----------------------------|--------------------|---------------------|-------|
| CH_4 | 0,016043 | 0,9981 | 0,66692 | 190,6 | 4587579,2 | 1,295 |
| N_2 | 0,028135 | 0,9997 | 1,16455 | 126,2 | 3385108 | 1,4 |
| CO_2 | 0,04401 | 0,9947 | 1,82954 | 304,2 | 7356294,4 | 1,285 |
| H_2 | 0,0020159 | 1,0006 | 0,083803 | 33,2 | 1293414,4 | 1,405 |
| CO | 0,02801 | 0,9996 | 1,1644 | 132,9 | 3486156 | 1,4 |
| Коксовый газ | | | | | | |
| CH_4 | 0,016043 | 0,9981 | 0,66692 | 190,6 | 4587579,2 | 1,295 |
| N_2 | 0,028135 | 0,9997 | 1,16455 | 126,2 | 3385108 | 1,4 |
| CO_2 | 0,04401 | 0,9947 | 1,82954 | 304,2 | 7356294,4 | 1,285 |
| H_2 | 0,0020159 | 1,0006 | 0,083803 | 33,2 | 1293414,4 | 1,405 |
| CO | 0,02801 | 0,9996 | 1,1644 | 132,9 | 3486156 | 1,4 |
| O_2 | 0,0319988 | 0,9993 | 1,33022 | 154,6 | 5032190,4 | 1,395 |
| C_2H_6 | 0,0650923 | 0,9537 | 2,435467 | 493,1 | 4984192,6 | 1,225 |

Таблица №4.2. Физические характеристики компонент ПГ [4,8].

| Состав ПГ | $r_i(\%)$ | x_i | M_i | z_{ci} | \bar{b}_i |
|---------------------------|-----------|------------------|---------|----------|-------------|
| CH_4 | 96,29275 | 0,96273(x_3) | 16,043 | 0,9981 | 0,0436 |
| C_2H_6 | 1,65 | 0,0165982 | 30,07 | 0,992 | 0,0894 |
| C_3H_8 | 0,362 | 0,0036733 | 44,097 | 0,9834 | 0,1288 |
| C_4H_{10} | 0,118 | 0,0012145 | 58,123 | 0,9695 | 0,1743 |
| C_5H_{12} | 0,02685 | 0,0002823 | 72,15 | 0,949 | 0,225 |
| C_6H_{14} | 0,0059 | 0,0000640 | 86,177 | 0,919 | 0,2846 |
| CO_2 | 0,232 | 0,00232(x_5) | 44,01 | 0,9947 | 0,0728 |
| N_2 | 1,28 | 0,01277(x_4) | 28,135 | 0,9997 | 0,0173 |
| O_2 | 0,0131 | 0,0001308 | 31,9988 | 0,9993 | 0,0265 |
| H_2 | 0,0011 | 0,0000109 | 2,0159 | 1,0006 | -0,0051 |
| He | 0,0183 | 0,0001825 | 4,0026 | 1,0005 | 0 |

Где: M_i , z_{ci} , ρ_{ci} , T_{ki} , P_{ki} , k_i , \bar{b}_i – молярная масса, фактор сжимаемости, плотность при стандартных условиях, критическая температура, критическое давление, показатель адиабаты и коэффициент суммирования каждого отдельного компонента смеси, соответственно.

$T_c = 293,15 \text{ К}$ (температура среды при стандартных условиях).

$P_c = 101325 \text{ Па} = 0,101325 \text{ МПа}$ (давление среды при стандартных условиях).

$R = 8,31451 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К}$ (универсальная газовая постоянная).

$\Omega_a = 0,427480232$ (константа необходимая для расчета фактора сжимаемости).

$\Omega_b = 0,08664035$ (константа необходимая для расчета фактора сжимаемости).

5 Список используемой литературы

1. ГОСТ 8.586.1-2005(ИСО 5167-1:2003) Измерение расхода и количества жидкости газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 1. Принцип метода измерений и общие требования.
2. ГОСТ 8.586.2-2005(ИСО 5167-2:2003) Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 2. Диафрагмы. Технические требования.
3. ГОСТ 30319.0-2015 Газ природный. Методы расчета физических свойств. Общие положения.
4. ГОСТ 30319.1-2015 Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение физических свойств природного газа, его компонентов и продуктов его переработки.
5. ГОСТ 30319.2-2015 Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение коэффициента сжимаемости.
6. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей: Справочное пособие/ Перевод с английского под редакцией Б. И. Соколова. - 3-е издание, переработано и дополнено – Ленинград: Химия, 1982. – 592с. , иллюстрация – Нью-Йорк, 1977.
7. Голубев И. Ф., Гнездилов Н.Е. Вязкость газовых смесей. Издательство государственного комитета стандартов совета министров СССР. Москва, 1971. – 326с.
8. ГОСТ 31369-2008. Газ природный. Вычисление теплоты сгорания, плотности, относительной плотности и числа Воббе на основе компонентного состава.
9. П.П. Кремлёвский. Расходомеры и счетчики количества: Справочник - 4-е издание, переработанное и дополненное – Ленинград: Машиностроение, 1989 – 701с.