

**Теплоэнергоконтроллер ТЭКОН-17**

**Алгоритмы расчета**

**Технические газы. Кислород**

**T10.06.52 РР-Д2**



Екатеринбург

2007

---

Редакция 21.00 от 18.06.2007  
© ИВП КРЕЙТ, 2000-2007г.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>4</b>
<b>1 ОБЩИЙ ПОРЯДОК РАСЧЕТА .....</b>	<b>4</b>
<b>2 ХАРАКТЕРИСТИКИ КИСЛОРОДА.....</b>	<b>5</b>
2.1 Плотность в рабочих условиях .....	5
2.2 Коэффициент сжимаемости .....	5
2.3 Динамическая вязкость.....	5
2.4 Показатель адиабаты .....	6
2.5 Коэффициент расширения .....	7
<b>3 РАСЧЕТ РАСХОДА .....</b>	<b>7</b>
3.1 Объемный расход .....	7
3.2 Массовый расход.....	7
<b>ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОЧНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>8</b>

## ВВЕДЕНИЕ

В документе описан способ расчета объемного и массового расхода теплоэнергоконтроллером ТЭКОН-17 (далее по тексту ТЭКОН) газообразного кислорода как технического газа методом переменного перепада давления на сужающем устройстве (диафрагме) в соответствии с [2-4]. Настоящий документ является дополнением к ранее выпущенному документу [1] «Теплоэнергоконтроллер ТЭКОН-17. Алгоритмы расчета Т10.06.52РР» и должен рассматриваться только совместно с ним.

Настоящий документ соответствует версии алгоритмов расчета 21.x2, где «x» – произвольная цифра.

## 1 ОБЩИЙ ПОРЯДОК РАСЧЕТА

1.1 На каждом цикле рабочей программы ТЭКОН для вычисления расхода любого технического газа, в том числе и кислорода, выполняются следующие действия:

- Необходимые для расчета данные по температуре, давлению, перепаду давления и т.п. определяются и согласуются, как это описано в разделе 1 [1].
- Вычисляются основные характеристики расходомерного узла по формулам раздела 2 [1].
- Определяются термодинамические характеристики среды (в данном случае кислорода) по формулам, приведенным ниже.
- Рассчитывается и корректируется действительный мгновенный расход через сужающее устройство в объемных единицах (кубометрах в час), приведенных к нормальным условиям. Для этого используются формулы, приведенные в разделе 4 [1] для природного газа.
- Взамен теплового эквивалента рассчитывается массовый расход в килограммах по формулам, приведенным далее.
- Объемный и массовый расходы накапливаются и усредняются по формулам раздела 6 [1].

1.2 Алгоритмы расчета расхода кислорода в диапазоне температур от минус 50 до плюс 100 градусов Цельсия и абсолютных давлений от 0.1 до 15.0 МПа обеспечивают точность не хуже 0.2%.

## 2 ХАРАКТЕРИСТИКИ КИСЛОРОДА

### 2.1 Плотность в рабочих условиях

Плотность в рабочих условиях  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>, вычисляется путем аппроксимации и интерполяции табличных данных, приведенных в [6]. Вычисления производятся в два этапа. На первом этапе с помощью полинома вида

$$\rho_T = 1/(A \cdot T_c^2 + B \cdot T_c + C) \quad (2.1)$$

производится аппроксимация плотности в функции температуры  $T_c$ , выраженной в градусах Цельсия, для двух значений абсолютного давления  $P_{лев}$  и  $P_{пр}$ , ближайших к текущему давлению  $P_a$ , и выбранных из ряда: 0.1; 0.5; 1.0; 2.0; 3.0; 4.0; 5.0; 6.0; 8.0; 10.0; 12.0; 15.0; 20.0 МПа. Для повышения точности аппроксимация производится отдельно для положительных и отрицательных температур; коэффициенты аппроксимации сведены в таблицу 2.1.

На втором этапе производится линейная интерполяция плотности по абсолютному давлению по формуле:

$$\rho = \rho_{пр} + (\rho_{лев} - \rho_{пр}) \cdot (P_a - P_{пр}) / (P_{лев} - P_{пр}), \quad (2.2)$$

где  $\rho_{лев}$  – плотность на левой границе интервала интерполяции, при давлении  $P_{лев} \leq P_a$ ;

$\rho_{пр}$  – плотность на правой границе интервала интерполяции, при давлении  $P_{пр} \geq P_a$ .

Таблица 2.1

Давление, МПа	А		В		С	
	$T_c < 0$	$T_c \geq 0$	$T_c < 0$	$T_c \geq 0$	$T_c < 0$	$T_c \geq 0$
0.1	$-26.169 \cdot 10^{-9}$	$-3.177 \cdot 10^{-9}$	$2.6078 \cdot 10^{-3}$	$2.6045 \cdot 10^{-3}$	$710.45 \cdot 10^{-3}$	$710.48 \cdot 10^{-3}$
0.5	$-62.154 \cdot 10^{-9}$	$-17.792 \cdot 10^{-9}$	$527.01 \cdot 10^{-6}$	$527.07 \cdot 10^{-6}$	$141.36 \cdot 10^{-3}$	$141.48 \cdot 10^{-3}$
1.0	$-66.082 \cdot 10^{-9}$	$-18.862 \cdot 10^{-9}$	$267.04 \cdot 10^{-6}$	$267.45 \cdot 10^{-6}$	$70.393 \cdot 10^{-3}$	$70.374 \cdot 10^{-3}$
2.0	$-74.333 \cdot 10^{-9}$	$-18.096 \cdot 10^{-9}$	$136.91 \cdot 10^{-6}$	$137.38 \cdot 10^{-6}$	$34.818 \cdot 10^{-3}$	$34.828 \cdot 10^{-3}$
3.0	$-80.287 \cdot 10^{-9}$	$-19.671 \cdot 10^{-9}$	$93.489 \cdot 10^{-6}$	$94.214 \cdot 10^{-6}$	$22.999 \cdot 10^{-3}$	$23.010 \cdot 10^{-3}$
4.0	$-88.413 \cdot 10^{-9}$	$-19.400 \cdot 10^{-9}$	$71.581 \cdot 10^{-6}$	$72.508 \cdot 10^{-6}$	$17.096 \cdot 10^{-3}$	$17.108 \cdot 10^{-3}$
5.0	$-96.381 \cdot 10^{-9}$	$-19.809 \cdot 10^{-9}$	$58.323 \cdot 10^{-6}$	$59.526 \cdot 10^{-6}$	$13.558 \cdot 10^{-3}$	$13.573 \cdot 10^{-3}$
6.0	$-102.18 \cdot 10^{-9}$	$-20.708 \cdot 10^{-9}$	$49.493 \cdot 10^{-6}$	$50.913 \cdot 10^{-6}$	$11.208 \cdot 10^{-3}$	$11.219 \cdot 10^{-3}$
8.0	$-114.11 \cdot 10^{-9}$	$-20.836 \cdot 10^{-9}$	$38.168 \cdot 10^{-6}$	$39.995 \cdot 10^{-6}$	$8.2781 \cdot 10^{-3}$	$8.2919 \cdot 10^{-3}$
10.0	$-118.10 \cdot 10^{-9}$	$-19.824 \cdot 10^{-9}$	$31.071 \cdot 10^{-6}$	$33.265 \cdot 10^{-6}$	$6.5213 \cdot 10^{-3}$	$6.5516 \cdot 10^{-3}$
12.0	$-106.16 \cdot 10^{-9}$	$-19.826 \cdot 10^{-9}$	$27.195 \cdot 10^{-6}$	$28.770 \cdot 10^{-6}$	$5.3909 \cdot 10^{-3}$	$5.4034 \cdot 10^{-3}$
15.0	$-65.614 \cdot 10^{-9}$	$-17.646 \cdot 10^{-9}$	$23.805 \cdot 10^{-6}$	$23.916 \cdot 10^{-6}$	$4.2747 \cdot 10^{-3}$	$4.2810 \cdot 10^{-3}$
20.0	$-68.000 \cdot 10^{-9}$	$-14.021 \cdot 10^{-9}$	$20.426 \cdot 10^{-6}$	$18.589 \cdot 10^{-6}$	$3.2198 \cdot 10^{-3}$	$3.2088 \cdot 10^{-3}$

### 2.2 Коэффициент сжимаемости

Коэффициент сжимаемости кислорода  $K_{сж}$ , согласно [5], определяется по формуле

$$K_{сж} = \frac{\rho_c \cdot P_a \cdot T_n}{\rho \cdot P_n \cdot T_a}, \quad (2.3)$$

где

$$\rho_c = 1.33116 \text{ кг/м}^3 \quad \text{плотность кислорода при нормальных условиях} \quad (2.4)$$

$$T_n = 293.15 \text{ К} \quad (2.5)$$

$$P_n = 0.101325 \text{ МПа.} \quad (2.6)$$

### 2.3 Динамическая вязкость

Вычисления проводятся в соответствии с формулами [6].

#### 2.3.1 Приведенная температура

$$\tau = T_a / T_{кр}, \quad (2.7)$$

$$\text{где } T_{кр} = 154.58 \text{ К.} \quad (2.8)$$

### 2.3.2 Приведенная плотность

$$\omega = \rho / \rho_{кр}, \quad (2.9)$$

$$\text{где } \rho_{кр} = 436.2 \text{ кг/м}^3. \quad (2.10)$$

### 2.3.3 Динамическая вязкость

$$\mu = \mu_0(\tau) + d\mu(\tau, \omega). \quad (2.11)$$

Первое слагаемое  $\mu_0(\tau)$ , характеризующее свойства кислорода в разреженном состоянии, вычисляется по формуле:

$$\mu_0(\tau) = -46.37437 * \tau^{-1.5} + 237.7359 * \tau^{-1} - 408.7227 * \tau^{-0.5} + 206.4049 + 104.3199 * \tau^{0.5} + 222.0488 * \tau \quad (2.12)$$

Избыточная составляющая вязкости кислорода  $d\mu(\tau, \omega)$  вычисляется по формуле:

$$\begin{aligned} d\mu(\tau, \omega) = & \omega^2 * (64.64877 * \tau + 291.8977 * \tau^{-1} - 269.4236 * \tau^{-2} + 47.97377 * \tau^{-3}) + \\ & + \omega^3 * (119.0839 - 613.0107 * \tau^{-1} + 643.25 * \tau^{-2} - 132.5039 * \tau^{-3}) + \\ & + \omega^4 * (-38.11928 * \tau + 266.5476 * \tau^{-1} - 331.8987 * \tau^{-2} + 79.83568 * \tau^{-3}). \end{aligned} \quad (2.13)$$

## 2.4 Показатель адиабаты

Показатель адиабаты кислорода  $\kappa$  вычисляется по формуле

$$\kappa = \left( 1 + A_1 + \frac{1 + A_2}{C_p^0/R - 1 + A_5} \right) * \frac{1}{1 + A_0}, \quad (2.14)$$

где

$$A_0 = \sum_{i=1}^5 \left\{ \omega^i * \sum_{j=1}^7 b_{ij} / \tau^{j-1} \right\} \quad (2.15)$$

$$A_1 = \sum_{i=1}^5 \left\{ (i + 1) * \omega^i * \sum_{j=1}^7 b_{ij} / \tau^{j-1} \right\} \quad (2.16)$$

$$A_2 = - \sum_{i=1}^5 \left\{ \omega^i * \sum_{j=1}^7 (j - 2) * b_{ij} / \tau^{j-1} \right\} \quad (2.17)$$

$$A_5 = - \sum_{i=1}^5 \left\{ \omega^i / i * \sum_{j=1}^7 (j - 1) * (j - 2) * b_{ij} / \tau^{j-1} \right\} \quad (2.18)$$

$$C_p^0/R = \sum_{i=1}^{15} a_i * \theta^{i-5} \quad (2.19)$$

$$\theta = T_a/100 \quad (2.20)$$

Коэффициенты  $b_{ij}$  и  $a_i$  сведены в приводимые ниже таблицы 2.2 и 2.3

Таблица 2.2

Индекс j	Индекс i				
	1	2	3	4	5
1	0.5003616	0.1280217	-0.1913846	0.524076	-0.3962116
2	-1.101003	0.1920127	0.2632636	-0.7494169	0.579793
3	-0.6223903	-0.3183172	-0.1683686	0.4697109	-0.3705044
4	0.1675656	0.83247	-0.4604221	0.05554044	-0.1481088
5	-0.06652177	-0.297485	0.3828505	0.05593279	-0.171155
6	-0.02169624	-0.1625295	0.2180327	-0.0407849	0
7	-0.009781135	0	0	0	0

Таблица 2.3

i	a <sub>i</sub>	i	a <sub>i</sub>
1	-0.04677496	9	-0.1511074
2	0.44438072	10	0.02166922
3	-1.754985	11	-0.002101182
4	3.793554	12	0.0001363906
5	-1.437798	13	-0.000005683852
6	4.038040	14	0.0000001375421
7	-2.105577	15	-0.000000001469623
8	0.7024159		

## 2.5 Коэффициент расширения

Коэффициент расширения вычисляется, как и для природного газа и водяного пара, по общей формуле, приведенной в [2-4]:

$$\varepsilon = 1 - (0.351 + 0.256 \cdot \beta^4 + 0.93 \cdot \beta^8) \cdot [1 - (1 - 0.001 \cdot dP/Pa)^{1/\kappa}] \quad (2.21)$$

## 3 РАСЧЕТ РАСХОДА

### 3.1 Объемный расход

Объемный расход кислорода  $G_k'$  в кубометрах в час, приведенный к нормальным условиям, рассчитывается по формулам раздела 4 [1], относящимся к природному газу. Вычисление числа Рейнольдса, коррекция расхода по числу Рейнольдса, коэффициентам притупления и шероховатости также производится в полном соответствии с формулами, приведенными в этом разделе.

### 3.2 Массовый расход

Массовый расход кислорода рассчитывается взамен теплового эквивалента природного газа (тепловой мощности). Расчетная формула для мгновенного массового расхода  $Q_{mg}$ , кг/час

$$Q_{mg} = \rho_c \cdot G_k' \quad (3.1)$$

## ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОЧНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теплоэнергоконтроллер ТЭКОН-17. Алгоритмы расчета Т10.06.52РР.  
Редакция 21.00. ИВП «КРЕЙТ», г. Екатеринбург, 2007 г.
2. ГОСТ 8.586.1-2005.  
Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 1. Принцип метода измерений и общие требования.
3. ГОСТ 8.586.2-2005.  
Измерение расхода и количества жидкостей и газов методом с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 2. Диафрагмы. Технические требования.
4. ГОСТ 8.586.5-2005.  
Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 5. Методика выполнения измерений.
5. ГОСТ 30319.1-96  
Газ природный. Методы расчета физических свойств.  
Определение физических свойств природного газа, его компонентов и продуктов его переработки.
6. ГСССД 19-81  
Кислород жидкий и газообразный.  
Плотность, энтальпия, энтропия и изобарная теплоемкость при температурах 70 ... 1000 К и давлениях 0.1 ... 100 кПа.