

Ю. А. ОЛЕЙНИК, С. А. САПРЫКИН, С. П. НАУМЕНКО

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛИТРОПНОГО КПД ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАГНЕТАТЕЛЯ

Проанализированы математические модели определения политропного коэффициента полезного действия (КПД) центробежного нагнетателя (ЦБН). Описаны четыре метода определения политропного КПД ЦБН и проведены практические расчеты политропного КПД и коэффициента адиабаты по всем методам. Определен самый простой и точный метод определения политропного КПД ЦБН. Значения коэффициентов адиабаты можно использовать при определении политропного КПД ЦБН после определения коэффициента политропы ЦБН.

Ключевые слова: политропный коэффициент полезного действия, центробежный нагнетатель.

Ю. А. ОЛІЙНИК, С. О. САПРИКІН, С. П. НАУМЕНКО

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛІТРОПНОГО ККД ВІДЦЕНТРОВОГО НАГНІТАЧА

Проаналізовано математичні моделі визначення політропного коефіцієнту корисної дії (ККД) відцентрового нагнітача (ВЦН). Описано чотири методи визначення політропного ККД ВЦН і проведено практичні розрахунки політропного ККД та коефіцієнту адиабати по всім методам. Визначено найпростіший і точний метод визначення політропного ККД ВЦН. Значення коефіцієнту адиабати можна використовувати при визначенні політропного ККД ВЦН після визначення коефіцієнту політропи ВЦН.

Ключові слова: політропний коефіцієнт корисної дії, відцентровий нагнітач.

YU. OLEYNIK, S. SAPRYKIN, S. NAUMENKO

ANALYZING THE METHODS OF COMPUTATION OF THE POLYTROPIC COEFFICIENT OF EFFICIENCY OF THE CENTRIFUGAL SUPERCHARGER

Mathematical models used for the determination of the parameters of natural gas and centrifugal supercharger (CSC) were analyzed. Based on these models we can compute the polytropic coefficient of efficiency of the CSC using natural gas parameters for the input and output of centrifugal supercharger. Three mathematical models were taken from the standards for the computation of CSC parameters and one mathematical model was taken from the scientific literature. Based on the above mathematical models we described the four methods of computation of the polytropic coefficient of efficiency of the CSC. The values were suggested for the methods that allow for the accurate computation of the polytropic coefficient of efficiency of the CSC and the coefficient of adiabatic curve of the natural gas. The most accurate method of determination of the polytropic coefficient of efficiency of the CSC has been given. The most accurate method is the easiest method for the computations and it is convenient for the computation of an average value of the coefficient of adiabatic curve of the CSC in-operation. The methods allow us to determine an average value of the coefficient of adiabatic curve of the natural gas and using it in combination with the coefficient of polytrope of natural gas we can easily determine the polytropic coefficient of efficiency of the CSC.

Key words: polytropic coefficient of efficiency and the centrifugal supercharger.

Введение

Для определения внутренней мощности центробежного нагнетателя (ЦБН) необходимо определять его политропный коэффициент полезного действия (КПД). Мы будем рассматривать ЦБН, которые сжимают природный газ (ПГ). Организации и предприятия, эксплуатирующие ЦБН, рассчитывают политропный КПД ЦБН по своим стандартам. Можно рассчитывать политропный КПД, используя математические модели (ММ), приведенные в научной литературе. Мы рассмотрим ММ определения параметров газа и ЦБН, после анализа которых выделим методы расчета политропного КПД, которые сравним с помощью практических расчетов.

Цель работы

Получить методы расчёта политропного КПД ЦБН и оценить их точность.

Параметры природного газа на входе и выходе ЦБН

Будем рассматривать ММ определения параметров ЦБН и КПД ЦБН, которые основываются на параметрах ПГ, представленных на рис. 1. Рассматриваемые ММ будут взяты из существующих стандартов и научной литературы.

На первой оси рис. 1 показаны удельные энтальпии реального ПГ при адиабатном и политропном процессах сжатия ПГ. Так же на этой оси (рис. 1) показаны удельные энтальпии ПГ, если ПГ обладает свойствами идеального газа.

Для удельных энтальпий и удельных работ на рис. 1 введены следующие обозначения:

- i_1 – удельная энтальпия ПГ на входе в ЦБН, Дж/кг;
- i_2 – удельная энтальпия ПГ на выходе из ЦБН при политропном процессе сжатия (ППС), Дж/кг;

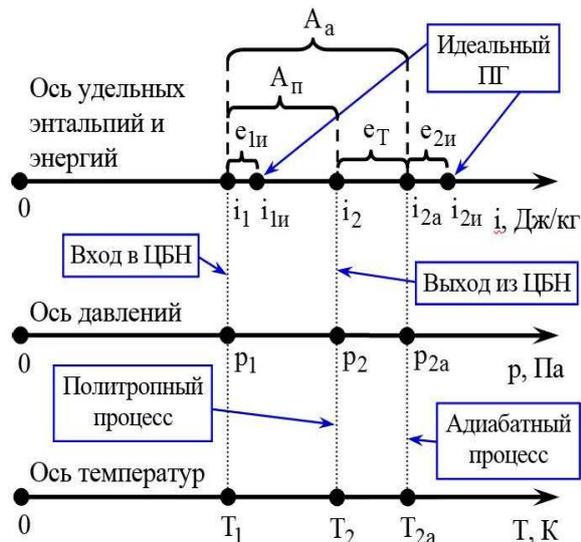


Рис. 1 – Удельные энтальпии и энергии, давления и температуры ПГ на входе и выходе ЦБН

– i_{2a} – удельная энтальпия ПГ на выходе из ЦБН при адиабатном процессе сжатия (АПС), Дж/кг;
 – i_{1i} , i_{2i} – удельные энтальпии ПГ на входе в ЦБН и выходе из ЦБН, если сжимаемый ПГ обладает свойствами идеального газа, Дж/кг;

– e_T – потери удельной энергии ПГ за счёт отдачи тепла от ПГ во внешнюю среду, Дж/кг;

– e_{1i} , e_{2i} – разница между удельной энтальпией ПГ в идеальном состоянии и ПГ в реальном состоянии при АПС, Дж/кг;

– A_a – удельная работа, совершённая ЦБН над ПГ при АПС, Дж/кг;

– A_p – удельная работа, совершённая ЦБН над ПГ при ППС, Дж/кг.

На второй оси давлений рис. 1 показаны следующие давления ПГ:

– p_1 – абсолютное давление ПГ на входе в ЦБН, Па;

– p_2 – абсолютное давление ПГ на выходе из ЦБН при ППС, Па;

– p_{2a} – абсолютное давление ПГ на выходе из ЦБН при АПС, Па.

На третьей оси температур рис. 1 показаны следующие температуры ПГ:

– T_1 – температура ПГ на входе в ЦБН, К;

– T_2 – температура ПГ на выходе из ЦБН при ППС, К;

– T_{2a} – температура ПГ на выходе из ЦБН при АПС, К.

Математические модели определения параметров ПГ и ЦБН

Для политропного КПД ЦБН η_n запишем общую формулу [1]:

$$\eta_n = \frac{A_p}{A_a} \quad (1)$$

В статье [2] рассмотрены основные три ММ расчета η_n . Мы проанализируем эти ММ и рассмотрим дополнительную ММ, чтобы получить четыре метода расчета η_n . Эти четыре метода будем сравнивать с помощью практических расчетов η_n и среднего значения η_n .

Математическая модель 1 стандарта [3]

Для величин i_{2a} и i_1 (рис. 1) запишем следующие уравнения [2, 3]:

$$i_{2a} = i_{2i} - e_{2i}; \quad (2)$$

$$i_1 = i_{1i} - e_{1i}; \quad (3)$$

$$i_{2i} = (2,6R + 149)T_2 + 1,225T_2^2;$$

$$i_{1i} = (2,6R + 149)T_1 + 1,225T_1^2;$$

$$e_{2i} = RT_{кр}\delta_2; \quad e_{1i} = RT_{кр}\delta_1,$$

где R – газовая постоянная ПГ, Дж/(кг·К);

$T_{кр}$ – критическая температура ПГ, К;

δ_1 , δ_2 – поправки удельной энтальпии ПГ, которые приводят значения энтальпии от состояния идеального к состоянию реального газа/

Зная значения i_{2a} и i_1 , определяем удельную работу A_a [2, 3]:

$$A_a = i_{2a} - i_1,$$

затем определяем A_p с учётом показателя политропы n [1, 2]:

$$A_p = \frac{n}{n-1} R(Z_2 T_2 - Z_1 T_1); \quad (4)$$

$$n = \frac{\ln \varepsilon}{\ln \left(\varepsilon \frac{Z_1 T_1}{Z_2 T_2} \right)}, \quad (5)$$

где Z_1 , Z_2 – коэффициенты сжатия ПГ на входе и выходе ЦБН (Z_2 принят одинаковым при адиабатном и политропном процессах сжатия ПГ);

$\varepsilon = p_2/p_1$ – степень сжатия ПГ в ЦБН.

Для A_a запишем уравнение с учетом показателя адиабаты k [1]:

$$A_a = \frac{k}{k-1} R(Z_2 T_{2a} - Z_1 T_1). \quad (6)$$

Подставим формулы (4) и (6) в (1):

$$\eta_n = \frac{n}{n-1} \frac{k-1}{k} \frac{Z_2 T_2 - Z_1 T_1}{Z_2 T_{2a} - Z_1 T_1}. \quad (7)$$

Запишем формулу (7) в виде:

$$\eta_{\text{п}} = \eta_1 \eta_2 ;$$

$$\eta_1 = \frac{n}{n-1} \frac{k-1}{k} ; \quad (8)$$

$$\eta_2 = \frac{Z_2 T_2 - Z_1 T_1}{Z_2 T_{2a} - Z_1 T_1} . \quad (9)$$

При допущении $\eta_2 \approx 1$, получим $\eta_{\text{п}} = \eta_1$.
Следующие три ММ используют это допущение и в них величина A_a определяется не с помощью энтальпий ПГ, а с помощью k .

Математическая модель 2 стандарта [4]

В стандарте [4] приведено следующее уравнение:

$$\frac{k}{k-1} = 4,16 + 0,0041 (t_{\text{ср}} - 10) + 3,93 (\Delta_b - 0,55) + 5,0 \left(\frac{n-1}{n} - 0,3 \right) ; \quad (10)$$

$$t_{\text{ср}} = \frac{t_1 + t_2}{2} ,$$

где $t_{\text{ср}}$ – средняя температура ПГ, °С;

t_1, t_2 – температура ПГ на входе и выходе ЦБН, °С;

Δ_b – относительная плотность ПГ по воздуху.

Зная $k/(k-1)$, можно оценивать A_a и η_1 .

Математической модель 3 стандарта [5]

В стандарте [5] приведена формула Кобза для k :

$$k = 1,556 (1 + 0,074 x_a) - 3,9 \cdot 10^{-4} T_{\text{ср}} (1 - 0,68 x_a) - 0,208 \rho_{\text{ср}} + \left(\frac{p_{\text{ср}}}{T_{\text{ср}}} \right)^{1,43} \left[384 (1 - x_a) \left(\frac{p_{\text{ср}}}{T_{\text{ср}}} \right)^{0,8} + 26,4 x_a \right] ; \quad (11)$$

$$T_{\text{ср}} = \frac{T_1 + T_2}{2} ;$$

$$p_{\text{ср}} = \frac{p_1 + p_2}{2} ;$$

$$x_a = \frac{X_a}{100} ,$$

где $T_{\text{ср}}$ – средняя температура ПГ, К;

$p_{\text{ср}}$ – среднее абсолютное давление ПГ, МПа;

x_a – молярная доля азота в ПГ;

X_a – молярная доля азота в ПГ, %;

$\rho_{\text{ср}}$ – плотность ПГ при стандартных условиях (20 °С, 101325 Па), кг/м³.

Зная значение k и определив n , можно оценивать величины A_a и η_1 .

Математическая модель 4 литературы [6]

В [2] рассмотрена следующая формула:

$$c_{pk} = \frac{4187}{M_{\text{пг}}} \left[5,15 + \left(5,65 + 0,017 \frac{\Delta T}{2} \right) \Delta_b \right] ; \quad (12)$$

$$\Delta T = T_2 - T_1 .$$

где c_{pk} – теплоёмкости ПГ при постоянном давлении и АПС ПГ, Дж/(кг·К);

$M_{\text{пг}}$ – молярная масса ПГ, кг/кмоль.

Формула (12) получена на основе уравнения из литературы [6], где первый автор – Доброхотов В.Д. По имени первого автора назовём (12) формулой Доброхотова.

Используя значение c_{pk} , можно определить дробь показателя адиабаты [1, 2]:

$$\frac{k}{k-1} = \frac{c_{pk}}{R} .$$

Методы определения политропного КПД ЦБН

На основе четырех ММ можно получить четыре метода расчета $\eta_{\text{п}}$ ЦБН (табл. 1). Метод 1 (табл. 1) основан на определении A_a с помощью энтальпий ПГ и $A_{\text{п}}$ с помощью параметров ПГ, чтобы далее получить $\eta_{\text{п}}$ (формула (1)). Методы 2–4 (табл. 1) основаны на определении k и n , после чего рассчитывается $\eta_1 \approx \eta_{\text{п}}$ (формула (8)).

Точность определения политропного КПД

Можно ли учитывать η_2 (формулы (7)–(9)), если ММ 2–4 определяют только значение η_1 (формула (8)) и мы получим завышенное значение $\eta_{\text{п}} = \eta_1 \eta_2$? Выход может быть в том, чтобы определять не η_1 , а $\bar{\eta}_1$:

$$\bar{\eta}_1 = \frac{n}{n-1} \frac{\bar{k}-1}{\bar{k}} , \quad (13)$$

где значение \bar{k} рассчитывается таким образом, чтобы выполнялось условие:

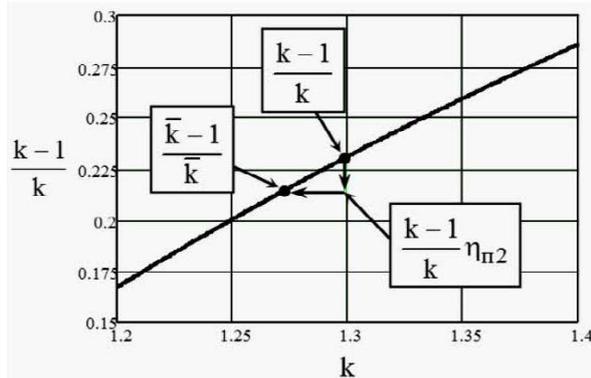
$$\bar{\eta}_1 = \eta_{\text{п}} .$$

Приравняем формулы (13) и (7) с учетом (9):

$$\frac{n}{n-1} \frac{\bar{k}-1}{\bar{k}} = \frac{n}{n-1} \frac{k-1}{k} \eta_2 ;$$

$$\frac{\bar{k}-1}{\bar{k}} = \frac{k-1}{k} \eta_2 . \quad (14)$$

Чтобы выполнялось равенство (14), необходимо, чтобы выполнялось условие $\bar{k} < k$ (рис. 2). Если определять реальное значение $\eta_{\text{п}}$, используя формулу (8), а не (7), то, для учёта $\eta_{\text{п}2}$, необходимо определять не k , а \bar{k} ($\bar{k} < k$), уменьшая реальное значение k (рис. 2).

Рис. 2 – График функции $(k-1)/k$

Насколько получаемые по методам 2–4 (табл. 1) значения k близки к \bar{k} оценить пока нельзя. Для идеального многоатомного газа $k = 1,33$, значит для \bar{k} можем записать $\bar{k} \leq 1,3$. При практических расчетах k по формулам методов 2–4 (табл. 1) получаем $k = 1,285 \dots 1,295$, что соответствует неравенству $\bar{k} \leq 1,3$.

Для оценки точности методов 1–4 (табл. 1) введем величину $\eta_{\text{ср}}$ – среднее значение $\eta_{\text{п}}$:

$$\eta_{\text{ср}} = \frac{\eta_{\text{п1}} + \eta_{\text{п2}} + \eta_{\text{п3}} + \eta_{\text{п4}}}{4}, \quad (15)$$

где $\eta_{\text{п1}}, \eta_{\text{п2}}, \eta_{\text{п3}}, \eta_{\text{п4}}$ – значения $\eta_{\text{п}}$, рассчитанные по методам 1, 2, 3, 4 (табл. 1).

Примем допущение, что значение $\eta_{\text{ср}}$ учитывает или "сглаживает" неточности всех методов 1–4 и наиболее близко к реальному значению $\eta_{\text{п}}$

($\eta_{\text{ср}} \approx \eta_{\text{п}}$, $\eta_{\text{ср}} \approx \bar{\eta}_1$). Согласно принятого допущения величину оценивать точность определения $\eta_{\text{п}i}$ (i – номер метода расчёта $\eta_{\text{п}}$) будем по величине его отклонения относительно значения $\eta_{\text{ср}}$:

$$\Delta\eta_{\text{п}i} = \eta_{\text{п}i} - \eta_{\text{ср}}. \quad (16)$$

По методам 1–4 (табл. 1) проведем расчеты значения $\eta_{\text{п}i}$ ($i = 1, 2, 3, 4$), приведенные в табл. 2.

В табл. 2 показаны значения $\eta_{\text{п}i}$, рассчитанные без учёта Z_1, Z_2 ($Z_1 = Z_2 = 1$) и при учёте значений Z_1 и Z_2 .

В табл. 2 используются параметры:

- k_1 – значение $k(\bar{k})$ при расчётах по методу 1;
- k_2 – значение $k(\bar{k})$ при расчётах по методу 2;
- k_3 – значение $k(\bar{k})$ при расчётах по методу 3;
- k_4 – значение $k(\bar{k})$ при расчётах по методу 4.

Величина k_1 определяется из формулы (8) при известном n и $\eta_{\text{п}}$, с допущением $\eta_1 \approx \eta_{\text{п}}$.

Значение $k_{\text{ср}}$ в табл. 2 рассчитано по формуле:

$$k_{\text{ср}} = \frac{k_1 + k_2 + k_3 + k_4}{4}$$

и необходимо для статистических исследований $k(\bar{k})$, чтобы можно было задавать \bar{k} и получать $\bar{\eta}_1 \approx \eta_{\text{п}}$ по формуле (13).

Таблица 1 – Методы расчёта значений $\eta_{\text{п}}$ для ЦБН

| Методы | Описание расчёта параметров ПГ и ЦБН | Расчёт $\eta_{\text{п}}$ |
|---|---|--------------------------|
| <u>Метод 1</u> на основе стандарта [3] | Определяем значения i_{2a} и i_1 по формулам (1), (2). Определяем $A_a = i_{2a} - i_1$. Определяем n по формуле (5) и $A_{\text{п}}$ по формуле (3). | По формуле (1) |
| <u>Метод 2</u> на основе стандарта [4] | Задаём Δ_v – относительную плотность ПГ по воздуху. Определяем n по формуле (5). Определяем $\frac{k}{k-1}$ по формуле (8). | По формуле (8) |
| <u>Метод 3</u> на основе формулы Кобза [5] | Задаём молярную долю азота в ПГ X_a (%) и определяем $x_a = X_a / 100$. Определяем k по формуле Кобза (11). Определяем n по формуле (5). | По формуле (8) |
| <u>Метод 4</u> на основе формулы Доброхотова [6] | Задаём $M_{\text{пг}}$ – молярную массу ПГ (кг/кмоль). Определяем c_{pk} по формуле Доброхотова (12). Определяем $\frac{k}{k-1} = \frac{c_{pk}}{R}$. Определяем n по формуле (5). | По формуле (8) |

Таблица 2 – Значения параметров ПГ и η_{ni} ЦБН при расчётах по методам I–4

| Параметры ПГ | Значения параметров η_{ni} , n , k | | | |
|--|---|--|---|--|
| | При $Z_1 = Z_2 = 1$ | | При известных Z_1 и Z_2 | |
| | n, k | $\eta_{ni} (\Delta\eta_{ni})$ | Z_1, Z_2, n, k | $\eta_{ni} (\Delta\eta_{ni})$ |
| $p_1 = 0,6$ МПа $p_2 = 1,9$ МПа $t_1 = 15$ °C $t_2 = 120$ °C $\rho_{ст} = 0,72$ кг/м ³ $M_{пр} = 17,3$ кг/кмоль $X_a = 1,6$ % | $Z_1 = 1$ $Z_2 = 1$ $n = 1,3690$ $k_1 = 1,2805$ $k_2 = 1,2914$ $k_3 = 1,2782$ $k_4 = 1,2803$ $k_{cp} = 1,2826$ | $\eta_{n1} = 0,8126$ (-0,0048) $\eta_{n2} = 0,8372$ (0,0198) $\eta_{n3} = 0,8075$ (-0,0099) $\eta_{n4} = 0,8122$ (-0,0051) $\eta_{ncp} = 0,8174$ | $Z_1 = 0,986304$ $Z_2 = 0,987346$ $n = 1,3707$ $k_1 = 1,2778$ $k_2 = 1,2911$ $k_3 = 1,2782$ $k_4 = 1,2803$ $k_{cp} = 1,2818$ | $\eta_{n1} = 0,8038$ (-0,0091) $\eta_{n2} = 0,8335$ (0,0206) $\eta_{n3} = 0,8047$ (-0,0081) $\eta_{n4} = 0,8095$ (-0,0034) $\eta_{ncp} = 0,8129$ |
| $p_1 = 0,7$ МПа $p_2 = 1,6$ МПа $t_1 = 10$ °C $t_2 = 90$ °C $\rho_{ст} = 0,72$ кг/м ³ $M_{пр} = 17,3$ кг/кмоль $X_a = 1,6$ % | $Z_1 = 1$ $Z_2 = 1$ $n = 1,4306$ $k_1 = 1,2869$ $k_2 = 1,2844$ $k_3 = 1,2849$ $k_4 = 1,2854$ $k_{cp} = 1,2854$ | $\eta_{n1} = 0,7407$ (0,0031) $\eta_{n2} = 0,7355$ (-0,0021) $\eta_{n3} = 0,7365$ (-0,0011) $\eta_{n4} = 0,7377$ (0,0001) $\eta_{ncp} = 0,7376$ | $Z_1 = 0,983056$ $Z_2 = 0,984775$ $n = 1,4350$ $k_1 = 1,2844$ $k_2 = 1,2835$ $k_3 = 1,2849$ $k_4 = 1,2854$ $k_{cp} = 1,2845$ | $\eta_{n1} = 0,7304$ (-0,0004) $\eta_{n2} = 0,7287$ (-0,0021) $\eta_{n3} = 0,7314$ (0,0006) $\eta_{n4} = 0,7326$ (0,0018) $\eta_{ncp} = 0,7308$ |
| $p_1 = 1,1$ МПа $p_2 = 2,8$ МПа $t_1 = 10$ °C $t_2 = 105$ °C $\rho_{ст} = 0,76$ кг/м ³ $M_{пр} = 18,3$ кг/кмоль $X_a = 2,3$ % | $Z_1 = 1$ $Z_2 = 1$ $n = 1,4486$ $k_1 = 1,2785$ $k_2 = 1,2687$ $k_3 = 1,2780$ $k_4 = 1,2747$ $k_{cp} = 1,2750$ | $\eta_{n1} = 0,7035$ (0,0070) $\eta_{n2} = 0,6840$ (-0,0125) $\eta_{n3} = 0,7025$ (0,0060) $\eta_{n4} = 0,6960$ (-0,0005) $\eta_{ncp} = 0,6965$ | $Z_1 = 0,970850$ $Z_2 = 0,975576$ $n = 1,4595$ $k_1 = 1,2758$ $k_2 = 1,2669$ $k_3 = 1,2780$ $k_4 = 1,2747$ $k_{cp} = 1,2739$ | $\eta_{n1} = 0,6866$ (0,0038) $\eta_{n2} = 0,6690$ (-0,0137) $\eta_{n3} = 0,6909$ (0,0082) $\eta_{n4} = 0,6845$ (0,0017) $\eta_{ncp} = 0,6828$ |
| $p_1 = 1,7$ МПа $p_2 = 3,9$ МПа $t_1 = 30$ °C $t_2 = 115$ °C $\rho_{ст} = 0,72$ кг/м ³ $M_{пр} = 17,3$ кг/кмоль $X_a = 1,5$ % | $Z_1 = 1$ $Z_2 = 1$ $n = 1,4238$ $k_1 = 1,2846$ $k_2 = 1,2784$ $k_3 = 1,2831$ $k_4 = 1,2844$ $k_{cp} = 1,2826$ | $\eta_{n1} = 0,7442$ (0,0040) $\eta_{n2} = 0,7316$ (-0,0087) $\eta_{n3} = 0,7413$ (0,0011) $\eta_{n4} = 0,7439$ (0,0036) $\eta_{ncp} = 0,7403$ | $Z_1 = 0,967765$ $Z_2 = 0,974151$ $n = 1,4401$ $k_1 = 1,2839$ $k_2 = 1,2753$ $k_3 = 1,2831$ $k_4 = 1,2844$ $k_{cp} = 1,2817$ | $\eta_{n1} = 0,7236$ (0,0044) $\eta_{n2} = 0,7065$ (-0,0127) $\eta_{n3} = 0,7221$ (0,0029) $\eta_{n4} = 0,7246$ (0,0054) $\eta_{ncp} = 0,7192$ |
| $p_1 = 1,9$ МПа $p_2 = 4,0$ МПа $t_1 = 35$ °C $t_2 = 115$ °C $\rho_{ст} = 0,73$ кг/м ³ $M_{пр} = 17,3$ кг/кмоль $X_a = 1,6$ % | $Z_1 = 1$ $Z_2 = 1$ $n = 1,4494$ $k_1 = 1,2811$ $k_2 = 1,2705$ $k_3 = 1,2812$ $k_4 = 1,2783$ $k_{cp} = 1,2778$ | $\eta_{n1} = 0,7077$ (0,0065) $\eta_{n2} = 0,6867$ (-0,0145) $\eta_{n3} = 0,7079$ (0,0068) $\eta_{n4} = 0,7023$ (0,0011) $\eta_{ncp} = 0,7012$ | $Z_1 = 0,965260$ $Z_2 = 0,972707$ $n = 1,4714$ $k_1 = 1,2816$ $k_2 = 1,2668$ $k_3 = 1,2812$ $k_4 = 1,2783$ $k_{cp} = 1,2770$ | $\eta_{n1} = 0,6859$ (0,0089) $\eta_{n2} = 0,6573$ (-0,0197) $\eta_{n3} = 0,6851$ (0,0081) $\eta_{n4} = 0,6796$ (0,0026) $\eta_{ncp} = 0,6770$ |

Значения $\eta_{\text{пер}}$ в табл. 2 рассчитаны по формуле (15). В табл. 2 возле значений $\eta_{\text{пг}}$ в скобках даны значения $\Delta\eta_{\text{пг}}$ (формула (16)). Анализируя $\Delta\eta_{\text{пг}}$, можно подбирать для ЦБН значение \bar{k} (учитывая T_1, T_2, p_1, p_2), чтобы использовать их для быстрого расчёта $\eta_{\text{пг}}$ по формуле (13) в условиях эксплуатации ЦБН.

Хорошие результаты для расчёта $\eta_{\text{пг}}$ показал самый простой четвёртый метод (табл. 1, 2), который можно применять в условиях эксплуатации ЦБН. Определив $\eta_{\text{пг}}$, можно оценивать состояние ЦБН, сравнивая полученные значения $\eta_{\text{пг}}$ со значениями, приведенными в технической и эксплуатационной документации ЦБН.

Наиболее точным методом расчёта $\eta_{\text{пг}}$ является метод 4, наименее точным является метод 2, который может давать завышенные или заниженные значения $\eta_{\text{пг}}$ по сравнению с методами 1, 3, 4 (табл. 2).

Выводы

Согласно проанализированных ММ [2–6] получены четыре метода определения политропного КПД ЦБН (табл. 1), по которым проведены расчёты и оценена точность методов (табл. 2). Самым точным и простым в расчётах является метод 4 (табл. 1).

Список литературы

1. Архаров А. М., Исаев С. И., Кожин И. А. и др. *Теплотехника: учеб. для студентов вузов* / Под ред. В.И. Крутова. Москва: Машиностроение, 1986. 432 с.
2. Oleynik Yu. A., Saprykin S. A. Methods of determination of polytropic effectiveness factor of the centrifugal supercharger. *Вісник*

Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія "Фізика". Харків.: ХНУ ім. Каразіна, 2017. № 26. С. 51–57. ISSN 2073-3771.

3. *Компрессорні станції. Контроль теплотехнічних та екологічних характеристик газоперекачувальних агрегатів: СОУ 60.3-30019801-011:2004.* [Дійсний з 22.12.2004]. Київ.: ДК "Укртрансгаз", 2004. 117 с.
4. *Методика оценки энергоэффективности газотранспортных объектов и систем. СТО 2-3.5-113-2007.* [Действителен с 15.11.2007]. Москва: ВНИИГАЗ, 2007. 118 с.
5. *Газ природный. Методы расчёта физических свойств. Определение физических свойств природного газа, его компонентов и продуктов его переработки: ГОСТ 30319.1-96.* [Действителен с 12.04.1996]. Минск: МГС СМС, 2002. 17 с.
6. Доброхотов В. Д., Клубничкин А. К., Шууровский В. А. *Термодинамика сжатия природного газа и характеристики нагнетателей компрессорных станций для магистральных газопроводов.* Москва: ВНИИЭгазпром, 1974. 41 с.

References (transliterated)

1. Arharov A. M., Isaev S.I., Kozhinov I.A. et al. (1986), *Heat engineering.* V. I. Krutova (Ed.). Mashinostrojnie. Moscow. 432 p.
2. Oleynik Yu. A., Saprykin S. A. (2017), "Methods of determination of polytropic effectiveness factor of the centrifugal supercharger", *Bulletin of the Harkovsky national university of V.N. Karazin. Physics series*, no. 26, pp. 51–57, ISSN 2073-3771.
3. (2004), *Compressor stations. Control of heat technical and ecological characteristics of gas-distributing units: SOU 60.3-30019801-011:2004*, DK "Ukrtransgaz", Kiev, 117 p.
4. (2007), *Technique of assessment of energy efficiency of gas transmission objects and systems* СТО 2-3.5-113-2007 VNIIGAZ, Moscow, 118 p.
5. (2002), *Natural gas. Methods of calculation of physical properties. Determination of physical properties of natural gas, his components and products of his processing: GOST 30319.1-96*, MGS SMS, Minsk, 17 p.
6. Dobrohotov V. D., Klubnichkin A. K., Shchurovsky V. A. (1974), *Thermodynamics of compression of natural gas and characteristic of superchargers of compressor stations for the main gas pipelines*, VNIIEgazprom, Moscow, 41 p.

Поступила (received) 20.02.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Олійник Юрій Анатолійович (Олейник Юрий Анатольевич, Oleynik Yuriy Anatolyevich) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, член-кореспондент Інженерної академії України, старший науковий співробітник відділу компресорних станцій, Український науково-дослідний інститут природних газів, Харків, Україна; e-mail: 12nauka12@gmail.com.

Сапрыкін Сергій Олексійович (Сапрыкин Сергей Алексеевич, Saprykin Sergey Alekseyevich) – кандидат технічних наук, академік Нафтогазової академії, академік-секретар секції «Нафтогазові технології» Інженерної академії України.

Науменко Світлана Петрівна (Науменко Светлана Петровна, Naumenko Svetlana) – старший викладач кафедри турбінобудування; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: naumenkos@kpi.kharkov.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2825-8199>.