

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

### **ПОТУЖНІСТЬ ПРИВОДУ ВІДЦЕНТРОВОГО НАГНІТАЧА ПРИРОДНОГО ГАЗУ**

Отримано формули для потужності приводу відцентрового нагнітача (ВЦН) природного газу, де враховується не тільки механічний та політропний коефіцієнт корисної дії (ККД) ВЦН, але й газодинамічний ККД ВЦН, де враховуються газодинамічні втрати тиску газу та потужності ВЦН. Також в формулі розрахунку потужності приводу ВЦН, що експлуатується, враховується наявність парів конденсату та води в природному газі.

**Ключові слова:** потужність, привід, відцентровий нагнітач, розхід газу, газоперекачувальний агрегат.

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

### **МОЩНОСТЬ ПРИВОДА ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАГНЕТАТЕЛЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА**

Получены формулы для мощности привода центробежного нагнетателя (ЦБН) природного газа, где учитывается не только механический и политропный коэффициент полезного действия (КПД) ЦБН, но и газодинамический КПД ЦБН, учитывающий газодинамические потери давления газа и мощности в ЦБН. Так же в формуле расчета мощности привода эксплуатируемого ЦБН учитывается наличие паров конденсата и воды в природном газе.

**Ключевые слова:** мощность, привод, центробежный нагнетатель, расход газа, газоперекачивающий агрегат.

**YU. OLEYNIK, S. SAPRYKIN, S. NAUMENKO**

### **DETERMINATION OF FUEL GAS FLOW RATE IN GAS PUMPING UNIT AND COMPRESSOR STATION**

Formulas for drive power of centrifugal supercharger of natural gas are obtained, where efficiency factor (EF) of centrifugal supercharger is equal to product of three EF of centrifugal supercharger: mechanical, polytropic, gas-dynamic. The gas dynamic EF of the centrifugal supercharger is usually not taken into account and is taken equal to one. Gas dynamic EF takes into account the pressure loss of the centrifugal supercharger pumped in the stages and the energy loss due to friction of the centrifugal supercharger impellers in the gas medium. Also in the formula of calculation of drive power of the operated centrifugal supercharger the presence of condensate and water vapors in the natural gas is taken into account, which affects the accuracy of measuring the flow rate of pumped gas in the diaphragm flowmeter. Pumping of pure natural gas is impossible in reality and there are always impurities in natural gas, which must be taken into account to estimate the mass flow rate of gas. For formulas of practical (operated) and theoretical calculations of the drive power of the centrifugal natural gas blower received constant (equal to 0.004) for daily standard gas flow, which simplifies the calculation. The paper presents both precise and simplified formulas for the drive power of a centrifugal natural gas blower.

**Keywords:** power, drive, centrifugal supercharger, gas flow rate, gas transfer unit.

#### **Вступ**

Для оцінки ефективності роботи газоперекачувального агрегату (ГПА) з відцентровим нагнітачем (ВЦН) необхідно визначати потужність газотурбінного приводу (ГТП) ВЦН. При визначенні потужності ГТП необхідно розрахувати коефіцієнт корисної дії (ККД) ВЦН, де враховуються наступні втрати енергії [1–3]:

- 1) теплові втрати газу в ВЦН;
- 2) механічні втрати від тертя підшипників ротора ВЦН;
- 3) газодинамічні втрати на тертя газу на верхній диска робочих коліс (РК) ВЦН;
- 4) газодинамічні втрати на внутрішні перетікання газу через ущільнення ротора в ступенях ВЦН;
- 5) газодинамічні втрати тиску газу через тертя, подолання місцевих опорів і поворотів у проточних частинах ВЦН.

Звичайно враховуються теплові (політропний ККД) і механічні (механічний ККД) втрати енергії в ВЦН [2, 3]. У даній роботі будуть враховуватися газодинамічні втрати за допомогою газодинамічного ККД [1], а раніше ці втрати враховувалися не

разом, а окремо, за допомогою різних коефіцієнтів [2, 3].

При визначенні витрати природного газу (ПГ), що перекачується, звичайно враховують хроматографічну щільність ПГ, де не враховують домішки, які є в ПГ (конденсат, вода й ін.). У статті буде розглянуто питання про урахування у формулі потужності ГТП двох домішок ПГ: конденсату (у газоподібному стані), води (у газоподібному стані). Урахування у ПГ конденсату та води вимагає розгляду суміші газів (СГ) замість чистого ПГ.

#### **Мета роботи**

Визначення потужності приводу ВЦН із урахуванням втрат енергії (теплових, механічних, газодинамічних) у ВЦН і параметрів СГ (ПГ із конденсатом і водою).

#### **Виклад основного матеріалу**

##### **Загальні формули потужності приводу ВЦН.**

Для потужності приводу ВЦН напишемо наступну загальну формулу [2]:

$$N_{пр} = \frac{1}{\eta_{вщн}} \ell_{пол} \dot{m}, \quad (1)$$

де  $N_{пр}$  – потужність ГТП ВЦН (потужність на роторі силової турбіни ГТП), Вт;  
 $\eta_{вщн}$  – ККД ВЦН;  
 $\ell_{пол}$  – питома енергія, передана 1 кг газу в ВЦН при політропному стиску газу, Дж/кг;  
 $\dot{m}$  – масова витрата газу, стисливого (перекачувального) ВЦН, кг/с.

Для  $\eta_{вщн}$  напишемо формулу з урахуванням газодинамічних втрат енергії газу [1, 3]:

$$\eta_{вщн} = \eta_m \eta_{пол} \eta_{гд}; \quad (2)$$

$$\eta_{гд} = \eta_{дрк} - \gamma_{гдв}; \quad (3)$$

$$\eta_{дрк} = \frac{1}{1 + \beta_{трд} + \beta_{пер}}, \quad (4)$$

де  $\eta_m$  – механічний (зовнішній) ККД ВЦН;  
 $\eta_{пол}$  – політропний ККД ВЦН;  
 $\eta_{гд}$  – газодинамічний ККД ВЦН (метод 2 статті [1]);  
 $\eta_{дрк}$  – динамічний ККД РК ВЦН (втрати на тертя диска об газ і перетікання газу в ущільненнях);  
 $\gamma_{гдв}$  – коефіцієнт газодинамічних втрат енергії газу: втрати тиску газу через тертя, подолання місцевих опорів і поворотів у проточних частинах ВЦН (дифузор, зворотний напрямний апарат);  
 $\beta_{трд}$  – коефіцієнт втрат енергії на тертя й зминання газу на поверхні диска РК ВЦН;  
 $\beta_{пер}$  – коефіцієнт втрат енергії на внутрішні перетікання газу через ущільнення ротора в ступені ВЦН.

Метод 2 статті [1] розглядає газодинамічні втрати енергії газу в робочому ступені ВЦН залежно від повного питомого напору газу в ступені. Для величин  $\beta_{трд}$ ,  $\beta_{пер}$ ,  $\gamma_{гдв}$  приймемо однакові межі 0,01...0,02 [3, 4]. Величина  $\gamma_{гдв}$  може досягати значення 0,03 [3], що вимагає додаткових досліджень. Для  $\eta_{гд}$  одержимо значення: максимальне – 0,970, мінімальне – 0,942, середнє – 0,956.

Для  $\eta_m$  рекомендуються наступні значення: максимальне – 0,98, мінімальне – 0,97, середнє – 0,975 [1]. В [2] рекомендуються більші значення: 0,99; 0,98; 0,985.

В [5] розглянуто чотири методи визначення  $\eta_{пол}$ .

Для  $\ell_{пол}$  напишемо вираження [2–4]:

$$\ell_{пол} = \frac{n}{n-1} R(Z_2 T_2 - Z_1 T_1);$$

$$\ell_{пол} = \frac{n}{n-1} R Z_1 T_1 \left( \varepsilon^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right); \quad (5)$$

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

$$\frac{Z_2 T_2}{Z_1 T_1} = \varepsilon^{\frac{n-1}{n}},$$

де  $n$  – показник політропи;  
 $R$  – газова постійна, Дж/(кг·К);  
 $Z_1, Z_2$  – коефіцієнт стиску газу на вході й виході ВЦН;  
 $T_1, T_2$  – температура газу на вході й виході ВЦН, К;

$\varepsilon = p_2/p_1$  – ступінь стиску газу в ВЦН;  
 $p_1, p_2$  – абсолютний тиск газу на вході та виході ВЦН, Па.

Величини  $Z_1$  та  $Z_2$  змінюються в межах 0,85...0,99.

Для залежності  $n$  і  $k$  (показник адіабати) напишемо [2–4]:

$$\frac{n}{n-1} = \frac{k \eta_{пол}}{k-1}; \quad \frac{n-1}{n} = \frac{k-1}{k \eta_{пол}}. \quad (6)$$

Напишемо формулу (1) з урахуванням рівняння (5):

$$N_{пр} = \frac{1}{\eta_{вщн}} \frac{n}{n-1} Z_1 T_1 \left( \varepsilon^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) R \dot{m}. \quad (7)$$

Запишемо формулу (7) з урахуванням формули (2) і рівнянь (6):

$$N_{пр} = \frac{1}{\eta_m \eta_{гд}} \frac{k}{k-1} Z_1 T_1 \left( \varepsilon^{\frac{k-1}{k \eta_{пол}}} - 1 \right) R \dot{m}. \quad (8)$$

Формула (7) зручна для практичних розрахунків досліджуваних ГПА, коли  $p_2$  і  $T_2$  вимірюються, а  $\eta_{пол}$  розраховується.

Формула (8) зручна для теоретичних розрахунків параметрів ГПА, коли  $p_2$  і  $\eta_{пол}$  задаються (  $\eta_{пол}$  задається з урахуванням технічної документації та теплотехнічних досліджень ВЦН),  $T_2$  розраховується.

Величина  $\dot{m}$  (кг/с) дорівнює добутку щільності газу  $\rho$  (кг/м<sup>3</sup>) на об'ємну витрату газу  $Q$  (м<sup>3</sup>/с) [2]:  
 $\dot{m} = \rho Q$ .

У розрахунках використовують стандартну щільність ПГ  $\rho_{ст}$  (101 325 Па, 20 °С) і нормальну щільність ПГ  $\rho_n$  (101 325 Па, 0 °С):

$$\dot{m} = \rho_{ст} Q_{ст} = \rho_n Q_n,$$

де  $Q_{ст}$  – стандартна об'ємна витрата газу, м<sup>3</sup>/с;  
 $Q_n$  – нормальна об'ємна витрата газу, м<sup>3</sup>/с.

Добутки  $\rho_{ст} R$  та  $\rho_n R$  постійні для всіх газів і їх

можна знайти по параметрам повітря [2]:

$$\rho_{ст}R = 1,2042 \cdot 287 = 345,605 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К});$$

$$\rho_{н}R = 1,293 \cdot 287 = 371,091 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

Якщо  $Q_{ст}$  измерять в млн. м<sup>3</sup>/сут, то зручно знаходити  $N_{пр}$  в МВт і для добутку  $\rho_{ст}RQ_{ст} = R\dot{m}_г$ , одержимо:

$$\begin{aligned} \rho_{ст}R \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}} \right] Q_{ст} \left[ \frac{\text{млн. м}^3}{\text{сут}} \right] \frac{1}{10^6} = \\ = 345,605 \cdot \left( Q_{ст} \frac{10^6}{60 \cdot 60 \cdot 24} \right) \frac{1}{10^6} = 0,004 Q_{ст} \frac{\text{МВт}}{\text{К}}. \end{aligned}$$

Для добутку  $\rho_{н}RQ_{н}$  одержимо коефіцієнт 0,0043 МВт/К.

Підставимо в рівняння (7) формулу (2), значення  $R\dot{m}_г = \rho_{ст}RQ_{ст} = 0,004 Q_{ст}$  і одержимо:

$$N_{пр} = \frac{0,004}{\eta_{м}\eta_{пол}\eta_{гд}} \frac{n}{n-1} Z_1 T_1 \left( \varepsilon^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) Q_{ст}. \quad (9)$$

Підставимо у формулу (8) значення  $R\dot{m}_г = \rho_{ст}RQ_{ст} = 0,004 Q_{ст}$  і одержимо вираження для  $N_{пр}$  з урахуванням  $k$  замість  $n$ :

$$N_{пр} = \frac{0,004}{\eta_{м}\eta_{гд}} \frac{k}{k-1} Z_1 T_1 \left( \varepsilon^{\frac{k-1}{k\eta_{пол}}} - 1 \right) Q_{ст}. \quad (10)$$

Якщо у формули (9), (10)  $Q_{ст}$  підставити в млн. м<sup>3</sup>/сут, то одержуємо  $N_{пр}$  в МВт. Якщо у формули (9), (10)  $Q_{ст}$  підставити в тис. м<sup>3</sup>/сут, то одержуємо  $N_{пр}$  в кВт.

**Урахування конденсату й води в природному газі, що перекачується.**

Розглянемо два компоненти, які можуть бути присутнім у ПГ: конденсат і вода в газоподібному стані. Прийmemo допущення, що відомі наступні параметри:

1)  $\delta_{к}$  – маса пар конденсату, які перебувають у стандартному м<sup>3</sup> ПГ, кг;

2)  $\delta_{в}$  – маса пар води, які перебувають у стандартному м<sup>3</sup> ПГ, кг.

Визначимо стандартну щільність СГ (101 325 Па, 20 °С) залежно від стандартної щільності чистого ПГ ( $\rho_{ст}$ , кг/м<sup>3</sup>):

$$\rho_{стс} = \rho_{ст} + \delta_{к} + \delta_{в};$$

$$\rho_{стс} = \left( 1 + \frac{\delta_{к}}{\rho_{ст}} + \frac{\delta_{в}}{\rho_{ст}} \right) \rho_{ст};$$

$$\rho_{стс} = (1 + \gamma_{к} + \gamma_{в}) \rho_{ст};$$

$$\rho_{стс} = (1 + \gamma_{кв}) \rho_{ст}; \quad (11)$$

$$\gamma_{к} = \frac{\delta_{к}}{\rho_{ст}}; \quad \gamma_{в} = \frac{\delta_{в}}{\rho_{ст}}; \quad \gamma_{кв} = \gamma_{к} + \gamma_{в},$$

де  $\rho_{стс}$  – стандартна щільність СГ, кг/м<sup>3</sup>;

$\gamma_{к}$  – відносна масова частка конденсату в стандартному м<sup>3</sup> ПГ;

$\gamma_{в}$  – відносна масова частка води в стандартному м<sup>3</sup> ПГ;

$\gamma_{кв}$  – відносна масова частка конденсату та води в стандартному м<sup>3</sup> ПГ.

Для відносин щільностей газової суміші й ПГ (при стандартних умовах) з рівняння (11) одержимо:

$$\frac{\rho_{стс}}{\rho_{ст}} = 1 + \gamma_{кв}; \quad \frac{\rho_{ст}}{\rho_{стс}} = \frac{1}{1 + \gamma_{кв}}. \quad (12)$$

У газопроводах перекачування ПГ звичайно використовують витратоміри, де застосовуються стандартні звужуючі устаткування (СЗУ) [6, 7]. Розглянемо діафрагмовий витратомір, для якого використовується наступна формула для визначення витрати газу (СГ) через діафрагму [6–8]:

$$\dot{m} = \alpha \varepsilon \frac{\pi d_2^2}{4} \sqrt{2 \Delta p \rho_2}, \quad (13)$$

де  $\dot{m}$  – масова витрата газу (СГ), кг/с;

$\alpha$  – коефіцієнт витрати;

$\varepsilon$  – коефіцієнт розширення ( $\varepsilon < 1$ );

$d_2$  – діаметр прохідного перетину діафрагми (ПДФ), м;

$\Delta p = p_1 - p_2$  – перепад тисків газу в ПДФ, Па;

$p_1$  – абсолютний тиск СГ перед ПДФ, Па;

$p_2$  – абсолютний тиск СГ в ПДФ, Па;

$\rho_2$  – щільність СГ в ПДФ, кг/м<sup>3</sup>.

У витратомірі  $\rho_2$  визначається з урахування газової постійної ПГ, а не СГ:

$$\rho_2 = \frac{p_2}{ZR_{пг}T_2}, \quad (14)$$

де  $Z$  – коефіцієнт стиску СГ в ПДФ;

$R_{пг}$  – газова постійна чистого ПГ, Дж/(кг·К).

Значення  $p_2$  та  $T_2$  вимірюються датчиками, а значення  $R_{пг}$  розраховується згідно з уведеним у витратомір значенням  $\rho_{ст}$  (стандартна щільність чистого ПГ). Для СГ (а не чистого ПГ) потрібно враховувати щільність СГ  $\rho_{стс} = (1 + \gamma_{кв}) \rho_{ст}$  і на основі  $\rho_{стс}$  визначати  $R_c$  – газову постійну СГ (Дж/(кг·К)). Для щільності СГ у СДф напишемо вираження:

$$\rho_{2с} = \frac{p_2}{ZR_cT_2}, \quad (15)$$

Для відношення  $\rho_{2с}/\rho_2$  з формул (14) і (15) одержимо:

$$\frac{\rho_{2с}}{\rho_2} = \frac{p_2}{ZR_cT_2} \frac{ZR_{пг}T_2}{p_2} = \frac{R_{пг}}{R_c}, \quad (16)$$

Для стандартних умов ( $\rho_{стс}R_c = \rho_{ст}R_{пг}$ ) напишемо формулу з урахуванням рівнянь (12):

$$\frac{R_{пг}}{R_c} = \frac{\rho_{стс}}{\rho_{ст}} = 1 + \gamma_{кв},$$

звідки, з урахуванням (16), одержимо:

$$\frac{\rho_{2c}}{\rho_2} = \frac{R_{пг}}{R_c} = 1 + \gamma_{кв} \quad (17)$$

З формул (13) і (17) для масової витрати СГ  $\dot{m}_c$  (кг/с), з урахуванням  $\rho_{2c}$ , одержимо вирази:

$$\begin{aligned} \dot{m}_c &= \alpha \varepsilon \frac{\pi d_2^2}{4} \sqrt{2 \Delta p \rho_2 \frac{\rho_{2c}}{\rho_2}}; \\ \dot{m}_c &= \alpha \varepsilon \frac{\pi d_2^2}{4} \sqrt{2 \Delta p \rho_2 (1 + \gamma_{кв})}; \\ \dot{m}_c &= \dot{m} \sqrt{1 + \gamma_{кв}}, \end{aligned} \quad (18)$$

де  $\dot{m} = \rho_{ст} Q_{ст}$  – масова витрата газу, яка обчислює діафрагмовий витратомір, що використовує  $\rho_{ст}$  та  $R_{пг}$  замість  $\rho_{стc}$  та  $R_c$ .

Для стандартної об'ємної витрати СГ напишемо вираження з урахуванням формул (11) та (18):

$$Q_{стc} = \frac{\dot{m}_c}{\rho_{стc}} = \frac{\dot{m} \sqrt{1 + \gamma_{кв}}}{(1 + \gamma_{кв}) \rho_{ст}} = \frac{\dot{m}}{\rho_{ст} \sqrt{1 + \gamma_{кв}}},$$

звідки одержимо:

$$Q_{стc} = \frac{\rho_{ст} Q_{ст}}{\rho_{ст} \sqrt{1 + \gamma_{кв}}} = \frac{Q_{ст}}{\sqrt{1 + \gamma_{кв}}}, \quad (19)$$

де  $Q_{ст} = \dot{m} / \rho_{ст}$  – це об'ємна витрата газу, що обчислюється діафрагмовим витратоміром з використанням  $\rho_{ст}$  та  $R_{пг}$  замість  $\rho_{стc}$  та  $R_c$ .

#### Кінцеві формули потужності приводу ВЦН.

Перепишемо формулу (9) з урахуванням формули (19):

$$N_{пр} = \frac{0,004}{\eta_{м} \eta_{пол}} \frac{n}{n-1} \frac{Z_1}{\sqrt{1 + \gamma_{кв}}} T_1 \left( \varepsilon^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) Q_{ст}. \quad (20)$$

Якщо розраховувати  $N_{пр}$  для теоретичних режимів роботи ГПА (формула (10)), то значення  $Q_{стc}$  задаються і необхідно визначити  $R_c \dot{m}_c = R_c \rho_{стc} Q_{стc}$ , а так як для будь-якого газу при

стандартних умовах  $R_c \rho_{стc} = R \rho = \text{const}$ , то з (10) одержимо аналогічну формулу для  $N_{пр}$ :

$$N_{пр} = \frac{0,004}{\eta_{м} \eta_{гд}} \frac{k}{k-1} Z_1 T_1 \left( \varepsilon^{\frac{k-1}{k \eta_{пол}}} - 1 \right) Q_{стc}, \quad (21)$$

де  $Q_{стc}$  враховує стандартну об'ємну витрату СГ із щільністю  $\rho_{стc} = (1 + \gamma_{кв}) \rho_{ст}$ .

Для спрощених розрахунків можна ухвалювати наступні допущення:

$$\frac{Z_1}{\eta_{гд}} \approx 1; \quad \frac{Z_1}{\eta_{гд} \sqrt{1 + \gamma_{кв}}} \approx 1.$$

Основні й спрощені формули для розрахунків  $N_{пр}$  показані в табл. 1.

#### Обговорення результатів

При розрахунках  $N_{пр}$  уперше врахована величина  $\eta_{гд}$ , що показано у формулах табл. 1. У табл. 1 дані рекомендації зі значень величин  $\eta_{м}$  та  $\eta_{гд}$ , де  $\eta_{гд}$  розраховані по формулі (3), (4) при  $\beta_{гд} = \beta_{пер} = \gamma_{гдп} = 0,01 \dots 0,02$  [3, 4].

Формули (20) і (21) показують, що для практичних і теоретичних досліджень  $N_{пр}$  необхідно враховувати виміри (витратоміри газу компресорної станції) або завдання (прогнозована витрата газу на компресорній станції) витрати перекачуемого газу.

Урахування добутку  $\rho_{ст} R$  і добової витрати перекачуемого газу дозволяє враховувати константу 0,004, що спрощує формулу для  $N_{пр}$ .

Розгляд ПГ як СГ (формула (11)) дозволила коректувати масову й об'ємну витрату перекачуемого ПГ, вимірюваного в діафрагмовому витратомірі (формули (18)–(20)).

Таблиця 1 – Формули для визначення  $N_{пр}$  при витраті газу в стандартних м<sup>3</sup>

Розрахунки експлуатаційних параметрів ВЦН ( $Q_{ст}$ виміряється діафрагмовим витратоміром)		Розрахунки теоретичних параметрів ВЦН	
$N_{пр} = \frac{0,004}{\eta_{м} \eta_{пол} \eta_{гд}} \frac{n}{n-1} \frac{Z_1}{\sqrt{1 + \gamma_{кв}}} T_1 \left( \varepsilon^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) Q_{ст}$		$N_{пр} = \frac{0,004}{\eta_{м} \eta_{гд}} \frac{k}{k-1} Z_1 T_1 \left( \varepsilon^{\frac{k-1}{k \eta_{пол}}} - 1 \right) Q_{стc}$	
Спрощені формули			
$N_{пр} = \frac{0,004}{\eta_{м} \eta_{пол}} \frac{n}{n-1} T_1 \left( \varepsilon^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) Q_{ст}$		$N_{пр} = \frac{0,004}{\eta_{м}} \frac{k}{k-1} T_1 \left( \varepsilon^{\frac{k-1}{k \eta_{пол}}} - 1 \right) Q_{стc}$	
Якщо $Q_{ст}$ в млн. м <sup>3</sup> /сутки, то $N_{пр}$ в МВт. Якщо $Q_{ст}$ в тис. м <sup>3</sup> /сутки, то $N_{пр}$ в кВт.			
Рекомендована оцінка значень $\eta_{м}$ та $\eta_{гд}$			
Нормальне (добре)	Середнє (задовільне)	Низьке (незадовільне)	
$\eta_{м} = 0,98; \eta_{гд} = 0,970$	$\eta_{м} = 0,975; \eta_{гд} = 0,956$	$\eta_{м} = 0,97; \eta_{гд} = 0,942$	

## Висновки

Отримані формули для  $N_{пр}$ , де враховуються три ККД ВЦН (механічний, політропний, газодинамічний, табл. 1) і наявність конденсату й води перекачувального ПГ (формула (18) розрахунків  $N_{пр}$  для експлуатованих ВЦН). Новий газодинамічний ККД враховує втрати тиску газу в ступенях ВЦН і втрати енергії через тертя робочих коліс ВЦН у газовому середовищі.

## Список літератури

1. Олейник Ю. А., Сапрыкин С. А., Науменко С. П. Методы определения КПД центробежного нагнетателя с учетом потерь энергии. *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2019. № 3(1328). С. 36–41. Бібліогр.: 7 назв. ISSN 2078-774X (print), ISSN 2707-7543 (on-line). doi: 10.20998/2078-774X.2019.03.05.
2. Михайлов А. К., Ворошилов В. П. *Компрессорные машины: учеб. для вузов*. Москва: Энергоатомиздат, 1989. 288 с.
3. Рис В.Ф. *Центробежные компрессорные машины*. Москва-Ленинград: Машиностроение, 1964. 336 с.
4. Ивановский Н. Н., Криворотко В. Н. *Центробежные нагнетатели природного газа: учеб. пособие для техникумов*. Москва: Недра, 1994. 176 с.
5. Олейник Ю. А., Сапрыкин С. А., Науменко С. П. Анализ методов определения политропного КПД центробежного нагнетателя. *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2018. № 11(1287). С. 67–72. Бібліогр.: 6 назв. ISSN 2078-774X (print), ISSN 2707-7543 (on-line). doi: 10.20998/2078-774X.2018.11.11.
6. Кремлевский П. П. *Расходомеры и счетчики количества: справочник*. Кн. 1. Изд. 4-е. Ленинград: Машиностроение, 1989. 701 с.
7. Кремлевский П. П. *Расходомеры и счетчики количества: справочник*. Кн. 1. Изд. 5-е. Санкт-Петербург: Политехника, 2002. 409 с.
8. *РД 80-213-80. Правила измерения расходов газов и жидкостей стандартными сужающимися устройствами*. Москва: Изд-во стандартов, 1982. 333 с. Введен 01.07.1982.

## References (transliterated)

1. Oleynik Yu., Saprykin S., Naumenko S. (2019), "Methods of Determination of Efficiency of the Centrifugal Super-charger Taking into Account Energy Losses", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 3(1328), pp. 36–41, ISSN 2078-774X (print), ISSN 2707-7543 (on-line), doi: 10.20998/2078-774X.2019.03.05.
2. Mihaylov A. K., Voroshilov V. P. (1989), *Kompressornye mashiny: ucheb. dlja vuzov* [Compressor machines: textbook for universities], Energoatomizdat, Moscow, 288 p.
3. Ris V. F. (1964), *Centrobezhnye kompressornye mashiny* [Centrifugal compressor machines], Mashinostroenie, Moscow-Leningrad, 336 p.
4. Ivanovskiy N. N., Kpivorotko V. N. (1994), *Centrobezhnye nagnetateli prirodnoogo gaza: ucheb. posobie dlja tehnikumov* [Centrifugal Natural Gas Injectors: Tutorial for Technical Schools], Nedra, Moscow, 176 p.
5. Oleynik Yu., Saprykin S., Naumenko S. (2018), "Analyzing the Methods of Computation of the Polytropic Coefficient of Efficiency of the Centrifugal Supercharger", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 11(1287), pp. 67–72, ISSN 2078-774X (print), ISSN 2707-7543 (on-line), doi: 10.20998/2078-774X.2018.11.11.
6. Kremlovskiy P. P. (1989), *Rashodometry i schetchiki kolichestva: spravochnik* [Flowmeters and quantity counters: Reference book], vol. 1, Mashinostroenie, Leningrad, 701 p.
7. Kremlovskiy P. P. (2002), *Rashodometry i schetchiki kolichestva: spravochnik* [Flowmeters and quantity counters: Reference book], vol. 1, Polytechnica, St. Petersburg, 409 p.
8. (1982), *RD 80-213-80. Pravila izmerenija rashodov gazov i zhidko-stej standartnymi suzhajushhimisja ustrojstvami. KF VNIIFTRI* [Regulations for measurement of gas and liquid flow rates by standard converging devices], Standards Publishing, Moscow, 333 p.

Надійшла (received) 17.10.2020

## 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, провідний науковий співробітник відділу компресорних станцій, Український науково-дослідний інститут природних газів, Харків, Україна.

**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>.