

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

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КПД ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАГНЕТАТЕЛЯ С УЧЕТОМ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ

Получены три метода определения коэффициента полезного действия (КПД) центробежного нагнетателя (ЦБН), где кроме тепловых потерь и потерь на трение в подшипниках и уплотнениях ЦБН учитываются потери энергии для следующих процессов: трение рабочего колеса ЦБН в газовой среде, перетекание газа через уплотнения ЦБН, движение газа в межступенчатых полостях ЦБН. Методы учитывают три различных подхода к расчету потерь энергии, связанных с движением газа в межступенчатых полостях ЦБН. Рассчитаны практические значения для КПД ЦБН по полученным методам.

Ключевые слова: центробежный нагнетатель, коэффициент полезного действия, потери энергии.

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

МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ККД ВІДЦЕНТРОВОГО НАГНІТАЧА З УРАХУВАННЯМ ВИТРАТ ЕНЕРГІЇ

Отримано три методи визначення коефіцієнта корисної дії (ККД) відцентрового нагнітача (ВЦН), де крім теплових втрат і втрат на тертя в підшипниках і ущільненнях ВЦН враховуються втрати енергії для наступних процесів: тертя робочого колеса ВЦН в газовій середовищі, перетікання газу через ущільнення ВЦН, рух газу в міжступінчатих порожнинах ВЦН. Методи враховують три різних підходи до розрахунку втрат енергії, пов'язаних з рухом газу в міжступінчатих порожнинах ВЦН. Розраховано практичні значення для ККД ВЦН по одному з отриманих методів.

Ключові слова: відцентровий нагнітач, коефіцієнт корисної дії, втрати енергії.

YU. OLEYNIK, S. SAPRYKIN, S. NAUMENKO

METHODS OF DETERMINATION OF EFFICIENCY OF THE CENTRIFUGAL SUPERCHARGER TAKING INTO ACCOUNT ENERGY LOSSES

Three methods of determination of the efficiency of the centrifugal supercharger (CS) where except thermal losses and losses on friction in bearings and consolidations of CS losses of energy for the following processes are considered are received: friction of the CS driving wheel in the gas environment, overflowing of gas through consolidations of CS, gas flow in inter step cavities of CS. Methods consider three various approaches to calculation of the losses of energy connected with gas flow in inter step cavities of CS. The first method considers gasdynamic losses depending on an expense and density of gas. The second method considers gasdynamic losses depending on full specific work in CS steps. The third method considers gasdynamic losses depending on specific work of Euler in CS steps. Calculation of pressure losses is carried out to CS steps for 5–7 step CS taking into account practical data on the CS parameters. Practical values for CS efficiency by one of the received methods are calculated. In calculations comparisons of efficiency of CS taking into account all losses of energy and without gasdynamic losses of energy are carried out.

Key words: centrifugal supercharger, efficiency, energy losses.

Введение

Для оценки мощности и технического состояния центробежного нагнетателя (ЦБН) и привода ЦБН, необходимо определять коэффициент полезного действия (КПД) ЦБН. При определении КПД ЦБН нужно учитывать внутренние и внешние потери энергии в ЦБН [1]. Внешние потери энергии характеризуются механическим КПД ЦБН $\eta_{\text{мех}}$, который учитывает трение в подшипниках и уплотнениях ротора [1]. Внутренние потери энергии характеризуются внутренним КПД ЦБН $\eta_{\text{вн}}$, который должен учитывать следующие потери энергии [1–3]:

- 1) тепловые (отдача тепла от газа в ЦБН во внешнюю среду);
- 2) динамические в рабочем колесе (РК) ЦБН (трение газа о РК, перетекание газа через уплотнения РК и ротора);
- 3) газодинамические между РК (трение газа, преодоление им сопротивлений и поворотов в

проточных частях между ступенями ЦБН).

Тепловые потери учитывает политропный КПД $\eta_{\text{пол}}$ [1–3] и при эксплуатации ЦБН обычно принимают допущение, что $\eta_{\text{вн}} \approx \eta_{\text{пол}}$, пренебрегая динамическими и газодинамическими потерями. Это происходит потому, что тепловые потери самые большие среди потерь внутренней энергии ЦБН и методы определения $\eta_{\text{пол}}$ хорошо изучены и разработаны [4, 5]. Динамические и газодинамические потери могут быть незначительными, составляя 1–3% полезной работы, совершаемой ЦБН. Но современные ЦБН растут по мощности и получают 6...32 МВт от привода. Соответственно даже 1% потерь мощности будет составлять 0,06...0,32 МВт, что существенно при анализе энергии и мощности ЦБН и привода ЦБН.

Не учёт потерь энергии в ЦБН увеличит его КПД и уменьшит рассчитываемую мощность (энергию) привода ЦБН. Лишняя мощность, подводимая к ЦБН, приведет к лишним затратам энергии (топлива) приводом ЦБН.

© Ю. А. Олейник, С. А. Сапрыкин, С. П. Науменко, 2019

Значения $\eta_{\text{мех}}$ известны и их можно задавать [1–3]. При определении $\eta_{\text{вн}}$ учитываются только тепловые потери [6], что недостаточно для точного значения $\eta_{\text{вн}}$. Методы определения $\eta_{\text{вн}}$ рассмотрены в общем виде в работе [7], но для точных расчетов $\eta_{\text{вн}}$ необходимы математические модели, в которых будут не в общем, а в конкретном виде рассчитываться внутренние потери энергии в ЦБН.

Цель работы

Получить математические методы определения КПД ЦБН с учетом потерь энергии в ЦБН.

КПД и удельные энергии ЦБН

Для КПД ЦБН $\eta_{\text{цбн}}$ запишем выражение [1]:

$$\eta_{\text{цбн}} = \eta_{\text{мех}} \eta_{\text{вн}}. \quad (1)$$

Величина $\eta_{\text{мех}}$ задается, а $\eta_{\text{вн}}$ будем определять с учетом всех потерь энергии в ЦБН.

Для упрощения математических моделей энергетического баланса ЦБН будем использовать удельные энергии (УЭ), показывающие потери энергии и полезную работу (энергию) в ЦБН, затрачиваемые на 1 кг перемещаемого и сжимаемого газа.

Для $\eta_{\text{вн}}$ запишем выражение [1–4]:

$$\eta_{\text{вн}} = \frac{l_{\text{пол}}}{l_{\text{вн}}}, \quad (2)$$

где $l_{\text{пол}}$ – УЭ, передаваемая 1 кг газа в ЦБН при политропном сжатии газа, Дж/кг;

$l_{\text{вн}}$ – внутренняя УЭ (с учетом потерь УЭ), которую ротор ЦБН получает от привода на сжатие и перемещение 1 кг газа, Дж/кг.

Зная значения $\eta_{\text{мех}}$, $\eta_{\text{вн}}$, $l_{\text{пол}}$, можно определять $l_{\text{вн}}$ и удельную работу привода ЦБН $l_{\text{пр}}$ [1–3]:

$$l_{\text{пол}} = \eta_{\text{мех}} l_{\text{вн}} = \eta_{\text{мех}} \eta_{\text{вн}} l_{\text{пр}} = \eta_{\text{цбн}} l_{\text{пр}}. \quad (3)$$

При эксплуатации ЦБН, или выборе привода ЦБН, определяют $l_{\text{пол}}$ и затем находят $l_{\text{вн}}$ и $l_{\text{пр}}$. При выборе ЦБН для имеющегося привода, оценивают $l_{\text{пр}}$ и затем определяют $l_{\text{вн}}$ и $l_{\text{пол}}$. Чтобы проводить эти расчеты, необходимо иметь математическую модель для определения $l_{\text{вн}}$ и $\eta_{\text{вн}}$, а значения $\eta_{\text{мех}}$ задаются.

Общая формула для $l_{\text{вн}}$ с учетом потерь энергии

Для $l_{\text{вн}}$ запишем выражения [1–3]:

$$l_{\text{вн}} = l_{\text{пол}} + l_t + l_{\text{трд}} + l_{\text{пер}} + l_{\text{гдп}} + l_{\Delta\text{К}}; \quad (4)$$

$$l_{\text{ад}} = l_{\text{пол}} + l_t;$$

$$l_{\text{дп}} = l_{\text{трд}} + l_{\text{пер}} + l_{\text{гдп}},$$

где l_t – УЭ, теряемая газом (1 кг газа) в ЦБН за счет отдачи тепла во внешнюю среду, Дж/кг.

$l_{\text{трд}}$ – УЭ, теряемая за счет трения и смятия газа на поверхности диска РК, Дж/кг;

$l_{\text{пер}}$ – УЭ, теряемая на внутренние перетечки газа через уплотнения ротора в РК, Дж/кг;

$l_{\text{гдп}}$ – газодинамические потери УЭ газа: потери давления из-за трения, преодоления местных сопротивлений и поворотов в проточных частях ЦБН, Дж/кг;

$l_{\Delta\text{К}}$ – УЭ, затрачиваемая на увеличение кинетической энергии газа, выходящего из ЦБН, Дж/кг;

$l_{\text{ад}}$ – УЭ, передаваемая газу в ЦБН при адиабатном сжатии газа, Дж/кг;

$l_{\text{дп}}$ – динамические потери УЭ газа в ЦБН, Дж/кг.

При торможении потока газа, его энергия переходит в увеличение давления и температуры газа, поэтому величину $l_{\Delta\text{К}}$ будем считать полезной работой, переходящей в $l_{\text{ад}}$. При этом допущении запишем уравнение (4) в виде:

$$l_{\text{вн}} = l_{\text{ад}} + l_{\text{трд}} + l_{\text{пер}} + l_{\text{гдп}}. \quad (5)$$

Для анализа УЭ ЦБН используется величина $l_{\text{Э}}$ (Дж/кг) – удельная работа Эйлера, которую РК сообщает газу [1–3]:

$$l_{\text{Э}} = l_{\text{вн}} - l_{\text{трд}} - l_{\text{пер}}, \quad (6)$$

а с учетом уравнения (5)

$$l_{\text{Э}} = l_{\text{ад}} + l_{\text{гдп}}. \quad (7)$$

Определение $l_{\text{вн}}$ и $\eta_{\text{цбн}}$ при зависимости от расхода и плотности газа в ЦБН

Запишем формулы для коэффициента потерь на трение диска РК $\beta_{\text{трд}}$ и коэффициента потерь на перетечки газа $\beta_{\text{пер}}$ [1, 2]:

$$\beta_{\text{трд}} = \frac{l_{\text{трд}}}{l_{\text{Э}}}; \quad \beta_{\text{пер}} = \frac{l_{\text{пер}}}{l_{\text{Э}}},$$

и определим $l_{\text{Э}}$ из (6) с учетом $\beta_{\text{трд}}$ и $\beta_{\text{пер}}$:

$$l_{\text{Э}} = l_{\text{вн}} - \beta_{\text{трд}} l_{\text{Э}} - \beta_{\text{пер}} l_{\text{Э}};$$

$$l_{\text{Э}} = \frac{l_{\text{вн}}}{1 + \beta_{\text{трд}} + \beta_{\text{пер}}}. \quad (8)$$

Подставим $l_{\text{Э}}$ из уравнения (8) в формулу (7):

$$\frac{l_{\text{вн}}}{1 + \beta_{\text{трд}} + \beta_{\text{пер}}} = l_{\text{ад}} + l_{\text{гдп}};$$

$$\ell_{\text{вн}} = (1 + \beta_{\text{трд}} + \beta_{\text{пер}})(\ell_{\text{ад}} + \ell_{\text{гдп}}), \quad (9)$$

Подставим формулу (9) в выражение (2) и получим:

$$\eta_{\text{вн}} = \frac{1}{1 + \beta_{\text{трд}} + \beta_{\text{пер}}} \frac{\ell_{\text{пол}}}{\ell_{\text{ад}} + \ell_{\text{гдп}}}. \quad (10)$$

Для определения величины $\ell_{\text{ад}}$ запишем [1–3]:

$$\ell_{\text{ад}} = \frac{\ell_{\text{пол}}}{\eta_{\text{пол}}}. \quad (11)$$

Величина $\ell_{\text{гдп}}$ появляется из-за потерь мощности $\Delta p Q_{\text{ср}}$ [1], где Δp (Па) – давление газа, теряемое из-за газодинамических потерь, $Q_{\text{ср}}$ (м³/с) – средний объемный расход газа в ЦБН. Разделим $\Delta p Q_{\text{ср}}$ на $\rho_{\text{ср}} Q_{\text{ср}}$ ($\rho_{\text{ср}}$ – средняя плотность газа, кг/м³) [1] и получим для $\ell_{\text{гдп}}$:

$$\ell_{\text{гдп}} = \frac{\Delta p}{\rho_{\text{ср}}}. \quad (12)$$

Подставим (12) и (11) в (10):

$$\eta_{\text{вн}} = \frac{1}{1 + \beta_{\text{трд}} + \beta_{\text{пер}}} \frac{\ell_{\text{пол}}}{\frac{\ell_{\text{пол}}}{\eta_{\text{пол}}} + \frac{\Delta p}{\rho_{\text{ср}}}};$$

$$\eta_{\text{вн}} = \frac{1}{1 + \beta_{\text{трд}} + \beta_{\text{пер}}} \frac{1}{\frac{1}{\eta_{\text{пол}}} + \frac{\Delta p}{\rho_{\text{ср}}} \frac{1}{\ell_{\text{пол}}}}. \quad (13)$$

Введем обозначения:

$$\eta_{\text{дрк}} = \frac{1}{1 + \beta_{\text{трд}} + \beta_{\text{пер}}}; \quad (14)$$

$$\varphi_{\text{гд}} = \frac{\Delta p}{\rho_{\text{ср}}} \frac{1}{\ell_{\text{пол}}}; \quad (15)$$

$$\eta_{\Delta p} = 1 - \varphi_{\text{гд}},$$

где $\eta_{\text{дрк}}$ – динамический КПД РК ЦБН, учитывающий потери УЭ в РК ЦБН,

$\varphi_{\text{гд}}$ – коэффициент газодинамических потерь давления между ступенями ЦБН;

$\eta_{\Delta p}$ – газодинамический КПД потерь давления между ступенями ЦБН.

С учетом выражений (14) и (15) для $\eta_{\text{вн}}$ (формула (13)) и $\eta_{\text{цбн}}$ (формула (1)) получим:

$$\eta_{\text{вн}} = \frac{\eta_{\text{дрк}}}{1 + \varphi_{\text{гд}}} = \frac{\eta_{\text{дрк}}}{1 + \varphi_{\text{гд}}} \eta_{\text{пол}};$$

$$\eta_{\text{цбн}} = \eta_{\text{мех}} \frac{\eta_{\text{дрк}}}{1 + \varphi_{\text{гд}}} \eta_{\text{пол}}.$$

Определение $\ell_{\text{вн}}$ и $\eta_{\text{цбн}}$ при зависимости

$$\ell_{\text{гдп}} \text{ от } \ell_{\text{э}}(1 + \beta_{\text{трд}} + \beta_{\text{пер}})$$

В литературе [2] рассматривается зависимость $\ell_{\text{гдп}}$ от полной удельной работы (полного удельного напора) ступени по сжатию газа:

$$\ell_{\text{гдп}} = \gamma_{\text{гдп}} \ell_{\text{п}}; \quad (16)$$

$$\ell_{\text{п}} = \ell_{\text{э}}(1 + \beta_{\text{трд}} + \beta_{\text{пер}}),$$

где $\gamma_{\text{гдп}}$ – коэффициент газодинамических потерь УЭ при $\ell_{\text{гдп}}(\ell_{\text{п}})$;

$\ell_{\text{п}}$ – полная удельная работа по сжатию газа в ступени ЦБН, Дж/кг.

Подставим формулу (16) в уравнение (7):

$$\ell_{\text{э}} = \ell_{\text{ад}} + \gamma_{\text{гдп}} \ell_{\text{п}};$$

$$\ell_{\text{э}} = \ell_{\text{ад}} + \gamma_{\text{гдп}} \ell_{\text{э}}(1 + \beta_{\text{трд}} + \beta_{\text{пер}});$$

$$\ell_{\text{э}} - \gamma_{\text{гдп}} \ell_{\text{э}}(1 + \beta_{\text{трд}} + \beta_{\text{пер}}) = \ell_{\text{ад}};$$

$$\ell_{\text{э}} = \frac{1}{1 - (1 + \beta_{\text{трд}} + \beta_{\text{пер}})\gamma_{\text{гдп}}} \ell_{\text{ад}},$$

после чего подставим значение $\ell_{\text{э}}$ из уравнения (8), чтобы определить $\ell_{\text{вн}}$:

$$\frac{\ell_{\text{вн}}}{1 + \beta_{\text{трд}} + \beta_{\text{пер}}} = \frac{1}{1 - (1 + \beta_{\text{трд}} + \beta_{\text{пер}})\gamma_{\text{гдп}}} \ell_{\text{ад}};$$

$$\ell_{\text{вн}} = \frac{1 + \beta_{\text{трд}} + \beta_{\text{пер}}}{1 - (1 + \beta_{\text{трд}} + \beta_{\text{пер}})\gamma_{\text{гдп}}} \frac{\ell_{\text{пол}}}{\eta_{\text{пол}}};$$

$$\ell_{\text{вн}} = \frac{1}{\frac{1}{1 + \beta_{\text{трд}} + \beta_{\text{пер}}} - \gamma_{\text{гдп}}} \frac{\ell_{\text{пол}}}{\eta_{\text{пол}}};$$

$$\bar{\ell}_{\text{вн}} = \frac{1}{\eta_{\text{дрк}} - \gamma_{\text{гдп}}} \frac{\ell_{\text{пол}}}{\eta_{\text{пол}}}. \quad (17)$$

Внутренняя УЭ в формуле (17) обозначена $\bar{\ell}_{\text{вн}}$ и зависит от $\gamma_{\text{гдп}}$ ($\ell_{\text{вн}}$ зависит от $\Delta p/\rho_{\text{ср}}$).

Для внутреннего КПД ЦБН из (2) и (17):

$$\bar{\eta}_{\text{вн}} = \frac{\ell_{\text{пол}}}{\bar{\ell}_{\text{вн}}};$$

$$\bar{\eta}_{\text{вн}} = \frac{\ell_{\text{пол}}}{\frac{1}{\eta_{\text{дрк}} - \gamma_{\text{гдп}}} \frac{\ell_{\text{пол}}}{\eta_{\text{пол}}}};$$

$$\bar{\eta}_{\text{вн}} = (\eta_{\text{дрк}} - \gamma_{\text{гдп}}) \eta_{\text{пол}}. \quad (18)$$

Внутренний КПД ЦБН в формуле (18) обозначен $\bar{\eta}_{\text{вн}}$ и зависит от $\gamma_{\text{гдп}}$.

Для КПД ЦБН из (1) и (18) получим:

$$\bar{\eta}_{\text{цбн}} = \eta_{\text{мех}} (\eta_{\text{дрк}} - \gamma_{\text{гдп}}) \eta_{\text{пол}},$$

где КПД ЦБН, обозначаемый $\bar{\eta}_{\text{цбн}}$, определяется с учетом $\bar{\eta}_{\text{вн}}$ а не $\eta_{\text{вн}}$.

Определение $l_{\text{вн}}$ и $\eta_{\text{цбн}}$ при зависимости $l_{\text{гдп}}$ от $l_{\text{э}}$

Примем допущение, что $l_{\text{гдп}}$ зависит не от $l_{\text{п}}$ $= l_{\text{э}}(1 + \beta_{\text{трд}} + \beta_{\text{пер}})$, а от $l_{\text{э}}$ (как $l_{\text{трд}}$ и $l_{\text{пер}}$):

$$\beta_{\text{гдп}} = \frac{l_{\text{гдп}}}{l_{\text{э}}},$$

где $\beta_{\text{гдп}}$ – коэффициент газодинамических потерь при $l_{\text{гдп}}(l_{\text{э}})$.

Для $l_{\text{э}}$ вместо формулы (6) запишем новое выражение с учетом дополнительных потерь $l_{\text{гдп}}$:

$$l_{\text{э}} = l_{\text{вн}} - l_{\text{трд}} - l_{\text{пер}} - l_{\text{гдп}},$$

при этом получим, что $l_{\text{э}} = l_{\text{ад}}$ (формула (5)) и далее разделим обе части уравнения на $l_{\text{ад}}$

$$1 = \frac{l_{\text{вн}}}{l_{\text{ад}}} - \beta_{\text{трд}} - \beta_{\text{пер}} - \beta_{\text{гдп}};$$

$$l_{\text{вн}} = (1 + \beta_{\text{трд}} + \beta_{\text{пер}} + \beta_{\text{гдп}}) l_{\text{ад}};$$

$$\hat{l}_{\text{вн}} = \left(\frac{1}{\eta_{\text{дрк}}} + \beta_{\text{гдп}} \right) \frac{l_{\text{пол}}}{\eta_{\text{пол}}}. \quad (19)$$

Внутренняя УЭ в формуле (19) обозначена $\hat{l}_{\text{вн}}$ и зависит от $\beta_{\text{гдп}}$ ($\bar{l}_{\text{вн}}$ зависит от $\gamma_{\text{гдп}}$, а $l_{\text{вн}}$ зависит от $\Delta p / \rho_{\text{ср}}$).

Для внутреннего КПД ЦБН из (2) и (19) получим новое решение:

$$\hat{\eta}_{\text{вн}} = \frac{l_{\text{пол}}}{\hat{l}_{\text{вн}}};$$

$$\hat{\eta}_{\text{вн}} = \frac{l_{\text{пол}}}{\frac{1}{\frac{1}{\eta_{\text{дрк}}} + \beta_{\text{гдп}}} l_{\text{пол}}};$$

$$\hat{\eta}_{\text{вн}} = \frac{1}{\frac{1}{\eta_{\text{дрк}}} + \beta_{\text{гдп}}} \eta_{\text{пол}};$$

$$\hat{\eta}_{\text{вн}} = \frac{\eta_{\text{дрк}}}{1 + \eta_{\text{дрк}} \beta_{\text{гдп}}} \eta_{\text{пол}}. \quad (20)$$

КПД ЦБН в формуле (20) обозначен $\hat{\eta}_{\text{вн}}$ и зависит от $\beta_{\text{гдп}}$.

Для $\hat{\eta}_{\text{цбн}}$ из (1) и (20) получим новое решение:

$$\hat{\eta}_{\text{цбн}} = \eta_{\text{мех}} \frac{\eta_{\text{дрк}}}{1 + \beta_{\text{гдп}} \eta_{\text{дрк}}} \eta_{\text{пол}}. \quad (21)$$

КПД ЦБН в формуле (21) обозначен $\hat{\eta}_{\text{цбн}}$, чтобы не путать его с $\eta_{\text{цбн}}$ и $\bar{\eta}_{\text{цбн}}$.

Методы определения и значения внутреннего КПД ЦБН и КПД ЦБН

Разработаны три новых метода определения внутреннего КПД ЦБН и КПД ЦБН (табл. 1). Методы различаются по определению $l_{\text{гдп}}$, а величины $l_{\text{трд}}$ и $l_{\text{пер}}$ определяются одинаково во всех методах (табл. 1). В каждом методе внутренний КПД определяется по-разному, а КПД ЦБН равен произведению внутреннего и механического КПД (табл. 1). Методы отличаются учетом трех новых величин: $\eta_{\text{дрк}}$, $\varphi_{\text{гд}}$, $\beta_{\text{гдп}}$.

Зная значения КПД ЦБН и рассчитав $l_{\text{пол}}$, можно определять $l_{\text{вн}}$ и $l_{\text{пр}}$ (формулы (2), (3)). В данной работе оценены значения внутреннего КПД ЦБН и КПД ЦБН, показывающие насколько величины $l_{\text{вн}}$ и $l_{\text{пр}}$ могут быть больше $l_{\text{пол}}$.

Таблица 1 – Методы определения потерь, внутреннего КПД ЦБН и КПД ЦБН

Метод	Определение $l_{\text{трд}}$, $l_{\text{пер}}$	Определение $l_{\text{гдп}}$	Определение внутреннего КПД ЦБН	Определение КПД ЦБН
1	$l_{\text{трд}} = \beta_{\text{трд}} l_{\text{э}}$	$l_{\text{гдп}} = \frac{\Delta p}{\rho_{\text{ср}}}$	$\eta_{\text{вн}} = \frac{\eta_{\text{дрк}}}{1 + \varphi_{\text{гд}} \eta_{\text{пол}}} \eta_{\text{пол}}$	$\eta_{\text{цбн}} = \eta_{\text{мех}} \eta_{\text{вн}}$
2		$l_{\text{гдп}} = \gamma_{\text{гдп}} l_{\text{э}} (1 + \beta_{\text{трд}} + \beta_{\text{пер}})$	$\bar{\eta}_{\text{вн}} = (\eta_{\text{дрк}} - \gamma_{\text{гдп}}) \eta_{\text{пол}}$	$\bar{\eta}_{\text{цбн}} = \eta_{\text{мех}} \bar{\eta}_{\text{вн}}$
3	$l_{\text{пер}} = \beta_{\text{пер}} l_{\text{э}}$	$l_{\text{гдп}} = \beta_{\text{гдп}} l_{\text{э}}$	$\hat{\eta}_{\text{вн}} = \frac{\eta_{\text{дрк}}}{1 + \beta_{\text{гдп}} \eta_{\text{дрк}}} \eta_{\text{пол}}$	$\hat{\eta}_{\text{цбн}} = \eta_{\text{мех}} \hat{\eta}_{\text{вн}}$

Запишем для КПД ЦБН формулы с учетом табл. 1:

$$\eta_{\text{цбн}} = \eta_{\text{мех}} \eta_{\text{гд}} \eta_{\text{пол}} = \eta_{\text{мех}} \eta_{\text{вн}};$$

$$\bar{\eta}_{\text{цбн}} = \eta_{\text{мех}} \bar{\eta}_{\text{гд}} \eta_{\text{пол}} = \eta_{\text{мех}} \bar{\eta}_{\text{вн}};$$

$$\hat{\eta}_{\text{цбн}} = \eta_{\text{мех}} \hat{\eta}_{\text{гд}} \eta_{\text{пол}} = \eta_{\text{мех}} \hat{\eta}_{\text{вн}};$$

$$\eta_{\text{гд}} = \frac{\eta_{\text{дрк}}}{1 + \varphi_{\text{гд}} \eta_{\text{пол}}};$$

$$\bar{\eta}_{\text{ГД}} = \eta_{\text{дрк}} - \gamma_{\text{ГДП}}; \quad (22)$$

$$\hat{\eta}_{\text{ГД}} = \frac{\eta_{\text{дрк}}}{1 + \beta_{\text{ГДП}} \eta_{\text{дрк}}},$$

где $\eta_{\text{ГД}}$, $\bar{\eta}_{\text{ГД}}$, $\hat{\eta}_{\text{ГД}}$ – газодинамические КПД ЦБН, рассчитанные, соответственно, по методам 1, 2, 3.

При расчетах КПД ЦБН газодинамический КПД не учитывают, принимая равным 1 и внутренний КПД равен политропному. Теперь можно оценивать внутренний КПД по предложенным методам, чтобы вместе с тепловыми потерями учитывать газодинамические потери энергии в ЦБН.

Определим пределы изменения газодинамического КПД, используя метод 2 (формула (22)), по которому имеются статистические данные значений параметров $\beta_{\text{трд}}$, $\beta_{\text{пер}}$, $\gamma_{\text{ГДП}}$.

Величины $\beta_{\text{трд}}$ и $\beta_{\text{пер}}$ находятся в пределах 0,01...0,02 [2, 3]. Для $\gamma_{\text{ГДП}}$ из литературы [2]: 0,01...0,03. Примем допущение, что $\beta_{\text{ГДП}} \approx \gamma_{\text{ГДП}}$.

Расчетные значения $\bar{\eta}_{\text{ГД}}$ показаны в табл. 2, где в скобках указаны значения $\gamma_{\text{ГДП}}$, $\bar{\eta}_{\text{ГД}}$ и $\bar{\eta}_{\text{ГД}} \eta_{\text{мех}}$ при максимальном значении $\gamma_{\text{ГДП}} = 0,02$ вместо значения 0,03.

Так же в табл. 2 рассмотрено значение $\eta_{\text{мех}}$: максимальное – 0,98, минимальное – 0,97, среднее – 0,975 [1].

Таблица 2 – Параметры ЦБН

Значение Параметр	Минимальное	Среднее	Максимальное
$\beta_{\text{трд}}$	0,01	0,015	0,02
$\beta_{\text{пер}}$	0,01	0,015	0,02
$\eta_{\text{дрк}}$	0,9615	0,9709	0,9804
$\gamma_{\text{ГДП}}$	0,01	0,02 (0,015)	0,03 (0,02)
$\bar{\eta}_{\text{ГД}}$	0,9315 (0,9415)	0,9509 (0,9559)	0,9704
$\eta_{\text{мех}}$	0,97	0,975	0,98
$\bar{\eta}_{\text{ГД}} \eta_{\text{мех}}$	0,9036 (0,9175)	0,9271 (0,9320)	0,9510

После анализа данных табл. 2, для газодинамического КПД рекомендуем учитывать следующие значения: максимальное – 0,97, минимальное – 0,94, среднее – 0,953.

Совершенствование конструкции ЦБН должно уменьшать значения $\beta_{\text{пер}}$ и $\gamma_{\text{ГДП}}$, что увеличит значения газодинамического КПД приблизительно на 0,005...0,01.

Значения $\eta_{\text{пол}}$ меньше $\bar{\eta}_{\text{ГД}}$, $\eta_{\text{мех}}$ и лежат в пределах 0,62...0,87 [1].

Для оценки значений $\phi_{\text{ГД}}$ определим пределы изменения Δp . Для этого преобразуем уравнения для $\ell_{\text{вн}}$ (формула (9)) и $\hat{\ell}_{\text{вн}}$ (формула (19)):

$$\ell_{\text{вн}} = \frac{1}{\eta_{\text{дрк}}} \left(\frac{\ell_{\text{пол}}}{\eta_{\text{пол}}} + \frac{\Delta p}{\rho_{\text{ср}}} \right) = \frac{1}{\eta_{\text{дрк}}} \frac{\ell_{\text{пол}}}{\eta_{\text{пол}}} + \frac{1}{\eta_{\text{дрк}}} \frac{\Delta p}{\rho_{\text{ср}}};$$

$$\hat{\ell}_{\text{вн}} = \left(\frac{1}{\eta_{\text{дрк}}} + \beta_{\text{ГДП}} \right) \frac{\ell_{\text{пол}}}{\eta_{\text{пол}}} = \frac{1}{\eta_{\text{дрк}}} \frac{\ell_{\text{пол}}}{\eta_{\text{пол}}} + \beta_{\text{ГДП}} \frac{\ell_{\text{пол}}}{\eta_{\text{пол}}},$$

приравняем $\ell_{\text{вн}} = \hat{\ell}_{\text{вн}}$ и выразим Δp :

$$\frac{1}{\eta_{\text{дрк}}} \frac{\Delta p}{\rho_{\text{ср}}} = \beta_{\text{ГДП}} \frac{\ell_{\text{пол}}}{\eta_{\text{пол}}};$$

$$\Delta p = \eta_{\text{дрк}} \beta_{\text{ГДП}} \frac{\ell_{\text{пол}}}{\eta_{\text{пол}}} \rho_{\text{ср}}. \quad (23)$$

Оценим максимальные значения Δp по формуле (23). Примем, что $\beta_{\text{ГДП}} = 0,03$ и $\beta_{\text{трд}} = \beta_{\text{пер}} = 0,01$:

$$\Delta p = \frac{0,03}{1 + 0,01 + 0,01} \frac{\ell_{\text{пол}}}{\eta_{\text{пол}}} \rho_{\text{ср}} \approx 0,03 \frac{\ell_{\text{пол}}}{\eta_{\text{пол}}} \rho_{\text{ср}}$$

и из практических расчетов для ЦБН с 5–7 ступенями получим значения порядка 0,3...1,3 бар (10^5 Па).

На ступени $\Delta p = 0,04...0,22$ бар. Более точно значение Δp ступени и всего ЦБН необходимо определять с учетом расхода и вязкости перекачиваемого газа, геометрических и физических характеристик проточных частей ЦБН.

С учетом практических расчетов $\ell_{\text{пол}}$ и $\rho_{\text{ср}}$ шестиступенчатых ЦБН для максимальной величины $\phi_{\text{ГД}}$ (формула (15)) получено значение 0,1, а для минимальной – 0,01. Значения $\phi_{\text{ГД}}$ необходимы для метода 1 (табл. 1). Методы 2 и 3 (табл. 1) учитывают не Δp и $\rho_{\text{ср}}$, а величины $\gamma_{\text{ГДП}}$ и $\beta_{\text{ГДП}}$, которые задаются из статистических данных.

Определив максимальные и минимальные значения безразмерных параметров (значения с двумя знаками после запятой в табл. 3), получены максимальные и минимальные значения внутреннего КПД ЦБН и КПД ЦБН (значения с четырьмя знаками после запятой в табл. 3). Для сравнения величин КПД ЦБН в табл. 3 приведены значения внутреннего КПД и КПД ЦБН при $\beta_{\text{трд}} = \beta_{\text{пер}} = \phi_{\text{ГД}} = \gamma_{\text{ГДП}} = 0$.

Наиболее точными в табл. 3 являются значения метода 2 ($\bar{\eta}_{\text{вн}}$, $\bar{\eta}_{\text{цбн}}$), т. к. по нему имеются статистические значения величины $\gamma_{\text{ГДП}}$. В методе 3 ($\hat{\eta}_{\text{вн}}$, $\hat{\eta}_{\text{цбн}}$) принято, что $\beta_{\text{ГДП}} \approx \gamma_{\text{ГДП}}$, а в методе 1 ($\eta_{\text{вн}}$, $\eta_{\text{цбн}}$) значения Δp и $\rho_{\text{ср}}$ необходимо рассчитывать для конкретного ЦБН при известном режиме работы ЦБН.

Из табл. 3 видно, что КПД ЦБН может изменяться в больших пределах: 0,562...0,828. Это

означає, що корисна робота (потужність) ЦБН може становити від 56 до 83 відсотків ($\ell_{\text{пол}} = 0,56 \dots 0,83 \ell_{\text{пр}}$) від роботи привода ЦБН.

Відповідно втрати енергії (потужності), передаваної від привода до ЦБН можуть бути від 17 до 44 відсотків ($0,17 \dots 0,44 \ell_{\text{пр}}$).

Таблиця 3 – Максимальні та мінімальні значення параметрів ЦБН

Парам.	$\beta_{\text{трд}}$	$\beta_{\text{пер}}$	$\eta_{\text{дрк}}$	$\gamma_{\text{гдп}}$	$\beta_{\text{гдп}}$	$\Phi_{\text{гд}}$	$\eta_{\text{пол}}$	$\eta_{\text{вн}}$	$\bar{\eta}_{\text{вн}}$	$\hat{\eta}_{\text{вн}}$	$\eta_{\text{мех}}$	$\eta_{\text{цбн}}$	$\bar{\eta}_{\text{цбн}}$	$\hat{\eta}_{\text{цбн}}$
max	0,02	0,02	0,9804	0,03	0,03	0,1	0,87	0,8456	0,8442	0,8447	0,98	0,8287	0,8273	0,8278
	0	0	1	0	0	0	0,87	0,8700		0,98	0,8526			
min	0,01	0,01	0,9615	0,01	0,01	0,01	0,62	0,5614	0,5776	0,5794	0,97	0,5446	0,5603	0,5620
	0	0	1	0	0	0	0,62	0,6200		0,97	0,6014			

Висновки

Отримано три нових методи визначення КПД ЦБН. Методи відрізняються тим, що запропоновано три нові величини $\eta_{\text{дрк}}$, $\Phi_{\text{гд}}$, $\beta_{\text{гдп}}$, які дозволяють враховувати втрати енергії в ступенях та міжступінчатих каналах ЦБН при визначенні газодинамічного та внутрішнього КПД ЦБН.

По трьох методах запропоновано нові формули для визначення газодинамічного КПД ЦБН.

Показано, що для визначення КПД ЦБН оптимально користуватися методом 2 (табл. 1), по якому є статистичні дані величин динамічних та газодинамічних втрат енергії.

По всіх трьох методах отримано максимальні та мінімальні значення внутрішнього КПД ЦБН та КПД ЦБН.

Пренебреження динамічними та газодинамічними втратами енергії збільшує КПД ЦБН на 3...7%, а значить, розрахункова потужність (енергія) привода ЦБН зменшується на 3...7%.

Список літератури

1. Михайлов А. К., Ворошилов В. П. *Компресорні машини* : учебник для вузів. Москва: Энергоатомиздат, 1989. 288 с.
2. Рис В. Ф. *Центробежні компресорні машини*. Москва-Ленинград: Машиностроение, 1964. 336 с.
3. Ивановский Н. Н., Криворотко В. Н. *Центробежні нагнетатели природного газа* : учебн. пособие для техн. Москва: Недра, 1994. 176 с.
4. Сапрыкин С. А., Олейник Ю. А., Праско А. В., Матюшевская И. А., Мосин А. С. Политропный коэффициент полезного действия компрессора. *Питання розвитку газової промисловості України*. Харків: УкрНДІгаз, 2015. № 43. С. 164–172.

5. Олейник Ю. А., Сапрыкин С. А., Науменко С. П. Анализ методов определения политропного КПД центробежного нагнетателя. *Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. Харків: НТУ «ХПИ», 2018. № 11(1287). С. 67–72. Бібліогр.: 6 назв. ISSN 2078-774X. doi: 10.20998/2078-774X.2018.11.11.
6. Компресорні 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.
7. Сапрыкин С. О., Олейник Ю. А. Спосіб визначення коефіцієнта корисної дії компресора. *Патент України на корисну модель № 100320. № u201413889*; Заяв. 25.12.2014; Опубл. 27.07.2015; Бюл. № 14. 6 с.

References (transliterated)

1. Mikhaylov A. K. (1989), *Compressor cars* : the textbook for higher education institutions, Energoatomizdat, Moscow, 288 p.
2. Rice V.F. (1964), *Centrifugal compressor cars*, Mechanical engineering, Moscow-Leningrad, 336 p.
3. Ivanovsky N. N., Krivorotko V. N. (1994), *Centrifugal superchargers of natural gas* : manual for technical schools, Subsoil, Moscow, 176 p.
4. Saprykin S. A., Oleynik Yu. A., Prasko A. V., Matyushevskaya I. A., Mosin A. S. (2015), "Polytropic coefficient of useful effect of the compressor", *Issues of gas industry development in Ukraine*, no 43, PP. 164–172.
5. Oleynik Yu., Saprykin S., Naumenko S. (2018), „Analyzing the Methods of Computation of the Polytropic Coefficient of Efficiency of the Centrifugal Supercharger”, *Bulletin NTU "HPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*. Kharkiv: NTU "HPI", no. 11(1287), PP. 67–72, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2018.11.11.
6. (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.
7. Saprykin S. O., Oleynik Yu. A. (2015), "Method for determining the efficiency of the compressor". *Patent of Ukraine for utility model no. 100320, no. u201413889*; Denunciations. 25.12.2014; Published. 27.07.2015; Bulletin No. 14. 6 p.

Поступила (received) 15.01.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Олейник 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.

Сапрыкин Сергій Олександрович (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>.