

СЭВАЛД

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

**САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЁВА**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ
ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАГНЕТАТЕЛЕЙ
ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ**

Методические указания к практическим работам

САМАРА 2003

Составитель : Н.И.Епишев

УДК 621.644.004.

Определение параметров работы центробежных нагнетателей газоперекачивающих агрегатов : Методические указания / Самарский гос. Аэрокосмический ун-т. сост. Н.И. Епишев. Самара 2003. С

Изложены методики определения приведенной производительности, запаса газодинамической устойчивости и мощности на муфте привода центробежных нагнетателей природного газа, приведены необходимые для расчета справочные материалы для нагнетателей ГПА ц.16.

Методические указания предназначены для студентов пятого курса специализации 130311 при выполнении ими практических заданий по курсу «Техническая эксплуатация энергетических установок с авиационным газотурбинным приводом»

Печатается по разрешению редакционно-издательского Совета Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королёва.

Рецензент : В. А. Антипов

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1. Определение удаленности режима работы нагнетателя от границы помпажа.....	5
1.1. Определение приведенного расхода газа с использованием приведенных характеристик нагнетателей.....	5
1.2. Определение приведенного расхода газа по перепаду давления на входном конфузоре НЦ.....	8
1.3. Определение газодинамической устойчивости НЦ.....	9
2. Определение мощности на муфте привода нагнетателя.....	9
2.1. Определение мощности по расходу газа.....	9
2.2. Определение параметров работы нагнетателей по мощностной характеристике.....	10
3. Задание.....	13
4. Контрольные вопросы.....	14
Библиографический список.....	15
Приложение.....	16

Введение

В процессе работы ГПА периодически, через каждые 2 часа работы измеряются и регистрируются в специальный журнал параметры работы двигателя, нагнетателя, маслосистем смазки и уплотнения и других систем ГПА. Цель регистрации параметров – определение технического состояния ГПА и отдельных его узлов, а также недопущение опасных режимов работы, таких как помпаж, режим нулевой производительности, превышение мощности двигателей над допустимой и т.д.

Параметры работы нагнетателей газа определяются с помощью характеристик центробежных нагнетателей и измерений параметров давления и температуры газа перед и за нагнетателем, частоты вращения ротора, свойств перекачиваемого газа.

Характеристики НЦ представлены в приведенной форме [1] и позволяют рассчитывать режим работы при изменении параметров (давления, температуры, газовая постоянная) на входе.

Приведенные характеристики постоянны для расчетных величин газовой постоянной $R_{пр}$, коэффициента сжимаемости $Z_{пр}$, коэффициента адиабаты и для расчетной температуры газа на входе $[T_{н}]_{пр}$ в необходимом диапазоне изменения приведенной относительной частоты вращения $[n/n_{н}]_{пр}$;

Минимальный расход на характеристиках нагнетателей соответствует границе помпажа. Рабочий расход газа должен не менее чем на 10% превышать помпажный.

Ниже приводятся методики расчета параметров работы нагнетателя : - приведенного расхода газа по степени повышения давления и температуре на входе и выходе;

- приведенного расхода по перепаду давления на входном конфузоре ;
- определения запаса газодинамической устойчивости;
- определения мощности на муфте привода нагнетателя;
- определения параметров работы НЦ с использованием мощностной характеристики;
- определения коммерческой производительности.

1. Определение удаленности режима работы нагнетателя от границы помпажа.

1.1. Определение приведенного расхода газа с использованием приведенных характеристик нагнетателей.

Для определения расхода газа ($Q_{пр}$) необходимо измерить давление на входе и выходе нагнетателя ($P_{н}$, $P_{к}$ соответственно); температуру газа на входе ($T_{н}$), К; частоту вращения ротора (n), об/мин; лабораторным исследованием определить газовую постоянную перекачиваемого газа (R), Дж/кгК.

Рабочая точка определяется по приведенной паспортной характеристике соответствующего типа нагнетателя

$$\varepsilon = f(Q_{пр}, [n/n_{н}]_{пр}),$$

где $\varepsilon = P_{к} / P_{н}$ - степень повышения давления газа; (1)

$[n/n_{н}]_{пр}$ - приведенная относительная частота вращения ротора нагнетателя.

$$[n/n_{н}]_{пр} = (n/n_{н}) \cdot \alpha, \quad (2)$$

где $n_{н}$ - номинальная частота вращения ротора,
 α - коэффициент приведения частоты вращения, определяемый как

$$\alpha = \sqrt{(Z_{пр}[T_{н}]_{пр}R_{пр}) / (Z_{н} T_{н} R)},$$

где $Z_{пр}, [T_{н}]_{пр}, R_{пр}$ - параметры приведения;

$Z_{н}$ - коэффициент сжимаемости при условиях входа в нагнетатель.

Значения $n_{н}$ и параметров приведения для нагнетателей ИЦ-6,3 и ИЦ-16 представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Параметры приведения для НЦ-6,3 и НЦ-16.

Параметр	Значения параметра		
	НЦ – 6,3	НЦ –16/76	НЦ- 16/100
$[T_n]_{пр}, K$	293	288	288
$R_{пр}, Дж/кгК$	508,16	508,16	508,16
$Z_{пр}$	0,90	0,89	0,86
n_n об/мин	8200	4900	5300

Коэффициент сжимаемости Z_n для определенной относительной плотности Δ находится по номограмме (рисунок 1). Параметр " Δ " определяется лабораторно. Для газа Тюменских месторождений $\Delta = 0,56$. Если значение газовой постоянной R не определялось лабораторно, то оно может быть найдено как

$R = (1 / \Delta) R_n$, где $R_n = 287,3$ Дж/кгК - газовая постоянная воздуха.

Определив ε и $[n/n_n]_{пр}$ по уравнениям (1) и (2) соответственно, необходимо найти рабочую точку на характеристике нагнетателя (рисунок 2) как точку пересечения горизонтали с ординатой ε и характеристики с рассчитанной $[n/n_n]_{пр}$. Абсцисса этой точки указывает величину $Q_{пр}$ для заданного режима работы НЦ.

Характеристики большинства эксплуатируемых в настоящее время нагнетателей представлены в Альбоме [1].

Использование степени повышения давления и характеристики $\varepsilon = f(Q_{пр}, [n/n_n]_{пр})$ для определения $Q_{пр}$ - самый распространенный в настоящее время метод решения этой задачи, что объясняется простотой метода.

Однако, необходимо иметь в виду, что точность определения положения рабочей точки на характеристике нагнетателя этим методом невысока, что обусловлено следующим:

- характеристика $\varepsilon = f(Q_{пр})$ в области малых расходов весьма полого, почти горизонтальна, что при неизбежных ошибках измерения

$\rho = 1,225$ $t = 15$ $H = 0$

$1,234$ $t = 2$

Коэффициент сжимаемости K

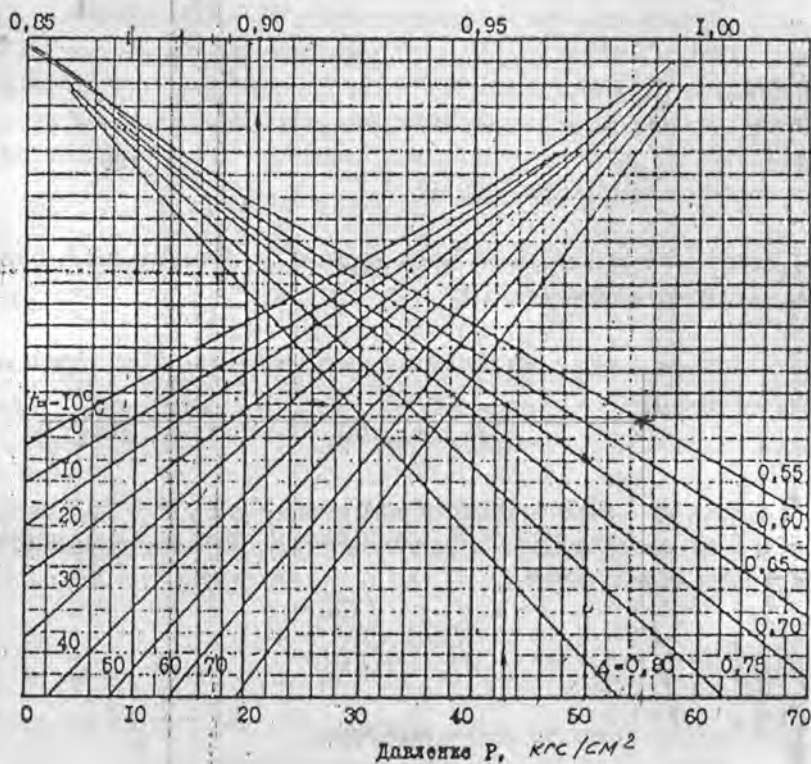


Рисунок 1

давления и других параметров, приведет к большой погрешности определения $Q_{пр}$;

- приведенная частота вращения $[n/n_n]_{пр}$, как правило, не совпадает со значениями, представленными на характеристиках, поэтому при определении положения рабочей точки приходится экстраполировать между соседними линиями, что существенно увеличивает погрешность вычислений;

- характеристика $\varepsilon = f(Q_{пр})$ в эксплуатационных условиях не стабильна из-за ухудшения технического состояния нагнетателя. При любом изменении состояния проточной части нагнетателя (загрязнении, эрозии лопаток ротора и статора, увеличении зазоров и т.д.) напорная характеристика смещается в сторону меньших расходов и степени повышения давления. Величина этого смещения, как правило, неизвестна и в расчетах учтена быть не может; что приводит к дополнительной ошибке в определении $Q_{пр}$.

1.2. Определение приведенного расхода газа по перепаду давления на входном конфузоре НЦ.

Приведенная производительность в этом методе определяется через объемную / 2 /:

$$Q_{пр} = Q(n_n / n), \quad (3)$$

где Q – объемная производительность при условиях всасывания. Производительность Q находится по хорошо известной в газовой динамике зависимости:

$$Q = K \sqrt{\frac{\Delta P_k}{\rho_n}}$$

где K – коэффициент конфузора;

ΔP_k – перепад давления на конфузоре, КПа;

ρ_n – плотность газа при условиях всасывания, кг/м³.

Коэффициент K определяется эмпирически для каждого типа нагнетателя, так для нагнетателя НЦ-16/76 $K = 439,5$ /2/.

Плотность ρ_n определяется по уравнению состояния газа:

$$\rho_n = (P_n \cdot 10^6) / (Z_n \cdot R \cdot T_n) \quad (4)$$

Таким образом, для определения $Q_{пр}$ по данной методике необходимо измерить величины $n, \Delta P_k, P_{II}, T_{II}$ и зная параметры, характеризующие свойства газа (R, Δ), коэффициент конфузора K , произвести вычисление по (3),(4).

1.3. Определение запаса газодинамической устойчивости НЦ.

Запас газодинамической устойчивости является весьма важным показателем безопасности эксплуатации ГПА. Он проверяется каждый раз в случае самопроизвольного или ожидаемого повышения давления на выходе из НЦ или понижения давления на входе, а также при каждом измерении параметров ГПА (т.е. через каждые 2 часа работы).

Запас устойчивости НЦ определяется по удалению рабочей точки от критической по приведенной производительности и находится как относительная разность указанных производительностей, выраженная в процентах /2/ :

$$\delta Q = ((Q_{пр} - Q_{пр \min}) / Q_{пр \min}) \cdot 100\%, \quad (5)$$

где $Q_{пр}, Q_{пр \min}$ - приведенная объемная производительность в рабочей и критической точках соответственно.

Для вычисления δQ по уравнению (5) необходимо определить режим работы НЦ в соответствии с уравнением (2), найти значение $Q_{пр \min}$ соответствующее абсциссе левой крайней точки линии $[n/n_n]_{пр}$ и найти $Q_{пр}$ как описано в разделе 1.1. или 1.2. Запас устойчивости должен быть не менее 10% для всех типов нагнетателей.

2. Определение мощности на муфте привода нагнетателя.

2.1. Определение мощности по расходу газа.

Мощность, потребляемая нагнетателем определяется как

$$N_e = N_i + N_{мех}, \quad (6)$$

где N_i - внутренняя мощность;

$N_{мех}$ - механические потери в опорах ротора нагнетателя при номинальной нагрузке.

Значения $N_{мех}$ даны для некоторых типов нагнетателей, так для ГПА -Ц-6,3 $N_{мех} = 80$ кВт, для ГПА -Ц-16 $N_{мех} = 140$ кВт.

Внутренняя мощность N_i определяется как :

$$N_i = \rho_{ii} [N_i / \rho_{ii}]_{пр} (n / n_{ii})^3, \quad (7)$$

где $[N_i / \rho_{ii}]_{пр}$ - приведенная относительная внутренняя мощность.

Величина $[N_i / \rho_{ii}]_{пр}$ для заданного режима работы нагнетателя при известных параметрах газа на входе и выходе находится по зависимости $[N_i / \rho_{ii}]_{пр} = f(Q_{пр})$ на приведенных характеристиках нагнетателя (рис.2). Рабочая точка на указанной характеристике может быть найдена двумя способами в зависимости от набора измеряемых параметров рабочего процесса нагнетателя, аналогичного указанному в п.1.1. и 1.2.

При наличии измерений давления на входе и выходе нагнетателя (P_{ii} , P_k), температуры газа на входе (T_{ii}) и частоты вращения ротора НЦ (n), необходимо определить параметры ϵ (1), $[n/n_{ii}]_{пр}$ (2). По найденным ϵ и $[n/n_{ii}]_{пр}$ определить рабочую точку на характеристике нагнетателя $\epsilon = \delta(Q_{пр}, [n/n_{ii}]_{пр})$ как указано в п.1.1. и найти $[N_i / \rho_{ii}]_{пр}$, соответствующее рабочей точке. По уравнениям (6),(7) найти значение мощности, потребляемой нагнетателем, ρ_{ii} находится по уравнению (4).

При наличии измерений перепада давления на конфузоре (ΔP_k), частоты вращения ротора НЦ (n), параметров газа на входе (P_{ii} , T_{ii}), рабочая точка на мощностной характеристике НЦ (рис.2) может быть найдена по значению $Q_{пр}$ (3). Следовательно, в этом случае необходимо определить $Q_{пр}$, как указано в п.1.2. и далее найти N_e по уравнениям (6), (7).

Точность определения мощности обоими методами зависит от точности нахождения положения рабочей точки на характеристиках нагнетателя, т.е. зависит от тех-же факторов, что и точность определения $Q_{пр}$. Мощность, потребляемая нагнетателем, не должна превышать номинальную более чем на 20% (Руководство по эксплуатации агрегатов ГПА ц-16 и ГПА ц-6,3).

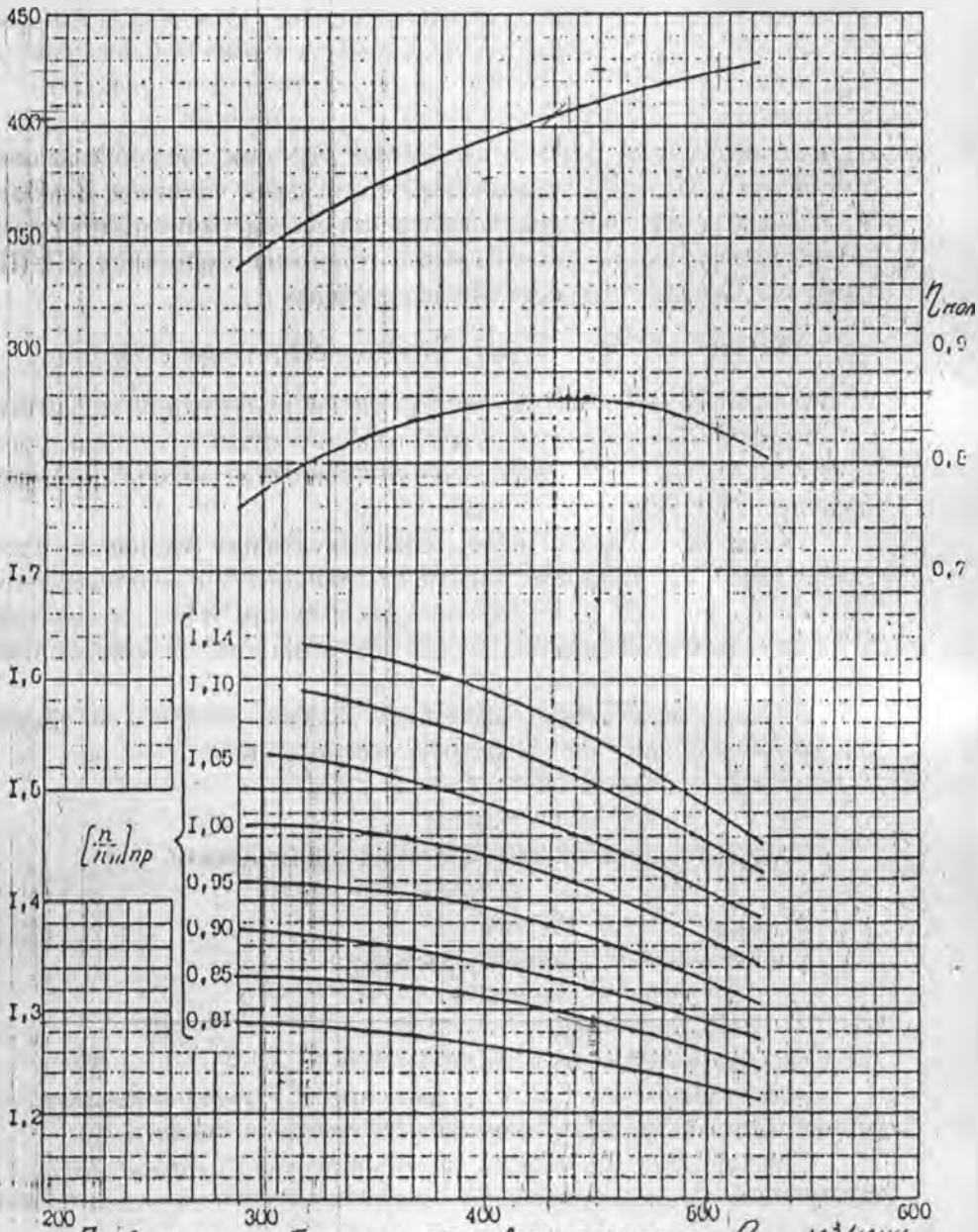
2.2. Определение параметров работы нагнетателей по мощностной характеристике.

Характеристики нагнетателей в эксплуатационных условиях нестабильны из-за ухудшения технического состояния проточной части нагнетателей. Это усугубляет неточности определения параметров их работы, по методике изложенной в п.п.1 и 2.

Приведенные характеристики компрессора ГПА-Ц-16

кВт
внутренняя мощность [Мл/р]_{пр} кг/м³

степень повышения давления &



Приведенная объемная производительность $\text{Q}_{пр}$ м³/мин

Рисунок 2

Анализ характеристик НЦ, находящихся в разном техническом состоянии, показывает что в отличие от характеристик $\varepsilon=f(Q_{пр})$ и $\eta_{пол}=f(Q_{пр})$ характеристика $[N_i/\rho_n]_{пр}=f(Q_{пр})$ в процессе эксплуатации изменяется в значительно меньшей степени. Объясняется этот факт следующим: при ухудшении технического состояния НЦ снижается ε (при заданной частоте вращения) и $\eta_{пол}$. Снижение ε приводит к уменьшению потребляемой мощности N_i , а снижение $\eta_{пол}$, наоборот, к ее увеличению. Совместное влияние двух факторов обуславливает относительную стабильность мощностной характеристики. В работе [3] приводятся экспериментальные данные исследования нагнетателей с большой наработкой. Относительные изменения параметров $\Delta\Pi=(\Pi-\Pi_0)/\Pi_0$ 100% находились в следующих пределах:

$$\Delta(\varepsilon-1) = -10,5\%, \quad \Delta\eta_{пол} = -7,5\%, \quad \Delta[N_i/\rho_n]_{пр} = -3\%,$$

т.е. относительное отклонение удельной приведенной мощности от паспортного значения в 2,5 раза меньше, чем отклонение политропического КПД и в 3,5 раза меньше, чем отклонение величины $(\varepsilon-1)$, пропорциональной политропическому напору.

Учитывая, что ту или иную степень ухудшения технического состояния имеют все нагнетатели и относительную стабильность мощностной характеристики по сравнению с другими, в работе [3] предложена методика определения параметров работы нагнетателя по мощностной характеристике.

Внутренняя мощность нагнетателя N_i (Квт) связана с его объемной производительностью Q (м³/мин) соотношением

$$N_i = \frac{1}{6} \cdot 10^{-4} \cdot Q \rho_n (K/K-1) Z_n R (T_k - T_n),$$

где K - показатель политропы.

Переходя к приведенной относительной мощности

$$[N_i/\rho_n]_{пр} = (N_i/\rho_n) \cdot (n_n/n)^3$$

и приведенному объемному расходу

$$Q_{пр} = Q (n_n/n) \text{ получаем}$$

$$[N_i/\rho_n]_{пр} = A \cdot Q_{пр}, \quad (8)$$

$$\text{где } A = \frac{1}{6} \cdot 10^{-4} (n_n/n)^2 (K/K-1) Z_n R (T_k - T_n) \quad (9)$$

Зная температуру (T_n, T_k), давление (P_n) и относительную плотность газа (Δ) по соотношению (9) можно вычислить A .

Соотношение (8) вместе с характеристикой $[N_i/\rho_n]_{пр}=f(Q_{пр})$ образуют систему двух уравнений с двумя неизвестными, из которой и

находится значение $[N_i/\rho_n]_{пр}$, соответствующее заданному режиму работы нагнетателя. Решение системы уравнений – графическое. На паспортную характеристику $[N_i/\rho_n]_{пр} = f(Q_{пр})$ по двум точкам (при двух произвольных значениях $Q_{пр}$) наносится прямая, соответствующая уравнению (8). По точке пересечения паспортной характеристики и проведенной прямой определяется $[N_i/\rho_n]_{пр}$ и $Q_{пр}$ для заданного режима работы НЦ. Далее определяется мощность по уравнениям (6),(7), запас газодинамической устойчивости (5). Для определения последнего необходимо знать частоту вращения ротора (n) и найти $[n/n_n]_{пр}$ (2).

Показатель политропы (K), вообще говоря, зависит от степени повышения давления и средней температуры процесса сжатия $1/3$. Однако, для узкого диапазона изменений давлений и температур в конкретном ГПА, показатель K можно принять постоянным, равным $K = 1,31$.

Таким образом, порядок расчета параметров рабочего процесса нагнетателя по данной методике следующий:

- определяются параметры потока T_n , P_n , T_k и относительная плотность газа Δ ;
- вычисляется коэффициент A (9) ;
- по двум произвольно заданным значениям $Q_{пр}$, находят соответствующие им значения $[N_i/\rho_n]_{пр}$ (8);
- по двум точкам, соответствующим заданным значениям $Q_{пр}$, на характеристику $[N_i/\rho_n]_{пр} = f(Q_{пр})$ (рис.2) наносится прямая;
- определяются координаты точки пересечения прямой и характеристики (рабочая точка);
- по величине $[N_i/\rho_n]_{пр}$ рабочей точки вычисляется мощность на валу нагнетателя (7),(6);
- по значению $Q_{пр}$ рабочей точки определяется запас газодинамической устойчивости (5).

3.Задание.

3.1. По данным суточной ведомости работы агрегата ГПА ц-16 (выписка из Ведомости см. Приложение, вариант задается преподавателем) определить :

- приведенный расход газа с помощью напорных характеристик НЦ ;
- приведенных расход газа по перепаду давления на конфузоре ;

- запас газодинамической устойчивости НЦ (ГДУ) по обем значениям приведенного расхода газа ;
 - мощность на валу нагнетателя по найденным значениям расхода газа ;
 - мощность нагнетателя с использованием мощностной характеристики ;
 - приведенный расход газа и запас ГДУ по мощностной характеристике.
- 3.2. Сравнить полученные различными методами значения запаса ГДУ и мощности на валу привода произведя качественный анализ результатов и сравнение с расчетами по другим вариантам регистрации параметров.

4.Контрольные вопросы.

1. Какие параметры работы нагнетателя необходимо измерить для определения $Q_{пр}$ с использованием приведенных характеристик НЦ ?
2. Какие параметры работы нагнетателя необходимо измерить для определения $Q_{пр}$ по перепаду давления на конфузоре ?
3. Чем обусловлены ошибки при определении $Q_{пр}$ с использованием характеристик НЦ ?
4. Какае параметры газа необходимо знать для расчета $Q_{пр}$?
5. Как определяется запас газодинамической устойчивости нагнетателя?
6. Каков допуск на запас ГДУ ?
7. Как определить мощность на валу привода нагнетателя с использованием приведенных характеристик НЦ ?
8. Как определить мощность на валу НЦ используя измерение перепада давления на конфузоре? Какие параметры работы НЦ должны быть для этого измерены ?
9. Каков допуск на значение мощности, потребляемой нагнетателем ?
10. Почему мощностная характеристика НЦ в процессе эксплуатации изменяется в меньшей степени, чем характеристики КПД и напорные?
11. Каков принцип нахождения положения рабочей точки на мощностной характеристике?
12. Какае параметры необходимо измерить для определения положения рабочей точки на мощностной характеристике?

13. Как определить $Q_{\text{пр}}$ и запас ГДУ, зная положение рабочей точки на мощностной характеристике?

14. Как определить мощность на валу нагнетателя зная положение рабочей точки на мощностной характеристике?

Библиографический список.

1. Альбом характеристик центробежных нагнетателей природного газа. Мингазпром СССР – М. 1985г., 88с.
2. Руководство по эксплуатации ГПА ц –16.
3. Галиулин З.Т., Леонтьев Е.В. Интенсификация магистрального транспорта газа. -М.: Недра, 1991. -272с.

Выписка из суточной ведомости работы ГПА ц-16
(Гольяттинская КС 05.99) (продолжение).

Параметры	Значения параметров по вариантам							
	17	18	19	20	21	22	23	24
tатм.возд.°С	2	2	2	5	7	8	2	1
ΔРвсас.кам. КПа	0,58	0,58	0,56	0,56	0,56	0,56	0,58	0,58
пнд об\мин	5160	5160	5130	5150	5240	5250	5200	5200
пвд-«-	6396	6396	6350	6360	6450	6470	6440	6430
пст-«-	4222	4234	4200	4200	4370	4360	4360	4200
tг перед.ст °С	448	447	445	447	467	447	464	457
Рквд МПа	0,62	0,62	0,62	0,61	0,62	0,62	0,64	0,64
Рг перед нагн. МПа	5,47	5,45	5,47	5,45	5,35	5,35	5,33	5,33
Рг после нагн. МПа	7,05	7,05	7,03	7,05	7,09	7,07	7,05	7,05
tг перед нагн.°С	26	26	26	26	26	27	27	26
tг после нагн.°С	48	48	48	48	50	51	51	50
ΔР на конф.КПа	39,3	40,03	38,6	38,5	38,1	36,2	36,3	37,0

Учебное издание

Определение параметров работы
центробежных нагнетателей
газоперекачивающих агрегатов.

Методические указания

Составитель: Епишев Николай Иванович

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С. П. Королёва
443086, г. Самара, Московское шоссе, 34