

РУКОВОДЯЩИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

**УСТРОЙСТВА ПУСКОВЫЕ
ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК
ДЛЯ ПРИВОДА НАГНЕТАТЕЛЕЙ
ПРИРОДНОГО ГАЗА**

РТМ 24.020.23—74

Издание официальное

**МИНИСТЕРСТВО ТЯЖЕЛОГО, ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО И ТРАНСПОРТНОГО
МАШИНОСТРОЕНИЯ**

Москва

РАЗРАБОТАН И ВНЕСЕН Центральным научно-исследовательским и проектно-конструкторским котлотурбинным институтом им. И. И. Ползунова

Директор

Н. М. МАРКОВ

Заведующий базовым отраслевым отделом
стандартизации

К. А. СУПРЯДКИН

Заведующий отделом газотурбинных установок

Ю. Г. КОРСОВ

Руководители темы:

В. В. ВОЛОДЬКО,

И. С. ЛАГУСКЕР

Н. А. ПЛЕСНОВА

Исполнитель

ПОДГОТОВЛЕН К УТВЕРЖДЕНИЮ Главным управлением турбинной промышленности Министерства тяжелого, энергетического и транспортного машиностроения

Главный инженер

В. П. ГОЛОВИЗНИН

УТВЕРЖДЕН Министерством тяжелого, энергетического и транспортного машиностроения

Заместитель министра

П. О. СИРЫЙ

**УСТРОЙСТВА ПУСКОВЫЕ
ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК
ДЛЯ ПРИВОДА НАГНЕТАТЕЛЕЙ
ПРИРОДНОГО ГАЗА**

РТМ 24.020.23—74

Указанием Министерства тяжелого, энергетического и транспортного машиностроения от 25 июля 1974 г. № ПС-002/9440 введен как рекомендуемый

Настоящий руководящий технический материал определяет методику приближенного выбора мощности пусковых устройств и распространяется на приводные газотурбинные установки (ГТУ) с независимым вращением газовой турбины полезной мощности (ГТУ с «разрезным валом»).

В РТМ приводится построение приближенной универсальной характеристики компрессора в пусковом диапазоне частот вращения и нанесение на нее линий «холодных режимов» (без подогрева воздуха в камере сгорания) для определения графоаналитическим способом мощности пускового устройства.

1. ПОСТРОЕНИЕ ПРИБЛИЖЕННОЙ УНИВЕРСАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПРЕССОРА

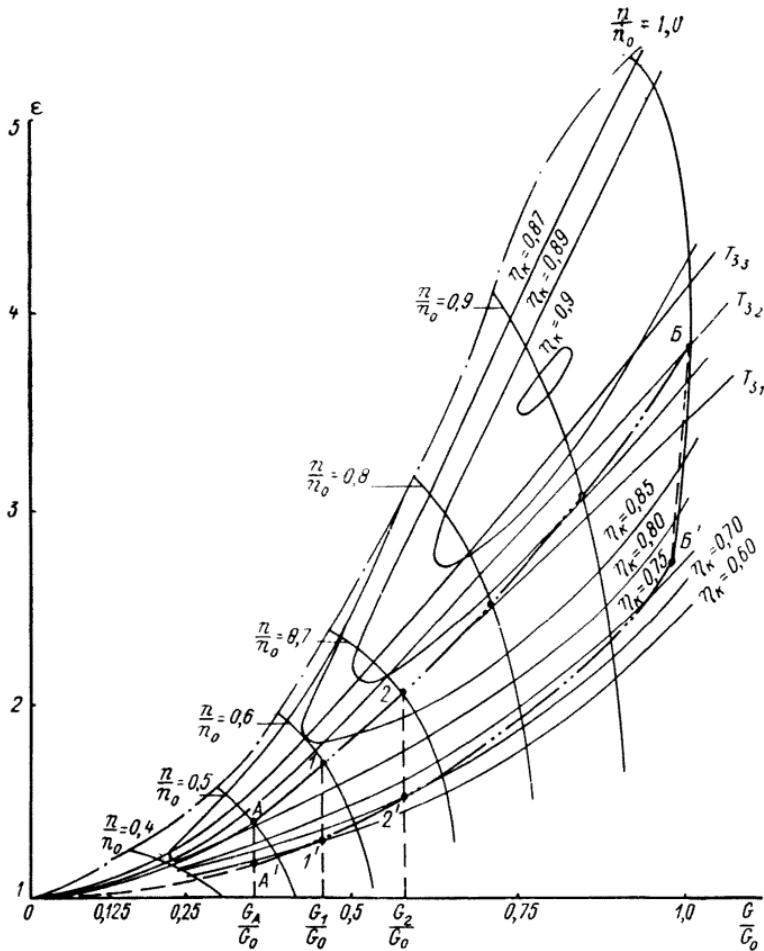
1.1. Исходными материалами для построения характеристики компрессора в диапазоне частот вращения от нуля до устойчивого холостого хода являются:

- расчетная характеристика компрессора;
- данные теплового расчета равновесных режимов;
- программа пуска.

1.2. Построению характеристики компрессора в пусковом диапазоне предшествует построение линий «холодных режимов» по заданной расчетной характеристике компрессора, линий постоянных коэффициентов полезного действия и изодром по методу графической экстраполяции данных величин.

При этих построениях принимаются следующие допущения:

- пропускная способность газовой турбины не зависит от частоты вращения при постоянном перепаде давлений;
- потери давления в газовоздушном тракте отсутствуют;
- расход газа через газовую турбину равен производительности компрессора;
- на всех рассматриваемых режимах сохраняется геометрическое подобие потока в ступенях.



Черт. 1

1.3. Линия «холодных режимов» $A' — B'$ (черт. 1) находится путем пересчета точек линии равновесных режимов $A — B$ по формуле Флюгеля, приведенной к виду:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{T_3}{T_{3_0}} \left(\frac{G}{G_0} \right)^2 (\varepsilon_0^2 - 1)} + 1, \quad (1)$$

где $\varepsilon = \frac{p_3}{p_1}$ — степень повышения давления в компрессоре;
 p_1 — давление воздуха перед компрессором, кгс/см²;
 p_3 — давление воздуха за компрессором и перед газовой турбиной, кгс/см²;
 T_1 — температура воздуха перед компрессором, К;
 T_2 — температура воздуха за компрессором, К;
 T_3 — температура воздуха (газа) перед газовой турбиной, К;
 G — расход воздуха (газа), кг/с;
 n — частота вращения, об/мин.

Индексом 0 отмечены параметры расчетных режимов.

1.4. При пересчете для каждой выбранной точки, определяемой кривой $A' - B'$, в качестве расчетной принимается точка на линии равновесных режимов $A - B$, соответствующая тому же расходу.

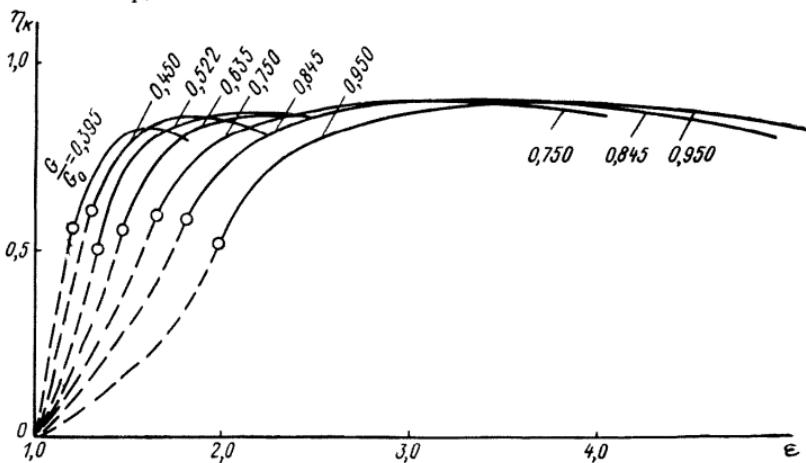
1.5. Степень повышения давления ε находится путем двух последовательных приближений:

в первом приближении — ε' по формуле (1) при $T_3 = T_2 = T_1$ и $\frac{G}{G_0} = 1$;

во втором приближении — ε по формуле (1) при

$$T_2 = T_1 \left[\frac{\frac{k-1}{k} - 1}{\eta_k} + 1 \right], \quad (2)$$

где η_k — коэффициент полезного действия компрессора, определяемый для ε' и $\frac{G}{G_0}$ по вспомогательному графику (черт. 2), представляющему семейство кривых $\eta_k = f\left(\frac{G}{G_0}; \varepsilon\right)$, экстраполируемых в начало координат.

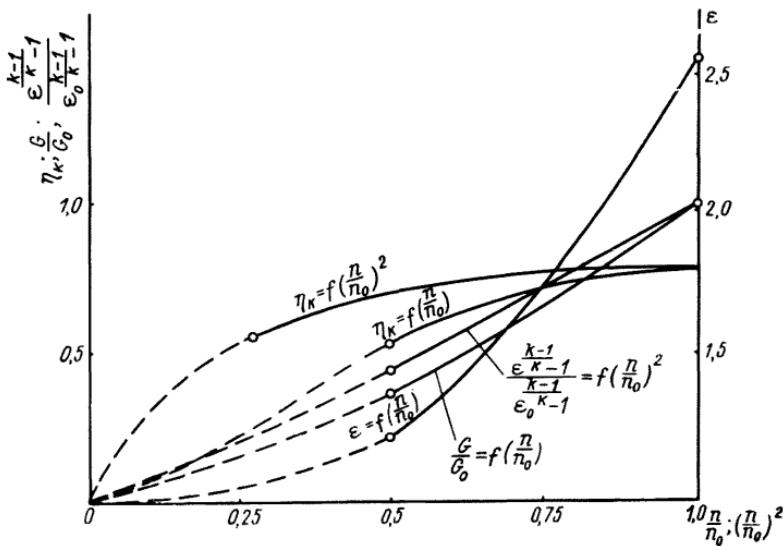


Черт. 2

1.6. Для получения зависимости $\varepsilon = f\left(\frac{n}{n_0}\right)$ в пусковом диапазоне частот вращения необходимо построить на графике (черт. 3) зависимость для линии «холодных режимов» в диапазоне частот вращения от устойчивого холостого хода до полной нагрузки:

$$\frac{\frac{k-1}{\varepsilon^{\frac{k}{k-1}}}-1}{\frac{k-1}{\varepsilon_0^{\frac{k}{k-1}}}-1} = f\left(\frac{n}{n_0}\right)^2 \approx \left(\frac{n}{n_0}\right)^2. \quad (3)$$

Полученная кривая близка к прямой линии и экстраполируется в начало координат.



Черт. 3

1.7. Далее по характеристике компрессора (см: черт. 3) строится зависимость $\frac{G}{G_0} = f\left(\frac{n}{n_0}\right)$ для линии «холодных» режимов $A' — B'$ в пусковом диапазоне.

Эта кривая также близка к прямой линии, экстраполируется в начало координат и выражается следующей зависимостью:

$$\frac{G}{G_{A'}} \approx \frac{n}{n_{A'}}, \quad (4)$$

где $G_{A'}$, $n_{A'}$ — расход и частота вращения в точке A' линии «холодных режимов».

1.8. Для получения зависимости $\eta_k = f\left(\frac{n}{n_0}\right)$ необходимо воспользоваться кривой $\varepsilon = f\left(\frac{n}{n_0}\right)$ (см. черт. 3) и данными черт. 2.

Кривая $\eta_k = f\left(\frac{n}{n_0}\right)^2$ пускового периода экстраполируется в начало координат, после чего строится зависимость $\eta_k = f\left(\frac{n}{n_0}\right)$ для всего диапазона частот вращения «холодных» режимов).

1.9. Задаваясь несколькими значениями температур от T_2 до T_{max} , определяем с помощью формулы (1) линии режимов работы ГТУ для соответствующих изотерм в диапазоне пусковых режимов.

Формула (1) для этого случая примет вид:

$$\varepsilon_r = \sqrt{\frac{T_{3r}}{T_{3x}} (\varepsilon_x^2 - 1)} + 1, \quad (5)$$

где ε_x и T_{3x} — степень повышения давления и температура воздуха на линии «холодных» режимов;

ε_r и T_{3r} — степень повышения давления для изотермы и соответствующая ей температура.

По изотермам T_3 и вспомогательным кривым (см. черт. 2 и 3) на универсальную характеристику компрессора (см. черт. 1) наносятся линии постоянных частот вращения и коэффициентов полезного действия в пусковом диапазоне, а по заданной программе пуска — линия совместной работы турбины и компрессора.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ ПУСКОВОГО УСТРОЙСТВА

2.1. Мощность компрессора и газовой турбины на пусковых режимах в киловаттах определяется из выражений:

$$N_k = 4,19 c_p T_1 G \frac{\frac{k-1}{k} - 1}{\eta_k}; \quad (6)$$

$$N_t = 4,19 c_p' T_3 G \eta_t \left(1 - \frac{1}{\frac{k-1}{k}}\right), \quad (7)$$

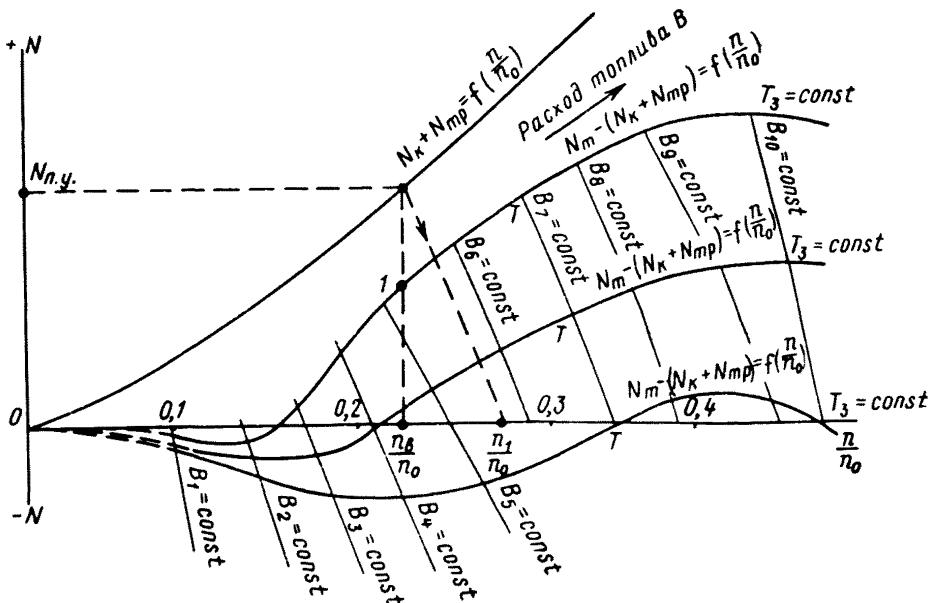
где c_p , c_p' — теплоемкости воздуха и газа, ккал/кг · °C;

η_t — коэффициент полезного действия газовой турбины;
 ε_t — степень расширения газа в газовой турбине.

Входящие в эти выражения параметры соответствуют точкам пересечения изодром $\frac{n}{n_0} = \text{const}$ с изотермами $T_3 = \text{const}$ на характеристике компрессора.

2.2. Полученные данные позволяют построить график зависимости (черт. 4):

$$N_{\tau} - (N_k + N_{tp}) = f\left(\frac{n}{n_0}\right) \quad T_3 = \text{const}$$



Черт. 4

Мощность N_{tp} , затрачиваемая на преодоление трения и механических потерь, может быть оценена по приближенной зависимости

$$N_{tp} = N_{tp}^{\text{ном}} \left(\frac{n}{n_{\text{ном}}} \right)^{1,5}, \quad (8)$$

где $N_{tp}^{\text{ном}}$ — мощность трения и механических потерь на номинальном режиме;

$n_{\text{ном}}$ — частота вращения на номинальном режиме.

2.3. Величины ε_t для частот вращения пускового периода определяются методом графической экстраполяции зависимости $\varepsilon_t = f(\varepsilon_r)$, построенной по данным теплового расчета равновесных режимов (в области от режима с минимальной рабочей частотой вращения силового вала до полной нагрузки). Коэффициент η_t находится аналогичным путем.

2.4. По точкам линий «холодных» режимов на черт. 4 следует построить кривую изменения мощности ($N_k + N_{tp}$) в зависимости от частоты вращения при отсутствии подогрева воздуха в камере сгорания и кривые постоянных расходов топлива ($B = \text{const}$).

2.5. Частота вращения вала турбокомпрессора n_b , при которой подается топливо в камеру сгорания и производится его зажигание, определяется по минимальной производительности форсунок и температуре газа в период пуска T_3 (см. черт. 4).

2.6. Минимальную мощность, необходимую для вращения ротора турбокомпрессора с частотой вращения n_b , можно определить при совместном рассмотрении кривой $N_k + N_{tp} = f\left(\frac{n}{n_0}\right)$ и кривых $(N_t - N_k - N_{tp}) = f\left(\frac{n}{n_0}\right)$ с учетом заданной программы пуска (без учета углового ускорения).

2.7. Полная мощность пускового устройства зависит от момента инерции вращающихся масс ротора турбокомпрессора, продолжительности пуска и характеристики пускового устройства.

2.7.1. Для различных моментов пускового периода мощность может быть найдена из уравнения моментов при помощи ранее приведенных кривых и уравнений.

Для всех режимов работы турбокомпрессорного вала остается справедливым следующее уравнение моментов:

$$M_t + M_{n.y} - M_I - M_k - M_{tp} = 0, \quad (9)$$

здесь

M_t и $M_{n.y}$ — полные моменты газовой турбины и пускового устройства, кгс·м;

M_{tp} — момент для преодоления трения и других механических потерь, кгс·м;

$M_I = I \frac{d\omega}{dt}$ — момент, затрачиваемый на сообщение углового ускорения вращающимся массам, кгс·м;

M_k — момент, затрачиваемый на преодоление аэродинамического сопротивления компрессора, кгс·м:

$$M_k = M_{k_1} \left(\frac{n}{n_1} \right)^{1.7}, \quad (10)$$

где

M_{k_1} и n_1 — момент и частота вращения компрессора в точке, где известен коэффициент полезного действия.

2.7.2. Общая продолжительность пускового периода складывается из времени, необходимого для раскручивания пусковым устройством ротора турбокомпрессора до частоты вращения, при которой производится подача и зажигание топлива (период «холодного» разгона), времени увеличения частоты вращения с момента подачи топлива до отключения пускового устройства (период сопровождения) и времени перехода на частоту вращения холостого хода без помощи пускового устройства.

Продолжительность отдельных периодов пуска в секунду может быть определена графическим интегрированием уравнения

$$\tau = \frac{\pi I}{30} \int_0^{n_A} \frac{dn}{M_T - M_{\text{п.у}} - M_K - M_{\text{тр}}} . \quad (11)$$

— — —

Ответственный за выпуск *В. С. Розанова*

Редактор *Н. М. Чернецов*

Техн. ред. *Н. П. Белянина*.

Корректор *В. Н. Шонуррова*.

Сдано в набор 22.05.75.

Подписано к печ. 28.08.75.

Формат бум. 60×90¹/₁₆.

24.020.23
Объем 1/2 печ. л.

Тираж 500.

Заказ 420.

Цена 10 коп.

Редакционно-издательский отдел ЦКТИ им. И. И. Ползунова.
194021, Ленинград, Политехническая ул., д. 24.