

**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

Заведующий базовым отраслевым отделом  
стандартизации

Заведующий отделом газотурбинных установок

Руководитель темы:

Исполнитель

**Н. М. МАРКОВ**

**К. А. СУПРЯДКИН**

**Ю. Г. КОРСОВ**

**В. В. ВОЛОДЬКО,**

**И. С. ЛАГУСКЕР**

**Н. А. ПЛЕСНОВА**

**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. СИРЫН**

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 подопрева воздуха в камере сгорания) для определения графоаналитическим способом мощности пускового устройства.

**1. ПОСТРОЕНИЕ ПРИБЛИЖЕННОЙ УНИВЕРСАЛЬНОЙ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПРЕССОРА**

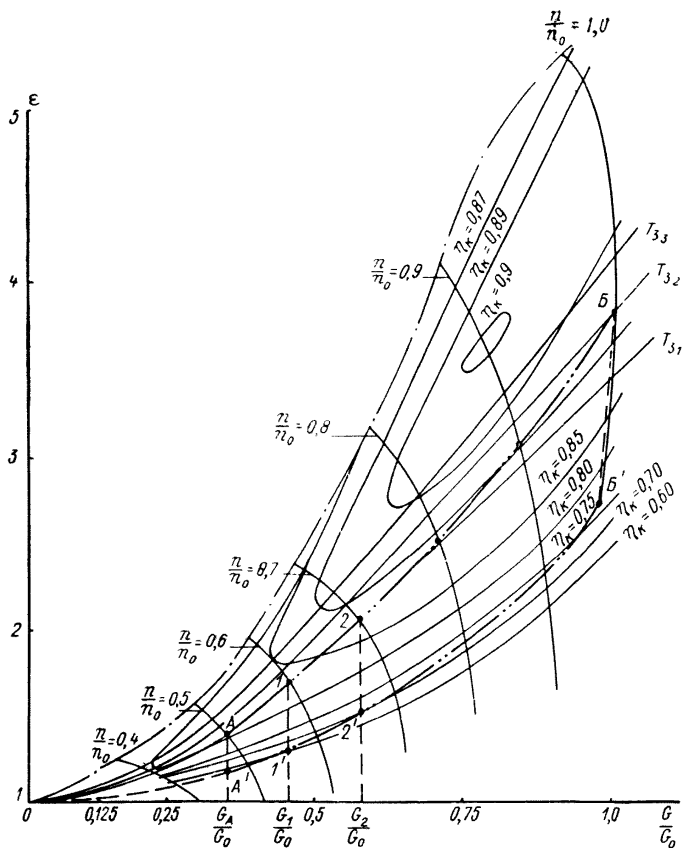
1.1. Исходными материалами для построения характеристики компрессора в диапазоне частот вращения от нуля до устойчивого холостого хода являются:

- 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 газоздушном 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/см<sup>2</sup>;  
 $p_3$  — давление воздуха за компрессором и перед газовой турбиной, кгс/см<sup>2</sup>;  
 $T_1$  — 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.

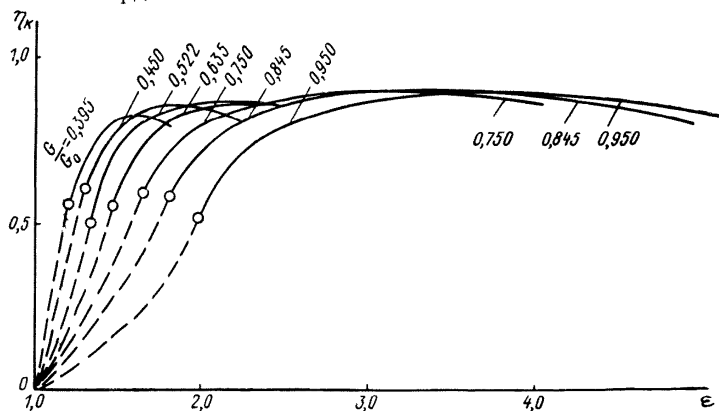
1.5. Степень повышения давления  $\varepsilon$  находится путем двух последовательных приближений:

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

во втором приближении —  $\varepsilon$  по формуле (1) при

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

где  $\eta_k$  — коэффициент полезного действия компрессора, определяемый для  $\varepsilon'$  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.

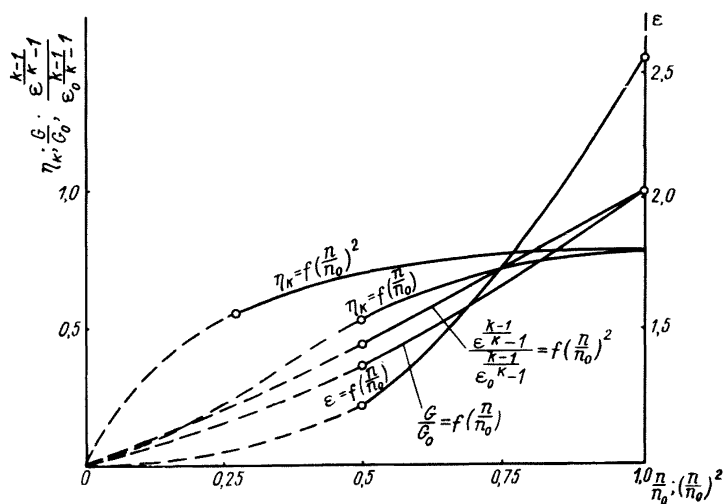


Черт. 2

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:

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

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  $\varepsilon_x$  и  $T_{3x}$  — степень повышения давления и температура воздуха на линии «холодных» режимов;

$\varepsilon_r$  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:

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

$$N_r = 4,19 c_p' T_3 G \eta_r \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_r^{\frac{k-1}{k}}}\right), \quad (7)$$

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

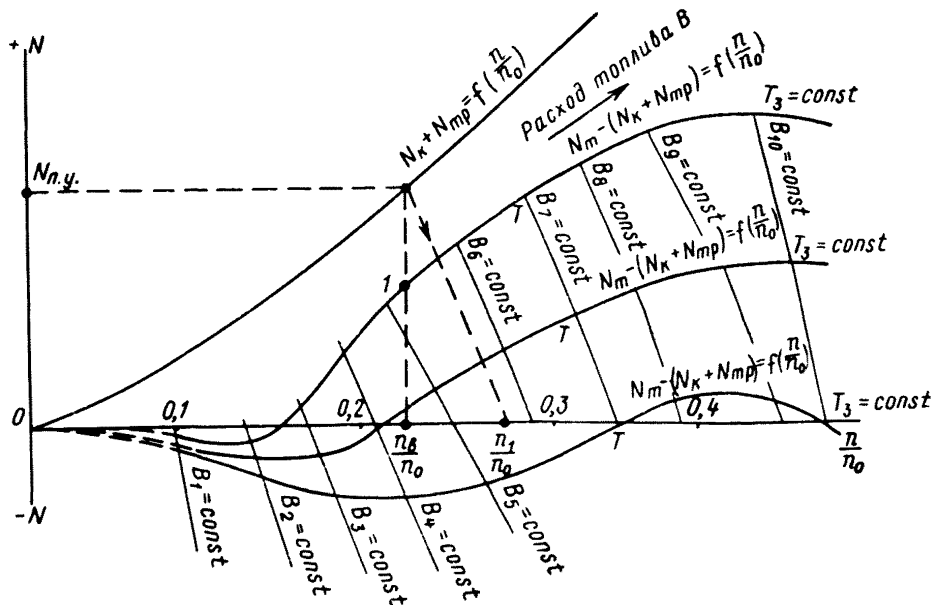
$\eta_r$  — коэффициент полезного действия газовой турбины;

$\varepsilon_r$  — степень расширения газа в газовой турбине.

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

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

$$N_{\text{т}} - (N_{\text{к}} + N_{\text{тр}}) = f\left(\frac{n}{n_0}\right)_{T_3 = \text{const}}.$$



Черт. 4

Мощность  $N_{\text{тр}}$ , затрачиваемая на преодоление трения и механических потерь, может быть оценена по приближенной зависимости

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

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

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

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

2.4. По точкам линии «холодных» режимов на черт. 4 следует построить кривую изменения мощности ( $N_{\text{к}} + N_{\text{тр}}$ ) 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  $N_k + N_{тр} = f\left(\frac{n}{n_0}\right)$  и кривых  $(N_t - N_k - N_{тр}) = f\left(\frac{n}{n_0}\right)$  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:

$$M_t + M_{п. у} - M_I - M_k - M_{тр} = 0, \quad (9)$$

здесь

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

$M_{тр}$  — 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 холодного хода без помощи пускового устройства.

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

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

—————

Ответственный за выпуск *В. С. Розанова*

Редактор *Н. М. Чернецова*

Техн. ред. *Н. П. Беянина.*

Корректор *В. Н. Шонурова.*

Сдано в набор 22.05.75.

Подписано к печ. 28.08.75.

Формат бум. 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

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.