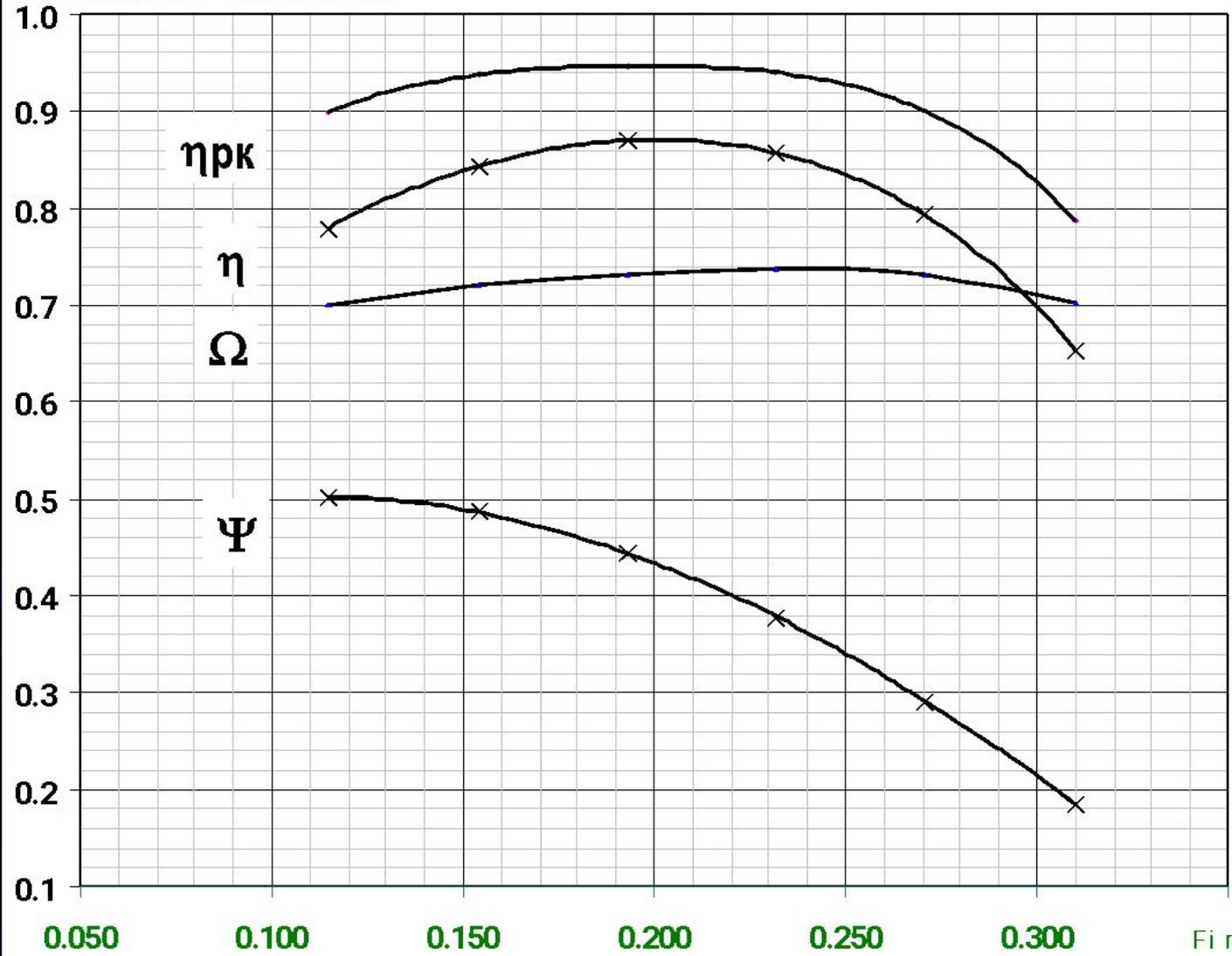


Центробежные компрессоры

Характеристики

KPD r k, KPD, Omega, Psi

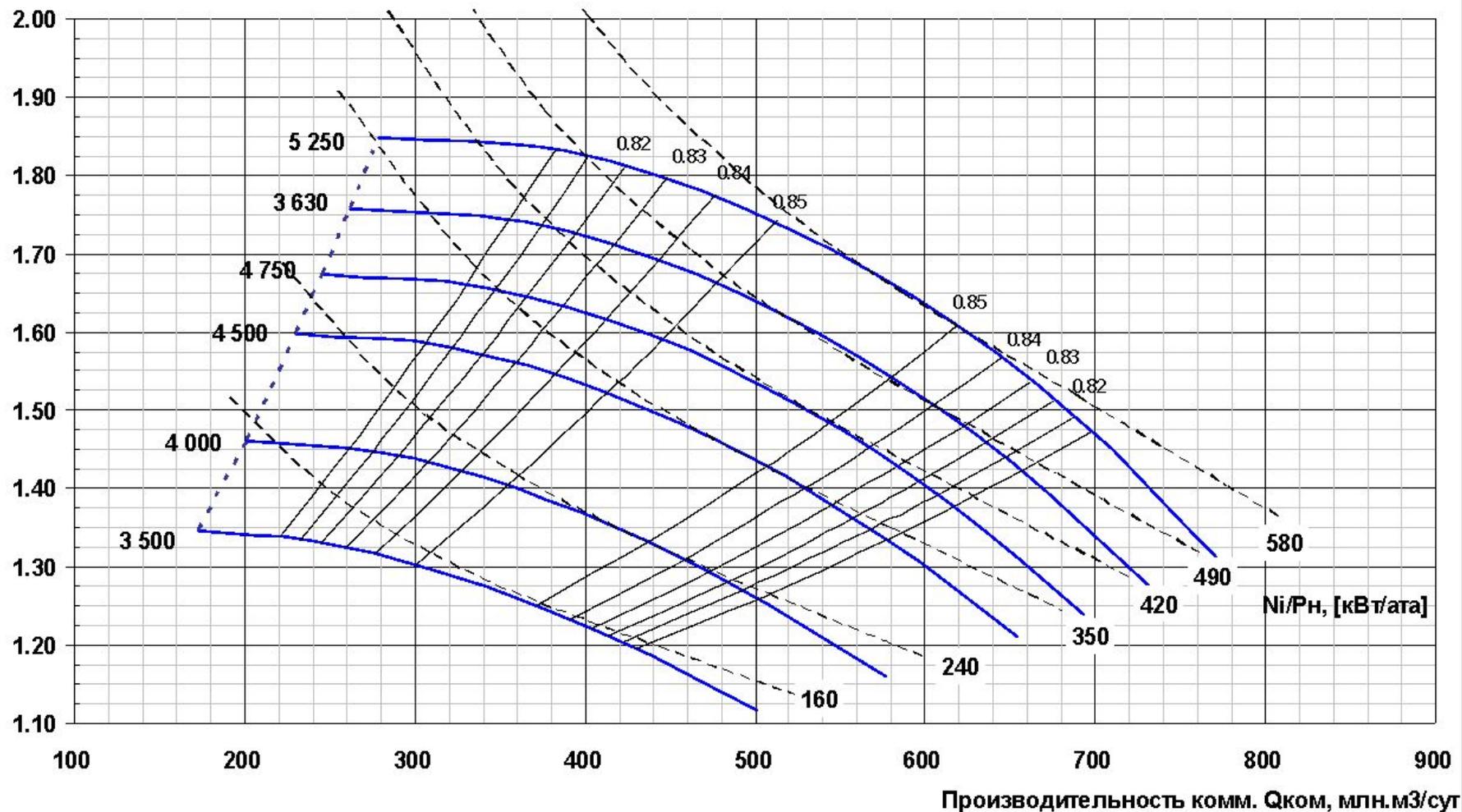


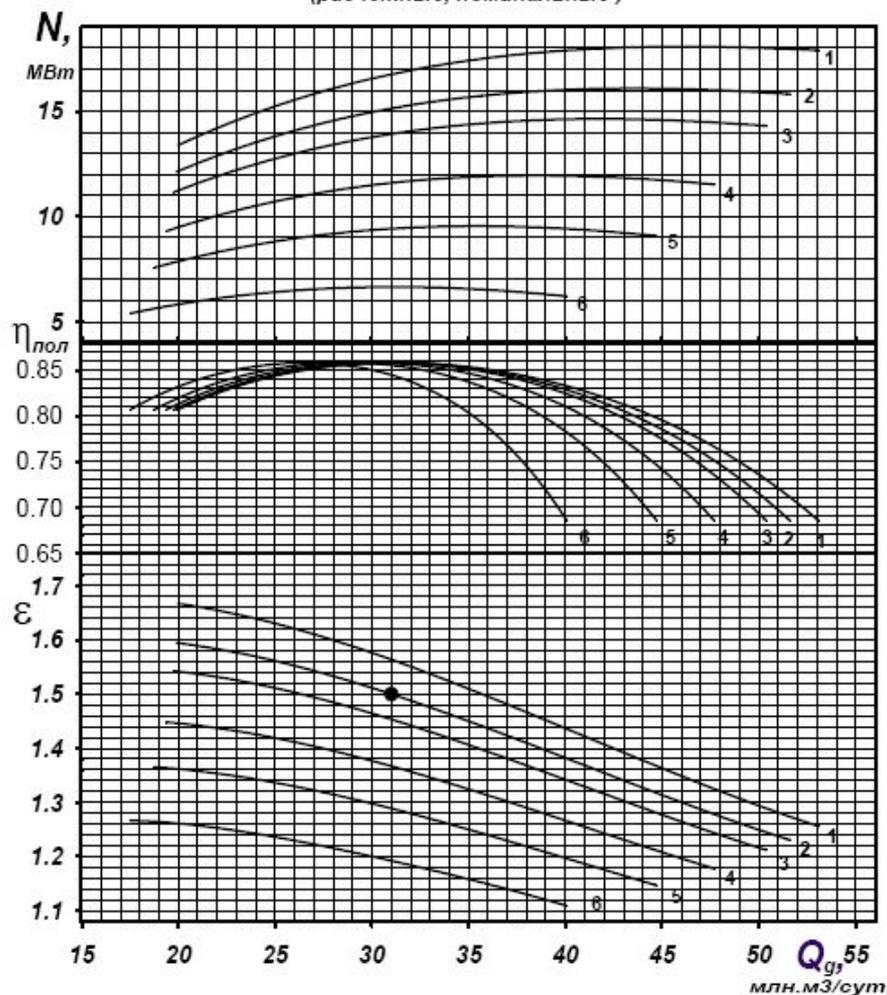
Fir 2)

Графики рабочих характеристик

ϵ

Газодинамические характеристики СПЧ-18/56-1,7
Значения расчетных величин: $T_H=288.15$ К, $R=506.08$ Дж/кг.К, $Z=0.92$, $k=1.312$





Обозначения:

Q_d - производительность объемная, отнесенная к 20 °С и 0.1013 МПа;

ε - начальное давление;

$\eta_{пол}$ - политропный КПД

N - потребляемая мощность;

• - расчетный режим.

Начальные условия:

Температура начальная $T_n=283$, К;

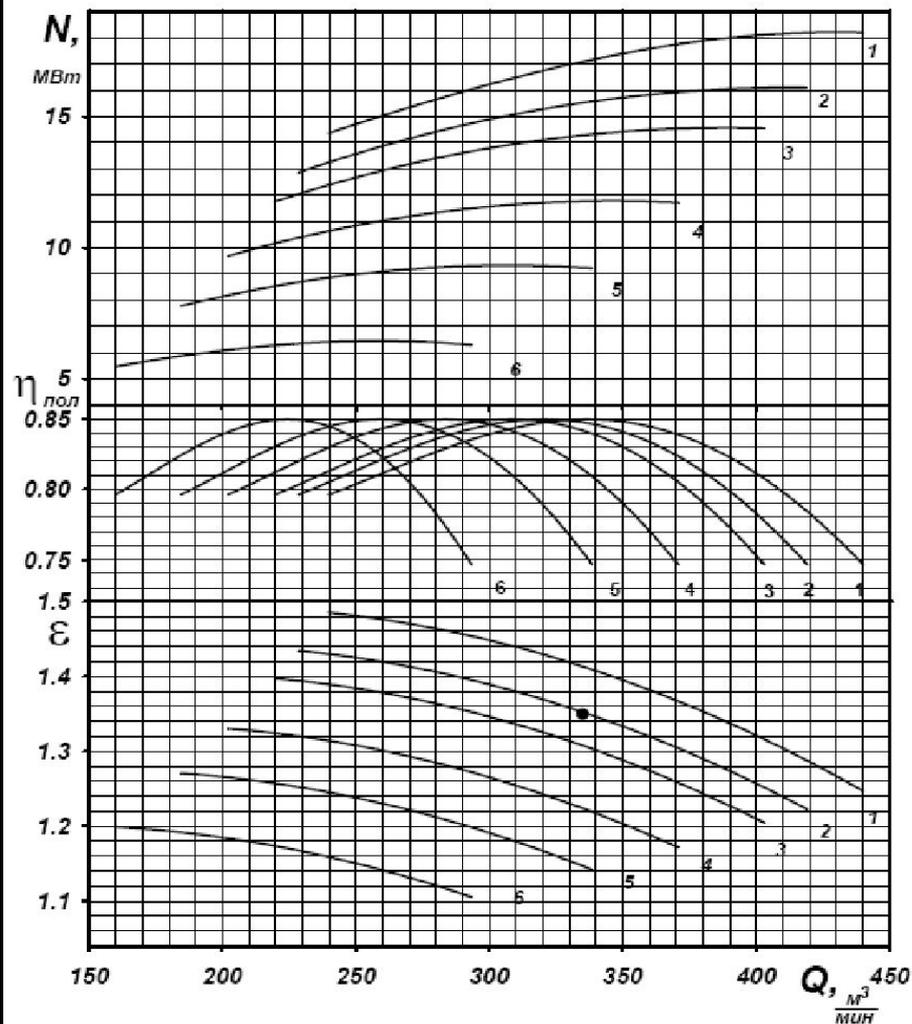
Давление конечное $P_k=9,91$ МПа;

Плотность газа ρ (20 °С и 0.1013 МПа) = 0,681 кг/м³;

Частота вращения ротора n , об/мин:

1 - 5460 2 - 5200 3 - 5000

4 - 4600 5 - 4200 6 - 3640.



Обозначения:

Q - производительность объемная, отнесенная к начальным условиям;

ε - отношение давлений;

$\eta_{пол}$ - политропный КПД;

N - потребляемая мощность;

• - расчетный режим.

Начальные условия:

Температура начальная $T_n=283$ К;

Давление конечное $P_k = 9,91$ МПа;

Плотность ρ (20 °С, 0.1013 МПа) = 0,681 кг/м³;

Частота вращения ротора n , об/мин:

1 - 5460; 2 - 5200; 3 - 5000;

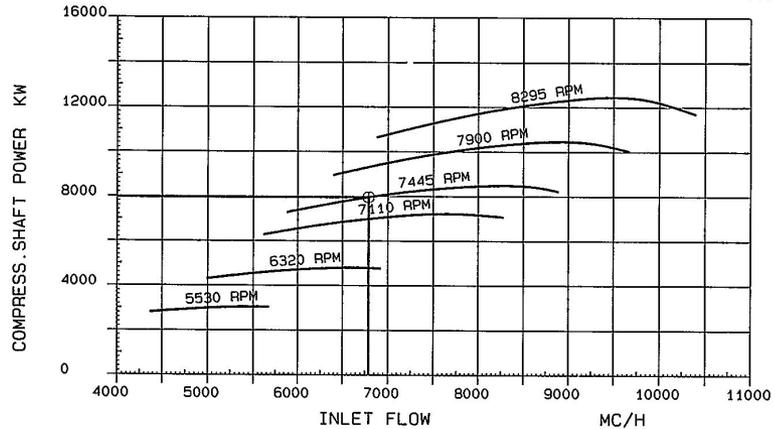
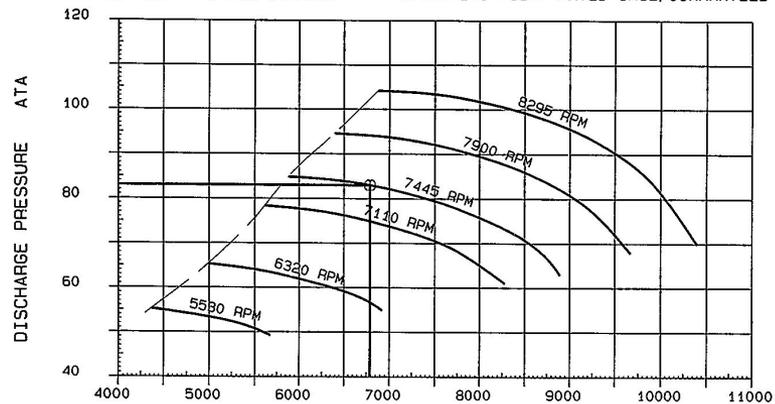
4 - 4600; 6 - 4200; 7 - 3640.

PRODOTTO SU PLOTTER HPGL2

CALCOLO (VERS. 21/07/97)

PLOTTER (VERS. 16/05/95)

RESIDUE GAS COMPR. STAGE OVERALL OPERATING POINT RATED CASE/GUARANTEED



THESE CURVES ARE VALID IN THE FOLLOWING CONDITIONS

GAS HANDLED	CH4 + OTHERS
MOLECULAR WEIGHT	18.69
INTAKE PRESSURE	32.1 ATA
INTAKE TEMPERATURE	35.2 C
COMPRESS. AT SUCTION	0.929
RATIO OF SPEC. HEATS	1.291

JOB 1101465

Nuovo Pignone
FIRENZE

REV.	DESCRIZIONE - DESCRIPTION	PREP'D	CONT-CHK'D	APP-APPR'D	DATA-DATE	N. S05 23004 /4
------	---------------------------	--------	------------	------------	-----------	-----------------

TITOLO - TITLE	ICA FLUOR DANIEL X PEMEX PREDICTED PERFORMANCE CURVES FOR CENTRIFUGAL COMPRESSOR_BCL408/N	LINGUA-LANG.	PAGINA-SHEET
		A	2/3

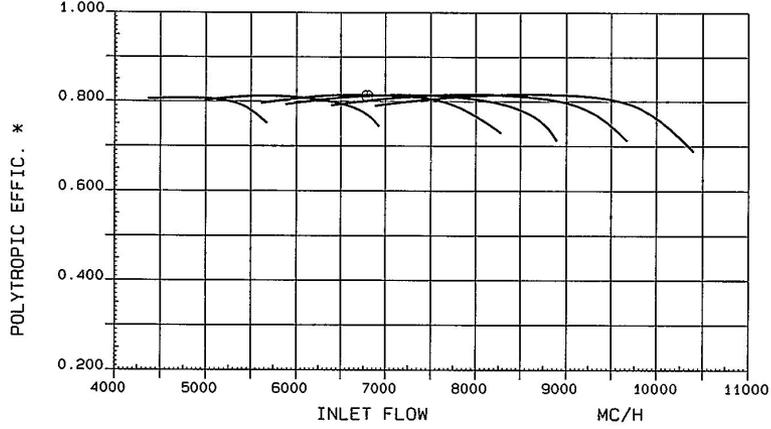
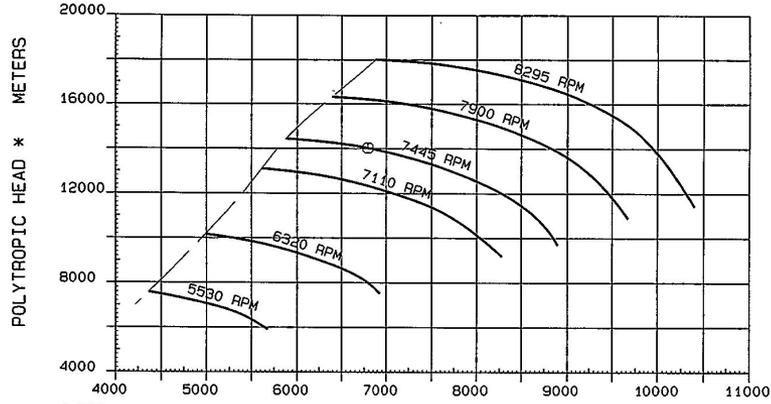
IL PRESENTE DOCUMENTO E' PROPRIETA' NUOVO PIGNONE. A TERMINE DI LEGGE OGNI DIRITTO E' RISERVATO. SOSTITUISCE IL-REPLACES
THIS DOCUMENT IS THE PROPERTY OF NUOVO PIGNONE. ALL RIGHTS ARE RESERVED ACCORDING TO LAW. SOSTITUITO DA-REPLACED BY

PRODOTTO SU PLOTTER HPGL2

CALCOLO (VERS. 21/07/97)

PLOTTER (VERS. 16/05/95)

RESIDUE GAS COMPR. STAGE OVERALL OPERATING POINT RATED CASE/GUARANTEED



THESE CURVES ARE VALID IN THE FOLLOWING CONDITIONS

GAS HANDLED	CH4 + OTHERS
MOLECULAR WEIGHT	18.69
INTAKE PRESSURE	32.1 ATA
INTAKE TEMPERATURE	35.2 C
COMPRESS. AT SUCTION	0.929
RATIO OF SPEC. HEATS	1.291

* FLANGE TO FLANGE

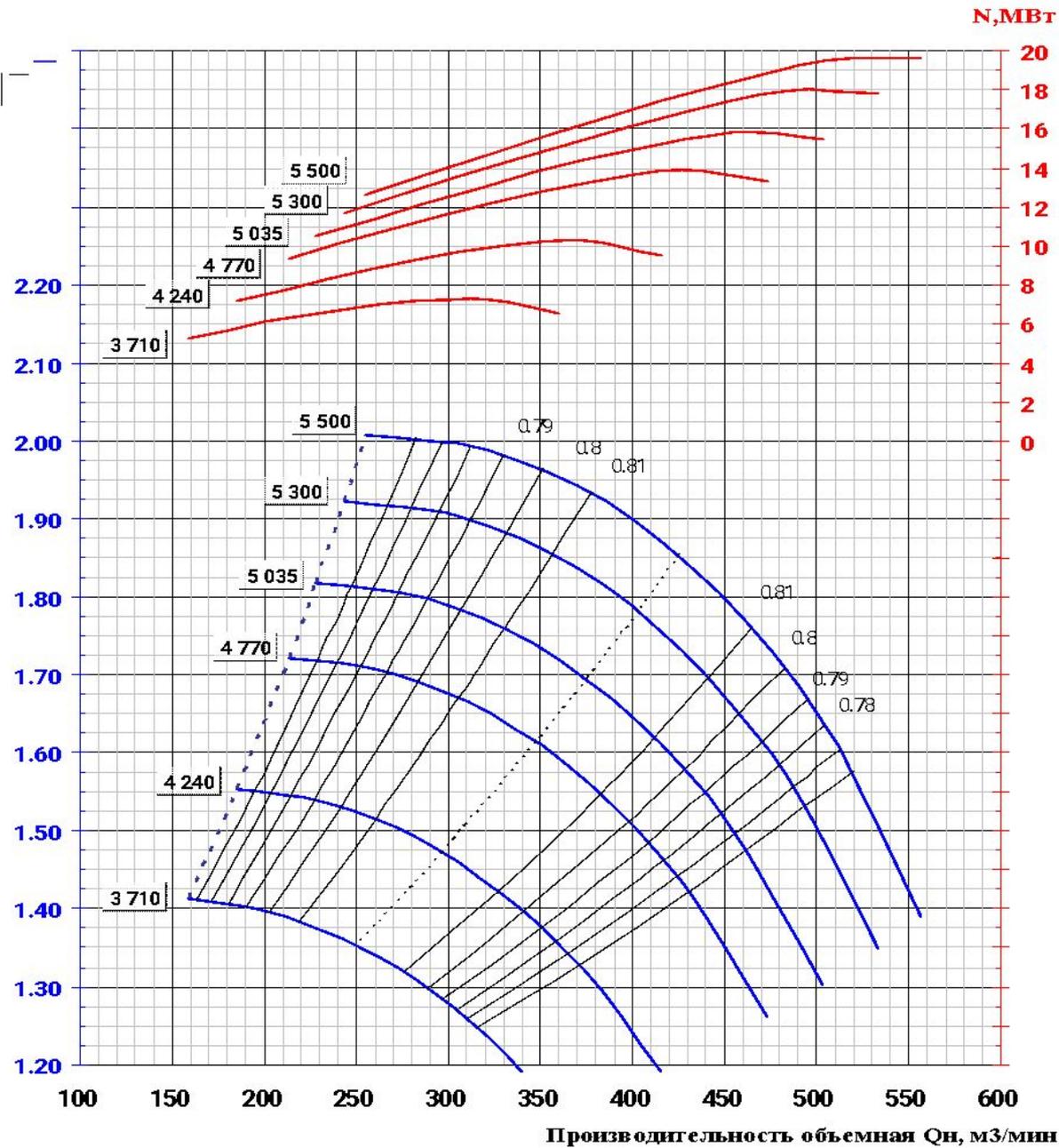
JOB 1101465

Nuovo Pignone
FIRENZE

REV.	DESCRIZIONE - DESCRIPTION	PREP'D	CONT-CHK'D	APP-APPR'D	DATA-DATE	N. S05 23004 /4
------	---------------------------	--------	------------	------------	-----------	-----------------

TITOLO - TITLE	ICA FLUOR DANIEL X PEMEX PREDICTED PERFORMANCE CURVES FOR CENTRIFUGAL COMPRESSOR_BCL408/N	LINGUA-LANG.	PAGINA-SHEET
		A	6/7

IL PRESENTE DOCUMENTO E' PROPRIETA' NUOVO PIGNONE. A TERMINE DI LEGGE OGNI DIRITTO E' RISERVATO. SOSTITUISCE IL-REPLACES
THIS DOCUMENT IS THE PROPERTY OF NUOVO PIGNONE. ALL RIGHTS ARE RESERVED ACCORDING TO LAW. SOSTITUITO DA-REPLACED BY



Производительность объемная Q_n , $\text{m}^3/\text{мин}$

СТУПЕНЬ СЖАТИЯ

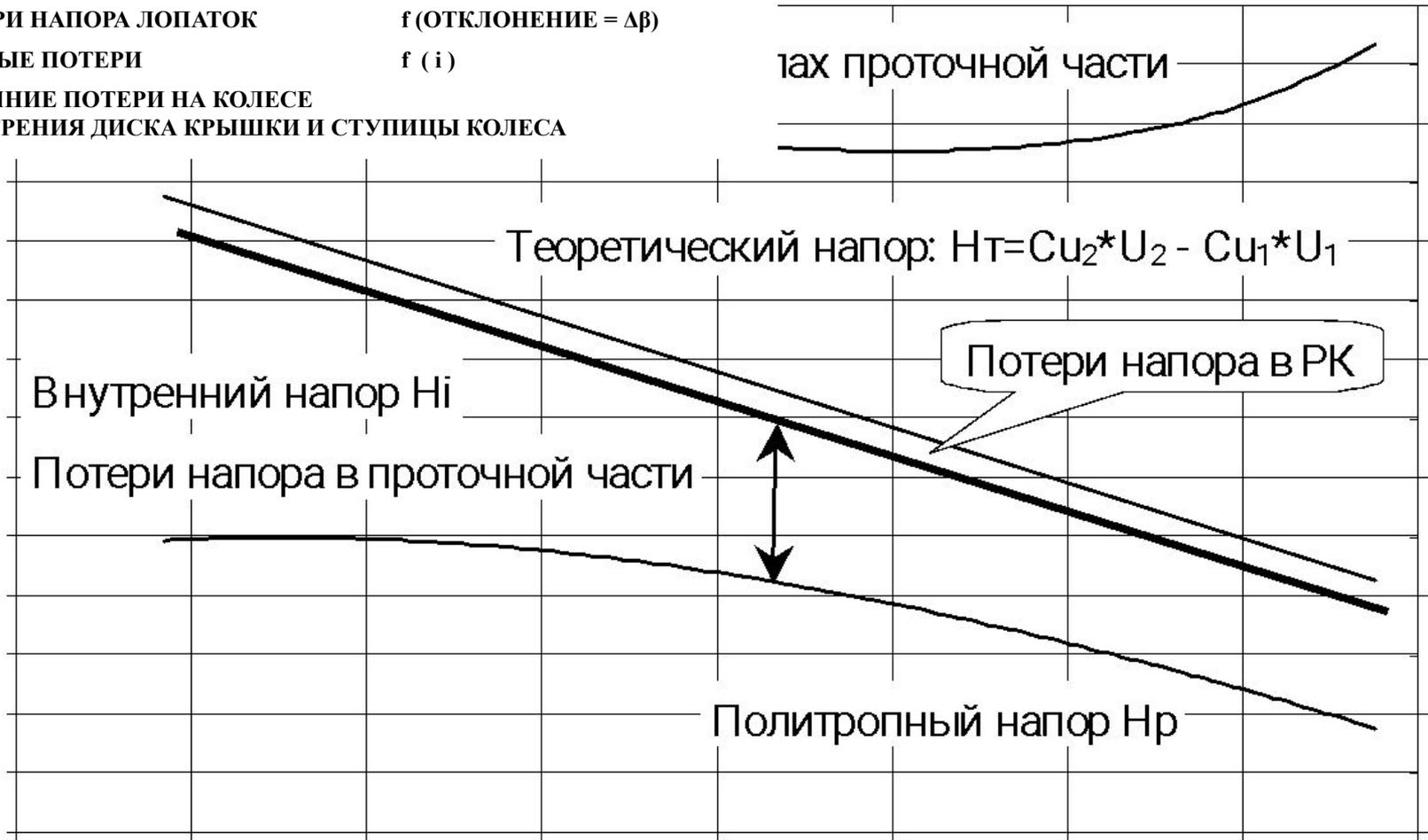
ПОТЕРИ ОДНОЙ СТУПЕНИ

1) ПОТЕРИ КАНАЛА ИЗ-ЗА

- ТРЕНИЯ f (СКОРОСТЬ)
- ПОТЕРИ НАПОРА ЛОПАТОК f (ОТКЛОНЕНИЕ = $\Delta\beta$)
- УДАРНЫЕ ПОТЕРИ $f(i)$

-2) ВНЕШНИЕ ПОТЕРИ НА КОЛЕСЕ

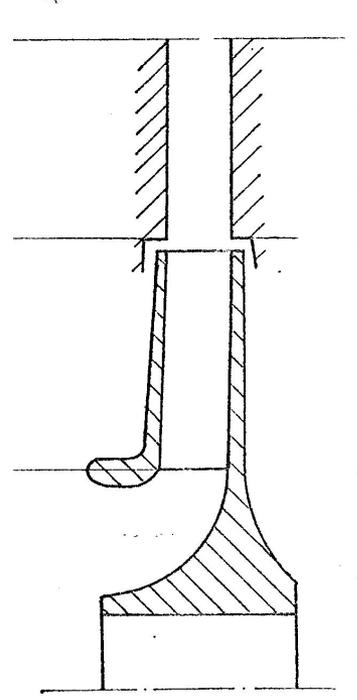
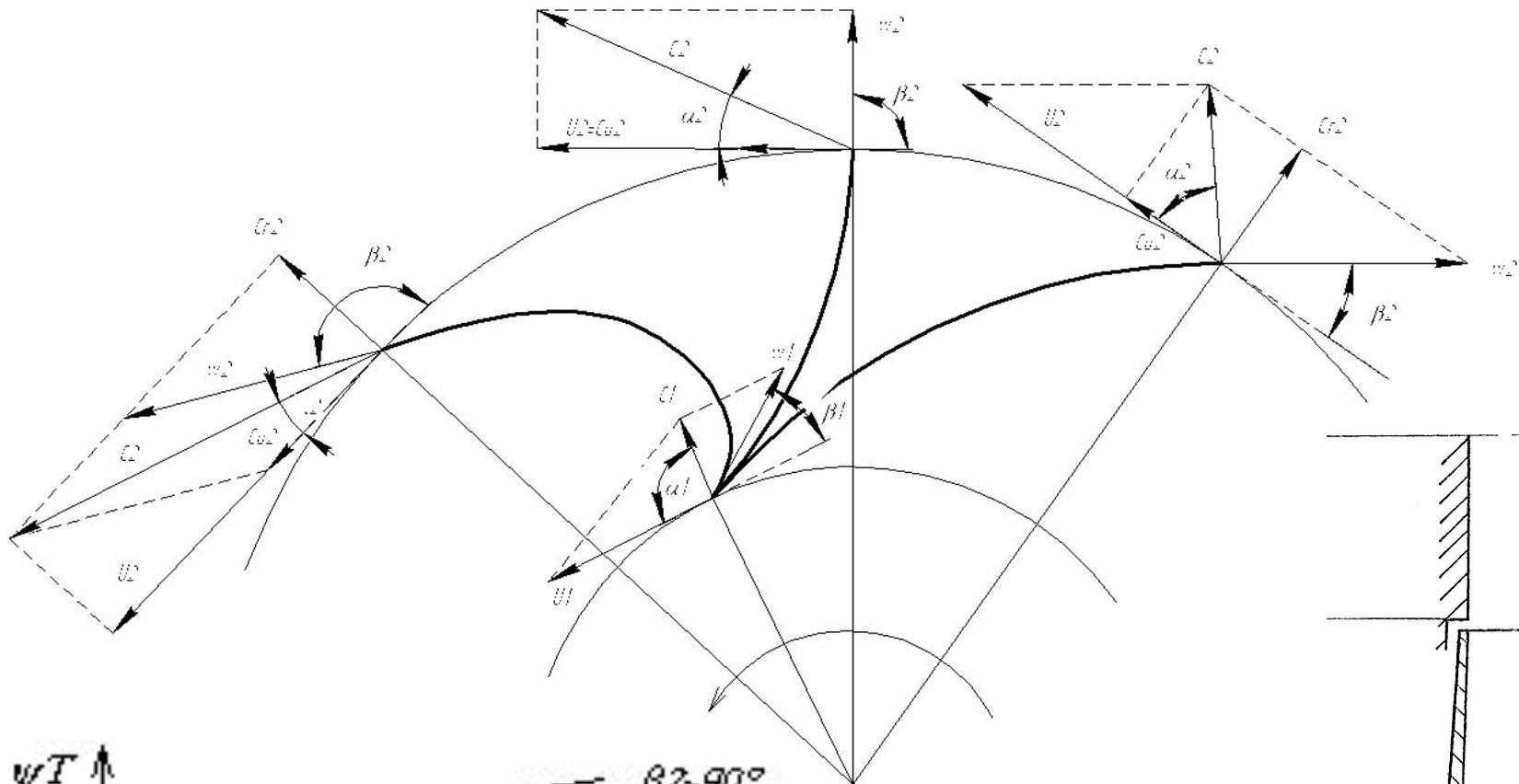
- ИЗ-ЗА ТРЕНИЯ ДИСКА КРЫШКИ И СТУПИЦЫ КОЛЕСА



УРАВНЕНИЕ БЕРНУЛЛИ: $H_i = H_p + H_d + H_r$

РАСХОД

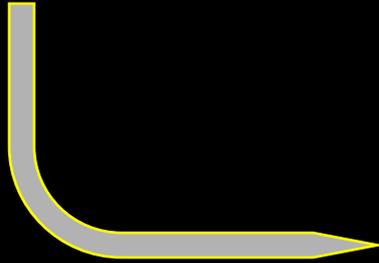
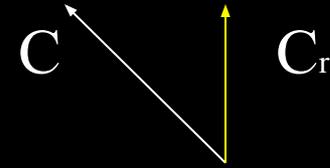
Механическая работа, сообщаемая газу рабочим колесом, расходуется на сжатие и перемещение газа, увеличение его кинетической энергии и преодолению сопротивления движению



УРАВНЕНИЕ ЭЙЛЕРА:

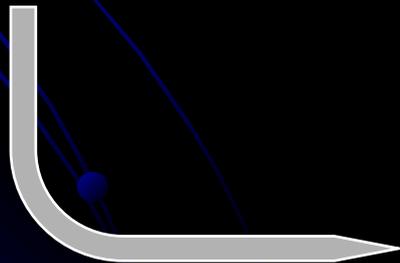
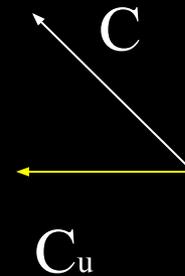
ИЗМЕНЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ДВИЖЕНИЯ $N_T = Cu_2 * U_2 - Cu_1 * U_1$

Радиальная составляющая скорости отвечает за расход

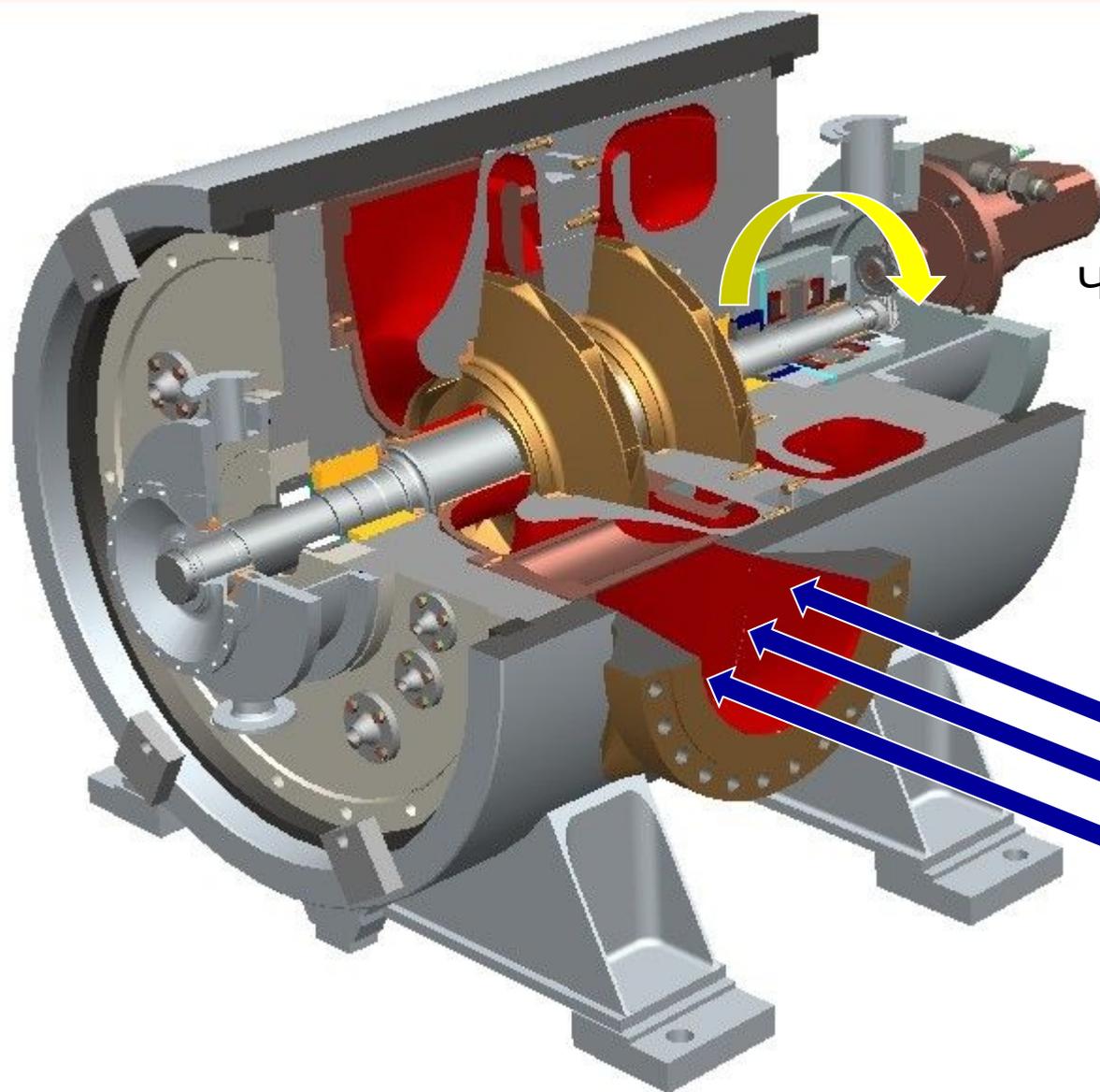


Умножив радиальный компонент скорости на площадь сечения получим объемный расход через сечение

Тангенциальная составляющая скорости отвечает за работу совершаемую над потоком



Уравнение Эйлера
10



Частота вращения ротора

Давление

Температура

Молекулярный вес

Во всех случаях основные формулы для оценки:

$$H_p = zRT_n \delta [(p_k/p_n)^{1/\delta} - 1] = C_p \Delta T / \eta_{пол} \quad (1)$$

$$H_{p1} / n_1^2 = H_{p2} / n_2^2 \quad (2)$$

$$\rho_n = P_n / R z T_n \quad (3)$$

$$\varepsilon = (H_p / (zRT_n \delta) + 1)^\delta \quad (4)$$

$$N_i = G H_i = G H_p / \eta_{пол} \quad (5)$$

$$Q_1 / n_1 = Q_2 / n_2 \quad (6)$$

$$\left[\frac{N_i}{\rho_n} \right]_{.1} = \left[\frac{N_i}{\rho_n} \right]_{.2} \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^3 \quad \eta_{пол1} = \eta_{пол2}$$

Изменение оборотов ротора

$$\begin{aligned} \uparrow n &\rightarrow (2)(4) \quad \uparrow \varepsilon \quad (1)(5) \rightarrow \uparrow N \\ \uparrow n &\rightarrow (6) \quad \uparrow Q \quad (5) \rightarrow \uparrow N \end{aligned}$$

Изменение температуры на входе.

$$\begin{aligned} \uparrow T - z \uparrow^* &\rightarrow \varepsilon \downarrow^{**} \\ n = \text{const} &\rightarrow (1) \quad Q = \text{const} \rightarrow G = Q \cdot \rho_n \\ \uparrow T &\rightarrow \downarrow \rho_n \rightarrow \downarrow G \quad (\downarrow Q_{ком} \sim G) \rightarrow \downarrow N \end{aligned}$$

Изменение давления на входе

$$\begin{aligned} n = \text{const} &\rightarrow (2) \quad H_p = \text{const} \\ \uparrow P &\rightarrow \uparrow \rho_n \rightarrow \uparrow G \quad (\uparrow Q_{ком} \sim G) \rightarrow \uparrow N \\ \uparrow P &\rightarrow z \downarrow^* \rightarrow \varepsilon \uparrow^{**} \end{aligned}$$

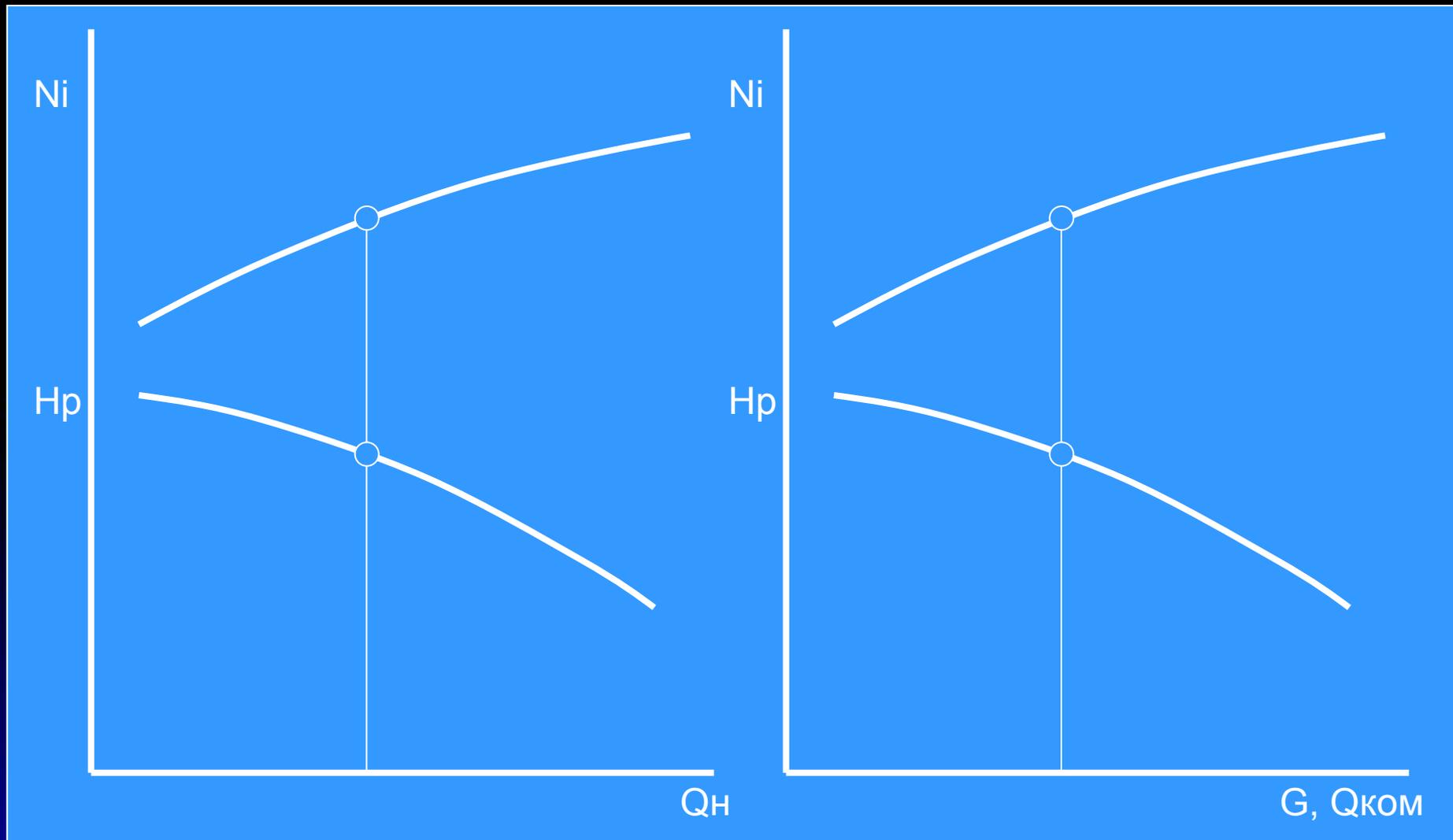
Изменение молекулярного веса газа

$$\begin{aligned} n = \text{const} &\rightarrow (2) \quad H_p = \text{const} \\ \uparrow M &\rightarrow \downarrow R \rightarrow \uparrow \rho_n \rightarrow \uparrow G \quad (\uparrow Q_{ком} \sim G) \rightarrow \uparrow N \\ \uparrow M &\rightarrow z \downarrow^* \rightarrow \varepsilon \uparrow \end{aligned}$$

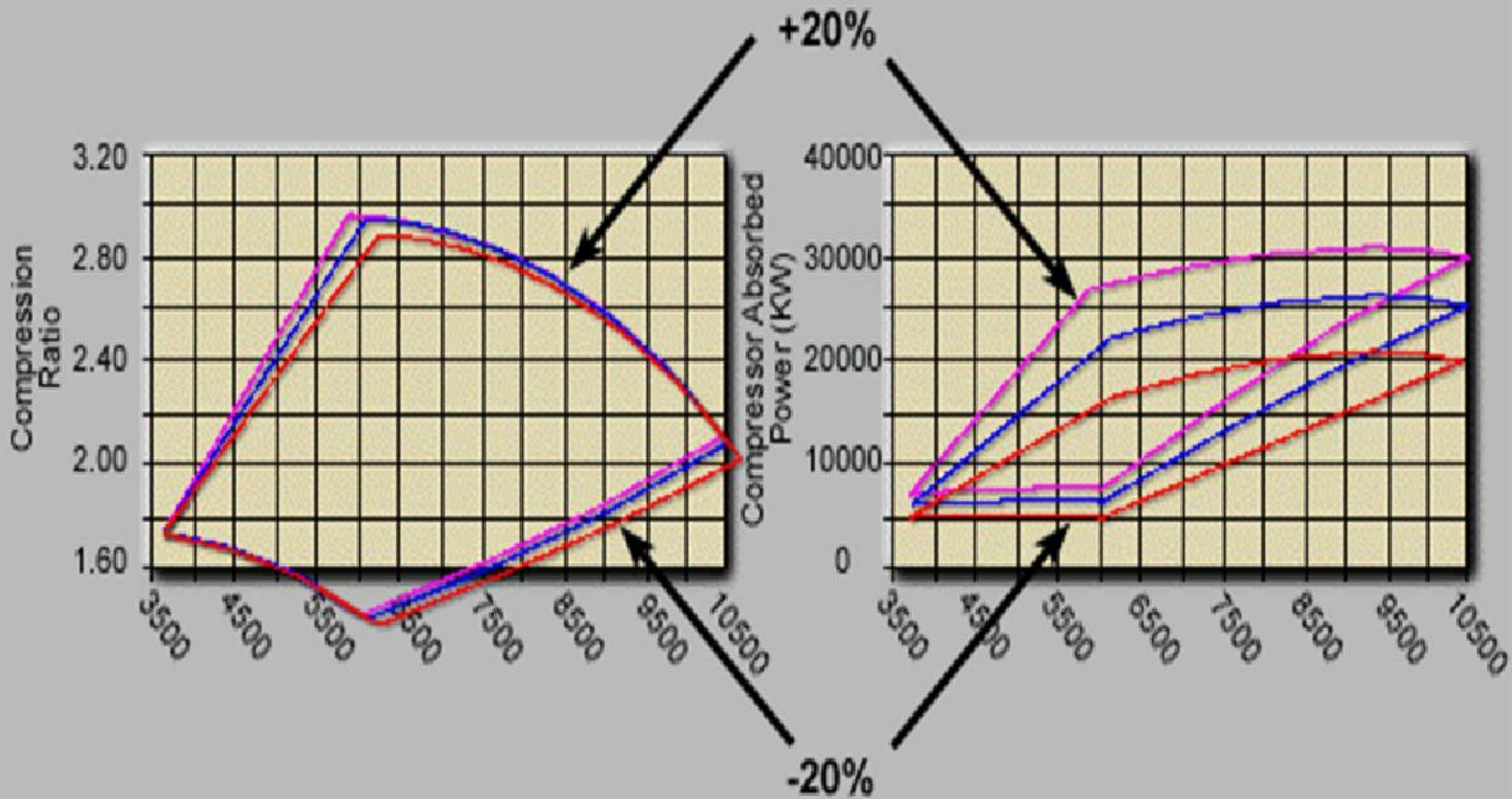
* (см свойства природного газа)

** (изменением (κ/κ-1) пренебречь)

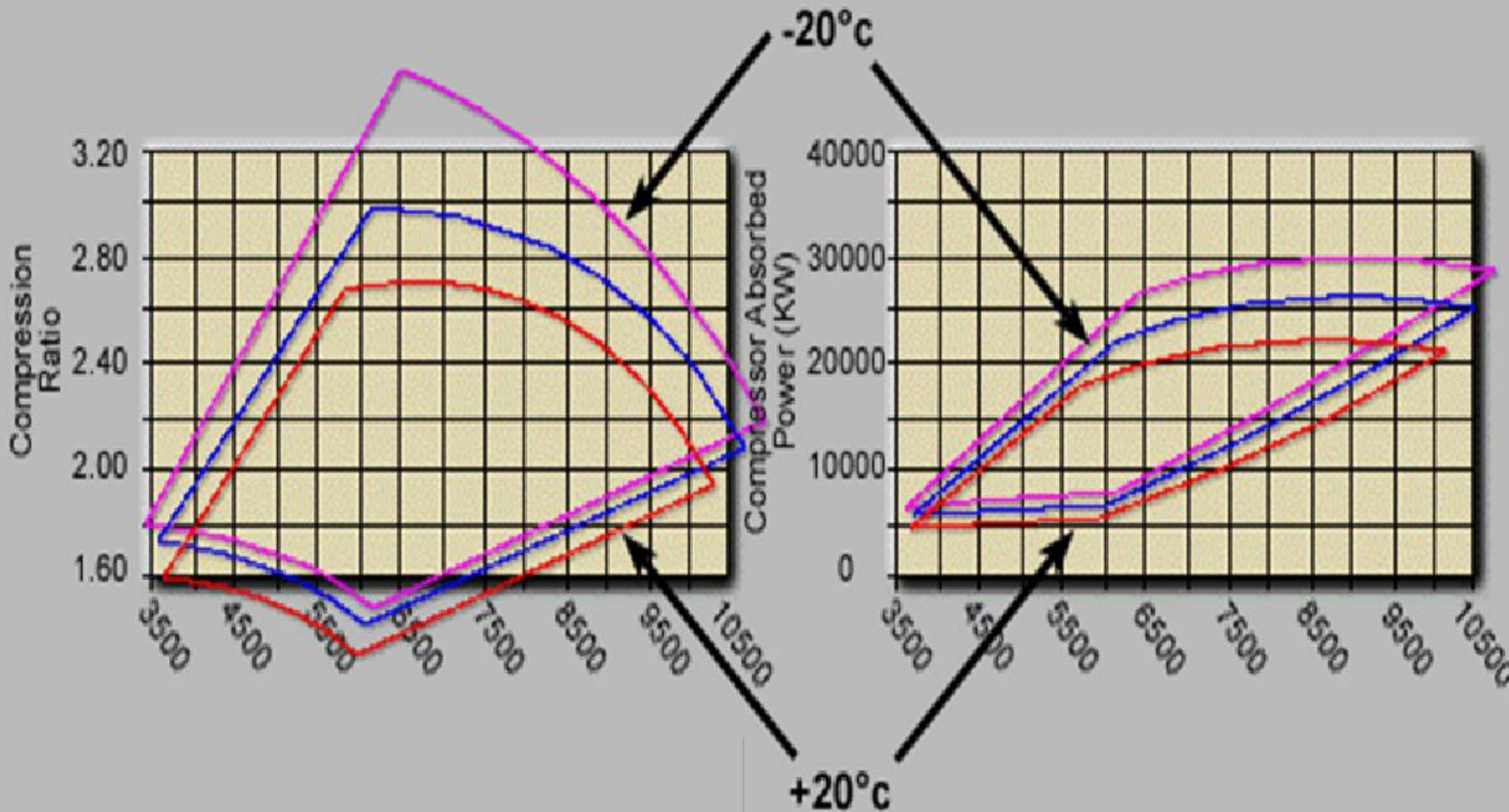
Изменение характеристик при изменении условий работы Частота вращения



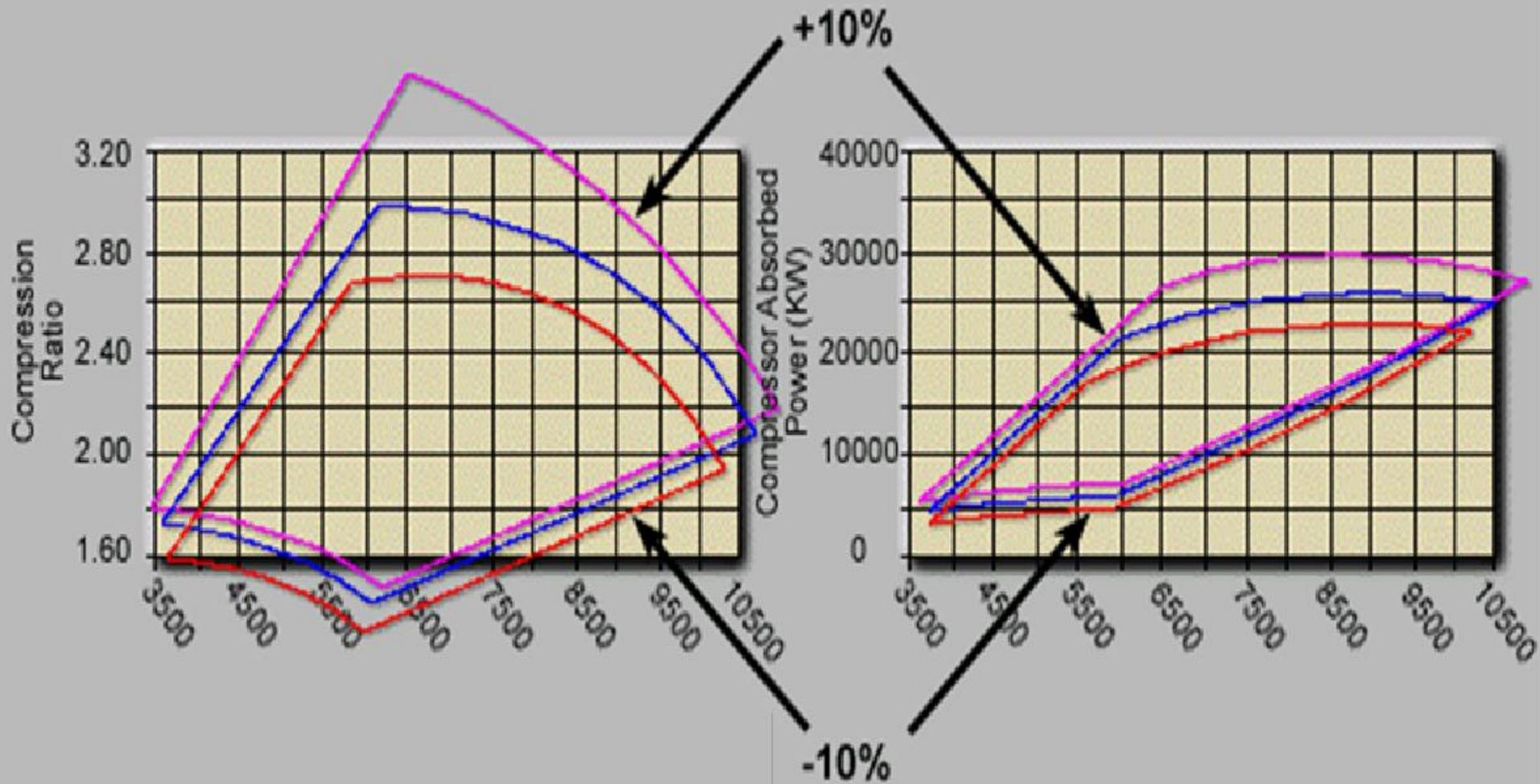
Изменение давления на входе компрессора



Изменение температуры газа на входе компрессора

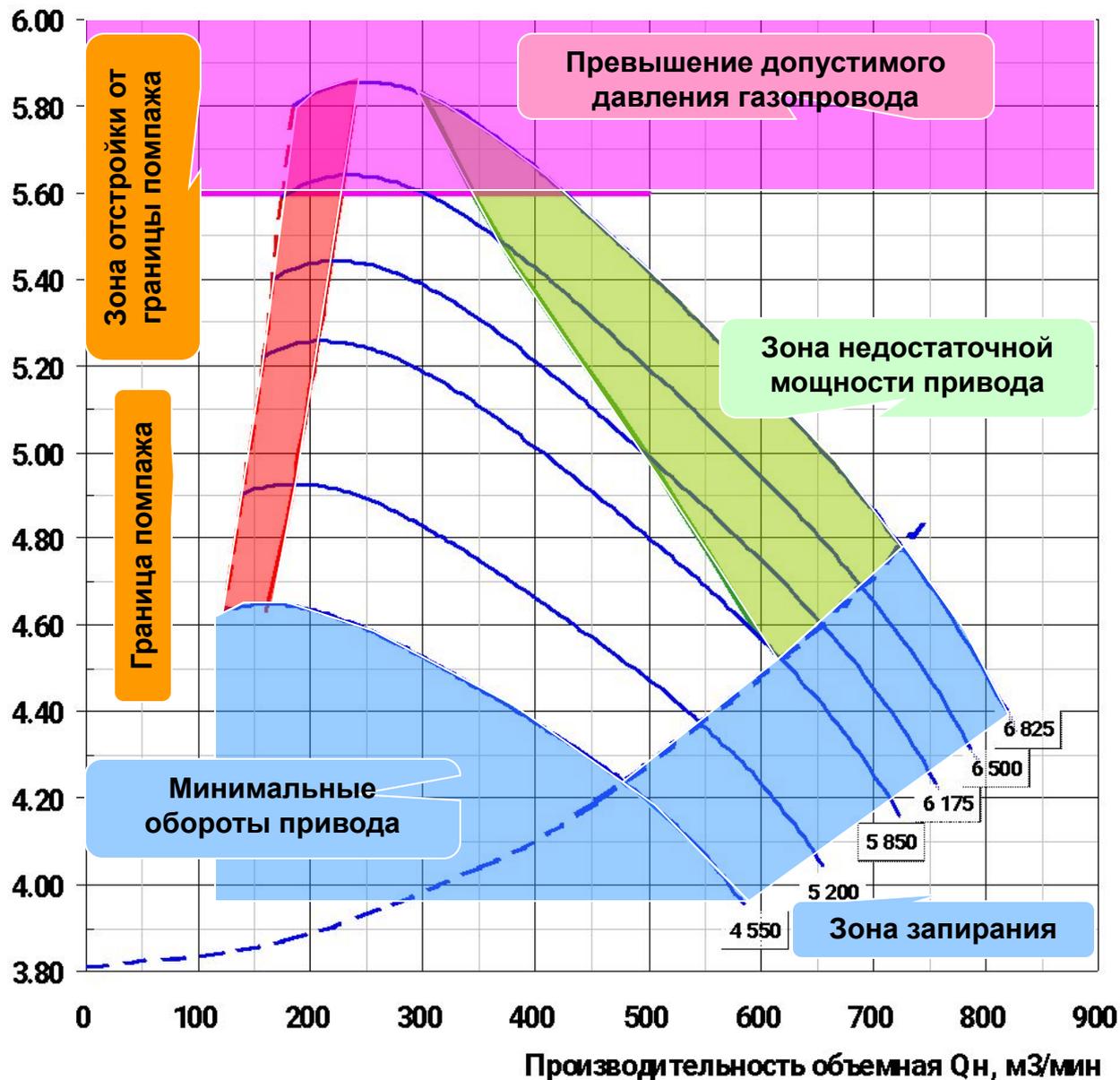


Изменение молекулярного веса газа на входе компрессора



Рк, МПа

Газодинамическая характеристика компрессора НЦ-12/56-1,44



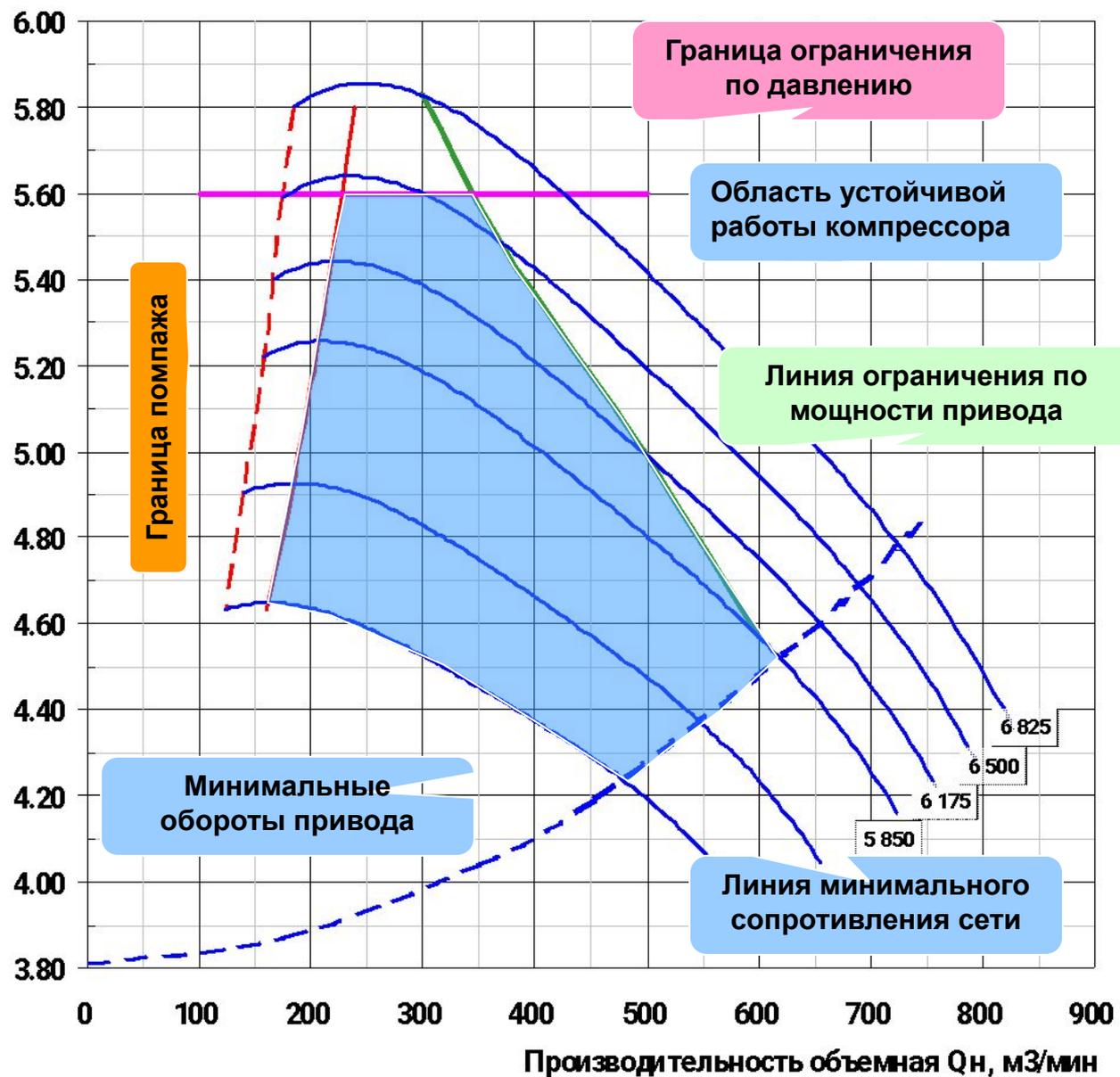
Начальные условия:

Давление на входе 3,81 МПа

Температура на входе 15 С

Рк, МПа

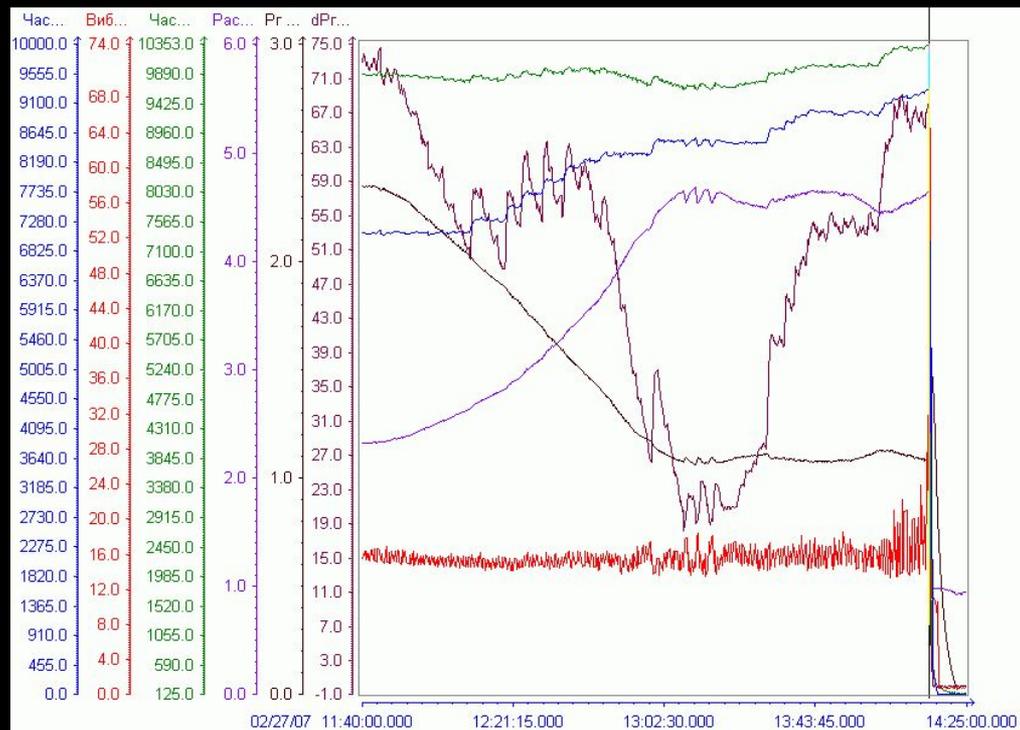
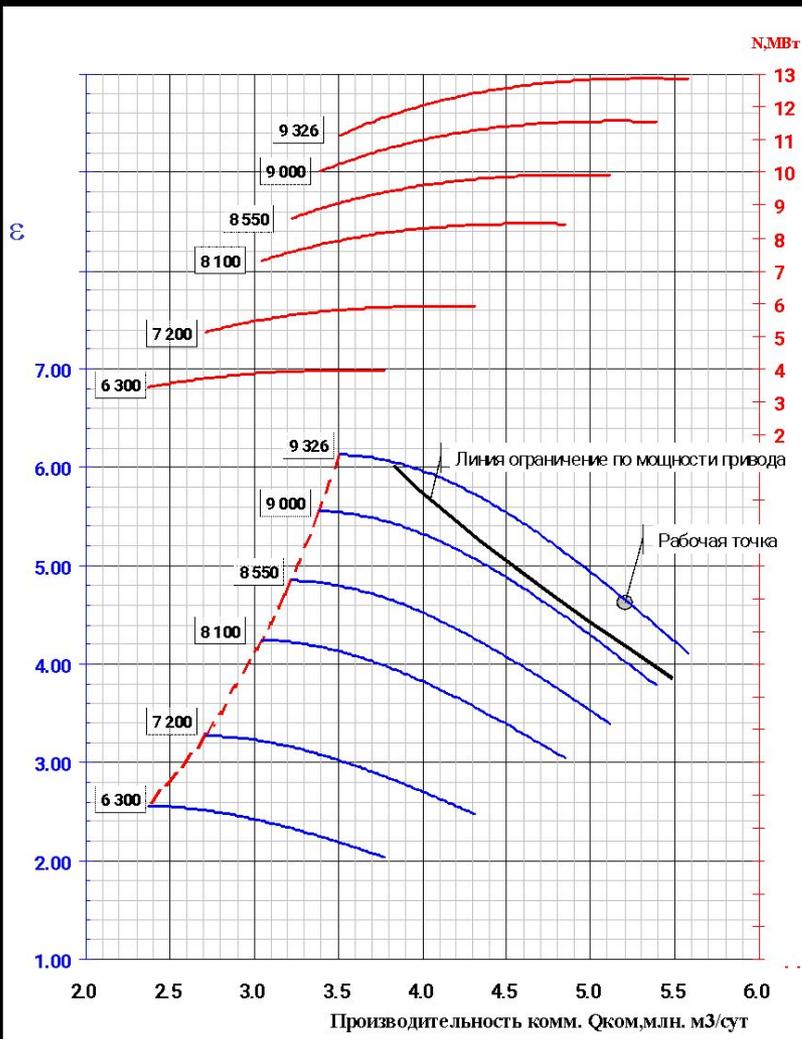
Газодинамическая характеристика компрессора НЦ-12/56-1,44



Начальные условия:

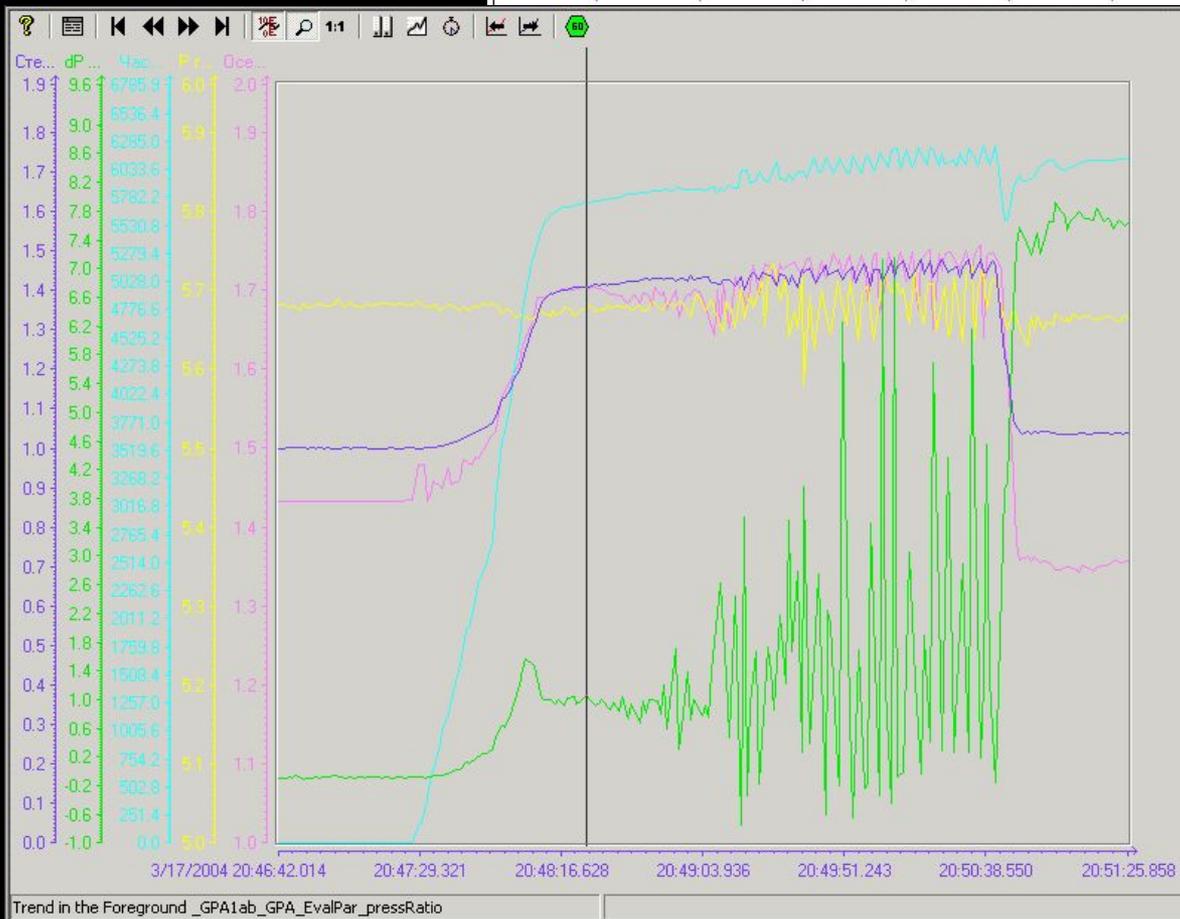
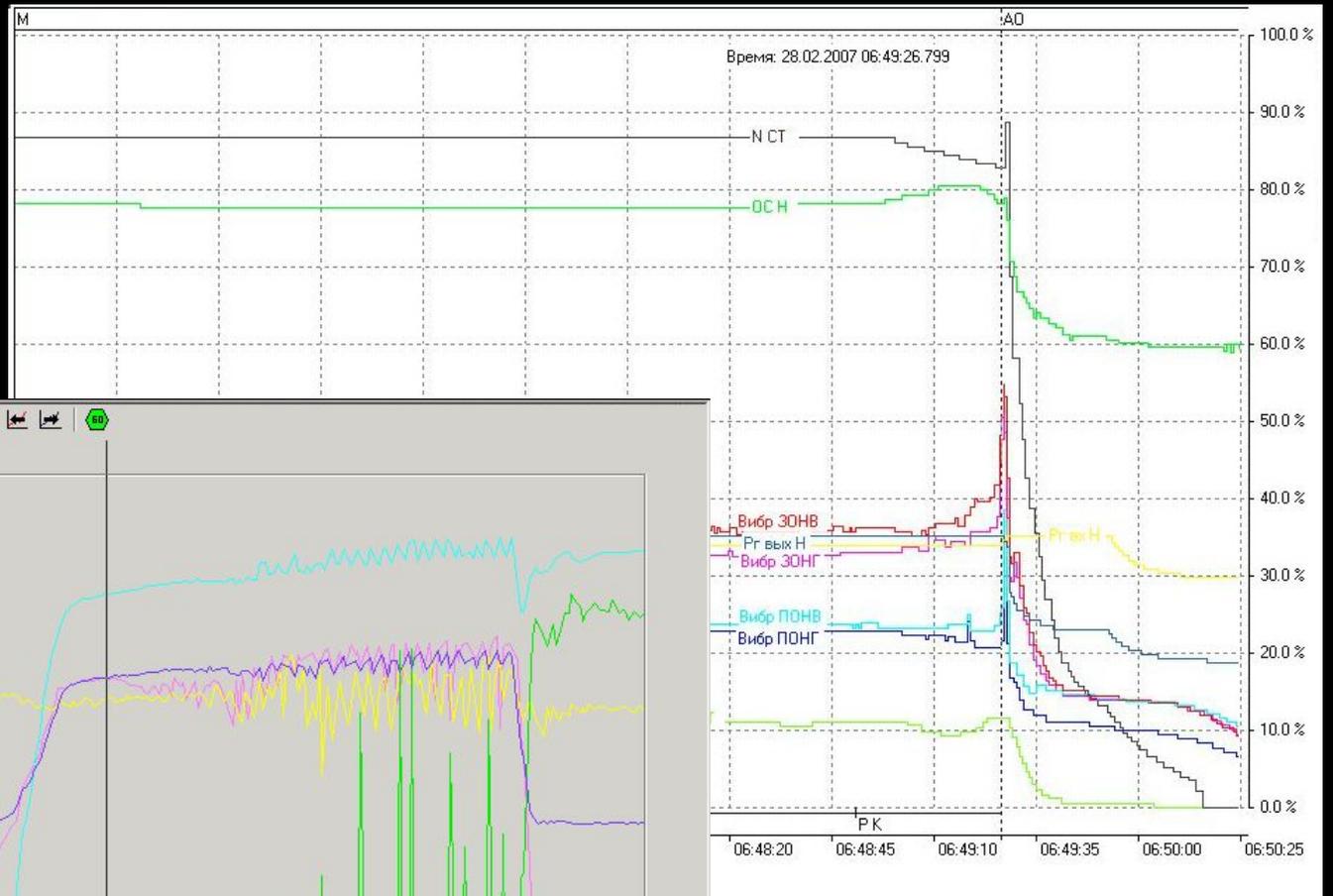
Давление на входе 3,81 МПа

Температура на входе 15 С

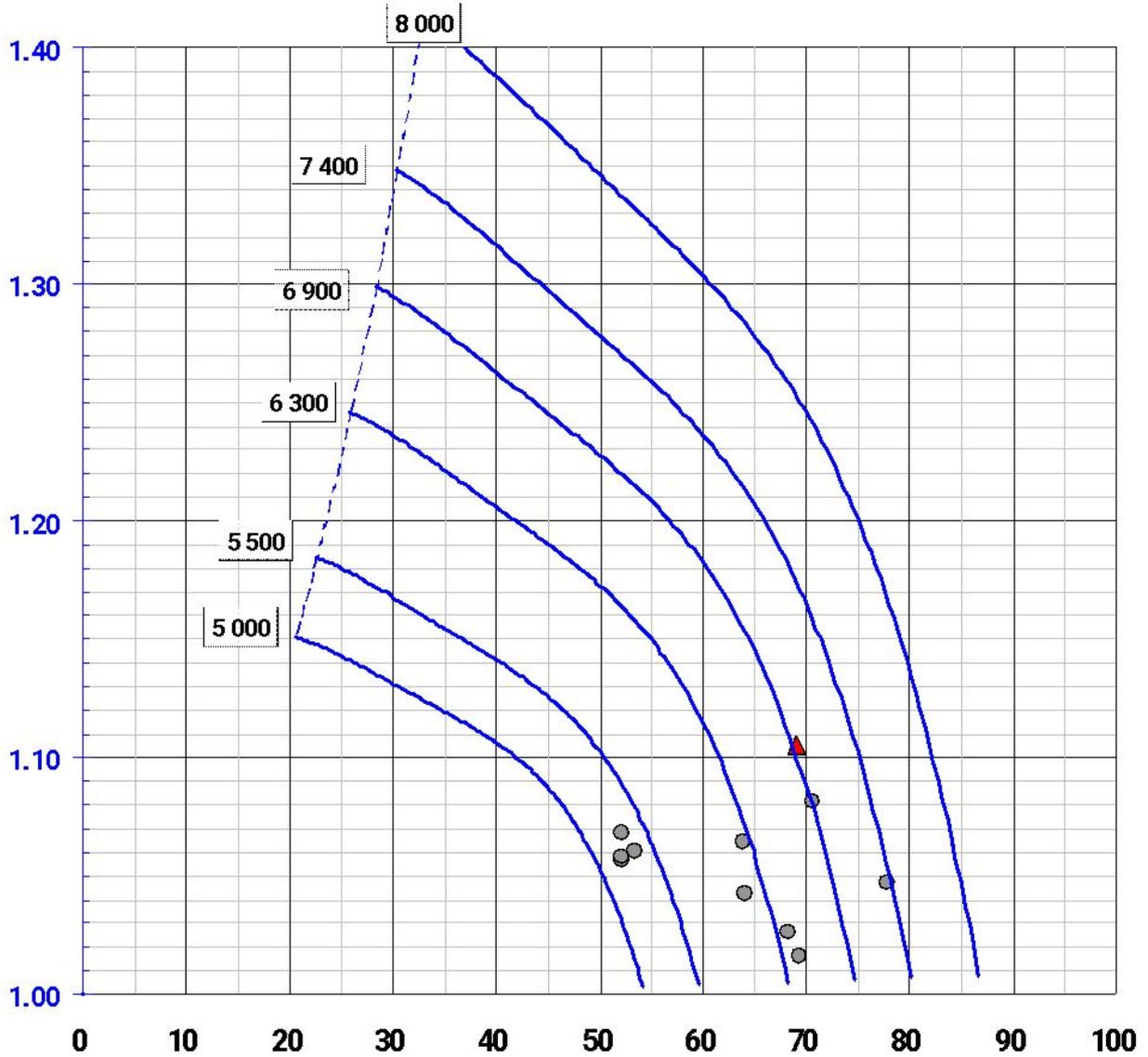


Trend in the foreground Частота вращения Nст, об/мин

Trend	Value	Date/Time
Частота вращения Nст, об/мин	9326.000000	02/27/07 14:14:55.950
Исчерпывающее ПОИ (y) (BV115, YTO10), м	14.728010	02/27/07 14:14:50.950
Частота вращения ротора ГГ-2 (A21), об/мин	10353.000000	02/27/07 14:14:54.950
Расчетная степень сжатия H	4.636141	02/27/07 14:14:51.950
Pг на входе в Н (BP99), МПа	1.230469 i	02/27/07 14:14:51.950
dPг на расх. узле (BP106, 22PdT101), кПа	68.362274	02/27/07 14:14:56.950



ε



Производительность объемная Q_v , м³/мин

Регулирование компрессоров

Для чего?

Регулирование процесса или пропускной способности компрессора

Регулирование давления на выходе

Согласование производительности с нагрузкой потребителя

Что?

Давление нагнетания

Давления всасывания

Расход

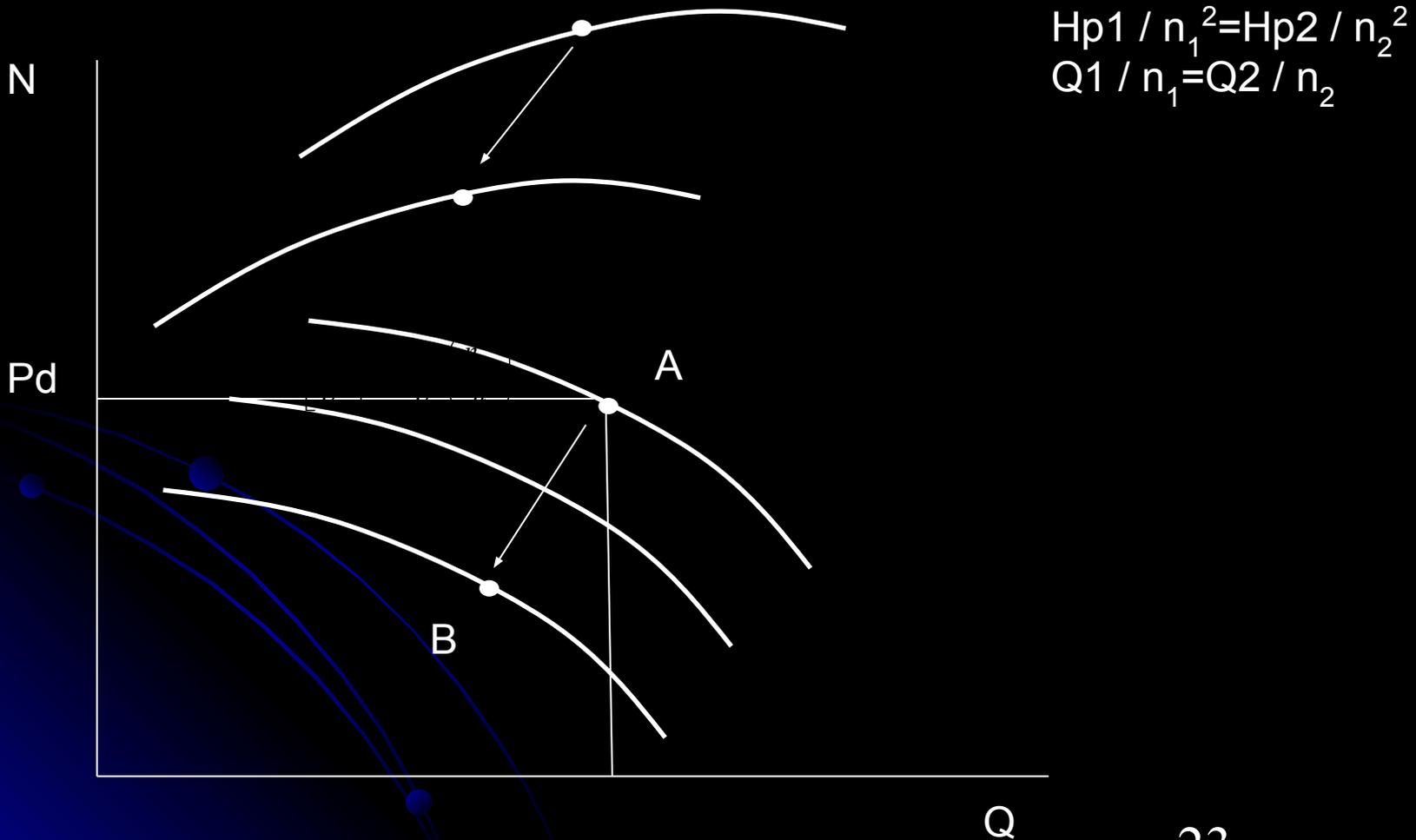
Температуру

Чем?

- Изменение частоты вращения
- Поворот лопаток направляющих аппаратов
- Поворот лопаток диффузора
- Дросселирование на всасывании
- Дросселирование на нагнетании
- Байпасирование (перепуск)

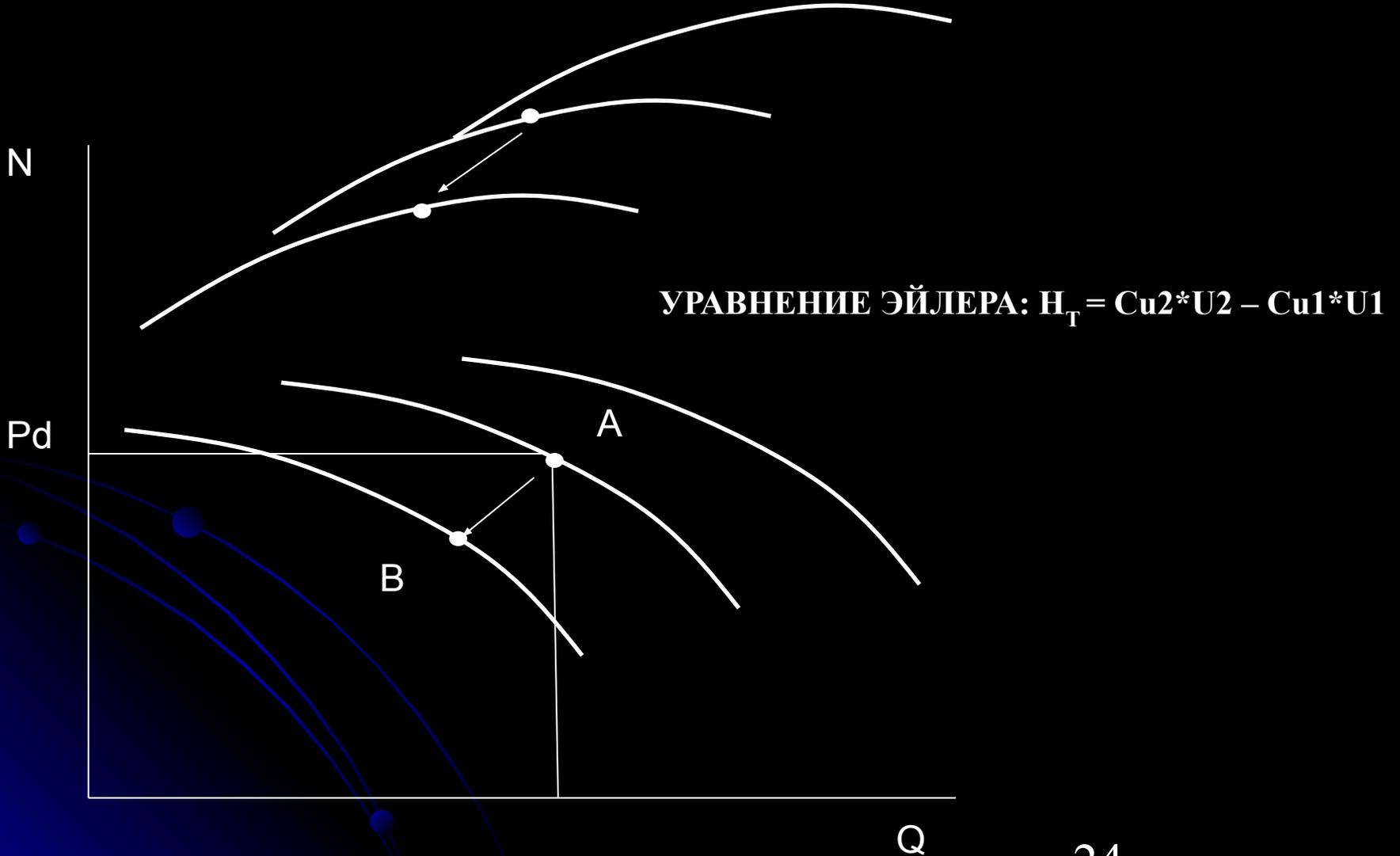
Регулирование компрессоров

Изменение частоты вращения



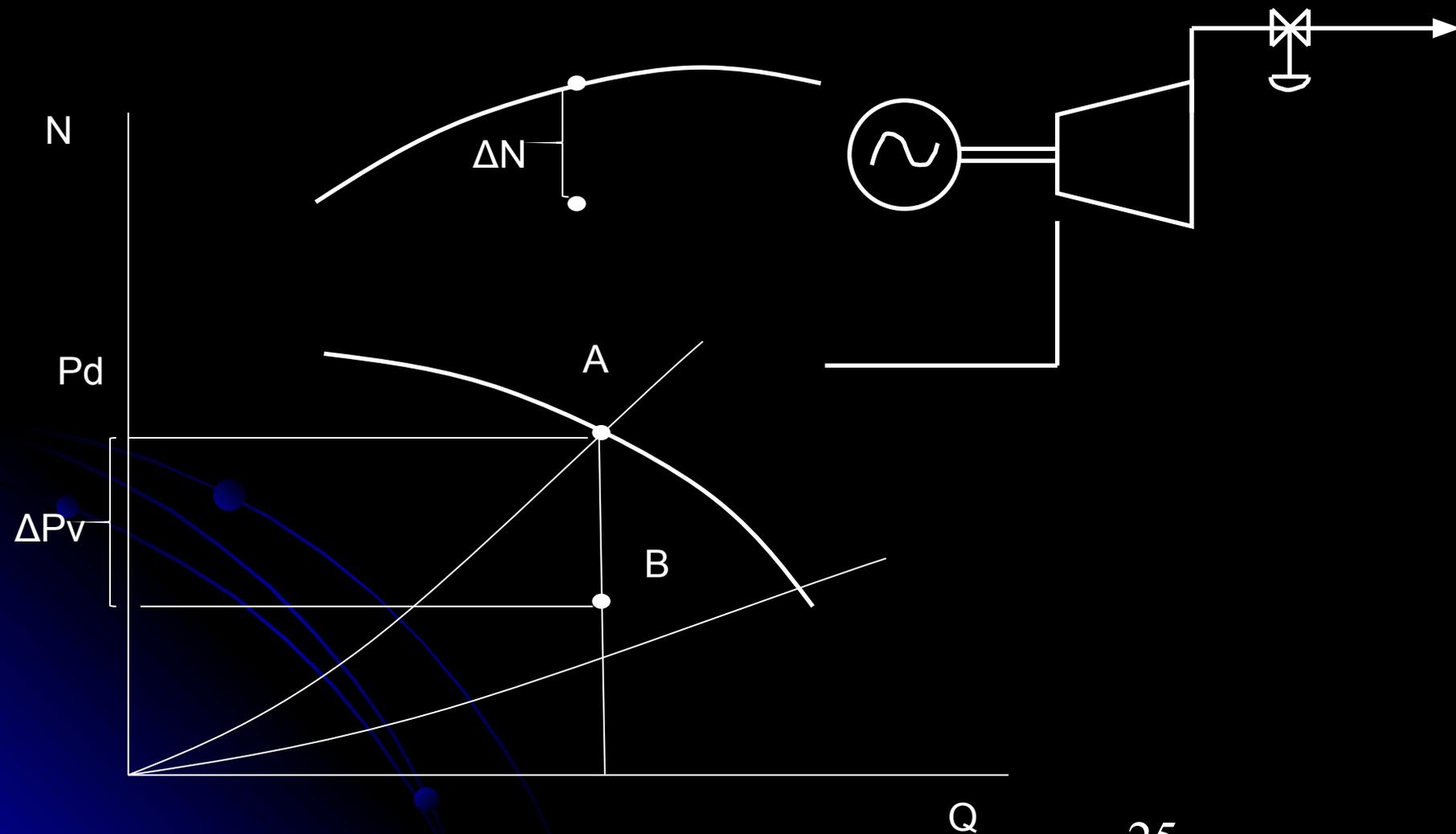
Регулирование компрессоров

Поворот лопаток направляющих аппаратов



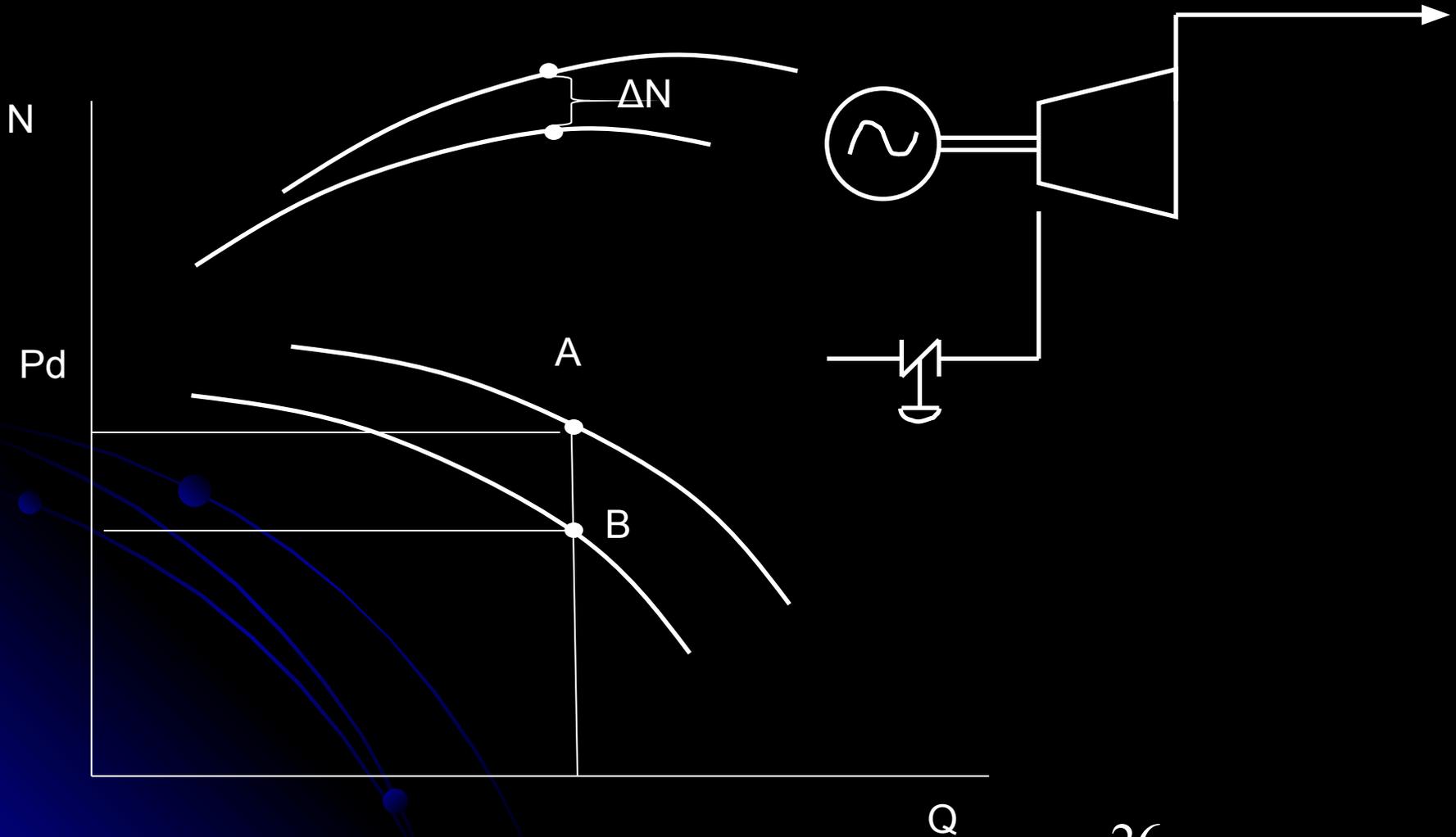
Регулирование компрессоров

Дросселирование на нагнетании



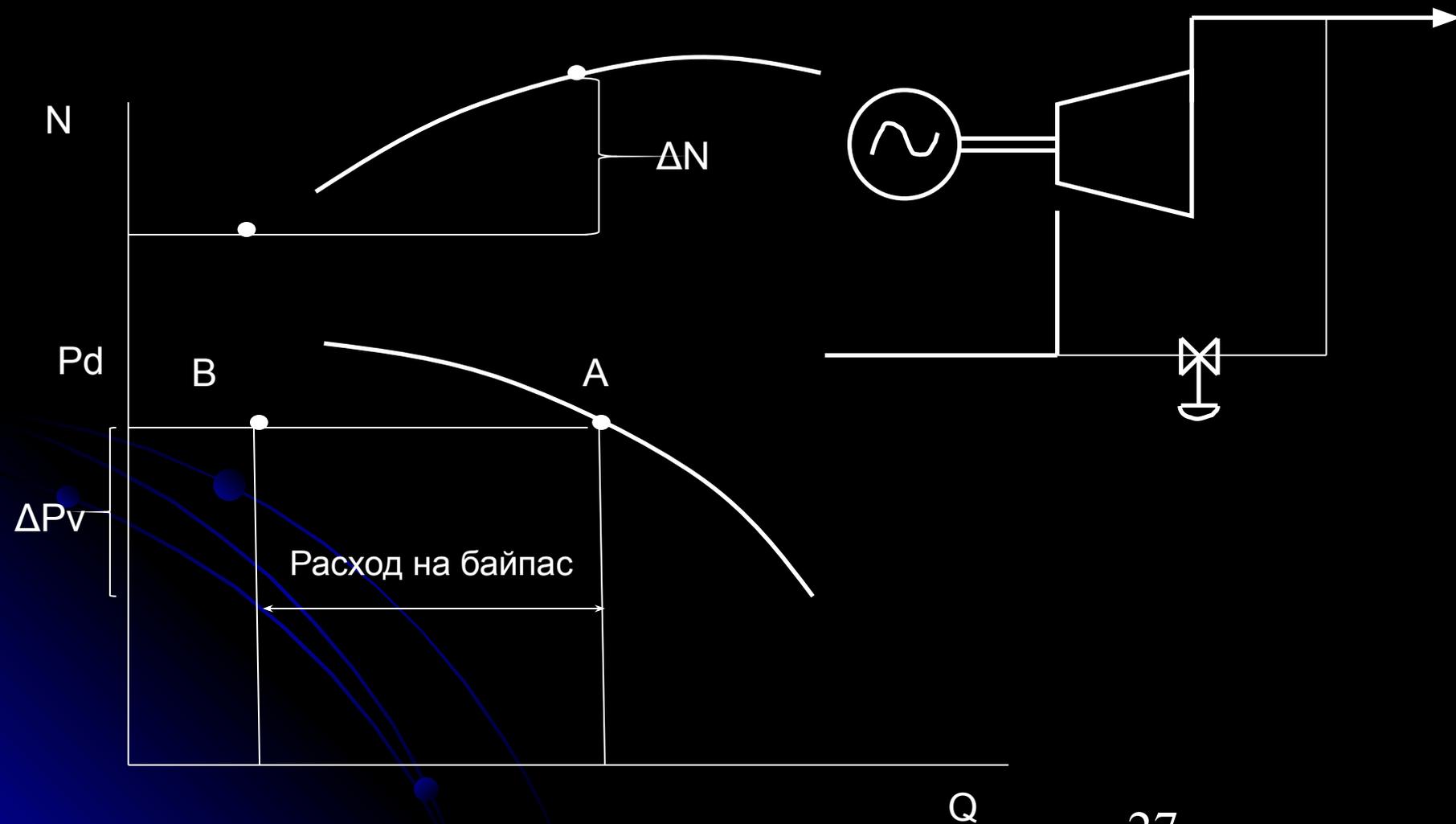
Регулирование компрессоров

Дросселирование на всасывании



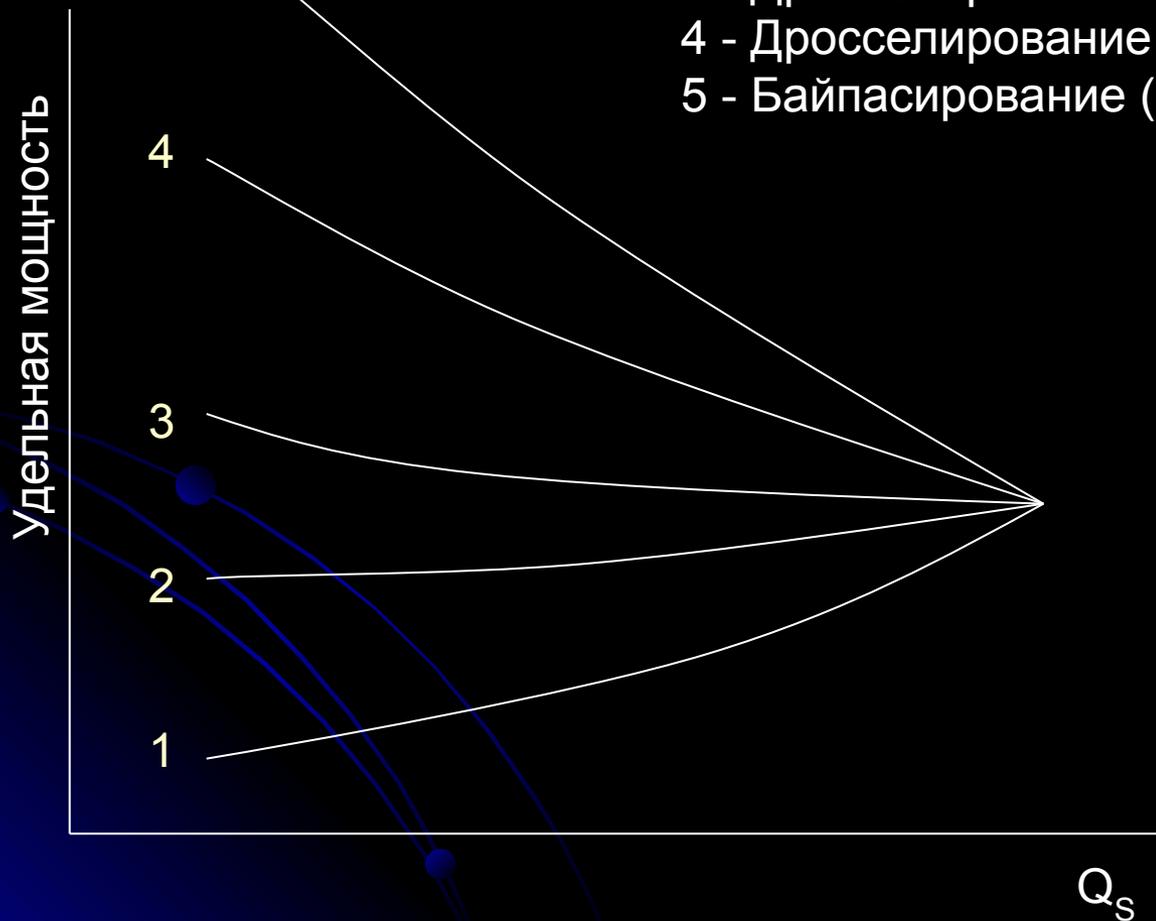
Регулирование компрессоров

Байпасирование (перепуск)



Эффективность способов регулирования

- 1 - Изменение частоты вращения
- 2 - Поворот лопаток направляющих аппаратов
- 3 - Дросселирование на всасывании
- 4 - Дросселирование на нагнетании
- 5 - Байпасирование (перепуск)



Пересчет приведенных характеристик

Приведенная частота вращения

$$n_{\cdot,p} = n \sqrt{\frac{Z_{\cdot,p} R_{\cdot,p} [T_H]_{\cdot,p}}{Z R T_H}}$$

Приведенный объемный расход

$$Q_{H,\cdot,p} = Q_H \sqrt{\frac{Z_{\cdot,p} R_{\cdot,p} [T_H]_{\cdot,p}}{Z R T_H}} = Q_H \frac{n_{\cdot,p}}{n}$$

Приведенный политропный напор

$$[H_{нол}]_{\cdot,p} = H_{нол} \frac{Z_{\cdot,p} R_{\cdot,p} [T_H]_{\cdot,p}}{Z R T_H} = H_{нол} \left(\frac{n_{\cdot,p}}{n} \right)^2$$

Приведенная степень сжатия

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\cdot,p} &= \left(1 + \frac{Z R T_H}{Z_{\cdot,p} R_{\cdot,p} [T_H]_{\cdot,p}} (\varepsilon^{m_v} - 1) \left(\frac{n_{\cdot,p}}{n} \right)^2 \right)^{\frac{1}{m_v}} \approx \\ &\approx 1 + \frac{Z R T_H}{Z_{\cdot,p} R_{\cdot,p} [T_H]_{\cdot,p}} (\varepsilon - 1) \left(\frac{n_{\cdot,p}}{n} \right)^2 \end{aligned}$$

Приведенная удельная внутренняя мощность

$$\left[\frac{N_i}{\gamma_H} \right]_{\cdot,p} = \frac{N_i}{\gamma_H} \left(\sqrt{\frac{Z_{\cdot,p} R_{\cdot,p} [T_H]_{\cdot,p}}{Z R T_H}} \right)^3 = \frac{N_i}{\gamma_H} \left(\frac{n_{\cdot,p}}{n} \right)^3$$

Приведенная коммерческая производительность

$$[Q_k]_{\cdot,p} = Q_k \sqrt{\frac{Z R_{\cdot,p} T_H}{Z_{\cdot,p} R [T_H]_{\cdot,p}}}$$

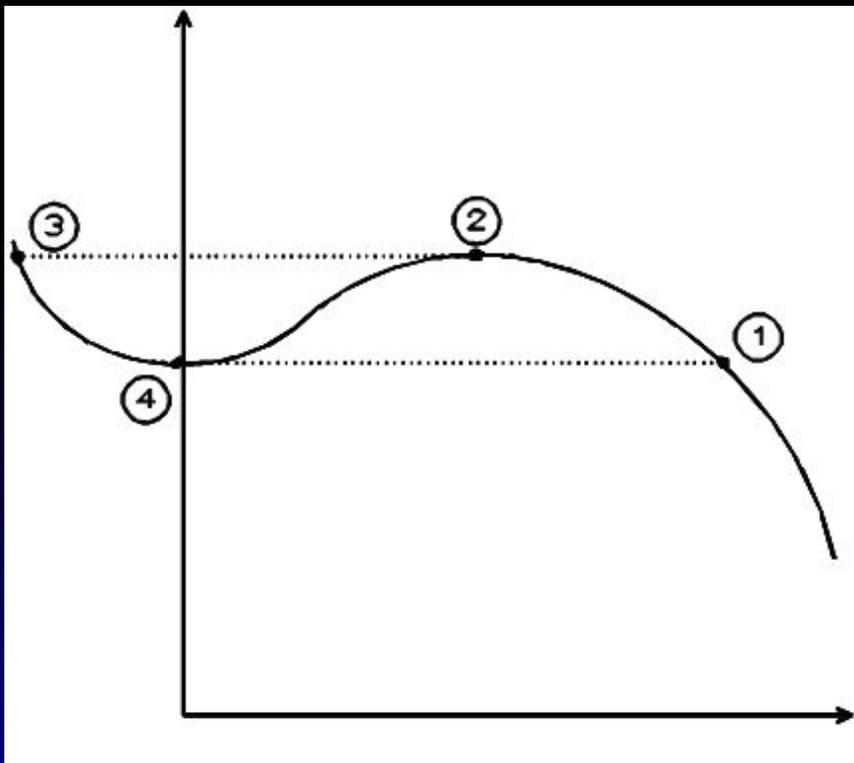
Политропный КПД при этом остается неизменным

$$[\eta_{нол}]_{\cdot,p} = \eta_{нол}$$

Антипомпажное регулирование

Явление „помпажа“

Явление помпажа проявляется в циклическом изменении давления газа в компрессоре и изменении объёмного расхода; при этом так же возможно изменение направления потока. Причиной помпажа является срыв потока на лопатках компрессора.



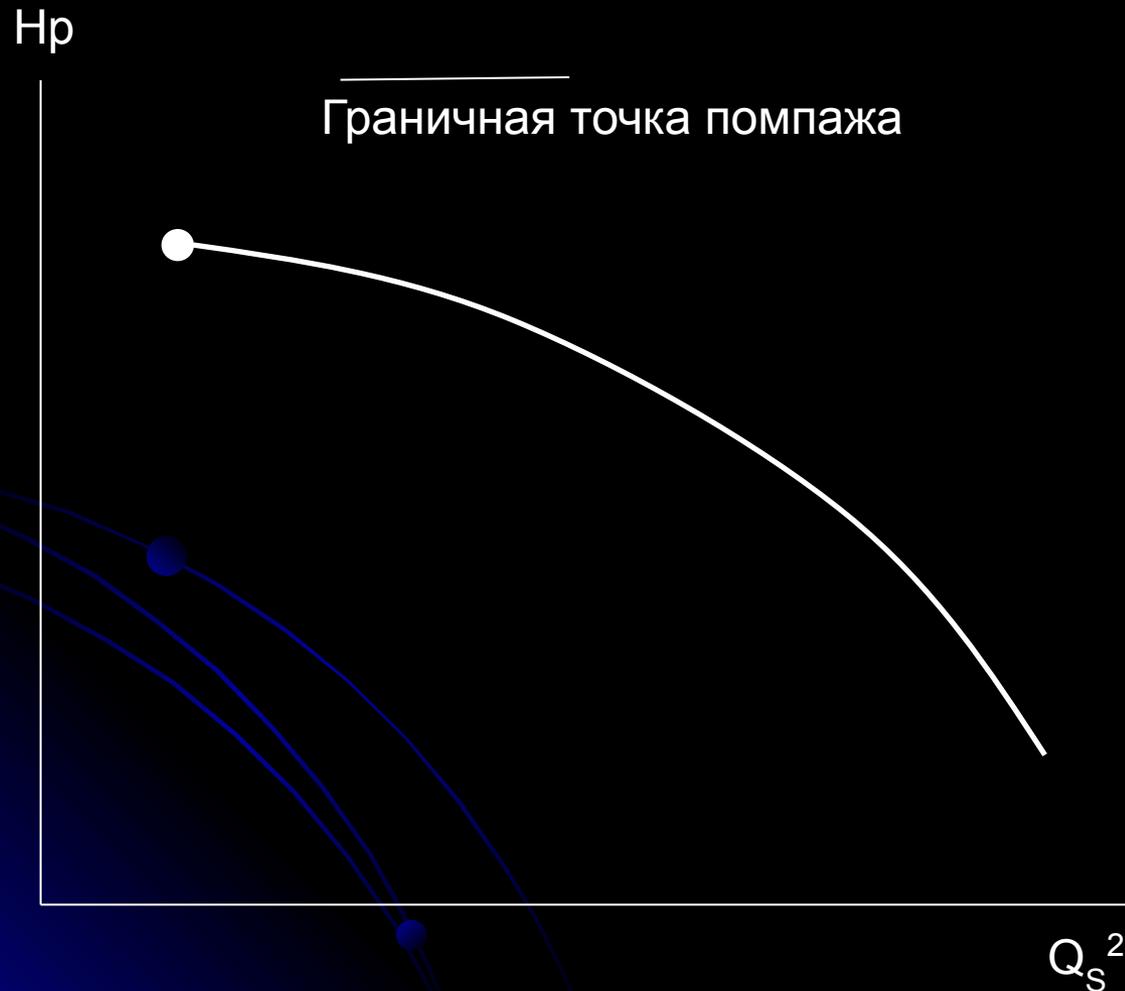
На рисунке представлен цикл изменения значения давления в процессе помпажа.

За счёт снижения отбора происходит перемещение рабочей точки компрессора из точки (1) в точку (2), при этом происходит повышение давления на выходе компрессора. Точка (2) находится при этом на границе устойчивости, в которой давления является максимальным.

Происходит срыв потока с лопаток компрессора и за счёт этого рабочая точка скачкообразно смещается в точку (3). Изменение направления потока приводит в свою очередь к снижению давления и смещению рабочей точки в точку (4). Снижение давления и повышение расхода опять приводят к тому, что срыв потока на лопатках пропадает. Восстановление потока опять приводит к скачкообразному изменению параметров – переход в точку (1).

Если в данный момент не предпринять меры по устранению помпажа, то цикл помпажа снова повторится.

Универсальная характеристика компрессора



В координатах
**Политропный напор –
объемный расход**

для данного компрессора
имеется единственная
характеристика и
единственная точка
помпажа.

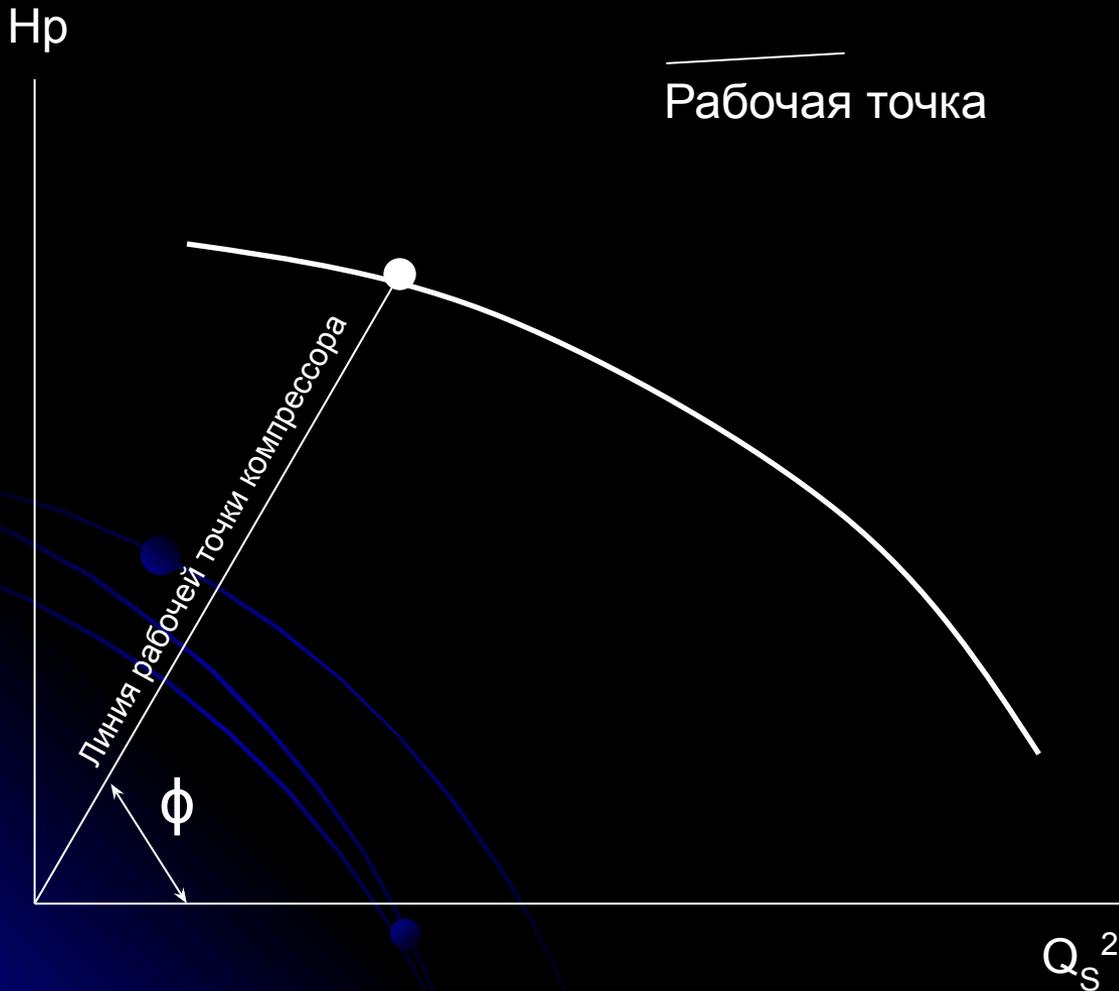
Инвариантна к

- Давлению всаса
- Температуре на всасе
- Составу газа
(молекулярный вес газа,
удельная теплоемкость)

Для учета изменения состава газа и
производительности вычисляется параметр:

Для учета изменения состава газа и
производительности вычисляется параметр:

Определение положения рабочей точки



В координатах
**Политропный напор –
объемный расход**

для данного компрессора
рабочая точка может быть
определена как точка
пересечения характеристики
компрессора с лучем,
проведенным из начала
координат под углом ϕ , при
этом:

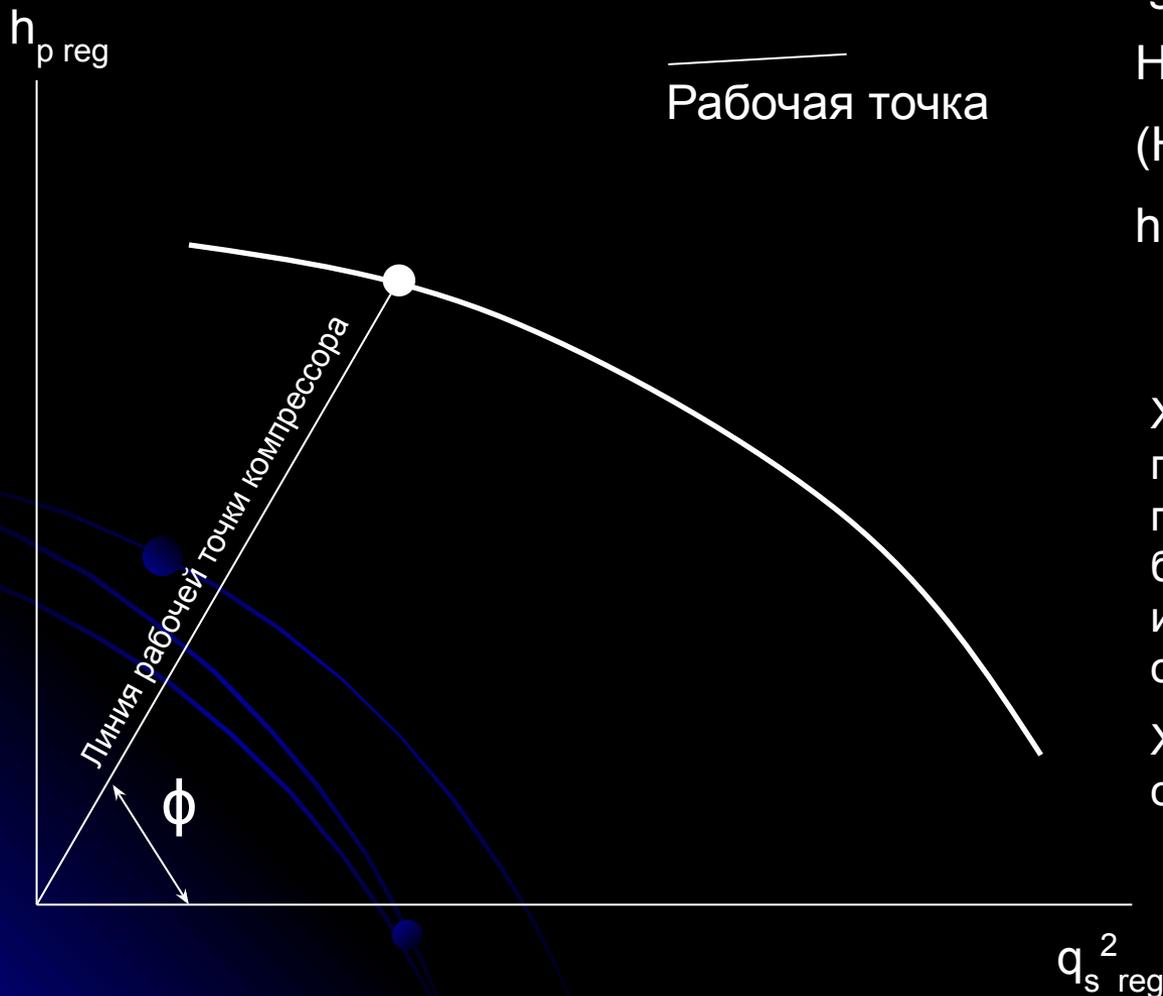
$$\operatorname{tg} \phi = \operatorname{Slope}_{\text{PT}} = H_r / Q_s^2$$

Упрощенное уравнение регуляторов

Сократим на Z_{cp} при этом Z_{cp}/Z_n меняется незначительно и может не учитываться тогда для приведенного напора и расхода:



Определение положения рабочей точки в преобразованных координатах



$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \phi &= \operatorname{Slope}_{\text{PT}} = \\ & H_p / Q_s^2 = \\ & (H_p / A) / (Q_s^2 / A) = \\ & h_{p \text{ reg}} / q_{s \text{ reg}}^2 \end{aligned}$$

Характеристика позволяет производить вычисление положения рабочей точки без лабораторных измерений состава газа и определения его свойств.
Характеристика не зависит от входных условий

Линия помпажа

Угол наклона линии помпажа в реальном компрессоре непостоянный

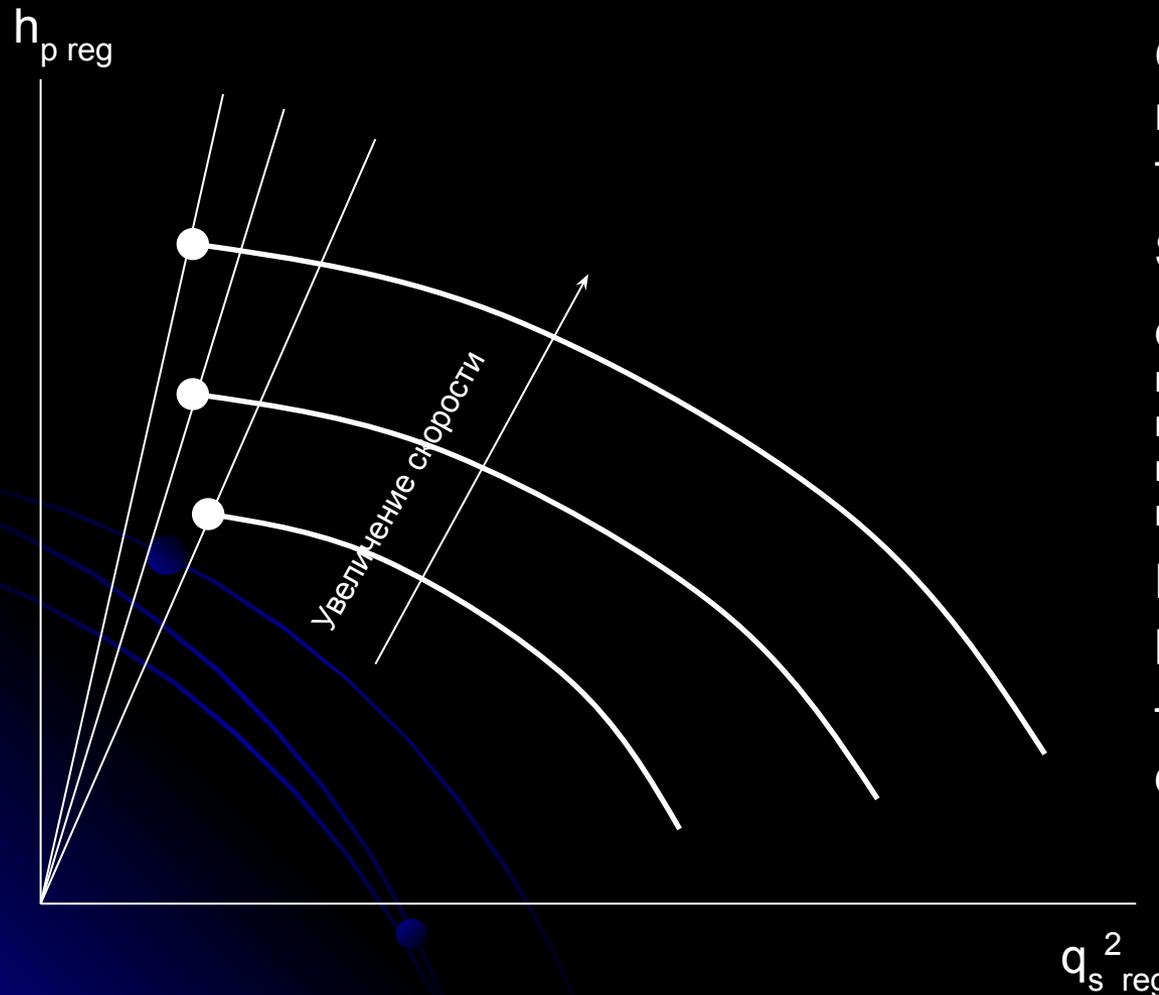
Относительный наклон линии рабочей точки:

$$Ss = \text{Slope}_{\text{РТ}} / \text{Slope}_{\text{ЛП}}$$

Относительный наклон линии помпажа определяется помпажными тестами или предоставляется производителем компрессора

Расстояние между рабочей точкой и линией помпажа

$$d = 1 - Ss$$



Ошибка регулирования

Ошибка регулирования:

$$DEV = d - b_1 * f(\Delta P, s)$$

где

$d = 1 - S_s$ - расстояние между рабочей точкой и линией помпажа

$f(\Delta P, s)$ – функция, определяющая форму линии запаса надежности

b_1 – относительная ширина зоны безопасности

Ошибка регулирования (DEV) – расстояние между рабочей точкой и линией заданного запаса надежности

