

## Диаграммы режимов теплофикационных паровых турбин для парогазовых установок

© 2012 г. Култышев А.Ю.<sup>1,2</sup>, Степанов М.Ю.<sup>1</sup>, Линдер Т.Ю.<sup>1</sup>  
 ЗАО УТЗ<sup>1</sup> – УрФУ<sup>2</sup>

**На основании известных подходов сформулированы общие соображения по виду диаграммы режимов теплофикационных турбин для ПГУ, состоящей из диаграммы и многочисленных поправок, которые необходимо учитывать при пользовании диаграммой. Представлена диаграмма режимов для паровой турбины Т-113/145-12.4 для ПГУ-410 Краснодарской ТЭЦ.**

Диаграмма режимов работы турбин в графической форме выражает зависимость между расходом свежего пара ( $G_{\text{турб}}$ ), электрической мощностью ( $N_e$ ), тепловой нагрузкой турбоагрегатов ( $Q_T$ ) и другими параметрами, определяющими режим работы турбоустановок и их тепловую экономичность. При построении диаграммы режимов учитывается работа каждого конкретного турбоагрегата в целом, включая конденсационную установку и систему подогрева питательной воды. Наличие диаграммы режимов позволяет выделить область возможных режимов работы турбоустановки и определить тепловую экономичность каждого из них. Наглядность представления, удобство пользования и достаточная для большого круга практических задач точность обусловили широкое использование диаграммы режимов при проектировании и эксплуатации ТЭЦ [1, 2].

Построение диаграммы режимов выполняется на основании расчетов тепловых балансов переменных режимов турбоагрегата. Количество параметров, определяющих его тепловую экономичность, довольно велико. Кроме  $G_{\text{турб}}$ ,  $N_e$  и  $Q_T$  таковыми являются: давление в отопительном отборе ( $p_T$ ), температура ( $t_0$ ) и давление ( $p_0$ ) свежего пара, расход ( $W_{\text{о.в}}$ ) и температура ( $t_{\text{о.в}}$ ) охлаждающей воды и др. Соответственно диаграмма режимов для турбины типа Т в общем случае должна выражать зависимость

$$F(G_{\text{турб}}, N_e, Q_T, p_T, p_0, t_0, W_{\text{о.в}}, t_{\text{о.в}}) = 0. \quad (1)$$

Диаграмма режимов паровых турбин для парогазовых установок (ПГУ) имеет несколько особенностей. Количество параметров, определяющих тепловую экономичность турбоагрегата для ПГУ (как двухконтурной, так и трехконтурной с промежуточным перегревом пара), значительно больше: наряду с расходом пара высокого давле-

ния ( $G_{\text{ВД}}$ ),  $N_e$ ,  $Q_T$  необходимо учитывать расход пара среднего давления ( $G_{\text{СД}}$  – для трехконтурной ПГУ), расход пара низкого давления ( $G_{\text{НД}}$ ), температуру пара высокого давления ( $t_{\text{ВД}}$ ), температуру промежуточного перегрева ( $t_{\text{п.п}}$  – для трехконтурной ПГУ), температуру низкого давления ( $t_{\text{НД}}$ ), давления ВД ( $p_{\text{ВД}}$ ) и в отопительном отборе ( $p_T$ ), температуру обратной сетевой воды ( $\tau_2$ ),  $t_{\text{о.в}}$ ,  $W_{\text{о.в}}$ , а также температуру наружного воздуха ( $t_{\text{н.в}}$ ). Соответственно диаграмма режимов турбины типа Т для ПГУ в общем случае должна выражать зависимость

$$F(G_{\text{ВД}}, G_{\text{СД}}, G_{\text{НД}}, N_e, Q_T, p_T, t_{\text{ВД}}, p_{\text{ВД}}, t_{\text{п.п}}, t_{\text{НД}}, \tau_2, W_{\text{о.в}}, t_{\text{о.в}}) = 0. \quad (2)$$

Уравнения (1) и (2) могут быть изображены на плоскости без искажений при числе членов  $n \leq 3$ . Если  $n > 3$ , изображение диаграммы режимов на плоскости может быть получено только при замене действительной взаимосвязи переменных на приближенные зависимости, что вносит погрешность в диаграмму режимов, причем тем более значительную, чем больше число переменных в уравнениях (1) и (2). Поэтому целесообразно ограничить число независимых параметров для построения диаграммы режимов.

Основные переменные для построения диаграммы режимов для турбин типа Т –  $G_{\text{турб}}$ ,  $N_e$  и  $Q_T$ . Соответственно уравнение (1) будет иметь вид

$$F(G_{\text{турб}}, N_e, Q_T) = 0.$$

Основные переменные при построении диаграммы режимов для турбин для ПГУ –  $G_{\text{ВД}}$ ,  $G_{\text{СД}}$ ,  $G_{\text{НД}}$ ,  $Q_T$ , они с достаточно большой степенью точности определяют  $N_{\text{ет}}$  на теплофикационных режимах. Остальные параметры приняты постоянными.

Дополнительная сложность построения диаграммы режимов для турбин для ПГУ состоит в том, что турбина работает на скользящих параметрах пара, что связано с изменением не только параметров контуров ВД, СД и НД, но и расходов

<sup>1</sup> 620017, г. Екатеринбург, ул. Фронтных Бригад, д. 18. ЗАО “Уральский турбинный завод”.

<sup>2</sup> 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19. Уральский федеральный университет.



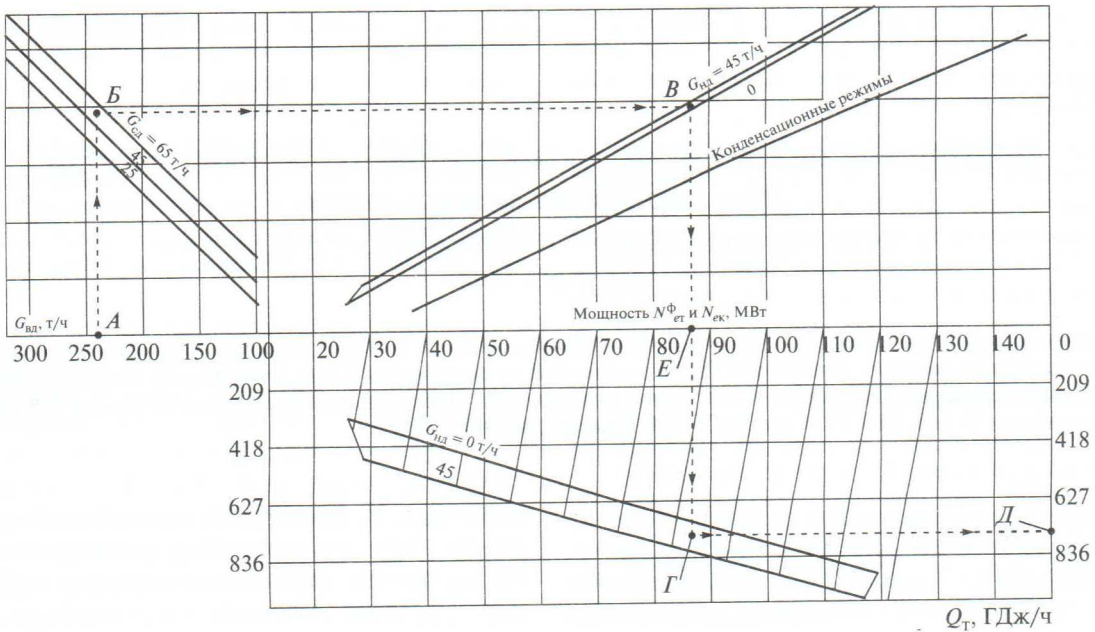


Рис. 1. Основной квадрант диаграммы режимов турбины Т-113/145-12.4 при двухступенчатом подогреве сетевой воды

пара в них. Облегчающим обстоятельством является то, что по условиям работы котла-утилизатора (КУ) давление пара НД должно поддерживаться органами паровпуска НД турбины постоянным при определенной температуре.

Рассмотрим диаграмму режимов для трехконтурной ПГУ с промежуточным перегревом пара, например турбины Т-113/145-12.4 для ПГУ-410 Краснодарской ТЭЦ. Основной квадрант диаграммы режимов для этой турбины представлен на рис. 1. Для повышения точности построения диаграммы режимов при расчете тепловых балансов принята зависимость  $t_{нд} = f(G_{нд})$  для  $t_{н.в} = +15^\circ\text{C}$ . Для других  $t_{н.в}$  зависимость  $t_{нд} = f(G_{нд})$  будет иметь несущественные отличия. Соответственно диаграмма режимов выражает зависимость

$$F(G_{вд}, N_e, Q_t, G_{сд}, G_{нд}) = 0,$$

что требует ее построения в трех квадрантах, каждый из которых будет выражать определенную зависимость:

левый верхний квадрант

$$F(G_{вд}, G_{сд}, G_{п.п}) = 0;$$

правый верхний квадрант

$$F(G_{п.п}, G_{нд}, N_e) = 0;$$

нижний квадрант

$$F(N_e, Q_t, G_{нд}) = 0.$$

На диаграмме режимов координата  $G_{п.п}$  (расход пара промежуточного перегрева, равный сумме расходов пара  $G_{вд}$  и  $G_{сд}$  с учетом утечек) не приводится, поскольку

$$G_{п.п} = F(G_{вд}, G_{сд}).$$

Так как диаграмма режимов строится для приведенных выше параметров пара, то электрическая мощность называется фиктивной и на шкале мощности имеет обозначение  $N_{ет}^{\phi}$ . При работе по тепловому графику значение  $N_{ет}^{\phi}$  определяется по изображенным линиям  $G_{нд}$  правого верхнего квадранта и принимается по данным шкалы мощности, значение  $Q_t$  находится в нижнем квадранте.

Электрический график характеризуется наличием конденсационного расхода пара. Если при неизменных значениях  $G_{вд}$ ,  $G_{сд}$  и  $G_{нд}$  уменьшить тепловую нагрузку на  $\Delta Q_t$ , то это приведет к увеличению мощности турбины на  $\Delta N_{ек}$  в результате выработки конденсационной мощности в ступенях, расположенных между отопительными отборами, и в ступенях цилиндра низкого давления.

Мощность турбин при работе по электрическому графику с расходами пара  $G_{вд}$ ,  $G_{сд}$  и  $G_{нд}$ , равными соответствующим расходам на режиме теплового графика, составляет

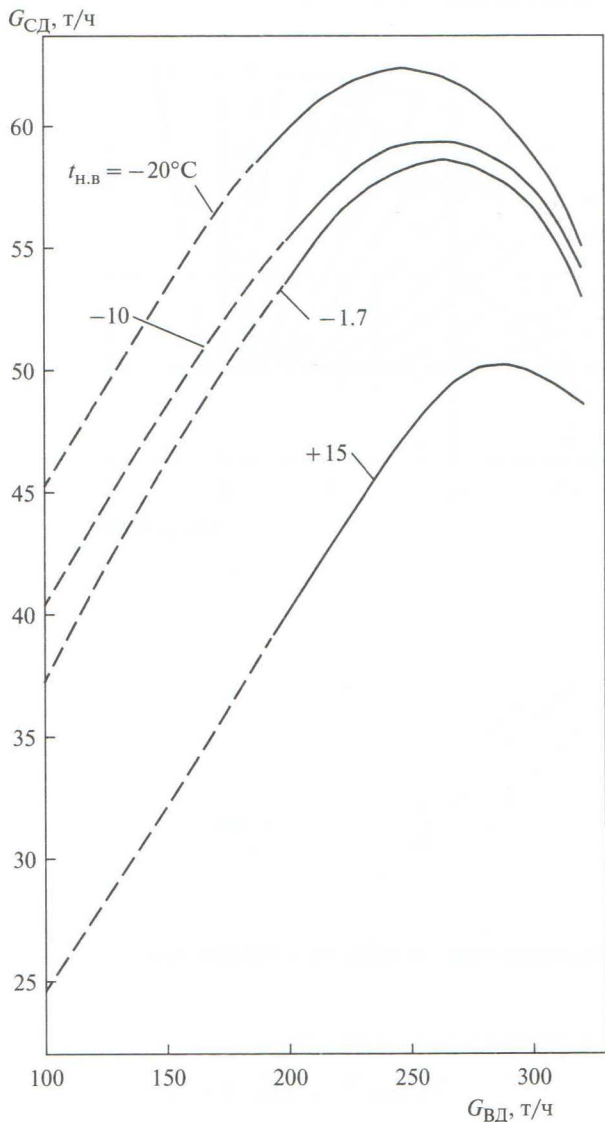
$$N_e = N_{ет} + \Delta N_{ек},$$

где  $\Delta N_{ек} = f(\Delta Q_t, G_{вд}, G_{сд}, G_{нд})$ .

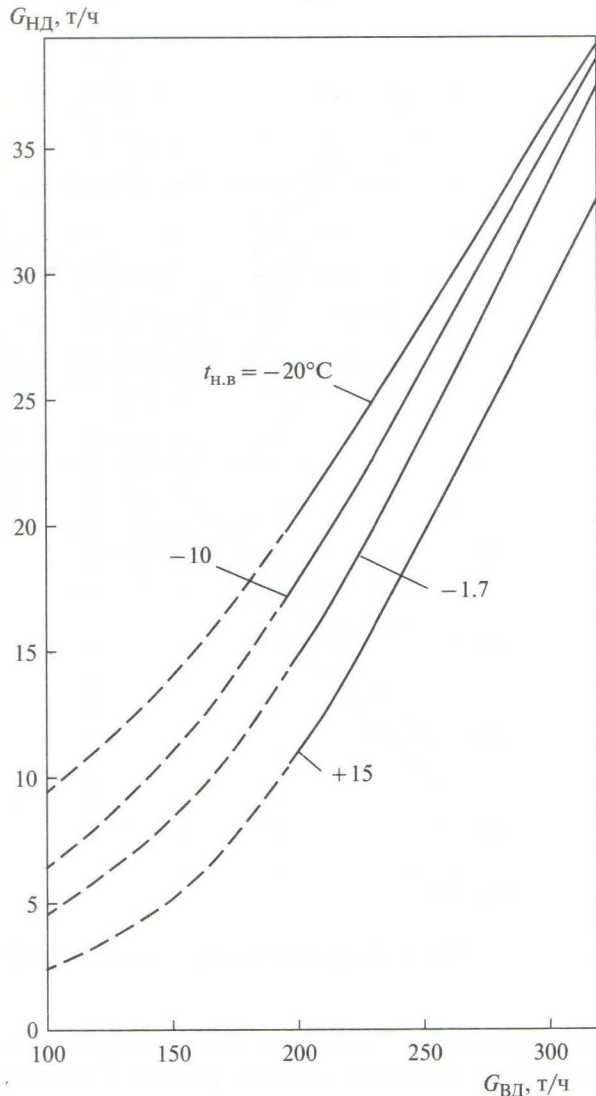
Так как КПД ступеней промежуточного отсека и ступеней ЧНД являются переменными, то приращение мощности  $\Delta N_{ек}$  не пропорционально изменению значений  $G_{вд}$ ,  $G_{сд}$  и  $G_{нд}$ . Для построения диаграммы режимов принята зависимость приращения мощности

$$\Delta N = k \Delta Q_t,$$

где  $k$  — усредненный коэффициент для режима работы турбины по электрическому графику.



**Рис. 2.** Зависимость расхода пара среднего давления от температуры наружного воздуха и расхода пара высокого давления турбины Т-113/145-12.4



**Рис. 3.** Зависимость расхода пара низкого давления от температуры наружного воздуха и расхода пара высокого давления турбины Т-113/145-12.4

Таким образом, сама диаграмма режимов позволяет установить фиктивную мощность турбины на теплофикационных режимах.

Для определения фактической мощности турбины при скользящих параметрах пара и постоянных значениях  $p_T$ ,  $\tau_2$  и  $t_{o.v}$  строятся зависимости  $p_{ВД} = f(G_{ВД})$ ,  $t_{ВД} = f(G_{ВД})$ ,  $t_{п.п} = f(G_{ВД})$ , а также  $G_{СД} = f(G_{ВД}, t_{н.в})$  (рис. 2),  $G_{НД} = f(G_{ВД}, t_{н.в})$  (рис. 3) и соответствующие поправки к мощности  $\Delta N_p$ ,  $\Delta N_t$  и  $\Delta N_{t.p.п.}$

При работе турбины на теплофикационных режимах и отклонениях  $p_T$ ,  $\tau_2$  и  $t_{o.v}$  от номинальных значений вводятся поправки к мощности  $\Delta N_{\tau_2}$ ,  $\Delta N_{pT}$  и  $\Delta N_{o.v}$ . При работе на конденсационных режимах вводится только поправка  $\Delta N_{o.v}$ .

Приведем пример пользования основным квадрантом диаграммы режимов для турбины Т-113/145-12,4 (см. рис. 1). Турбина работает по тепловому графику, и задано  $G_{ВД} = 240$  т/ч и  $t_{н.в} = -1.7^\circ\text{C}$ . По зависимостям  $G_{СД} = f(G_{ВД}, t_{н.в})$  (см. рис. 2) и  $G_{НД} = f(G_{ВД}, t_{н.в})$  (см. рис. 3) определяем, что  $G_{СД} = 58$  т/ч и  $G_{НД} = 22$  т/ч. По рис. 1 от точки А ( $G_{ВД} = 240$  т/ч) в левом верхнем квадранте возводим вертикаль до пересечения с линией  $G_{СД} = 58$  т/ч в точке В. Из точки В проводим горизонталь до пересечения с линией  $G_{НД} = 22$  т/ч в точке В в правом верхнем квадранте. Из точки В опускаем вертикаль до пересечения с линией  $G_{НД} = 22$  т/ч в точке Г в нижнем квадранте. Из точки Г ведем горизонталь до пересечения со шкалой тепловой нагрузки в точке Д. Определяем значение тепло-



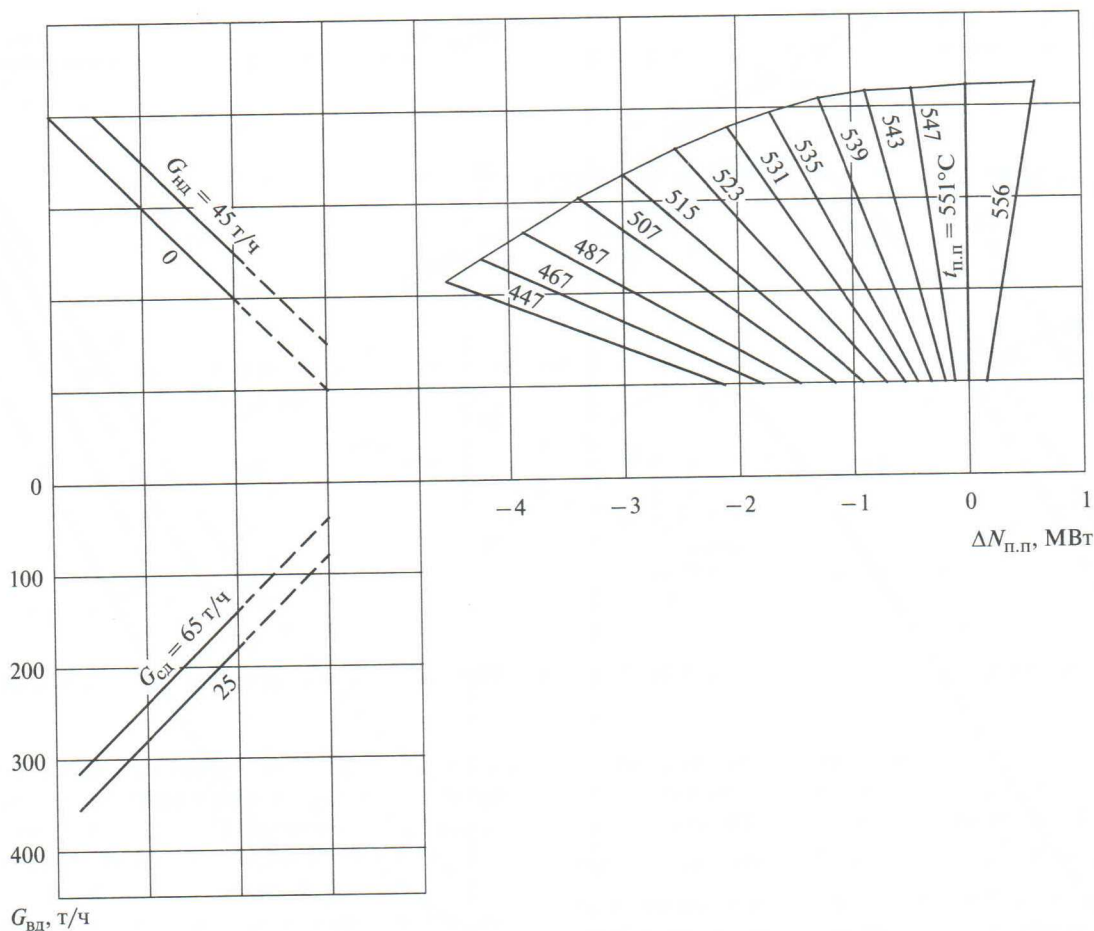


Рис. 4. Поправка к мощности на температуру промперегрева пара для турбины Т-113/145-12.4

вой нагрузки  $Q_T = 757$  ГДж/ч. На пересечении линии  $B-G$  со шкалой мощности в точке  $E$  находим значение фиктивной мощности турбины  $\Delta N_{\text{ет}}^{\phi} = 86.6$  МВт.

Поправочные кривые позволяют учесть влияние изменения параметров турбоустановки на тепловую экономичность ее работы. Поправки представляют собой зависимости между изменением рассматриваемых параметров и соответствующим изменением мощности турбины. Они определяются при неизменных расходах пара высокого давления, а также при номинальных значениях всех остальных параметров на основании приближенных расчетов или по данным испытаний.

Особенность построения поправок в диаграмме режимов турбин для ПГУ состоит в том, что поправка также строится в трех квадрантах.

Поправка к мощности на  $t_{\text{п.п}}$  для турбины Т-113/145-12.4 приведена на рис. 4.

Нижний квадрант отражает зависимость

$$F(G_{\text{вд}}, G_{\text{сд}}, G_{\text{п.п}}) = 0,$$

верхний левый квадрант

$$F(G_{\text{п.п}}, G_{\text{нд}}, G_{\text{со}}) = 0,$$

верхний правый квадрант

$$F(G_{\text{со}}, t_{\text{п.п}}, \Delta N_{t_{\text{п.п}}}) = 0,$$

где  $G_{\text{со}}$  – расход пара через ступени среднего отсека, предшествующие отбору пара из ПСГ-2.

Поправка к мощности на  $p_{\text{вд}}$  для турбины Т-113/145-12.4 приведена на рис. 5.

Нижний квадрант отражает зависимость

$$F(G_{\text{вд}}, G_{\text{сд}}, G_{\text{п.п}}) = 0,$$

верхний левый квадрант

$$F(G_{\text{п.п}}, G_{\text{нд}}, G_{\text{со}}) = 0,$$

правый верхний квадрант

$$F(G_{\text{со}}, p_{\text{вд}}, \Delta N_p) = 0.$$

По такому же принципу строятся остальные поправки.

Приведем пример пользования поправками к мощности к диаграмме режимов. Основной квадрант диаграммы режимов построен при  $p_{\text{вд}} = 12.4$  МПа. При отклонении этого значения необходимо пользоваться поправкой к мощности на  $p_{\text{вд}}$  (см. рис. 5). Задано  $G_{\text{вд}} = 220$  т/ч,  $p_{\text{вд}} = 11.8$  МПа и  $t_{\text{н.в}} = -1.7^\circ\text{C}$ . По зависимостям  $G_{\text{сд}} = f(G_{\text{вд}}, t_{\text{н.в}})$

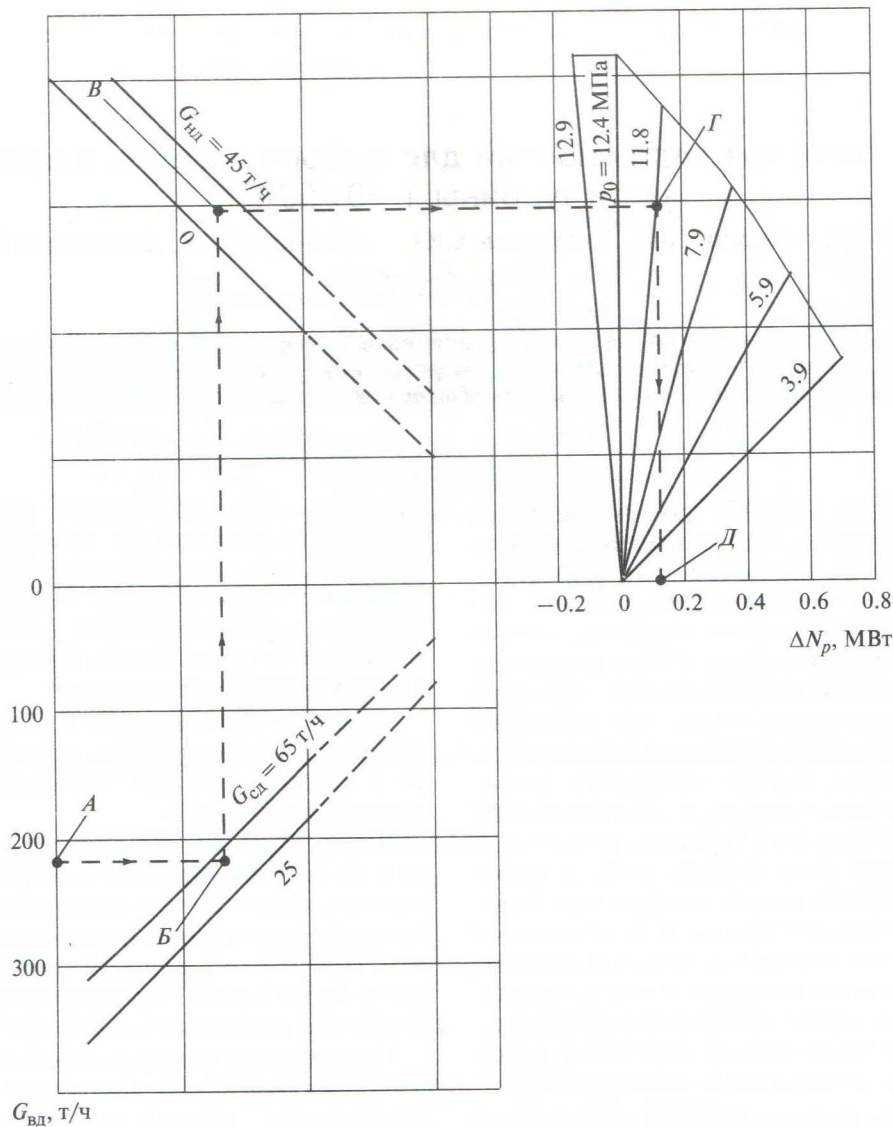


Рис. 5. Поправка к мощности на давление свежего пара для турбины Т-113/145-12.4

(см. рис. 2) и  $G_{\text{нд}} = f(G_{\text{вд}}, t_{\text{н.в}})$  (см. рис. 3) определяем, что  $G_{\text{сд}} = 55.8$  т/ч, а  $G_{\text{нд}} = 18.2$  т/ч. По рис. 5 от точки А ( $G_{\text{вд}} = 220$  т/ч) в нижнем квадранте проводим горизонталь до пересечения с линией  $G_{\text{сд}} = 55.8$  т/ч в точке В. Из точки В опускаем вертикаль до пересечения с линией  $G_{\text{нд}} = 18.2$  т/ч в точке В в левом верхнем квадранте. Из точки В проводим горизонталь до пересечения с линией  $p_{\text{вд}} = 11.8$  МПа в точке Г в правом верхнем квадранте. Из точки Г строим вертикаль до пересечения со шкалой поправки к мощности в точке Д. Определяем значение поправки к мощности от  $p_{\text{вд}}$ , получаем  $\Delta N_p = 0.12$  МПа. Таким же способом используются другие поправки к мощности.

Построение диаграммы режимов может быть автоматизировано, для этого по результатам окончательных расчетов тепловых балансов заполняется массив данных, которые используются как исходные данные для построения соответствующих зависимостей.

#### Список литературы

1. **Паровые турбины и турбоустановки Уральского турбинного завода** / Г.Д. Баринберг, Ю.М. Бродов, А.А. Гольдберг и др. Екатеринбург: Априо, 2010.
2. **Бененсон Е.И., Иоффе Л.С.** Теплофикационные паровые турбины / под ред. Д.П. Бузина. М.: Энергоатомиздат, 1986.