ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО
Том 69. ИНСТИТУТА имени С. М. КИРОВА 1952 г.

ИЗМЕНЕНИЕ МОЩНОСТИ ПАРОХОДНОЙ МАШИНЫ КОМПАУНД ПРИ ИЗМЕНЕНИИ СТЕПЕНИ НАПОЛНЕНИЯ

И. Н. БУТАКОВ и Е. Н. ШАДРИН

Среднее индикаторное давление, как известно, может быть для ЦВД выражено в виде

$$P_i' = \sigma_{цвд} \,.\, (K_1 P_1 - K_r \rho P_r),$$

где K_1—усредняющий коэфициент переднего давления, K_r—то же заднего давления, каковым является ρP_r, причем P_r—давление при впуске в ЦНД, а $\rho \cong 1{,}05$—коэфициент, характеризующий падение давления при перетекании пара из ЦВД. При изменении степени наполнения ЦВД будут меняться K_1, K_r и P_r. Для K_1 в случае насыщенного пара имеем

$$K_1 = \alpha_{цвд} \,.\, \varepsilon + \beta_{цвд} \,.\, (\varepsilon + m) \,.\, \ln \frac{1+m}{\varepsilon + m},$$

где m—вредное пространство ЦВД в долях рабочего объема цилиндра, $\alpha_{цвд} \cong 0{,}93$—усредняющий коэфициент впуска, а $\beta_{цвд} = 0{,}85$—коэфициент, характеризующий падение давления в момент отсечки. Положив $x = \varepsilon + m$, преобразовываем

$$K_1 = \alpha_{цвд} \,.\, x - \alpha_{цвд} \,.\, m + \beta_{цвд} \,.\, x \,.\, \ln(1+m) - \beta_{цвд} - x \,.\, \ln x \,.$$

Чтобы избавиться от $\ln x$, прибегаем к разложению в строку, причем для возможности игнорирования всех членов разложения, начиная со второго, x под знаком ln умножим на некоторый множитель $\psi > 1$, прибавив одновременно величину $\beta_{цвд} \,.\, x \,.\, \ln \psi$. Тогда

$$K_1 = x[\alpha_{цвд} + \beta_{цвд} \,.\, \ln(1+m) + \beta_{цвд} \,.\, \ln \psi] - \alpha_{цвд} \,.\, m - 2\,\beta_{цвд} \,.\, x \,.\, \frac{\psi x - 1}{\psi x + 1}$$

или

$$\begin{aligned} &\psi[\alpha_{цвд} + \beta_{цвд} \,.\, \ln(1+m) + \beta_{цвд} \,.\, \ln \psi - 2\,\beta_{цвд}]\, x^2 + \\ &+ [\alpha_{цвд} + \beta_{цвд} \,.\, \ln(1+m) + \beta_{цвд} \,.\, \ln \psi - \alpha_{цвд} \,.\, m \,.\, \psi + 2\,\beta_{цвд} - \psi K_1]\, x - \\ &- K_1 - \alpha_{цвд} \,.\, m = 0. \end{aligned} \tag{1}$$

Это уравнение гиперболы. Считая, что в пароходных машинах обычные колебания $x = 0{,}3 \div 0{,}8$, для возможности игнорирования второго члена

$$\frac{2}{3}\, \beta_{цвд} \,.\, x \left(\frac{\psi x - 1}{\psi x + 1}\right)^3$$

разложения в строку $\ln \psi x$ принимаем

$$\psi = \frac{1}{x} = 3{,}3 - 1{,}25,$$

держась ближе к средним значениям $\psi = 2 \div 2{,}5$ и так, чтобы множитель при x^2 уравнения (1) превращался в нуль в целях упрощения задачи.

Если взять $\beta_{цвд}=0{,}85$; $\alpha_{цвд}=0{,}93$; $m=0{,}08$, получим $\psi=2{,}3$, когда указанный множитель делается равным нулю. Тогда для определения асимптот имеем

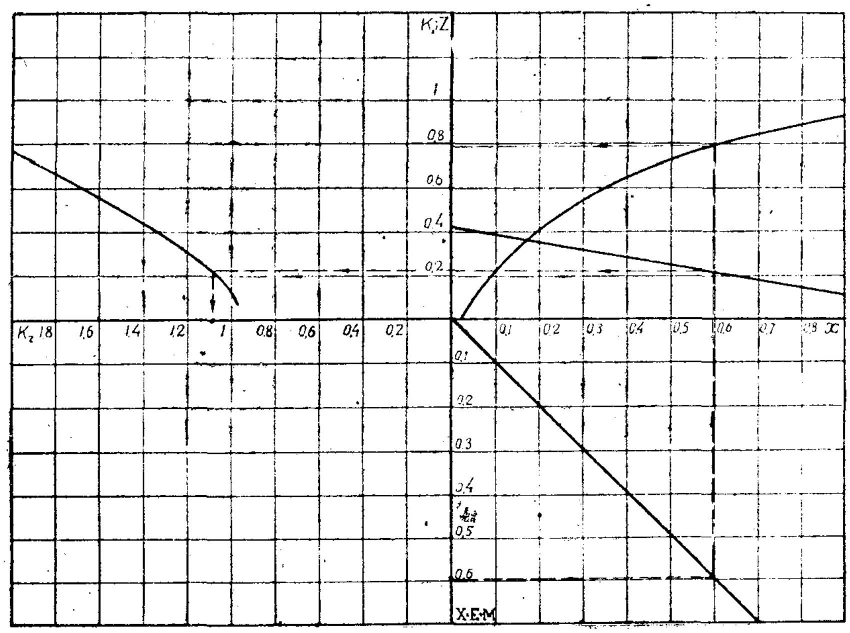
$$K_1=\frac{[\alpha_{цвд}+\beta_{цвд}\,.\ln(1+m)+\beta_{цвд}\,.\ln\psi-\alpha_{цвд}\,.\,m\,.\,\psi+2\,\beta_{цвд}]-\alpha_{цвд}\,.\,m}{\psi x+1}=$$

$$=\frac{\dfrac{[\alpha_{цвд}+\beta_{цвд}\,.\ln(1+m)+\beta_{цвд}\,.\ln\psi-\alpha_{цвд}\,.\,m\,.\,\psi+2\,\beta_{цвд}]}{\psi}-\alpha_{цвд}\,.\,m}{\psi x+1}.$$

Если $K_1=\infty$, то $\psi x+1=0$ или $x=-\dfrac{1}{\psi}$. Если $x=\infty$, то

$$K_1=-\alpha_{цвд}\,.\,m+\frac{4\,\beta_{цвд}}{\psi}.$$

Для указанных ниже численных значений частного примера имеем $K_1=1{,}4$ и $x=-0{,}43$. Необходимую точку для построения гиперболы



Фиг. 1

найдем, полагая $x=0$, когда $K_1=-0{,}074$. Гипербола K_1 построена на фиг. 1, как функция x.

Что касается коэфициента заднего давления K_r, то для него имеем

$$K_r=1-c+\varphi(c+m)\ln\frac{c+m}{m}=1-z(1+\varphi\ln m)+m+\varphi z\ln z,$$

если обозначить $z=c+m$, а через φ — коэфициент, характеризующий мятие пара к моменту начала сжатия, $\varphi=1{,}1$. Зная, что z обычно находится в пределах $z = 0{,}1 \div 0{,}4$ и, следовательно, множитель при z под знаком ln при разложении в строку с игнорированием второго члена разложения может быть $\psi_1 = 10 \div 2{,}5$, позволительно принять $\psi_1 = 5$, учитывая, что $K_r > 1$, почему неточность от исключения второго члена разложения будет ничтожной. Тогда получаем

$$\psi[2\varphi - 1 - \varphi \ln(m\psi_1)]z^2 + [\psi_1(1+m) - 2\varphi - 1 - \varphi\ln(m\psi)]z - \\ - \psi_1 K_r z - K_r + 1 + m = 0, \tag{2}$$

т. е. опять зависимость $K_r = f(z)$ гиперболическая.

Полагая $z = 0$, найдем точку гиперболы, необходимую для ее построения, когда $K_r = 1 + m = 1{,}08$. Для определения асимптот имеем

$$K_r = \frac{Az^2 + \beta z + 1 + m}{\psi_1 z + 1} = \frac{Az}{\psi_1} + \frac{\beta - \frac{A}{\psi_1}}{\psi_1} - \frac{\frac{\beta - \frac{A}{\psi_1}}{\psi_1} - 1 - m}{\psi_1 z + 1}.$$

При $K_r = \infty$ получаем

$$z = -\frac{1}{\psi_1} = -0{,}2.$$

Для второй асимптоты имеем уравнение прямой

$$K_r = \frac{Az}{\psi_1} + \frac{\beta - \frac{A}{\psi_1}}{\psi_1} = [2\varphi - 1 - \varphi\ln(m\psi_1)]z + 1 + m - \frac{4\varphi}{\psi_1}.$$

Гипербола построена на той же фиг. 1 с расположением ее в левом верхнем углу прямоугольных координат (второй квадрант) по причине, видной из нижеследующего.

Между степенью наполнения ε и степенью сжатия c существует в каждой пароходной машине своя определенная зависимость. Последняя для золотниковых приводов, обеспечивающих равенство линейных опережений впуска при изменениях степени наполнения ε (Джоя, Гакворта, Клуга и др.), близка к прямой вида $c \cong a_1 - b_1 . \varepsilon$, где a_1 и b_1 — некоторые постоянные меньше единицы, разные для разных машин. На фиг. 2 изображена, например, такая зависимость для ЦВД вида $c = 0{,}31 - 0{,}35\,\varepsilon$, и следовательно,

$$z = c + m = a_1 + m + b_1 m - b_1 x \cong u_1 - b_1 x = 0{,}42 - 0{,}35\,x.$$

При откладывании x по оси абсцисс в первом квадранте (фиг. 1) значения z получаются на оси ординат этого же квадранта, так что величины K_r для значений z, а следовательно, и x, удобно иметь на оси абсцисс второго квадранта.

Обращаясь теперь к изменениям P_r в зависимости от x, запишем уравнение постоянства весового количества пара, проходящего через машину

$$\gamma_1 F_1(m_0 + \varepsilon) = \gamma_r F_2(M_0 + E), \tag{3}$$

где

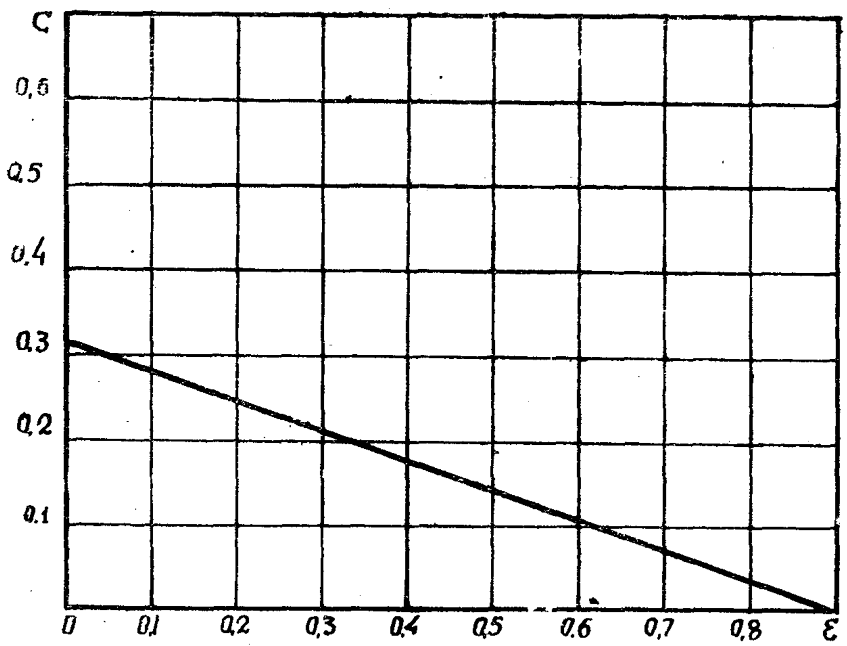
$$m_0 = m - \frac{\rho P_r(c+m)}{P_1}, \quad M_0 = M - \frac{P_2(C+M)}{P_r}, \quad \gamma_1 = \varsigma . P_1, \quad \gamma_r = \varsigma . P$$

$$\text{и } E = q + i\varepsilon,$$

причем, в случае $q=0$ и $i=1$ имеем $E=\varepsilon$, как это рекомендует, например, П. Г. Руфанов (Повышение эффективности работы речных паровых машин, 1946, стр. 51). Полагая $\frac{F_2}{F_1}=\delta$ — отношение объемов цилиндров, получаем [3] следующее уравнение:

$$(\rho b_1-\delta i)P_r\,.\,x+(\delta\, i\, m-\rho\, u_1-\delta M-\delta q)P_r+(P_1-i\,\delta P_2 b_2)\,x+$$
$$+P_2\delta(u_2-qb_2-Mb_2+imb_2)=0 \qquad (4)$$

Здесь u_2 и b_2 в ЦНД то же самое, что u_1 и b_1 в ЦВД, т. е. в ЦНД



Фиг. 2

$Z=u_2-b_2\,X$, где $X=E+M$, а $Z=C+M$. Уравнение (4) — гипербола. Для определения асимптот ее имеем

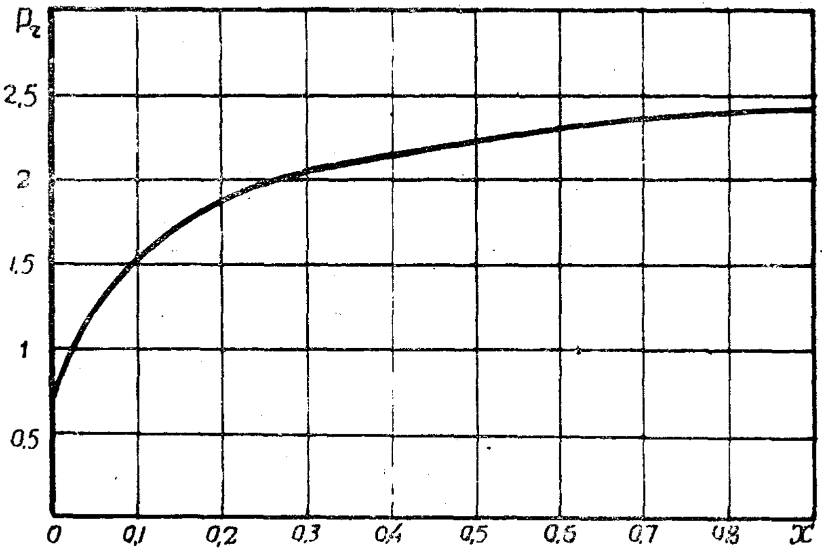
$$P_r=-\frac{F_1x+K_1}{A_1x+B_1}=-\frac{F_1}{A_1}-\frac{K_1-\dfrac{B_1F_1}{A_1}}{A_1x+B_1}.$$

При $P_r=\infty$ для $x=-\frac{B_1}{A_1}$. При $x=\infty$ для $P_r=-\frac{F_1}{A_1}$. Необходимую точку найдем, полагая $x=0$, когда $P_r=-\frac{K_1}{B_1}$. На фиг. 3 изображена гипербола, причем принято для частного примера: $\rho=1{,}05$; $b_1=0{,}35$; $i=1$; $M=m=0{,}08$; $u_1=0{,}42$; $q=0$; $P_1=10$ *ата*; $P_2=0{,}2$*ата*; $b_2=0{,}35$; $u_2=0{,}42$; $\delta=4$.

Кривой переднего давления ЦВД $\sigma_{цвд}\,.\,K_1 P_1$, как функции x, может быть та же гипербола $K_1=f_1(x)$, если за масштаб чертежа принять масштаб фиг. 1, уменьшенный в $\sigma_{цвд}\,.\,P_1$ раз. Перемножение ординат гиперболы $P_r=f_2(x)$ на соответственные ординаты гиперболы $K_r=f(z)$ для одних и тех же абсцисс x (фиг. 1) дает кривую изменения заднего давления в ЦВД $\sigma_{цвд}\,.\,\rho\,.\,K_r P_r$ в функции x, причем ординаты последней кривой должны быть отложены в том же масштабе, как и кривая $\sigma_{цвд} . K_1 . P_1$. Разность ординат кривых

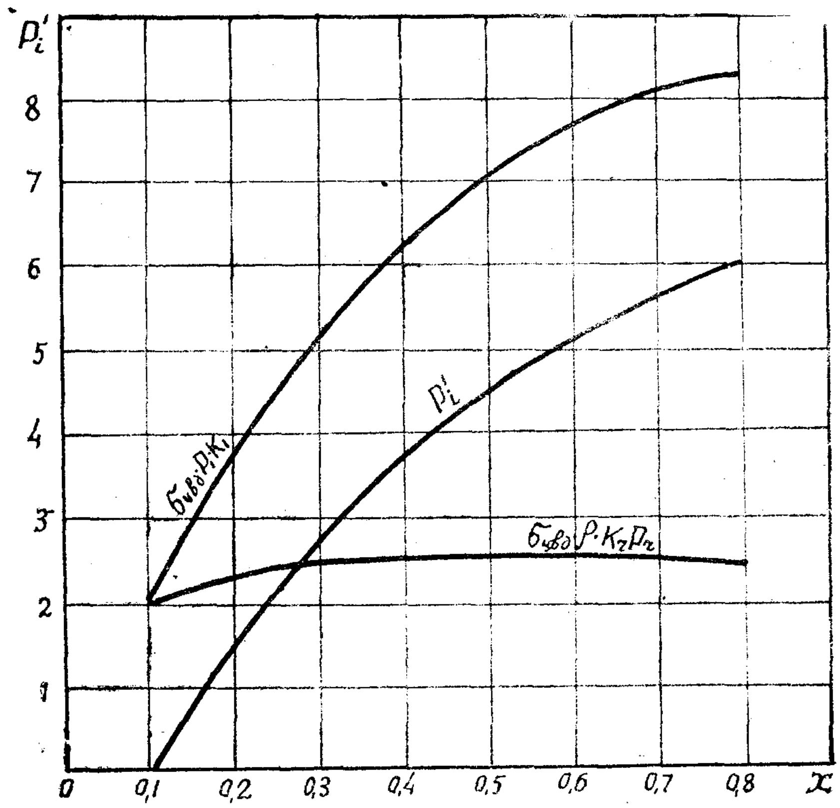
$$(\sigma_{цвд} . K_1 . P_1 - \sigma_{цвд} . K_r . \rho . P_r)$$

на фиг. 4 для любого значения x определяет величину среднего индикаторного давления P_i' в ЦВД, как функции x.



Фиг. 3

Аналогично ведем построение для кривых переднего и заднего давлений в ЦНД, исходя из основного уравнения $P_i'' = \sigma_{цнд}(K_1 P_r - K_2 P_2)$. Здесь $K_1 = f_4(X)$ есть та же самая гипербола $K_1 = f_1(x)$, как на фиг. 1, пользо-

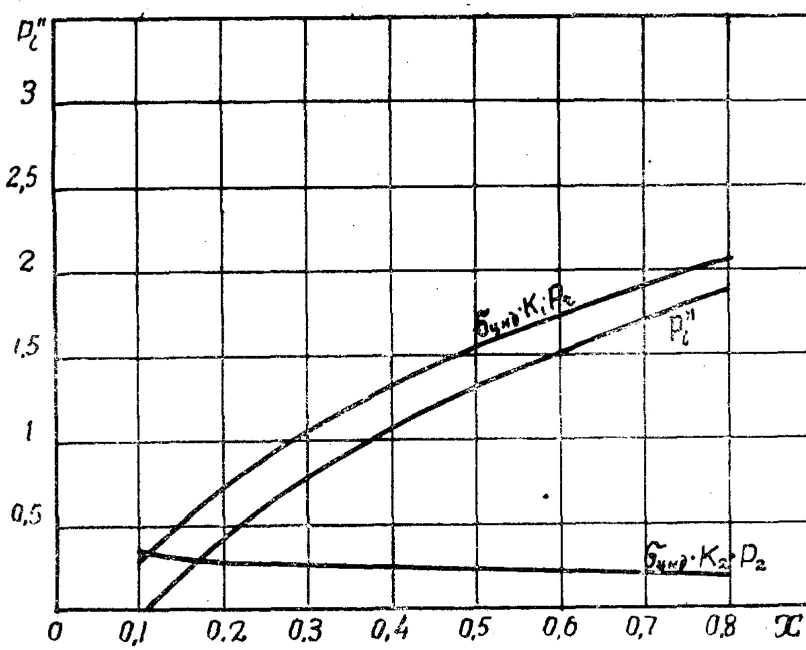


Фиг 4

ваться которой надлежит, однако, так, чтобы по заданным значениям $X = E + M$ на отрицательной оси ординат (4 квадрант) на положительной оси абсцисс (первый квадрант) находить соответственные значения x, пользуясь прямой

$$X = E + M = q + M - im + ix = Q + ix,$$

построенной в четвертом квадранте, а по значениям x отыскивать отвечающие им величины ординат (в первом квадранте) по гиперболе K_1 на фиг. 1. Помножая последние ординаты на ординаты кривой $P_r = f_2(x)$ на фиг. 3 для одних и тех же заначений x и откладывая произведения в масштабе фиг. 4, получим кривую изменения переднего давления в ЦНД



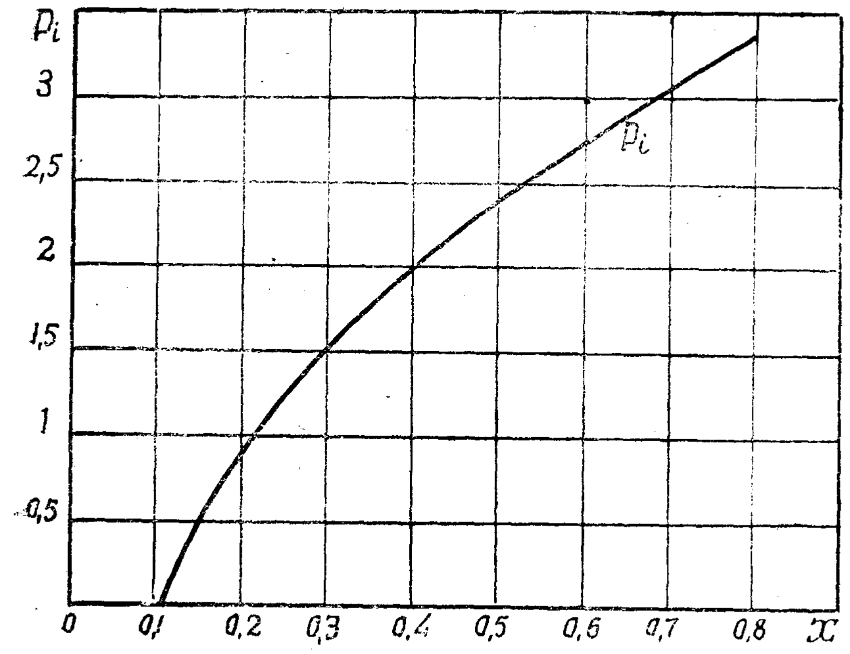
Фиг. 5

$\sigma_{цнд} . K_1 . P_r$, как функции x (фиг. 5). Тут же строим кривую $\sigma_{цнд} . K_2 . P_2$, как произведение $\sigma_{цнд} . P_2$ на $K_2 = f_5(x)$, для чего пользуемся фиг. 1, где по данной величине $X = E + M$ находим x, а через последнюю величину отыскиваем Z, значениям которого соответствуют определенные величины $K_2 = K_r$. Ординаты кривой $\sigma_{цнд} . K_2 . P_2 = f_6(x)$ откладываем на фиг. 5 в масштабе фиг. 4. Разность ординат $\sigma_{цнд} . K_1 . P_r - \sigma_{цнд} . K_2 . P_r$ дает P_i'' в функции x. На фиг. 6 построена кривая изменения совокупного среднего индикаторного давления

$$P'_i = \frac{P_i'}{\delta} + P_i''$$

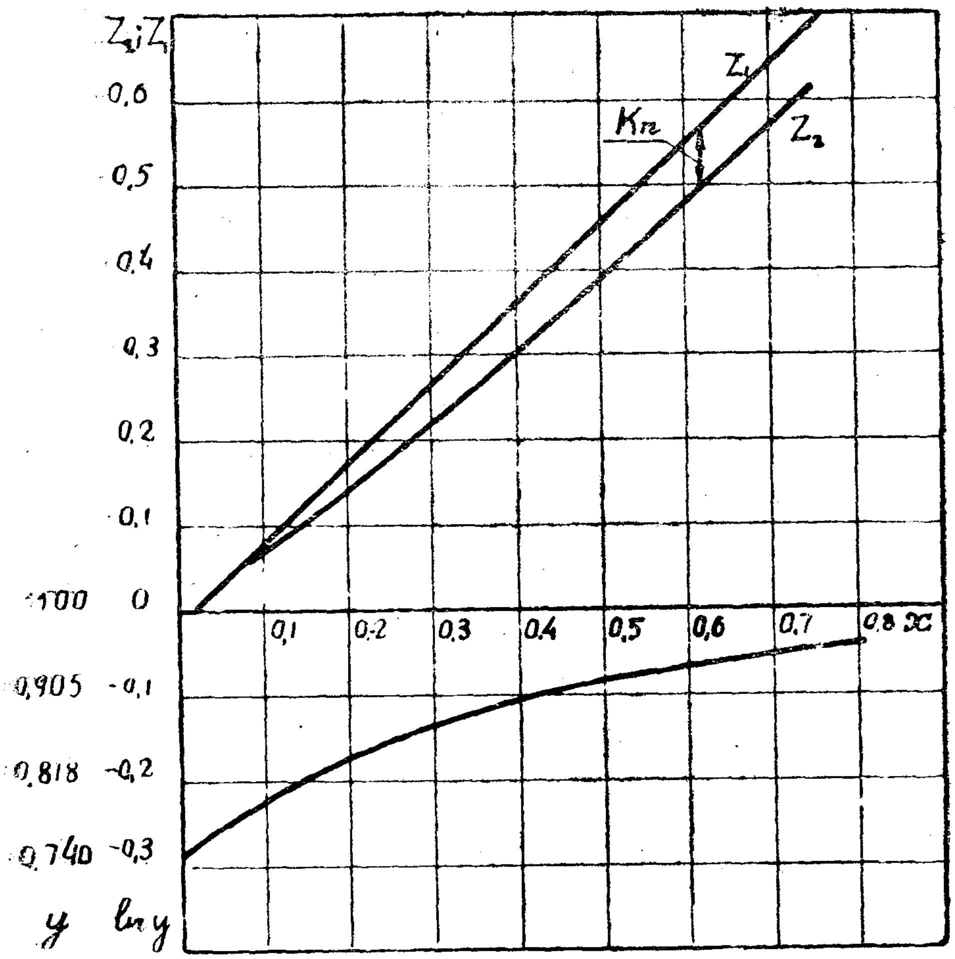
как функция x.

На разобранный пример надо смотреть как на частный случай, иллюстрирующий общий метод решения такой довольно сложной задачи переменного режима пароходной машины. Не надо при этом упускать из вида, что построение гипербол коэфициентов переднего и заднего давлений может быть выполнено раз навсегда для разных значений вредных пространств. Специфическими же являются кривые зависимости между степенями наполнения и сжатия ЦВД и ЦНД, а также, в связи с этим, кривые среднего ресиверного давления в зависимости от x в ЦВД.



p_i
3
2,5
2
1,5
1
0,5
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
x

Фиг. 6



$Z_2; Z_1$
Z_1
Z_2
K_n
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
1,00
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
x
0,905
-0,1
0,818
-0,2
0,740
-0,3
y
$\ln y$

Фиг. 7

В случае применения перегретого пара усредняющий коэфициент переднего давления имеет вид

$$K_n = \alpha_{цвд} \cdot \varepsilon + \frac{\beta_{цвд}}{n-1}(\varepsilon + m)\left[1 - \left(\frac{\varepsilon + m}{1+m}\right)^{n-1}\right].$$

Здесь n — показатель политропы, зависящий от давления и температуры пара. Назовем

$$y = \left(\frac{\varepsilon + m}{1+m}\right)^{n-1}.$$

Тогда

$$\ln y = (n-1)\ln x - (n-1)\ln(1+m).$$

Вводя коэфициент $\psi_n \geqslant 2$ и разлагая в строку $\ln \psi_n x$, получаем после преобразований

$$\ln y = (n-1)\left[2\left(1 - \frac{2}{\psi_n x + 1}\right) - \ln \psi_n(1+m)\right].$$

Асимптота гиперболы при $\ln y = \infty$ будет

$$x = -\frac{1}{\psi_n},$$

а при $x = \infty$

$$\ln y = (n-1)[2 - \ln \psi_n(1+m)].$$

Если $x = 0$, то

$$\ln y = (n-1)[-2 - \ln \psi_n(1+m)].$$

На оси ординат против значений $\ln y$ надо поставить их числа и построить зависимость $y = f(x)$. В результате получаем

$$K_n = x\left(\alpha_{цвд} + \frac{\beta_{цвд}}{n-1}\right) - \alpha_{цвд} \cdot m - \frac{\beta_{цвд}}{n-1} xy = Z_1 - Z_2,$$

причем

$$Z_1 = x\left(\alpha_{цвд} + \frac{\beta_{цвд}}{n-1}\right) - \alpha_{цвд} \cdot m \text{ — уравнение прямой.}$$

Кривые

$$Z_2 = \frac{\beta_{цвд}}{n-1} x y$$

в зависимости от x можно построить для разных значений n. Тогда значения для K_n получаем, как указано на фиг. 7.

Уравнение (3) для постоянства весового количества пара, проходящего через машину, в случае перегретого пара, перепишется в виде

$$\frac{T_1}{T_{пер}} \cdot \gamma_1 F(m_0 + \varepsilon) = \gamma_2 F_2 (M_0 + E),$$

где T_1 и $T_{пер}$ — абсолютные температуры насыщенного и перегретого пара начального давления в ЦВД. В соответствии с этим гипербола $P_r = f_2(x)$ на фиг. 3 займет другое положение и получатся изменения положения кривых $\sigma_{цвд} \cdot \rho \cdot K_r \cdot P_r$ и P_i' на фиг. 4.

В заключение необходимо заметить, что при изменениях степеней ε и E наполнения в ЦВД и в ЦНД будут меняться в какой-то мере коэфициенты α, β и σ, что может быть определено только опытным путем. В соответствии с обобщением опытных материалов потребуется, вероятно, внести некоторые поправочные коэфициенты к значениям P_i' и P_i'', полученным на основе вышеизложенных соображений.

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Следует
24	2 снизу	$\gamma_r = S . P$	$\gamma_r = S \; P_r$
41	4 сверху	цитированая	цитированная
57	5 сверху	термо-игидродинамические	термо- и гидродинамические
69	11 снизу	топлоносителя	теплоносителя
85	10 снизу	$\frac{dV}{d\alpha} =$	$0 = \frac{dV}{d\alpha} =$
102	17 снизу	бессейнов	бассейнов
178	фиг. 1	в процесс	в процессе
185	14, 15, 17 снизу	э	ε
204	7 сверху	огд	год
210	6 снизу	где 860 $N_{=мk} = 8{)}0\,(N_{ik} - N_{=k})$	где 860 $N_{эмk} = 860\,(N_{ik} - N_{эk})$
211	9 сверху	$N_{=} = N_{=k} + N_{=no}$	$N_{э} = N_{эk} + N_{эno}$
211	18 сверху	$D_k = \frac{860\, N_{=k}}{(i_0 - i_k)\, \eta_м \; \eta_г} =$	$D_k = \frac{860\, N_{эk}}{(i_0 - i_k)\, \eta_м \, \eta_г} =$