

## Изменение мощности паромашин.

Мощность паромашин, как известно, выражается в л. с. в виде:  $N_e = \eta \cdot \frac{l \cdot p}{30 \cdot 75} \cdot O \cdot p_i$ . При неизменных в данной машине:  $O$  — полезной площади поршня в кв. сант. и  $l$  — длине хода поршня в мет. эффективная мощность  $N_e$  могла бы меняться при изменении:  $p$  — числа оборотов в мин. и  $p_i$  — среднего индикаторного давления, ибо  $\eta$  — мех. к. п. практически величина постоянная. Но изменения  $p$  для заданных условий производства не представляется удобным, так как исполнительные механизмы, приводимые в движение от данной паромашин, имеют определенные наиболее выгодные скорости движения, нарушение коих ведет к понижению качественной и количественной стороны выработки продукта. С другой стороны, это именно число оборотов  $p$  учтено при проектировании самой паромашин в части, касающейся ее динамики. Так., обр. в сущности остается одна возможность к изменению мощности  $N_e$  данной паромашин — это изменение  $p_i$ , сохраняя  $p$  постоянным.

Среднее индикаторное давление всякой паромашин можно представить так:  $p_i = \sigma (k p - k_e p_e) \dots (1)$ , где  $p$  и  $p_e$  — давления впуска и выпуска в аб. атм.,  $k$  и  $k_e$  — усредняющие коэффициенты переднего и заднего давлений и  $\sigma$  — коэффициент надежности, характеризующий потери в действительной индикаторной диаграмме вследствие парораспределения и теплообмена со стенками цилиндра,  $\sigma = 0,90 - 0,95$ .

Из формулы (1) для  $p_i$  ясно, что можно получать изменения  $p_i$ , меняя величину  $p$ , что имеет место в действительных паромашинах при регулировке дроссель-клапаном. В этом случае изменение  $p_i$  в зависимости от  $p$  будет происходить по закону прямой линии, проведенной от начала координат на расстоянии  $\sigma \cdot k_e p_e$  под углом к оси  $p$ , тангенс коего равен  $\sigma k$ . На чер. 1 изображен этот закон для частного примера:  $p = 6,15$ ;  $p_e = 1,1$ ;  $k = 0,58$ ;  $k_e = 1,13$  и  $\sigma = 0,93$ , причем для  $p = 6,15$  атм.  $p_i = 2,2$  атм., а для  $p = 4$  атм.  $p_i = 1,05$  атм.

Способ изменения мощности машин при посредстве «мятия пара» довольно распространен в небольших паромашинах. Он обладает, однако, следующими общеизвестными недостатками: 1) пусть в теоретической индикаторной диаграмме (чер. 2) начальное давление  $AC$  понижение до  $AC^1$ , а степень наполнения  $\frac{CD}{AB} = \frac{C^1D^1}{AB}$  оставлена прежней. Получим диаграмму  $C^1D^1E^1GK^1C^1$ .

Продолжив линию расширения  $E^1D^1$  до встречи с прямой  $CD$  получим теоретическую диаграмму  $KCFE^1GK$  при первоначальном давлении  $AC$  и при степени впуска  $\frac{CF}{AB} < \frac{CD}{AB}$ . Расход пара по весу одинаков в обоих последних

диаграммах, между тем как во второй получается избыток работы, изображаемый площадкой  $CF C^1 D^1$ . А так как добавочный расход тепла на приготовление пара более высокого давления ничтожен, то ясно, что мощность машин выгоднее уменьшать более ранней отсечкой, чем мятием пара, что и подтверждается опытом.

2) Существуют паромашины, у которых переход равнодействующих горизонтальных усилий чрез ноль, происходит после мертвого положения. При дроссель—клапанах увеличение  $p$  в этом случае вызывает приближение нуля давлений к мертвой точке до возможного совпадения с ней, результатом чего могут быть удары в сочленениях машины.

3) При уравнивании сил инерции механизма достаточным сжатием давление последнего в конце  $p_c$  ограничивает дальнейшее понижение  $p$ , так как при  $p < p_c$  будет появляться петля в конце сжатия, и наступает искажение вида индикаторной диаграммы, чем суживаются пределы регулирования, или же, в случае большого понижения мощности, приходится мириться с потерями в индикаторной диаграмме.

Естественно поэтому, что способ изменения мощности  $N_e$  при посредстве изменения степени  $\epsilon$  наполнения, т. е. при изменении  $k$  в формуле (1) для  $p_i$ , является наиболее рациональным.

Коэффициент переднего давления  $k$  выражается чрез степень наполнения  $\epsilon$  в следующем виде:  $k = \epsilon + (\epsilon + m) \ln \frac{1+m}{\epsilon+m}$ , где  $m$  — величина вредного

пространства в % рабочего объема парового цилиндра. Положивши  $x = \epsilon + m$ , преобразуем:  $k = \alpha x - x m + \beta x \ln(1+m) - \beta x \ln x$ . Чтобы избавиться от  $\ln x$ , прибегнем к разложению в строку, при чем для возможности игнорирования всех членов разложения, начиная со второго,  $x$  под знаком  $\ln$  умножим на некоторый множитель  $\gamma > 1$ , прибавив одновременно величину  $+$   $+$   $\beta x \ln \gamma$ . Тогда:  $k = x [\alpha + \beta \ln(1+m) + \beta \ln \gamma] - \alpha m - 2\beta x \frac{\gamma x - 1}{\gamma x + 1}$ , отсюда:  $\gamma [\alpha + \beta \ln(1+m) + \beta \ln \gamma - 2\beta] x^2 - \gamma k x - k + [\alpha + \beta \ln(1+m) + \beta \ln \gamma - \alpha m \gamma + 2\beta] x - \alpha m = 0$ .

Таким образом имеем уравнение кривой второго порядка вида:  $Ax^2 - Bx + C = 0$ , при чем  $AC - B^2 = -(\gamma)^2 < 0$ , т. е. кривая — гиперболою. Для выбора значения  $\gamma$  заметим, что второй член разложения в строку  $\ln \gamma x$  равен  $\frac{2}{3} \beta x \left( \frac{\gamma x - 1}{\gamma x + 1} \right)^3$  и обращается в ноль при  $\gamma = \frac{1}{x}$ , для чего пришлось бы давать переменные значения  $\gamma$  для каждого  $x$ , что, очевидно, невозможно. В одноцилиндровой машине при работе на холодильник обычные колебания для  $x = 0,1 - 0,5$ , а при работе на атмосферу  $x = 0,2 - 0,7$ , чему соответствуют значения  $\gamma$  в первом случае  $\gamma = 10 - 2$ , а во втором  $\gamma = 5 - 1,43$ , поэтому, держась ближе к нормальным степеням наполнения, выберем для первого случая  $\gamma = 5$ , а для второго еще и с тем расчетом, чтобы множитель  $A$  при  $x^2$  обратить в ноль для упрощения задачи. Если принять  $\epsilon = 0,85$ ;  $\alpha = 0,92$ ;  $m = 0,08$ , получим  $\gamma = 2,3$ , когда  $A = 0$ . Обозначим для последнего случая:  $\psi = D - By$  и  $\tau = -Vx - 1$ . Тогда:  $\psi \tau = (D - By)(-Vx - 1) = -V(Dx - Bxy - y) - D = -VF - D = \text{const}$ . Уравнение асимптот гиперболы  $\psi \tau = 0$ , т. е.  $y = \frac{D}{B}$  и  $x = -\frac{1}{V}$ . Имеем численные значения для вышеуказанного частного примера:

Коэффициенты:	Их буквенные выражения:	Их численные значения:
A.	$\gamma [\alpha + \beta \ln(1+m) + \beta \ln \gamma - 2\beta]$ .	0
B.	$\gamma$ .	2,3
D.	$\alpha + \beta \ln(1+m) + \beta \ln \gamma - \alpha m \gamma + 2\beta$ .	3,23
F.	$\alpha m$ .	0,074

Таким образом для ассимтот имеем  $k = \frac{3,23}{2,3} = 1,4$  и  $x = -\frac{1}{2,3} = -0,43$ .

Необходимую точку для построения гиперболы найдем, полагая  $x=0$ , при чем  $k = -F = -0,074$ . Построение гиперболы сделано, на чер. 3.—

Переходя ко второму случаю работы на холодильник, заметим, что  $A$  не равно. Тогда уравнение нашей гиперболы можно представить в виде:

$$\left[0,5 By - \left(0,5 D - \frac{A}{B}\right)\right]^2 - [Ax - 0,5 (By - D)]^2 + 0,25 D^2 + AF - \left(0,5 D - \frac{A}{B}\right)^2 = 0, \text{ так что уравнение для ассимтот: } \left[0,5 By - \left(0,5 D - \frac{A}{B}\right)\right]^2 - [Ax - 0,5 (By - D)]^2 = 0, \text{ откуда, по разложении разности квадратов}$$

на произведение суммы их на их разность, имеем:  $x = -\frac{1}{B}$ , а уравнение

другой ассимтоты:  $By - D + \frac{A}{B} - Ax = 0$ , что при  $x=0$  дает  $y = \frac{D}{B} -$

$\frac{A}{B^2}$  и при  $x=1$  дает  $y = \frac{D}{B} - \frac{A}{B^2} + \frac{A}{B}$ .

Коэффициенты в численных значениях нашего частного примера будут для данного случая:

Коэффици- енты.	Их буквенные выражения.	Их численные значения.
A.	$\gamma [\alpha + \beta \ln(1+m) + \beta \ln \gamma - 2\beta]$ .	3,3
B.	$\gamma$ .	5,0
D.	$\alpha + \beta \ln(1+m) + \beta \ln \gamma - \alpha m \gamma + 2\beta$ .	3,7
F.	$\alpha m$ .	0,074

Так обр.:  $x = -\frac{1}{B} = -\frac{1}{5} = -0,20$ ; для другой ассимтоты при  $x=0$

имеем  $y = \frac{D}{B} - \frac{A}{B^2} = \frac{3,7}{5} - \frac{3,3}{25} = 0,61$  и при  $x=1$  имеем  $y = \frac{D}{B} -$

$\frac{A}{B^2} + \frac{A}{B} = \frac{3,7}{5} - \frac{3,3}{25} + \frac{3,3}{5} = 1,27$ . Точка, нужная для построения гиперболы,

получается при  $x=0$ , когда  $k = -F = -0,074$ . Гипербола построена на чер. 4 способом секущих.

Неточности от игнорирования второго члена разложения  $\frac{2}{3} \beta x \left(\frac{\gamma x - 1}{\gamma x + 1}\right)^3$  выразятся для крайних значений  $x$ :

x.	$\gamma=5$	$\gamma=2,3$
0.1	0,002	—
0.2	—	0,006
0.5	0,02	—
0.7	—	0,004

Изменение  $p_i$  в основном уравнении (1) в зависимости от  $k$  изобразится в виде прямой  $p_i = \sigma r k - \sigma k e p_e$ , проходящей от начала координат на расстоянии  $-\sigma k e p_e$  под углом к оси  $k$ , тангенс коего  $= \sigma r$ . Для вышеуказанного частного примера машины:  $p_i = 0,93.6,15. k - 0,93.1,13.1,1$ ; для  $k=0$  имеем  $p_i = -0,93.1,13.1,1 = -1,15$ ; для  $k=1,0$  имеем:  $p_i = 5,7 - 1,15 = 4,55$ .

На чер. 5 изображена эта прямая. По найденному  $k$  для любого  $p_i$  легко найти  $x = \varepsilon + m$ , пользуясь той или другой гиперболой для  $k$  (чер. 3—4) в зависимости от обстоятельств. Так, для  $p_i = 2,2$  атм.

находим  $k = 0,57$ , чему на чер. 3 отвечает  $x = 0,33$  и след.  $\varepsilon = 0,25$ . Легко решается и обратная задача: по заданному  $\varepsilon = x - m$  найти  $p_1$  при помощи гипербол  $k = f(x)$  и прямой  $p_1 = f(k)$ .

Если бы желательно было установить непосредственную зависимость между  $p_1$  и  $x = \varepsilon + m$ , то нетрудно убедиться, исходя из основного уравнения (1)  $p_1 = \sigma k p_e - \sigma k_e p_e$ , что для любого  $x$  для  $p_1$  получаем значения, как разность между ординатами той или иной гиперболы  $k$  (чер. 3—4) и ординатами прямой, проведенной параллельно оси  $x$  на расстоянии от нее  $= \sigma k_e p_e$ , при чем масштаб для тех и других ординат должен быть взят сравнительно с чер. 3—4 в  $\sigma p$  раз менее. Так, для упоминавшегося частного примера имеем значение  $p_1$  для  $x = 0,5$  при работе на атмосферу (чер. 3):  $p_1 = \frac{6,15 \cdot 0,93}{100} (51,5 - 20) = 2,95$  атм.

Таким образом непосредственная зависимость  $p_1 = f(x)$  — *гиперболическая*.

Основное уравнение (1)  $p_1 = \sigma (k p_e - k_e p_e)$  показывает возможность изменения  $p_1$  при изменении  $k_e$ . Коэффициент заднего давления  $k_e$  выражается чрез  $s$  — степень сжатия — в виде:  $k_e = 1 - s + \varphi (s + m) \ln \frac{s + m}{m} = 1 - Z(1 + \varphi \ln m) + m + \varphi Z \ln Z$ , если обозначить  $Z = s + m$  и чрез  $\varphi$  — коэффициент, характеризующий мятие пара в момент начала сжатия  $= 1,1$ . Зная, что  $Z$  обычно находится в пределах  $Z = 0,1 - 0,5$ , и что, следовательно, множитель при  $Z$  под знаком  $\ln$  при разложении в строку с игнорированием второго члена разложения может быть  $\gamma_1 = 10 - 2$ , можно принять  $\gamma_1 = 5$ . Тогда имеем:  $\gamma_1 [2\varphi - 1 - \varphi \ln(m\gamma_1)] Z^2 - \gamma_1 k_e Z + [\gamma_1(1+m) - 2\varphi - 1 - \varphi \ln(m\gamma_1)] Z - k_e + 1 + m = 0$ , т. е. опять для зависимости между  $k_e$  и  $Z$  имеем *гиперболу*, ибо  $AC - B^2 = -(-\gamma_1)^2 < 0$ . Координаты центра гиперболы будут:  $z = -\frac{1}{\gamma_1} = -0,2$  и  $k_e = -\frac{2\gamma_1 [2\varphi - 1 - \varphi \ln(m\gamma_1)] + \gamma_1(1+m) - 2\varphi - 1 - \varphi \ln(m\gamma_1)}{\gamma_1} = -\frac{2 \cdot 11}{25} + \frac{3,2}{5} = -0,24$ , при чем уравнение второй ассимтоты  $k_e = -0,24 + [2\varphi - 1 - \varphi \ln(m\gamma_1)]Z$ , что для  $Z = 1$  дает  $k_e = 2,4$ . Необходимую для построения гиперболы точку найдем, полагая  $Z = 0$ , так что  $k_e = 1 + m = 1,08$ . Гипербола способом секущих построена на чер. 6. Заметим, что относительная погрешность от игнорирования второго члена разложения здесь будет менее, чем в случае  $k$ , ибо  $k_e$  всегда  $> 1$ .

Пользование изменениями  $k_e$  для изменения мощности паромашин на практике обычно не применяется, ибо имеет следующие невыгоды: 1) давление  $p_e$  в конце сжатия принято выбирать достаточным для уравнивания сил инерции частей с попеременно-возвратным движением: это обеспечивает плавность хода. При уменьшении  $p_e$  легко могут получиться удары в сочленениях машины; 2) при увеличении  $p_e$  увеличивается работа противодействия, при чем возрастание  $p_e$  от компрессии пара получается невыгодным путем, как превращение механической работы в теплоту, а в случае значительных мертвых пространств может иметь место даже предварительная конденсация. Термически наиболее выгодное давление в конце сжатия не должно превосходить средней температуры стенок концов цилиндра: отступление от этого ведет к увеличению расхода пара; 3) пределы регулирования мощности гораздо шире в случае изменения степени наполнения или применения дроссель клапана. Если к изменению степени сжатия, как к самостоятельному средству изменения мощности, не принято прибегать на практике, тем не менее в машинах с кулисным парораспределением, а также в случаях плоских регуляторов вместе с изменением степени наполнения изменяется и степень сжатия в обратном направлении, т. е. увеличение, напр., степени наполнения влечет за собой уменьшение степени сжатия и наоборот. Так. обр. изменение мощности про-

исходит в этих случаях с двух сторон одновременно, отчего мощность машины изменяется быстрее. Для возможности выяснения закона изменения  $p_i$  в зависимости от  $\varepsilon$  (или  $x = \varepsilon + m$ ) необходимо в каждом отдельном таком случае знать зависимость  $c = f(\varepsilon)$ . Если ограничиваться грубо приближенным решением задачи, то окажется, что иногда эта зависимость может быть выражена крайне простым линейным уравнением вида:  $c = a - b\varepsilon$ . Такая зависимость имеет место, например, в некоторых типах паровозов<sup>1)</sup>. Так, для паровоза сер. К в численных значениях она будет:  $C = 0,38 - 0,42\varepsilon$ . Выражая через  $x$  и  $Z$ , получим:  $Z = a + m + bm - bx$  и  $Z = 0,49 - 0,42x$ , полагая  $m = 0,08$ . Пользуясь этой зависимостью, находим график зависимости  $p_i$  от  $x$  для данного частного случая, как разность ординат кривой  $k = f(x)$  с уменьшенным в  $\sigma p$  раз масштабом (чер. 3), ибо в паровозах отсечки ранее  $x = 0,2$  неупотребительны, и ординат кривой  $k_e = f(Z)$  (чер. 6) с уменьшенным масштаба в  $p/p_e$  раз, имея в виду, что масштабы чер. 3—6 одинаковы, при чем ординаты последней кривой (чер. 6) берутся для тех значений  $Z$ , которые отвечают соответственным значениям  $x$  из линейного графика (чер. 7):  $Z = 0,49 - 0,42x$ . Искомая зависимость  $p_i = f'(x)$  выстроена на чер. 8, где для  $x = 0,5$  имеем  $p_i$ , как разность ординат  $ab - ad =$

$$= (71 - 10,5) \frac{0,93 \cdot 12,5}{100} \approx 6,9 \text{ атм.}, \text{ при чем } p = 12,5 \text{ атм. и } p_e = 1,2 \text{ атм.}$$

Само собой разумеется, что влияние скорости движения паровоза на  $p_i$  здесь не учитывается.

Наконец, из основного (1) уравнения  $p_i = \sigma (k p - k_e p_e)$  явствует возможность изменения  $p_i$  при изменении  $p_e$ . Невыгоды регулировки мощности при помощи изменения  $p_e$  заключаются в следующем: 1) меняется давление в конце сжатия, а след. не устранена возможность ударов; 2) при повышении  $p_e$  является опасность образования петель на индикаторной диаграмме в конце расширения и сжатия; 3) при изменении  $p_e$  машина является неэкономичной, ибо каждой степени наполнения отвечает лишь одно наиболее экономичное давление выпуска  $p_e$  в зависимости от амортизационных и эксплуатационных расходов и стоимости топлива. Как известно, при выборе наиболее выгодного давления холодильника приходится делать подсчет всех расходов при заданном  $p_i$  для разных  $p_e$ , при чем в целях выяснения полезного расхода пара определяется для каждого  $p_e$  соответственная степень наполнения  $\varepsilon$ . Так. обр. задача в случае изменения  $p_e$  в основном (1) уравнении  $p_i = \sigma (k p - k_e p_e)$  видоизменяется: приходится отыскивать  $x = \varepsilon + m$ , как  $x = f(p_e)$  при  $p_i = \text{const}$ . Аналогичная задача возникает еще и в другом случае практики, когда надлежит найти степень наполнения при изменении противодействия с сохранением мощности, что имеет место в случаях переустройства установки, работавшей на холодильник, для работы на отопление и при обратной переделке

Нетрудно видеть, что  $\frac{p_i}{\sigma p} + \frac{k_e}{p} p_e = k$ , т. е.  $k$  изменяется, как  $k = f(p_e)$ , по закону прямой, проведенной от начала координат на расстоянии  $\frac{p_i}{\sigma p}$  под углом к оси  $p_e$ , тангенс коего  $= \frac{k_e}{p}$ . Для нашего частного примера при  $p_e = 0$  имеем  $k = p_i / \sigma p = 0,38$ , а для  $p_e = 1$  имеем  $k = 0,56$ , что и нанесено на чер. 9. По заданному  $p_e$  легко находим  $k$ , а пользуясь кривыми (чер. 3—4)  $k = f(x)$ , просто определяем соответственное  $x$ . Но можно иметь непосредственное изображение зависимости  $p_e = f(x) = \frac{p}{k_e} K - \frac{p_i}{\sigma k_e}$ , т. е. эта зависимость гиперболического вида.

<sup>1)</sup> Паспорта паровозов: 1—5—0 Е ф (Игр., 1917, стр. 14); 1—4—0 Щп (Игр. 1915, стр. 7); 1—3—1 С (Игр. 1915, стр. 7); 2—3—0 Ку (Игр. 1915, стр. 7); 0—5—0 Э (Москва 1918, стр. 7).

Каждое значение  $p_e$  получается, как разность ординат кривой  $k = f(x)$  (чер. 3—4) в уменьшенном в  $\frac{p}{k_e}$  раз масштабе и ординат прямой  $\frac{p_i}{k_e}$  параллельной оси  $x$  в том же масштабе  $k$ . Так, обр. для  $p_e = 0,3$  атм. имеем на чер. 10:  $p_e = \frac{0,3}{6,15} \times 1,13 \times 100 = 5,5$  мм., так что  $x = 0,23$ , откуда  $\varepsilon = 0,15$ .

Все вышесказанное относится к машинам, работающим насыщенным паром. Для машин перегретого пара коэффициент переднего давления имеет вид:  $k_n = \alpha \varepsilon + \frac{\beta}{n-1} (\varepsilon + m) \left[ 1 - \left( \frac{\varepsilon + m}{m+1} \right)^{n-1} \right]$ , что может быть представлено, полагая  $x = \varepsilon + m$ , в виде:  $k_n = \left[ \alpha + \frac{\beta}{n-1} - \frac{x \beta \cdot n-1}{(n-1)(m+1)^{n-1}} \right] x - \alpha m$ .

Осложняющим обстоятельством здесь является то, что показатель  $n$  политропы, будучи зависим от температуры перегретого пара, в то же время зависит и от степени наполнения  $\varepsilon = x - m$ .

Для характеристики последней зависимости могут служить кривые чер. 11, относящиеся до опытов проф. Schröter'a с машинами двукратного расширения, при чем кривые эти дают зависимость  $n$  от  $\varepsilon$  в ЦВД. Так как в современных машинах температура перегретого пара обычно бывает  $300 - 350^\circ \text{Ц}$ , то, допуская приближенную линейную зависимость между  $n$  и  $x = \varepsilon - m$  в пределах  $x = 0,1$ , когда  $n = 1,0$ , и  $x = 0,4$ , когда  $n = 1,24$ , получим:  $n = 0,8x + 0,92$ , при чем  $m$  принято  $= 0,08$ , как часто встречается величина для клапанного и золотникового с цилиндрическими золотниками парораспределения, применяемых при перегретом паре. Очень часто рекомендуется при выборе значения показателя  $n$  для давлений<sup>1)</sup>  $p \geq 9$  вил./кв. сант. пользоваться следующей таблицей Berner'a:

Средние показатели расширения для ЦВД.				
Температура пара в С.	200	250	300	350
Малая нагрузка . . . . .	1,00	1,05	1,10	1,14
Нормальная нагрузка . . . . .	1,05	1,10	1,14	1,17
Усиленная » . . . . .	1,10	1,15	1,18	1,20

Но здесь, во-первых, зависимость от степени наполнения существует лишь в скрытом и при том неопределенном виде (малая, нормальная, усиленная нагрузка), а во-вторых, для больших машин значения  $n$  рекомендуется повышать на  $0,02 - 0,04$  и вместе свидетельствуется, что практически даже большие отклонения от действительных величин имеют обыкновенно мало значения. Вообще в выборе  $n$  существует некоторая неопределенность и, надо думать, пользование приближенной формулой  $n = 0,8x + 0,92$  в указанных границах не может создать грубых ошибок. Умножим и разделим вычитаемое внутри [ ] скобок выражения для  $k_n$  на  $1,5^{n-1}$  и произведем разложение в строку в числителе вычитаемого  $\beta (1,5n)^{n-1}$ , а в его знаменателе  $(n-1) [1,5(1+m)]^{n-1}$ .

Тогда получим:  $k_n = \left\{ \alpha + \frac{\beta}{n-1} - \frac{\beta [1 + (n-1) \ln 1,5x]}{(n-1) [1 + (n-1) \ln 1,5(1+m)]} \right\} x - \alpha m$ .

Вторые члены разложения можно игнорировать, ибо при  $x = 0,1$  превращается в ноль  $n-1$ , а при  $x = 0,4$ , вторые члены разложения будут:  $0,9 \cdot 0,24^2 \cdot \frac{(\ln 0,6)^2}{2} \cdot 0,4 = 0,002$  и  $0,24 \cdot 0,24^2 \cdot \frac{(\ln 0,6)^2}{2} = 0,001$ .

<sup>1)</sup> Berner. Применение перегретого пара к поршневой паровой машине. Москва. 1908 г. стр. 83.

Разложим также в строку и  $\beta(n-1)x \ln 1,5x$ . Второй член разложения при  $x=0,4$  равен  $\frac{2}{3} \left( \frac{1,5x-1}{1,5x+1} \right)^3 (n-1) \times \beta \times x = 0,0008$ , каковую величину можно также игнорировать, и, следовательно, вместо  $\ln 1,5$  надлежит подставить всего лишь  $2 \left( \frac{1,5x-1}{1,5x+1} \right)$ . Правую часть выражения для  $k_n$  приводим теперь к одному знаменателю, подставив вместо  $n$  его приближенное значение  $= 0,8x + 0,92$ , и производим фактическое деление многочлена числителя на многочлен знаменателя, после чего имеем:

$$k_n = \left\{ 1,2\alpha \ln[1,5(1+m)]x^3 + \left\{ 1,5\alpha - 3\beta + [0,68\alpha + 1,5\beta - 1,2\alpha m] \ln[1,5(1+m)] \right\} x^2 + \right. \\ \left. + \left\{ \alpha + 2\beta - 1,5\alpha m + [\beta - 0,08\alpha + 0,04\alpha m] \ln[1,5(1+m)] \right\} x + \right. \\ \left. + 0,08\alpha m \ln[1,5(1+m)] - \alpha m \right\} : \left\{ 1,2 \ln[1,5(1+m)] x^2 + \right. \\ \left. + \left\{ 1,5 + 0,68 \ln[1,5(1+m)] \right\} x + 1 - 0,08 \ln[1,5(1+m)] \right\} = \\ = \frac{0,55x^3 - 0,35x^2 + 3,04x - 0,07}{0,57x^2 + 1,83x + 0,96} = 0,97x - 3,72 + \\ + \frac{8,81x + 3,49}{0,57x^2 + 1,83x + 0,96} = y_1 + y_2.$$

Таким образом  $k_n$  для каждого  $x$  получаем, как сумму ординат  $y_1$  и  $y_2$ . Но  $y_1 = 0,97x - 3,72$  есть уравнение прямой, а  $y_2 = \frac{8,81x + 3,49}{0,57x^2 + 1,83x + 0,96}$  получается, как частное от деления ординат прямой числителя на соответственные ординаты параболы<sup>1)</sup> знаменателя для одних и тех же абсцисс  $x$ . — Все дело сводится, следовательно, к построению двух прямых и одной параболы. Любопытно отметить, что парабола знаменателя совершенно не зависит от  $\alpha$  и  $\beta$ , т. е. не связана с характером парораспределения и может быть построена раз навсегда, как для клапанного, так и для золотникового парораспределения. Построение для  $y_1$  и  $y_2$  выполнены на чер. 12, где нанесена и кривая  $k_n$  в зависимости от  $x$ , при чем масштаб для абсцисс  $1 = 100$  мм., а для ординат прямых  $1 = 10$  мм. для возможности размещения в пределах чертежа, а для самой кривой  $k_n$  опять  $1 = 100$  мм.

За пределами отсечки, когда  $x \geq 0,4$ , показатель политропы  $n$ , повидимому, можно принять постоянным  $= 1,24$ . Посему имеем для этого случая:

$$k_n = \left\{ \left\{ 1,5\alpha - 3\beta + [\alpha(n-1) + \beta] 1,5 \ln[1,5(1+m)] \right\} x^2 + \right. \\ \left. + \left\{ \alpha + 2\beta - 1,5\alpha m + [\alpha(n-1) + \beta - 1,5\alpha m(n-1)] \ln[(1,5(1+m))] \right\} x - \right. \\ \left. - \alpha m - \alpha m(n-1) \ln[1,5(1+m)] \right\} : \left\{ 1,5 \left\{ 1 + (n-1) \ln[1,5(1-m)] \right\} x + \right. \\ \left. + 1 + (n-1) \ln[1,5(1+m)] \right\} = \frac{-0,47x^2 + 3,16x - 0,08}{1,67x + 1,11} = -0,28x + 2,08 -$$

$\frac{2,38}{1,67x + 1,11}$ , т. е., в данном случае дело сводится к построению трех прямых, что и выполнено на чер. 13. Совокупная кривая изменений  $k_n$  от  $x$  в пределах от  $x=0,1$  до  $x=0,7$  нанесена на том же чер. 13. Эта же кривая может изображать и закон изменения среднего переднего давления  $k_n p_0$  для любого  $p_0$  в зависимости от  $x$ , при чем масштаб чертежа, само собой разумеется, должен быть уменьшен в  $p_0$  раз.

<sup>1)</sup> Ибо  $AC - B^2 = 0$ .

Перейдем теперь к машинам двукратного расширения. Совокупное среднее индикаторное давление  $p_i$  представляется здесь в виде суммы частных таких же давлений в каждом из цилиндров, при чем  $p_i$  в ЦВД должно быть отнесено, конечно, к площади поршня ЦНД, т. е.  $p_i = \frac{p'_i}{\delta} + p''_i$ , где  $\delta$  — отношение объемов цилиндров. Можно написать:  $p'_i = \sigma (k_p - k_r \rho p_r)$ , где  $p_r$  — среднее ресиверное давление и  $p''_i = \sigma (k_{pr} - k_e p_e)$ , при чем чрез  $\rho$  оценивается разница между контр-давлением на поршень ЦВД и давлением на поршень ЦНД. Обычно принимают  $\rho$  в 0,1  $p_r$ , т. е.  $\rho = 1,1$ . Таким образом  $p_i$ , будучи зависимо от  $k$ , как в одноцилиндровой машине, при изменении степени пополнения  $\varepsilon$  в ЦВД или  $E$  в ЦНД зависит в то же время и от  $p_r$ , которое меняется вместе с  $\varepsilon$  и  $E$ . Для весового количества пара, проходящего чрез паромашину, имеем:  $\gamma \cdot F_1 (m_0 + \varepsilon) = \gamma_r \cdot F_2 (M_0 + E)$ . Считая приближенно:  $\gamma = \rho p$ ,  $\gamma_r = \rho p_r$ ,  $m_0 = m - \frac{\rho p_r (c + m)}{p}$  и  $M_0 = M - \frac{p_e (C + M)}{p_r}$  <sup>1)</sup>, а также полагая  $\delta = \frac{F_2}{F_1}$ , получаем:  $p_i = \frac{p}{\delta M + \delta E + \rho (c + m)} \varepsilon + \frac{p m + \delta (C + M) p_e}{\delta M + \delta E + \rho (c + m)}$ , т. е. зависимость среднего ресиверного давления от переменной степени  $\varepsilon$  наполнения ЦВД выражается законом прямой линии в предположении, что в то же время степень сжатия ЦВД с остается постоянной так же, как степень наполнения  $E$  и сжатия  $C$  в ЦНД. Поставим  $p_r$  в зависимости от  $x = \varepsilon + m$ .

Тогда:  $p_r = \frac{p}{\delta M + \delta E + \rho (c + m)} x + \frac{\delta (C + M) p_e}{\delta M + \delta E + \rho (c + m)}$ . Берем частный пример машины компаунд:  $\delta = 2,5$ ;  $p = 7$ ;  $p_e = 0,2$ ;  $m = M = 0,08$ ;  $c = 0,08$ ;  $C = 0,12$  и  $E = 0,6$ . Имеем:  $p_r = 3,8 x + 0,055$ . Построение сделано на чер. 14, с масштабом для ординат  $1 = 10$  мм., где, на пример, для  $x = 0,5$  получаем значение ординаты 20,5 мм., что дает  $p_r = \frac{20,5}{10} = 2,05$  атм.

Обращаемся сначала к отысканию зависимости среднего индикаторного давления  $p'_i$  в ЦНД от  $x$ . Подставляя в общее уравнение  $p'_i = \sigma (k_p - k_e p_e)$  вместо  $p_r$  его выражение чрез  $x$ , получаем:  $p'_i = \frac{\sigma k_p}{\delta M + \delta E + \rho (c + m)} x + \frac{\delta (C + M) p_e \cdot \sigma k}{\delta M + \delta E + \rho (c + m)} - \sigma k_e p_e$ . Таким обр. зависимость для ЦНД между средним его индикаторным давлением  $p'_i$  и  $x$  тоже линейного вида.

Выразим эту зависимость в числовых значениях вышеприведенного примера машины компаунд, приняв:  $\beta = 0,85$ ,  $\alpha = 0,93$  и  $\sigma = 0,93$ . Тогда:  $p'_i = 2,9 x - 0,17$ . На чер. 15 имеем, например, для  $x = 0,5$  значение  $p'_i = \frac{13,5}{10} = 1,35$  атм.

В ЦВД изменение  $p'_i$  обусловлено изменением двух факторов  $k$  и  $p_r$ . Пользуясь чер. 4, легко находим кривую для  $\sigma k_p$  на чер. 16, на котором в его масштабе наносим и прямую  $\sigma k_r \rho p_r$  применяя чер. 14. Разность ордопад двух этих линий и дает значение  $p'_i$  для любого  $x$ . Так обр., например, для  $x = 0,5$  имеем  $p'_i = (74 - 33,5) \cdot \frac{0,93 \cdot 7}{100} = 2,76$  атм., так что совокупное  $p_i = 1,35 + \frac{2,76}{2,5} = 2,45$  атм.

<sup>1)</sup> Объем вредных пространств, заполняемых паром впускного давления.



Из чер. 16 явствует, что при изменениях  $\varepsilon$  мощность ЦВД меняется мало начиная с  $x \geq 0,3$ .

Заметим кстати, что чер. 14 дает возможность установить максимальную отсечку в ЦВД, какую мы можем допустить без искажения вида индикаторной диаграммы в ЦВД. Максимальное давление в конце сжатия  $p_c$  не должно превосходить давления впуска  $p$  во избежание образования петли, т. е. приближенно имеем:  $p_c \cdot m = p_r (c + m)$ , откуда  $p_r = \frac{p_c m}{c + m}$ . По найденному этим путем значению  $p_r$  и чер. 14 отыскиваем  $x$ , а следовательно и  $\varepsilon_{\max} = x - m$ .

Если при прочих неизменных условиях парораспределения будет меняться одна лишь степень наполнения  $E$  в ЦВД, то, исходя опять таки из постоянства весового количества пара получаем:  $\delta p_r X + \rho (c + m) p_r - p (m + \varepsilon) - \delta p_e (C + M) = 0$ , где  $X = E + M$ . Так. обр. между ресиверным давлением  $p_r$  и  $X$  существует *гиперболическая* зависимость, ибо  $A\varepsilon - B^2 = -\delta^2 < 0$ . Пусть  $\tau = \delta p_r$  и  $\psi = \delta X + \rho (c + m)$ . Тогда  $\tau \cdot \psi = \delta [ \delta X p_r + \rho (c + m) p_r ] = = \delta [ p (m + \varepsilon) + \delta p_e (C + M) ] = \text{const}$ . Для асимптот имеем.  $\tau \cdot \psi = 0$ , так что  $\delta p_r = 0$ , т. е.  $p_r = 0$  и  $\psi = \delta X + \rho (c + m) = 0$ , т. е.  $X = -\frac{\rho (c + m)}{\delta}$ . Возьмем пример;  $\varepsilon = 0,27$ ;  $m = M = 0,08$ ;  $p = 11$ ;  $p_e = 1,1$ ;  $\delta = 2,25$ ;  $c = 0,09$  и  $C = 0,12$ . Имеем для асимптоты  $X = -\frac{1,1 (0,09 + 0,08)}{2,25} = -0,083$ . Необходимую для построения гиперболы точку найдем, полагая  $x = 1$ , так что  $p_r = \frac{p (m + \varepsilon) + \delta p_e (C + M)}{\delta X + \rho (c + m)} = 1,78$ . Построение выполнено на чер. 17.

Займемся далее отыскиванием зависимости среднего индикаторного давления  $p'_i$  в ЦВД от  $X$ . Подставляя в уравнение  $p'_i = \sigma (k p - \rho k_r p_r)$  вместо  $p_r$  его значение из предыдущего, получаем:  $p'_i = \sigma \left\{ k p - k_r \cdot \frac{\rho [ p (m + \varepsilon) + \delta p_e (C + M) ]}{\rho (c + m) + \delta X} \right\}$ , что приводится к виду:  $\rho (c + m) p'_i + \delta p'_i X - \sigma \delta k p X - S = 0$ , т. е. зависимость  $p'_i$  от  $X$  тоже *гиперболическая*. Имеем уравнения асимптот:  $\tau = \delta p'_i - \sigma \delta k p = 0$  и  $\psi = \delta X + \rho (c + m) = 0$ , откуда:  $p_i = \frac{\sigma \delta k p}{\delta} = \sigma p k$  и  $X = -\frac{\rho (c + m)}{\delta}$ , что дает в численных значениях нашего частного примера:  $p'_i = 5,9$  и  $X = 0,083$ . Необходимую точку получаем для  $X = 1,0$ , что дает  $p'_i = 4,6$  атм. Графическое изображение этого закона имеем на чер. 18.

Что касается среднего индикаторного давления ЦВД:  $p''_i = \sigma (k p_r - k_e p_e)$ , то, как видно из формулы, при изменении  $E$  будем иметь одновременно изменения  $k$  и  $p_r$ , при чем для зависимости  $k$  от  $X$  надлежит пользоваться гиперболой чер. 3, ибо в ЦВД  $X = 0,3 - 0,8$ . Умножая ординаты этой гиперболы на соответственные ординаты гиперболы  $p_r = f(X)$  по чер. 17 для одних и тех же абсцисс, откладывая произведения (чер. 19) для тех же абсцисс в виде новых ординат в масштабе  $\frac{\text{чер. 3} \times \text{чер. 17}}{\text{чер. 3}}$  и вычитая из последних постоянные ординаты прямой  $-k_e p_e$ , отложенные в том же масштабе, получим в виде разности этих ординат значения  $p''_i \sigma$  между линиями а б и в г. если масштабом для измерения будет служить масштаб чер. 17:  $\sigma$ . Так, для

$$x = 0,5 \text{ имеем } p''_i = \frac{11,5}{10,0,93} = 1,2 \text{ атм.}$$

Построим, наконец, на чер. 20 кривую изменения суммарного  $p_i = p'_i / \delta + p''_i$  в зависимости от  $X$  путем сложения ординат чер. 18 с разностными отрезками между а б и в г чер. 19.

Усматриваем, что максимум мощности получается при  $X = 0,5$ . Дальнейшее увеличение  $X$  ведет к уменьшению мощности машины, что объясняется возрастанием потери от падения давления при сообщении ЦВД с ресивером а также возможностью образования петли в конце сжатия в ЦВД. Уменьшение  $X < 0,5$  тоже понижает мощность машины, так как начинает возрастать ресиверное давление, а значит и противодействие в ЦВД, вследствие чего является увеличение давления в конце сжатия в ЦВД, возникает опасность образования здесь петель в конце сжатия, а также петель в конце расширения.

Попутно нельзя не отметить одного интересного следствия, вытекающего отсюда, а именно нельзя не отметить возможности использования графика типа чер. 20 для целей распределения мощности между цилиндрами по-равну в машинах компаунд. Здесь надо различать два случая: случай золотникового парораспределения в ЦВД и клапанного. Золотниковое парораспределение обуславливает необходимость получения некоторой определенной степени наполнения в ЦВД, зависящей от типа золотников. Так, например, для простых коробчатых золотников степени наполнения менее 50% хода поршня являются невыгодными, как ухудшающие условия выпуска и сжатия и как требующие больших эксцентриситетов, а след., и большой работы трения; для золотников Трика-Вейса можно принять  $\varepsilon \geq 0,35$ , а для двойных золотников обычно принимают  $\varepsilon = 0,25$  и т. д. Эти степени наполнения являются как бы поперек заданными. Пусть давление впуска в ЦВД  $p = 8$  атм. Для этого давления и при работе на холодильник наивыгоднейшая степень наполнения, проведенная к ЦВД, скажем, равна  $\varepsilon_0 = 0,07 - 0,06$ . Тогда для возможности ее получения, например, при двойном золотнике в ЦВД надлежит выбрать отношение объемов цилиндров  $\frac{0,25}{0,07} \approx 3,5$ . Для экономичных золотниковых машин и постоянной нагрузки большие отношения объемов 3 — 5 являются обычными для Америки.<sup>1)</sup> Задаваясь степенями сжатия  $s$  и  $S$  из условий золотникового парораспределения и плавности хода (возможность разгрузки сил инерции достаточным давлением в конце сжатия), получаем все данные, зная  $\varepsilon$  и  $p$  и считая меняющейся величину  $X = E + M$ , построить кривую  $p_i = f(X)$ , как на чер. 17., кривую  $p'_i = f'(X)$  и кривую  $p''_i = f''(X)$  по типу чер. 18 и 19. Строя кривую суммарного  $p_i$  по чер. 20, определяем  $X$ , при котором  $p'_i = p''_i$ . Это  $X = E + M$  и принимаем за степень наполнения ЦВД, обеспечивающую распределение работ поровну между цилиндрами в машине компаунд. На чер. 20 это случится при  $X = 0,43$ . Принятие степени наполнения  $X = E + M$  вместо  $E$  необходимо, ибо конечный объем ресивера создает уменьшение площади индикаторной диаграммы ЦВД в машине компаунд и увеличение таковой же в ЦВД примерно до 10%<sup>2)</sup>.

В случае клапанной машины кроме приведенной степени наполнения  $\varepsilon_0$  обычно является заданным отношением объемов  $\delta$  цилиндров, которое можно определить, исходя из теоретической диаграммы соответственной одноцилиндровой машины путем деления площади ее пополам хотя бы методом интегральной кривой, или при помощи таблиц Hrabak'a или Haeder'a. Зная  $\delta$ , находим  $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \delta$ , после чего задача отыскания  $X = E + M$  для равномерного распределения работы между цилиндрами решается по предыдущему.

Особые случаи представляют машины, у которых одновременно с изменением степеней наполнения в обоих цилиндрах меняются, и степени сжатия, что имеет место, например, в машинах с кулисами, или машинах с плоскими регуляторами, где при изменении степени наполнения ЦВД одновременно ме-

<sup>1)</sup> Левенсон. Современные американские паровые машины. СПб. 1912, стр. 6.

<sup>2)</sup> Дуббель. Конструирование и расчет паровых машин. 1907. СПб., стр. 27.

няется здесь и степень сжатия. В этих случаях является необходимым прежде всего установить закон зависимости между  $\epsilon$  и  $c$  в ЦВД и  $E$  и  $C$  в ЦНД, а также зависимость между  $\epsilon$  и  $E$ , в какой мере изменения  $\epsilon$  вызывают изменения  $E$ . В качестве частного примера, указывающего на удобство решения подобных задач с помощью излагаемых здесь методов, возьмем паровоз н/т вып. 1901 г. Как усматривается из чер. 21. зависимость между  $\epsilon$  и  $c$ , с одной стороны, и  $E$  и  $C$ , с другой, приближается к *линейной* типа:  $Z = a - bx$ , причем  $Z = c + m$ , а значения постоянных в ЦВД  $a$  и  $b$ , как  $d$  и  $t$  в ЦНД, указаны на чер. 21.—Что же касается зависимости между  $\epsilon$  и  $E$ , то для данного типа паровоза можно принять приближенно:  $E = \epsilon + 0,69$ . Исходя из постоянства потока пара через паромашину:  $\gamma F_1 (m_0 + \epsilon) = \gamma_r F_2 (M_0 + E)$  и пользуясь вышеуказанными выражениями для  $m_0$ ,  $M_0$ , и только что указанными зависимостями  $E$ ,  $c$  от  $\epsilon$  и  $C$  от  $E$  приводим после преобразований уравнение потока пара к виду:  $Bx r_r + Dx - Fr_r - N = 0$ , что определяет *гиперболу*, при чем коэффициенты имеют нижеследующие значения:

Коэффициенты.	Их буквенные выражения.	Их численные значения.
B.	$\frac{F_1}{F_2} \cdot \rho \cdot b - 1$ . . . . .	-0,82
D.	$\rho \frac{F_1}{F_2} - \rho \epsilon \cdot f$ . . . . .	+5,3
F.	$\rho \cdot a \cdot \frac{F_1}{F_2} + i$ . . . . .	+0,31
N.	$d - f \cdot i$ . . . . .	+0,55

Здесь  $\frac{F_1}{F_2} = \frac{1}{\delta} = 0,47$  — отношение объемов цилиндров паровозов н/т;  $m = M = 0,08$ ;  $\rho = 12,5$ ;  $\rho \epsilon = 1,25$ ;  $i = E - \epsilon = 0,09$ ;  $\rho = 1,1$ ;  $d$  и  $f$  в ЦНД то же, что  $a$  и  $b$  в ЦВД, т. е. коэффициенты в зависимости между  $C$  и  $E$ . Необходимо иметь в виду, что с увеличением скорости движения паровоза будет происходить искажение вида индикаторных диаграмм в обоих цилиндрах вследствие изменений  $\rho$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\varphi$  и  $\rho \epsilon$ , за чем следить не входит в задачу настоящей работы.

Гипербола для принятых заданий выстроена на чер. 22, при чем для асимптот ее имеем:  $r_r = -\frac{D}{B} = +6,47$  и  $x = \frac{F}{B} = -0,38$ , а для необходимой точки при  $x=0$  имеем:  $r_r = 1,78$ .—

Перемножение ординат последней гиперболы  $r_r$  на соответственные ординаты гиперболы  $k_r$  (чер. 6) для одних и тех же абсцисс  $x$  и на  $\sigma \rho$  даст кривую изменения заднего давления  $\sigma \rho k_r r_r$ , при чем при пользовании гиперболой  $k_r$  (чер. 6)  $Z$  определяется предварительно по  $x$  из вышеуказанного линейного уравнения (чер. 21). Эта кривая выстроена на чер. 23, где выше ее нанесена кривая переднего давления для тех же абсцисс  $x$ , как произведение ординат гиперболы  $k$  (чер. 3) на  $\sigma \rho$ , ибо отсечка в паровозе не бывает обычно меньше  $x=0,3$ . Разность ординат кривых чер. 23 ( $\sigma \rho k - \sigma \rho k_r r_r$ ) для любого значения  $x$  дает величину среднего индикаторного давления  $p'i$  в ЦВД.—Так, для  $x=0,6$  имеем  $p'i = \frac{40}{100} \cdot 0,93 \cdot 12,5 = 4,65$  атм. Совершенно аналогичным способом ведем построение для кривых

переднего и заднего давлений в ЦНД, что и выполнено на чер. 24, пользуясь линейной зависимостью между  $E$  и  $C$  в ЦНД:  $Z=0,48+0,4 X$ . На чер. 25 выстроена диаграмма изменения совокупного давления;  $p_i = \frac{p''_i}{\delta} + p'_i$ , при чем при построении этой диаграммы принималось, что степени  $\varepsilon$  наполнения в ЦВД отвечает в ЦНД  $E = \varepsilon + 0,09$ , в соответствии с чем и брались ординаты по чер. 24. для переноса на чер. 25.—Например, для  $x=0,6$  имеем  $p_i = \frac{36}{100} \cdot 12,5 \cdot 0,93 \approx 4,2$  атм.

Разберем еще случай изменения противодействия в ЦНД при сохранении общей мощности паромашины в виду практического значения этого случая, о чем отмечено выше в соответственной части, касающейся одноцилиндровой машины. Из уравнения для ЦНД:  $p''_i = \sigma (k_{pr} - k_e p_e)$  имеем:  $p_r = \frac{p''_i}{\sigma k} + \frac{k_e}{k} p_e$ , т. е. при сохранении  $p''_i = \text{const.}$  имеем изменение  $p_r$  в зависимости от  $p_e$  по закону *прямой* линии. Подставляя в уравнение постоянства весового количества пара, проходящего через паромашину:  $(\varepsilon + m_0) p \cdot F_1 = (E + M_0) p_r \cdot F_2$  вместо  $m_0$ ,  $M_0$  и  $p_r$  значения из предыдущего, получаем:  $\varepsilon = \left\{ \left[ (E + M) \delta + \rho (c + m) \right] \frac{k_e}{k} - (C + M) \delta \right\} \frac{p_e}{p} - m + \left[ (E + M) \delta + \rho (c + m) \right] \frac{p''_i}{\delta k p}$ , т. е. изменение наполнения  $\varepsilon$  в ЦВД при изменении  $p_e$  происходит тоже по закону *прямой* линии, проведенной от начала координат на расстоянии  $\left[ (E + M) \delta + \rho (c + m) \right] \frac{p''_i}{\delta k p} - m$  и под углом наклона и оси  $p_e$ , тангенс коего  $= \frac{1}{p} \left[ (E + M) \delta + \rho (c + m) \right] \frac{k_e}{k} - (C + M) \delta$ , при чем предполагается, что все условия парораспределения, как то:  $c$ ,  $C$  и  $E$  остаются неизменными. Прямая изображена на чер. 26 для нашего частного примера:  $p=7$ ;  $c=0,08$ ;  $C=0,12$ ;  $E=0,6$ ;  $p''_i=0,9$ ;  $m=M=0,08$ ;  $\delta=2,5$ . Тогда  $\varepsilon=0,275 p_e + 0,23$ , так что, например, для  $p_e=0,2$  атм.  $\varepsilon=0,27$ . Мощность ЦВД, как мы выше видели (чер. 16), при изменении  $\varepsilon \approx 0,25$  меняется мало.

Способ регулирования мятием пара в машинах двукратного расширения в настоящее время применяется редко, но в паровозах при езде «на малый клапан» способ этот (вручную) употребителен. Точно также и в стационарных машинах всегда возможны случаи работы машины не при полном начальном давлении вследствие ли постоянных причин (конструктивная слабость котлов и пр.) или временных (плохое топливо, неопытность кочегаров и пр.) Исходя из условия постоянства потока пара по весу имеем:  $p (\varepsilon + m_0) = \delta p_r (E + M_0)$ , откуда после подстановки вместо  $M_0$  и  $m_0$  их выражений из предыдущего получаем:  $p_r = \frac{\varepsilon + m}{\rho (c + m) + \delta (E + M)} p - \frac{p_e (C + M) \cdot \delta}{\delta (c + m) + \delta (E + M)}$ , т. е. изменение  $p_r$  при изменениях  $p$  происходит по закону *прямой*, как и  $p''_i$  в зависимости от  $p$ :  $p''_i = \frac{\sigma k (\varepsilon + m)}{\rho (c + m) + \delta (E + M)} p - \frac{p_e (C + M) \cdot \sigma k \cdot \delta}{\rho (c + m) + \delta (E + M)} - \sigma k_e p_e$ . Для нашего частного примера машины компаунд имеем при  $\varepsilon=0,25$ :  $p_r=0,175 p - 0,054$  и  $p''_i=0,135 p - 0,23$ , каковые прямые и выстроены на чер. 27 и 28. Для  $p''_i$  имеем:  $p''_i = \sigma k p - \sigma k_r \rho p_r$ , т. е.  $p''_i$  получаем при изменении  $p$  как разность ординат прямой  $y_1 = \sigma k p$ , проходящей через начала координат, и прямой  $y_2 = \sigma k_r \rho p_r = \frac{\sigma k_r (\varepsilon + m) \cdot \rho}{\rho (c + m) + \delta (E + M)} p -$

$\frac{\rho_e (C + M) \delta \sigma k_r \cdot \rho}{\rho (c + m) + \delta (E + M)}$ . Для нашего численного примера:  $y_1 = 0,93 \cdot 0,56 \cdot \rho = 0,52 \rho$  и  $y_2 = 0,186 \rho - 0,057$ . Построение выполнено на чер. 29. На чер. 28 верхняя прямая изображает закон изменения суммарного  $p' = \frac{p'}{\delta} + p''$  при изменении  $p$ .

Теперь в принятом порядке изложения надлежит заняться машинами двухкратного расширения с перегретым паром. Принимается обычно, что в ЦВД пар поступает уже насыщенным или слабо перегретым, почему период расширения здесь, как и периоды сжатия в обоих цилиндрах, происходят так же, как в машинах насыщенного пара. Таким образом в уравнении постоянства весового количества пара, идущего через паромашину, изменения будут касаться лишь ЦВД. Называя чрез  $\gamma_n$  — удельный вес перегретого пара, получим:  $\gamma_n \cdot F_1 (\varepsilon + m_0) = \gamma_r F_2 (E + M_0)$ . Удельный объем перегретого пара, как известно, выражается:  $V_n = \frac{1}{\gamma_n} = \frac{47,1 \cdot T_n}{p} = 0,016$ , где  $T_n$  — абс. температура перегретого пара, а  $p$  — его давление в кил./кв. м. Но приближенно можно принять, что удельные объемы перегретого пара изменяются, как для газов, т. е.  $\frac{1}{\gamma_n} : \frac{1}{\gamma} = T_n : T$ , где  $\gamma$ , по предыдущему, удельный вес сухого насыщенного пара того же давления, а  $T$  — его абс. температура. Можно написать, следовательно:  $p \cdot \frac{T}{T_n} (\varepsilon + m_0) = \delta p_r (E + M_0)$ . Считая степень наполнения  $\varepsilon$  в ЦВД неизменной, как  $s$  и  $C$ , а меняющейся лишь степень наполнения  $E$  в ЦНД, вставляя вместо  $m_0$  и  $M_0$  их выражения из предыдущего, имеем:  $\delta p_r X + \frac{T}{T_n} \rho (c + m) p_r - \frac{T}{T_n} p (m + \varepsilon) - \delta p_e (C + M) = 0$ , т. е., как и для насыщенного пара, зависимость между  $p_r$  и  $X = E + M$  *гиперболическая*. Необходимая для построения гиперболы точка при  $X = 1$  будет:  $p_r = \frac{\frac{T}{T_n} p (m + \varepsilon) + \delta p_e (C + M)}{\delta X + \frac{T}{T_n} \rho (c + m)}$ , что в численных значениях примера чер. 17 при перегреве до  $325^\circ$  ц. дает  $p_r = 1,43$ .

Для асимптот имеем:  $p_r = 0$  и  $X = -\frac{\frac{T}{T_n} \rho (c + m)}{\delta} = -0,06$ . Гипербола выстроена на чер. 30. Для ЦВД имеем:  $p' = \sigma \cdot [k_n p - k_r \cdot \rho \cdot \frac{\frac{T}{T_n} p (m + \varepsilon) + \delta p_e (C + M)}{\delta X + \frac{T}{T_n} \rho (c + m)}]$ , что дает:  $\delta p' X + \frac{T}{T_n} \rho (c + m) p' - \sigma k_n p \delta X + Q = 0$ , т. е.  $p' = \varphi (X)$  опять *гипербола*. Асимптоты:  $p' = -\sigma k_n p = 5,9$  и  $X = -\frac{\frac{T}{T_n} \rho (c + m)}{\delta} = -0,06$ . Необходимая точка при  $X = 1$  будет  $p' = 4,22$ . Гипербола построена на чер. 31. Построение графика  $p' = \varphi (X)$  для машины перегретого пара будет отличаться от такового (чер. 19) для машины насыщенного пара лишь тем, что ординаты гиперболы  $k$  (чер. 3) надлежит для данного случая умножить на ординаты гиперболы  $p_r$  на чер. 30, а не на чер. 17. График построен на чер. 32. Совокупный

график для  $p_i = \frac{p'_i}{\delta} + p''_i$  дан на чер. 33, из коего усматривается, что в случае перегретого пара равенство работ в цилиндрах будет иметь место при  $X=0,38$ .—

В случае, если меняется одна лишь степень  $\varepsilon$  наполнения в ЦВД, из равенства  $p \cdot T/T_n (\varepsilon + m_0) = \delta p_r (E + M_0)$  получаем:

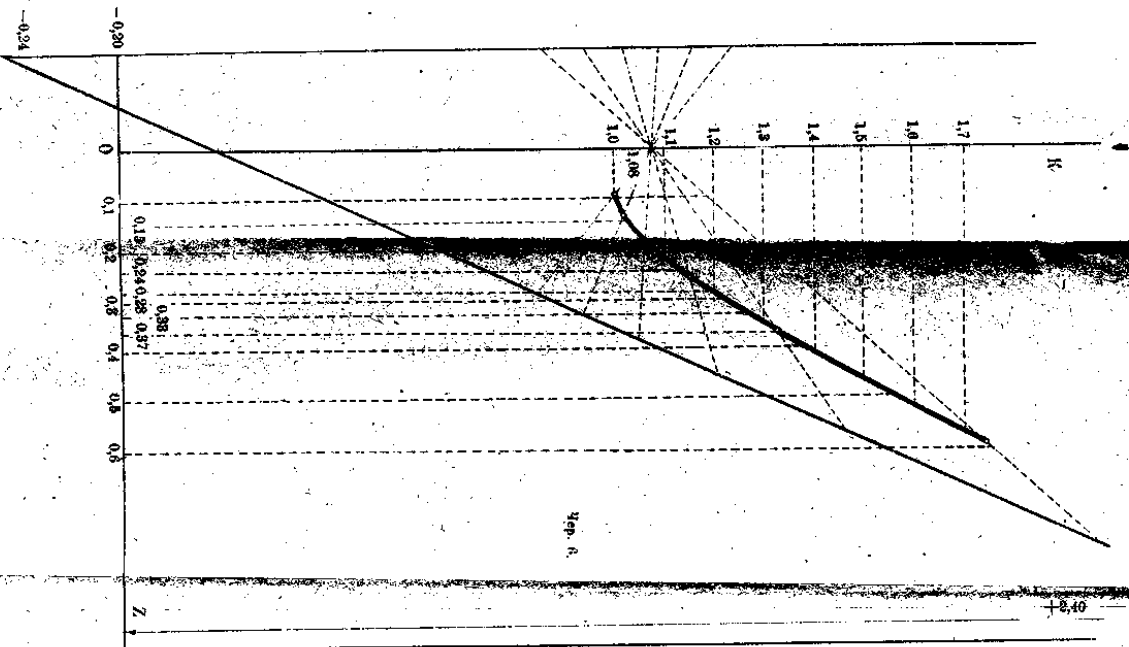
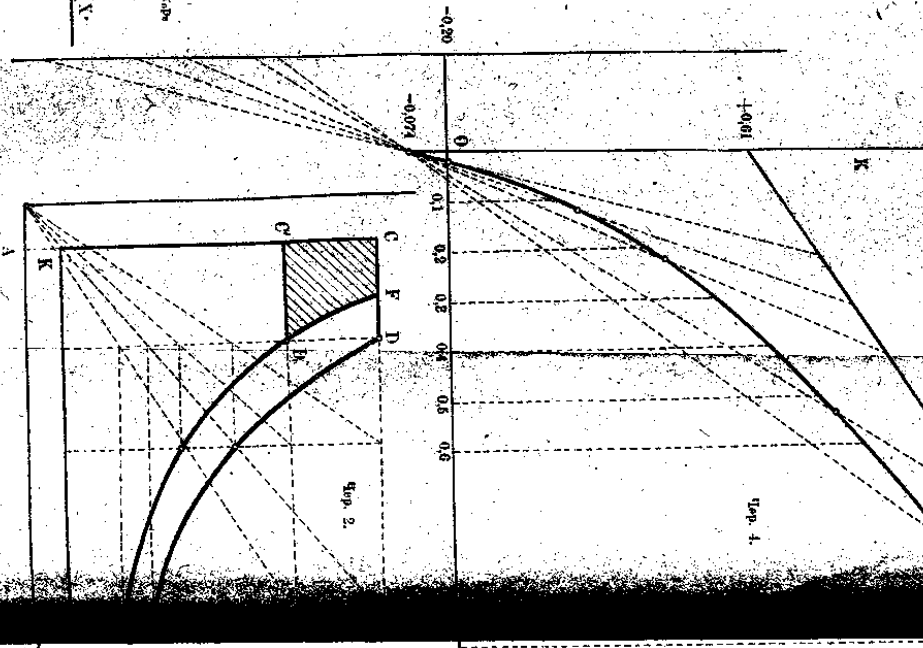
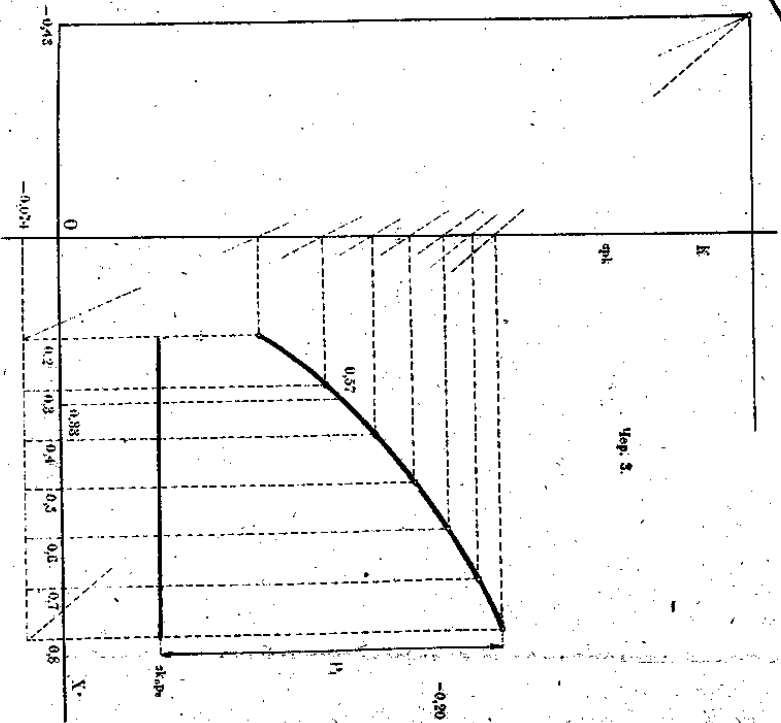
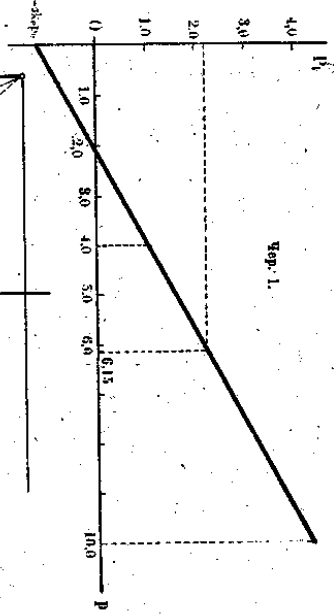
$$p_r = \frac{p \cdot T/T_n}{\delta (E + M) + T/T_n \rho (c + m)} x + \frac{\delta p_e (C + M)}{\delta (E + M) + T/T_n \rho (c + m)} \text{ и}$$

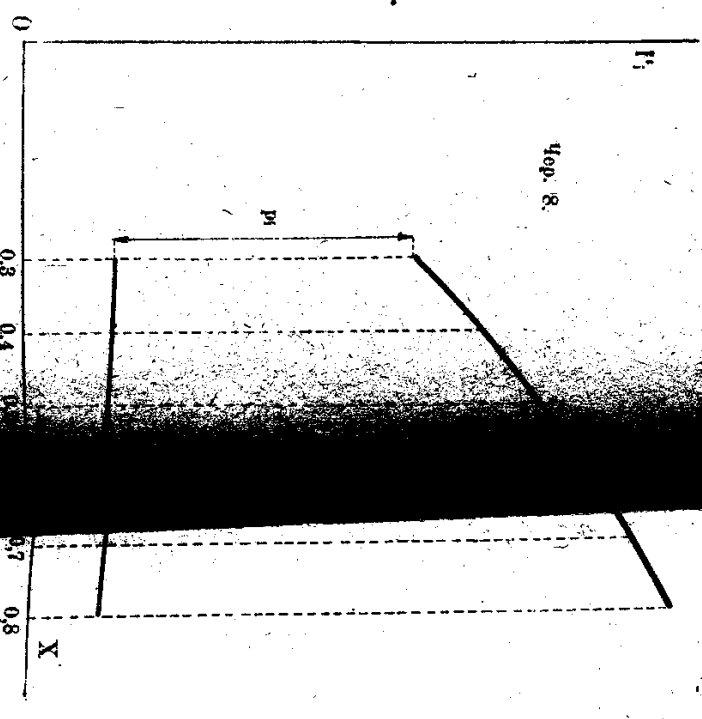
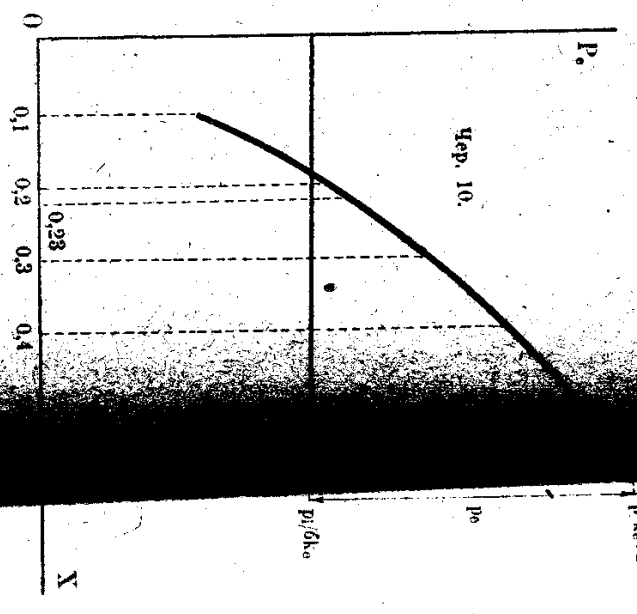
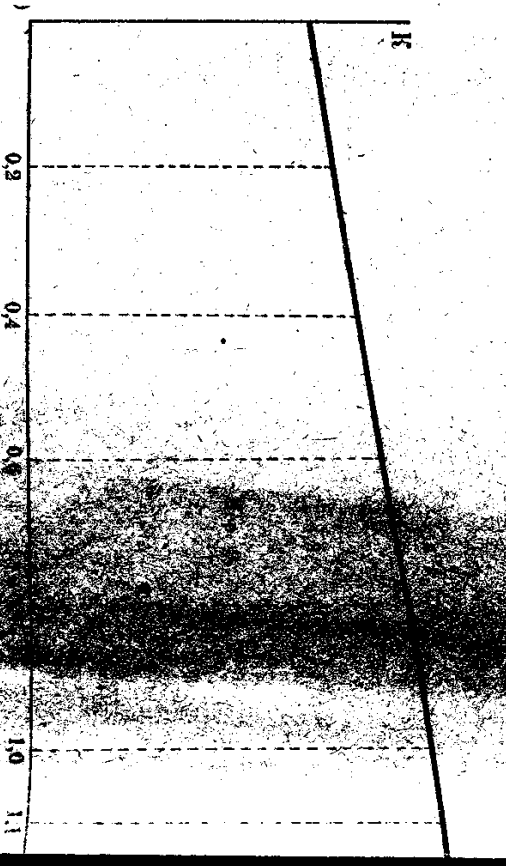
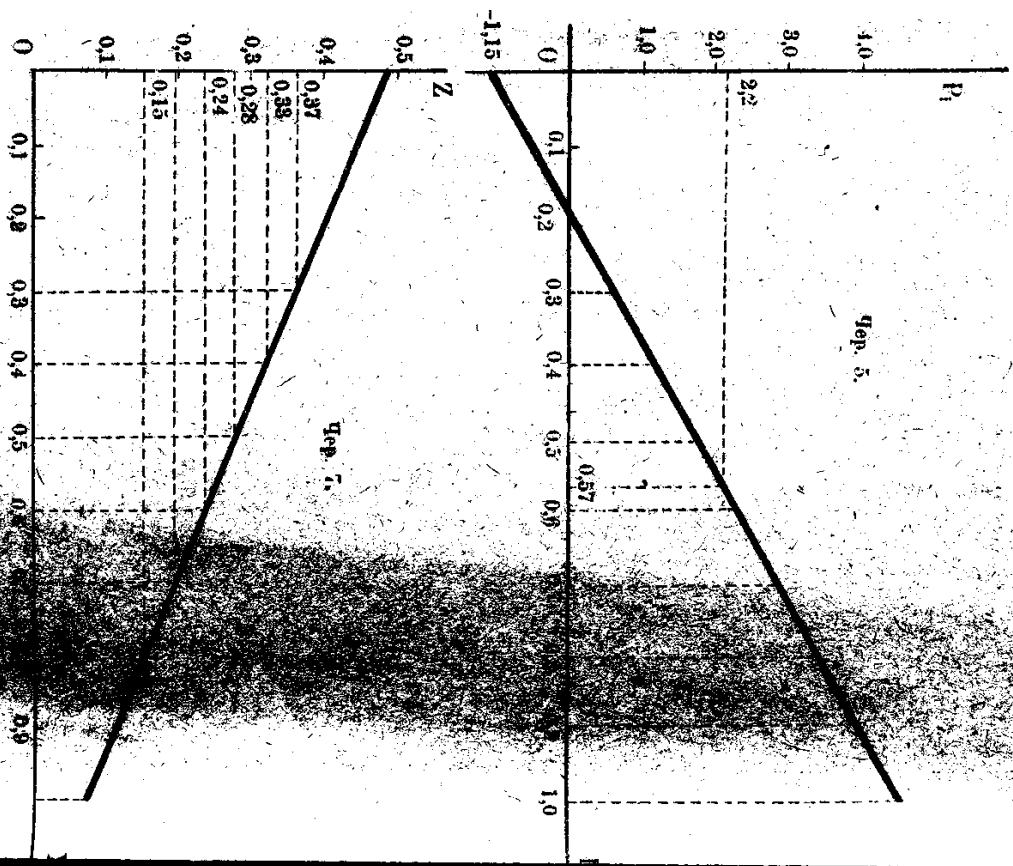
$$p''_i = \frac{\sigma k p T/T_n}{\delta (E + M) + T/T_n \rho (c + m)} x + \frac{\delta p_e (C + M) \sigma k}{\delta (E + M) + T/T_n \rho (c + m)} - \sigma k e p_e .$$

Так. обр.  $p_r$  и  $p''_i$  в зависимости от  $x$  изменяются по закону *прямой*. Эти прямые построены на чер. 34 и чер. 35 для частного примера машины компаунд (чер. 14) в предположении перегрева до  $300^\circ \text{Ц}$ . После подстановки численных значений получаем:  $p_r = 2,9 x + 0,055$  и  $p''_i = 2,24 x - 0,16$ . Для ЦВД, пользуясь чер. 13, легко находим кривую  $\sigma k p$  на чер. 36, на коем в его масштабе наносим и прямую  $\sigma k p_r$ , применяя чер. 34. Разность ординат двух этих линий и дает значения  $p'_i$ . — Совокупная диаграмма изменений  $p_i = p'_i / \delta + p''_i$  в зависимости от  $x$  представлена на чер. 35, где видно, что при всех  $x$  превалирующей является работа ЦВД. Выравнивание работы может быть достигнуто уменьшением степени наполнения ЦВД.

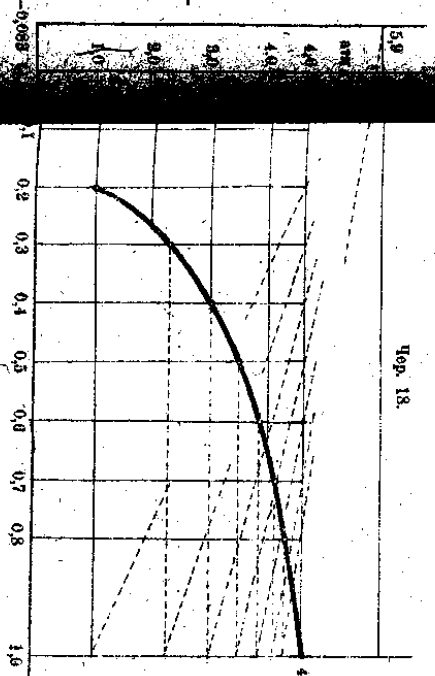
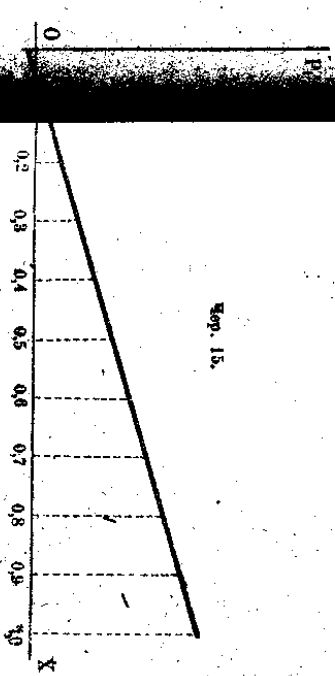
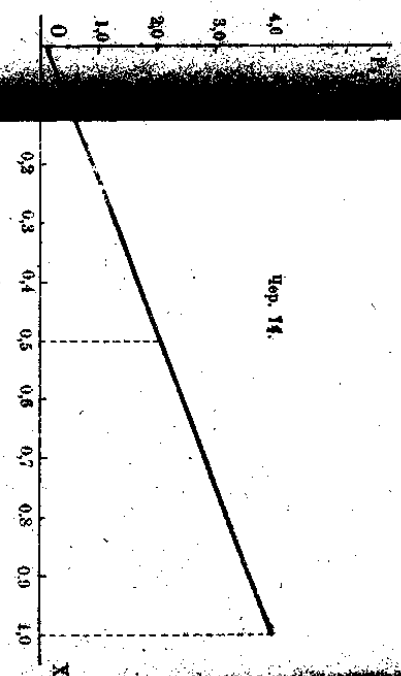
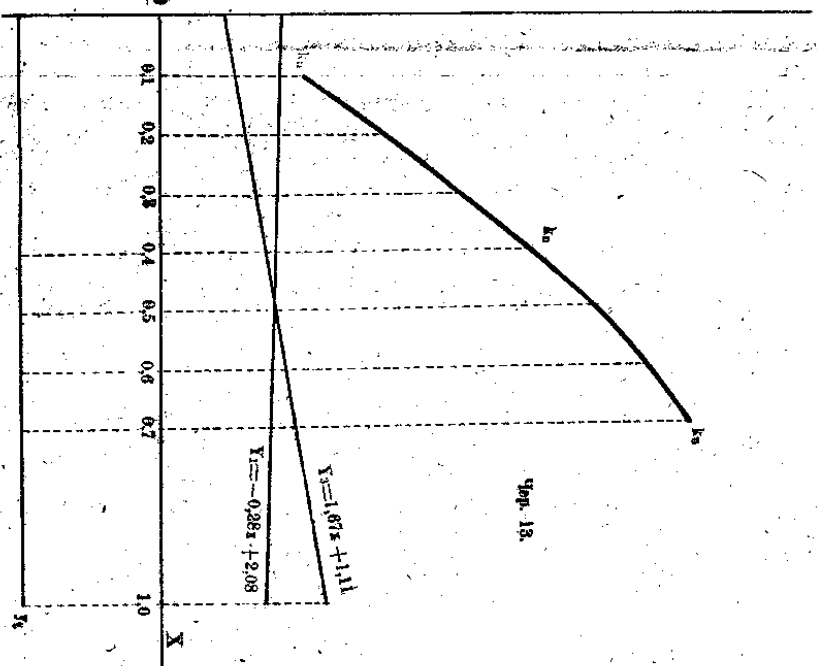
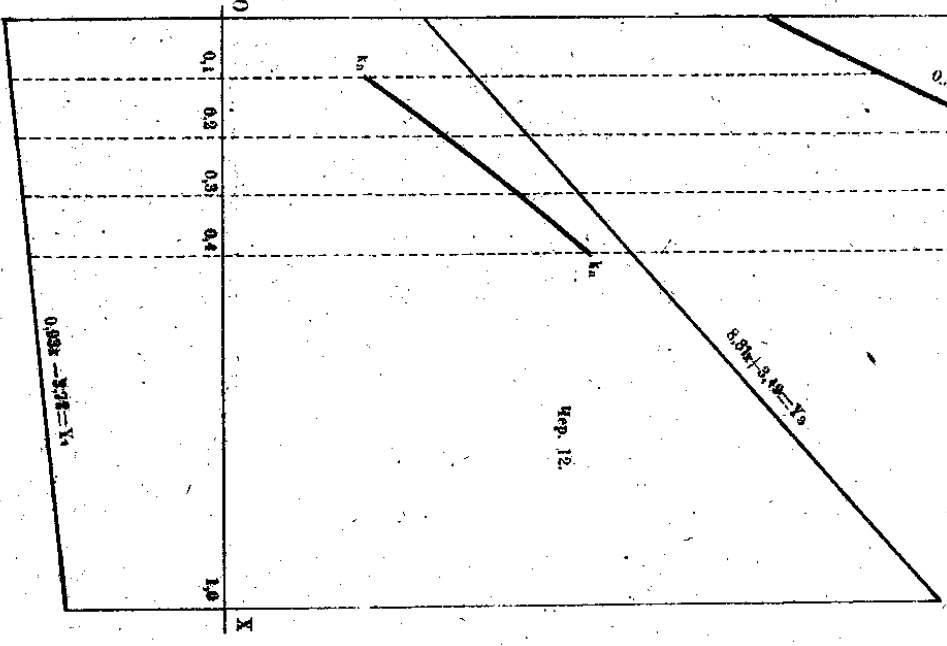
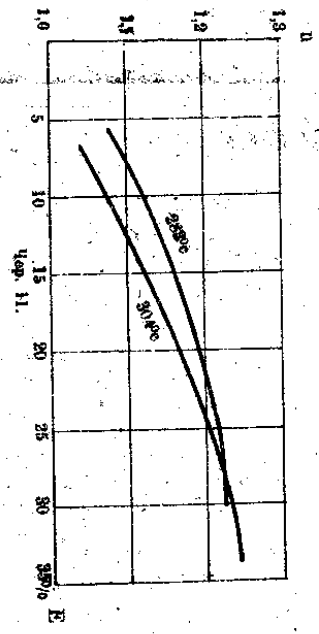
Этими частными случаями и позволительно ограничиться для иллюстрации применения к машинам двукратного расширения перегретого пара равенства:  $p \cdot T/T_n (\varepsilon + m_0) = \delta \cdot p_r (E + M_0)$  и гиперболы  $k_n$  (чер. 13), ибо эти случаи, будучи типовыми, в связи с изложенным относительно машин насыщенного пара, достаточно могут ориентировать в многочисленных и разнообразных положениях практики.

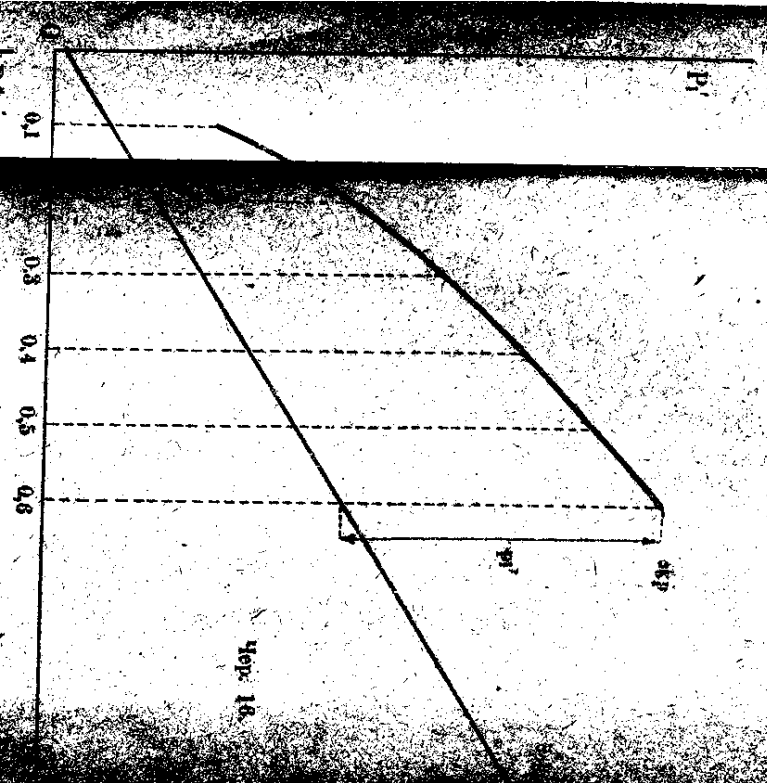
В заключение необходимо отметить, что разбиравшиеся выше зависимости для коэффициентов переднего  $k$  и заднего  $k_e$  давлений, принятые за основные, выведены в согласии с существующей практикой в предположении постоянства коэффициентов  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\varphi$ , при изменении степеней наполнения  $\varepsilon$  и сжатия  $s$ . Между тем имеются данные предполагать, что последние коэффициенты меняются в свою очередь при изменении  $\varepsilon$  и  $s$ , будучи различны для разных типов парораспределения. Опытного материала для суждения о законах такого изменения имеется в литературе мало, почему в качестве одной из ближайших работ в паротехнической лаборатории Томского Технологического Института намечается установление таких зависимостей для  $\alpha$  и  $\beta$ , как  $f(\varepsilon)$ , и  $\varphi$ , как  $f(s)$ .



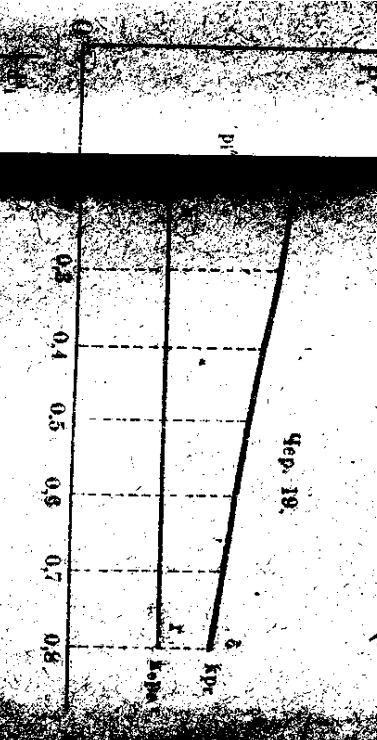




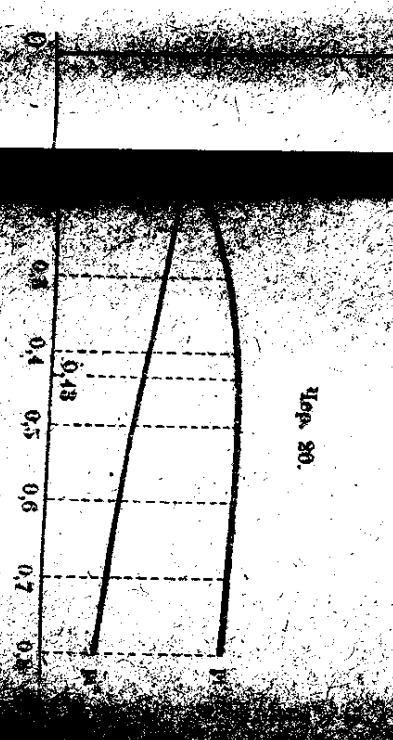




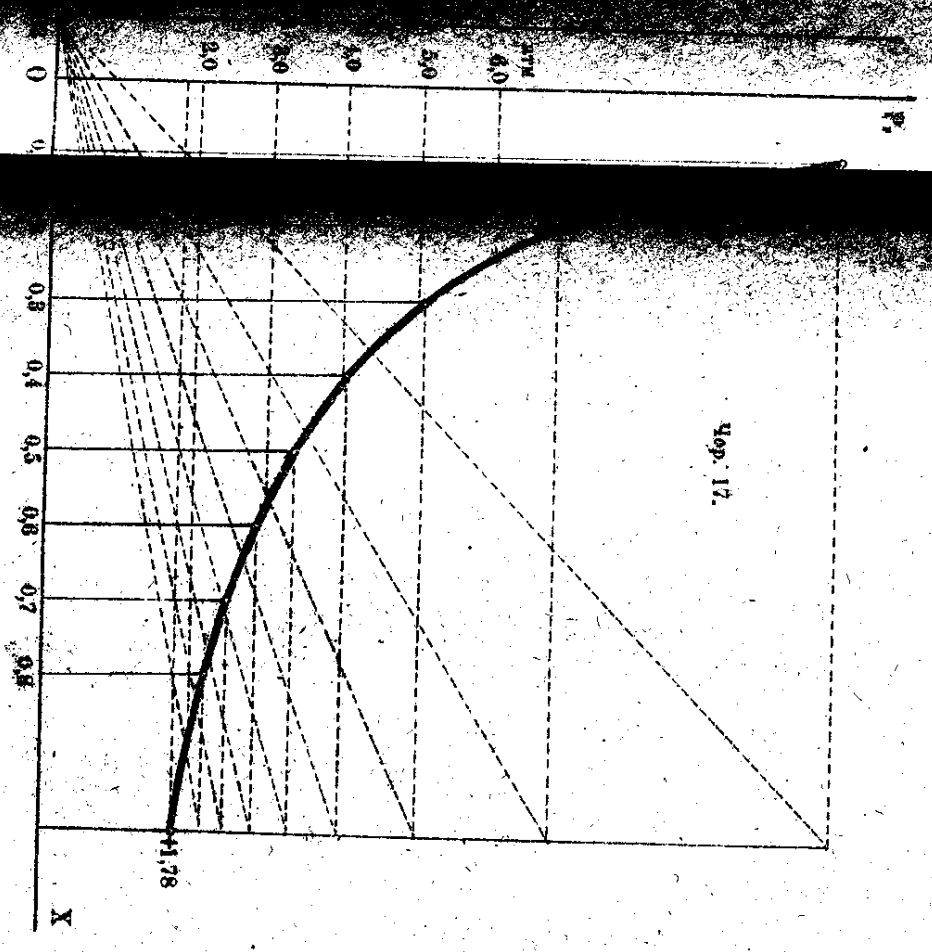
Чеп. 16.



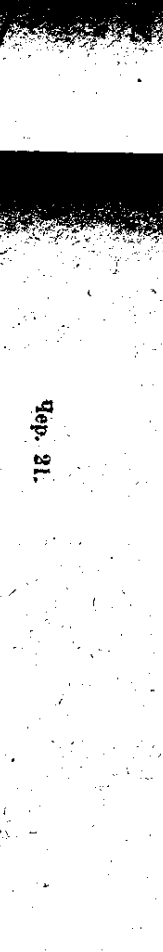
Чеп. 19.



Чеп. 20.



Чеп. 17.



Чеп. 21.

$Z = 0,280 - 0,225X$   
 $Z = 0,184 - 0,101X$

