

С. П. ГОМЕЛЛЯ.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТЪ
УТИЛИЗАЦІИ ПАРА
ВЪ ПАРОВЫХЪ КОМПРЕССОРАХЪ ПРЯМОГО ДѢЙСТВІЯ.

СЪ ДВУМЯ ТАБЛИЦАМИ ЧЕРТЕЖЕЙ.

1—36



СРАВНИТЕЛЬНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТЪ УТИЛИЗАЦІИ ПАРА

ВЪ ПАРОВЫХЪ КОМПРЕССОРАХЪ ПРЯМОГО ДѢЙСТВІЯ.

§ 1. Паровые компрессоры прямого дѣйствія не только имѣютъ обширное примѣненіе на желѣзныхъ дорогахъ при поѣздныхъ воздушныхъ тормозахъ, но мало по малу начинаютъ завоевывать себѣ мѣсто и въ другихъ отрасляхъ техники, тамъ, гдѣ требуется для аккумулярованія энергіи сжатого воздуха несложный, негромоздкій и недорогой приборъ. Обыкновенно вопросъ объ экономическомъ дѣйствіи компрессора играетъ второстепенную роль, разъ дѣло касается полученія небольшого количества сжатого воздуха: въ этомъ случаѣ низкій коэффициентъ полезнаго дѣйствія можетъ окупаться простотою устройства и не сложностью ухода за компрессоромъ. Но, если отъ компрессора требуется болѣе серьезная работа, то нельзя оставить уже безъ вниманія вопроса объ его полезномъ дѣйствіи. Дѣйствительно, въ С.-Ам. Соединенныхъ Штатахъ увеличеніе состава желѣзнодорожныхъ поѣздовъ не только повело къ увеличенію размѣровъ компрессоровъ для воздушныхъ тормозовъ, но и выдвинуло на первый планъ вопросъ о повышеніи ихъ коэффициента полезнаго дѣйствія, ибо при томъ огромномъ количествѣ пара которое расходуютъ въ нѣкоторыхъ случаяхъ паровозы на приведеніе въ дѣйствіе воздушныхъ тормозовъ (отъ 5% до 10%), увеличеніе производительности воздушнаго насоса можетъ дать ощутительную экономію.

Было произведено нѣсколько сравнительныхъ испытаній компрессоровъ, употребляемыхъ для желѣзнодорожныхъ тормозовъ, главнымъ образомъ системъ: „Вестингаузъ“, „Нью-Йоркъ“, „Фивъ-Лилъ“ и др.; однако въ виду разнорѣчивости данныхъ этихъ опытовъ изъ нихъ трудно вывести какое-либо опредѣленное заключеніе о сравнительныхъ достоинствахъ этихъ системъ. Обыкновенно, компрессоры фирмы, производящей испытаніе, оказываются наилучшими, можетъ быть, вслѣдствіе того, что испытываемый ею собственной системы компрессоръ находится въ лучшемъ состояніи, чѣмъ испытываемый компрессоръ другой системы.

Вообще говоря, точность работы и сборки, состояніе клапановъ, золотниковъ, сальниковъ, поршней,—все это оказываетъ значительное вліяніе на работу такой сравнительно небольшой машины, какою является обыкновенный паровой компрессоръ прямого дѣйствія. Такимъ образомъ, каждое отдѣльное изслѣдованіе, даже если оно и повторено надъ большимъ количествомъ той-же системы компрессоровъ, будетъ заключать въ себѣ индивидуальныя вліянія механизма и иногда мо-

жетъ дать результаты, слишкомъ недостаточные для оцѣнки пригодности данной системы.

Поэтому теоретическое изслѣдованіе работы компрессоровъ прямого дѣйствія при условіяхъ тождественныхъ для всѣхъ конструкцій и системъ ихъ, не только дастъ вполне справедливую сравнительную оцѣнку, не зависимую отъ выполненія самого механизма и другихъ побочныхъ условій, для существующихъ конструкцій,—но и укажетъ, то направленіе, въ которомъ должны совершенствоваться эти компрессоры, чтобы можно было пользоваться ими съ наибольшей экономіей пара.

§ 2. При разсмотрѣніи различныхъ системъ паровыхъ компрессоровъ прямого дѣйствія мы примемъ слѣдующее подраздѣленіе ихъ.

А) Компрессоры, работающіе безъ расширенія пара:

- 1) двухцилиндровые;
- 2) трехцилиндровые;
- 3) четырехцилиндровые:

α) періодическаго дѣйствія,

β) одновременнаго дѣйствія.

В) Компрессоры съ однократнымъ расширеніемъ пара:

- 1) двухцилиндровые;

2) четырехцилиндровые періодическаго дѣйствія и съ окончательнымъ сжатіемъ воздуха:

α) при помощи свѣжаго пара;

β) при помощи расширяющагося пара;

3) четырехцилиндровые не періодическаго дѣйствія и съ окончательнымъ сжатіемъ воздуха:

α) при помощи свѣжаго пара;

β) при помощи расширяющагося пара.

С) Компрессоры съ двукратнымъ и многократнымъ расширеніемъ пара:

- 1) трехцилиндровые,
- 2) четырехцилиндровые и
- 3) многоцилиндровые.

При разсмотрѣніи этихъ системъ компрессоровъ примемъ для всѣхъ ихъ слѣдующія одинаковыя допущенія:

- 1) давленіе свѣжаго пара на поршень на всемъ протяженіи хода его постоянно;
- 2) давленіе пара при расширеніи его слѣдуетъ закону Мариотта;
- 3) давленіе сжатія воздуха слѣдуетъ политропической кривой $p v^n = c$;
- 4) вредныя пространства для паровыхъ и воздушныхъ цилиндровъ, а также утечки воздуха равны нулю;
- 5) сопротивленіе пара и воздуха при прохожденіи черезъ отверстія и каналы равны нулю;
- 6) тренія механизмовъ равны нулю;

7) инерціей движущихся частей, пренебрегаемъ *).

Затѣмъ принимаемъ слѣдующія обозначенія:

v —объемъ цилиндра, въ который поступаетъ свѣжій паръ;

v_0 —объемъ цилиндра въ которомъ происходитъ первое расширеніе пара;

v_{c0} —объемъ цилиндра, въ которомъ происходитъ вторичное расширение пара;

P —давленіе свѣжаго пара;

P_0 —давленіе пара въ концѣ его расширенія;

v_1 —объемъ цилиндра, въ который поступаетъ атмосферный воздухъ;

v_2 —объемъ цилиндра, въ которомъ происходитъ первое сжатіе воздуха;

v_3 —объемъ цилиндра, въ которомъ происходитъ вторичное сжатіе воздуха;

p_1 —давленіе воздуха въ концѣ перваго сжатія;

p_2 —давленіе воздуха въ концѣ вторичнаго сжатія;

p —окончательное максимальное сжатіе воздуха;

n —постоянная политропической кривой; для компрессоровъ безъ искусственнаго охлажденія, каковыми являются рассматриваемые нами, можно принять $n=1,4$ (адиабатическая кривая).

Всѣ давленія принимаются отъ абсолютнаго нуля. Ходы поршней повсюду считаются между собой равными.

Задача настоящаго изслѣдованія заключается въ томъ, чтобы опредѣлить *относительную* степень утилизаціи пара въ различныхъ системахъ паровыхъ компрессоровъ прямого дѣйствія, т. е. величины отношеній для разныхъ системъ компрессоровъ прямого дѣйствія между объемомъ поступающаго въ компрессоръ атмосфернаго воздуха и объемомъ израсходованнаго на сжатіе этого воздуха пара, приведеннымъ тоже къ атмосферному давленію. Такъ какъ въ данномъ случаѣ паръ является источникомъ движущей силы, то мы можемъ назвать этотъ коэффициентъ также *относительнымъ коэффициентомъ полезнаго дѣйствія компрессора* и принимать его за мѣру сравнительной экономичности той, либо другой системы паровыхъ компрессоровъ прямого дѣйствія.

При этомъ, какъ указано выше, мы выдѣляемъ изъ изслѣдованія всѣ тѣ обстоятельства работы компрессора, оцѣнить которыхъ довольно трудно безъ опытныхъ данныхъ и которыя по отношенію къ величинѣ работы компрессора могутъ быть рассматриваемы, какъ малыя величины высшаго порядка. Вслѣдствіе этого результаты, вытекающіе изъ такого изслѣдованія, можно считать только *первымъ приближеніемъ*; тѣмъ не менѣе они являются не только достаточными для освѣщенія этого, не изученнаго еще вопроса, но, пожалуй, и един-

*) Не принятыя здѣсь обстоятельства, будучи весьма существенными при опредѣленіи абсолютнаго коэффициента полезнаго дѣйствія, при опредѣленіи сравнительнаго коэффициента утилизаціи пара являются мало существенными.

етвенно возможными, въ виду того, что упомянутыя малыя высшаго порядка по большей части представляют перемѣнные факторы, зависящiе не отъ *системы*, а главнымъ образомъ отъ *конструкціи*, а также отъ выполненія и содержанія механизма компрессора.

§ 3. Разсмотримъ сначала двухцилиндровый простой компрессоръ, у котораго паровой и воздушный цилиндры не равны между собой (фиг. 1).

Эта система паровыхъ компрессоровъ прямого дѣйствія является наиболѣе распространенною. Обозначимъ объемъ парового цилиндра черезъ v и объемъ воздушнаго чрезъ v_1 . При каждомъ ходѣ поршня засасывается объемъ воздуха v_1 , при этомъ затрачивается работа пара vP ; такъ что коэффициентъ утилизаціи пара η_1 будетъ равенъ:

$$\eta_1 = \frac{1}{P} \cdot \frac{v_1}{v} \dots \dots \dots (1)$$

Слѣдовательно, коэффициентъ утилизаціи пара у простыхъ компрессоровъ прямого дѣйствія съ двумя цилиндрами обратно пропорціоналенъ величинѣ давленія свѣжаго пара, обратно пропорціоналенъ объему парового цилиндра и прямо пропорціоналенъ величинѣ объема воздушнаго цилиндра.

Максимальное сжатіе воздуха p , которое можетъ быть получено съ помощью указаннаго компрессора, будетъ:

$$p = P \frac{v}{v_1},$$

такъ что формула (1) можетъ быть представлена въ слѣдующемъ видѣ:

$$\eta_1 = \frac{1}{p} \dots \dots \dots (2)$$

Изъ формулы (2) видно, что, чѣмъ выше предѣльное давленіе, которое можно получить съ помощью даннаго двухцилиндроваго парового компрессора прямого дѣйствія, тѣмъ меньше его коэффициентъ утилизаціи пара и наоборотъ.

Если оба цилиндра равны между собою, то

$$p = P \text{ и } \eta_1 = \frac{1}{P}, \text{ или, что тоже: } \eta_1 = \frac{1}{p}.$$

Такимъ образомъ, коэффициентъ утилизаціи пара у простыхъ паровыхъ компрессоровъ прямого дѣйствія очень низокъ; такъ напри-

мѣръ, для компрессора съ двумя равными цилиндрами, работающаго при 10 атмосфер., теоретическій *) коэффициентъ $\eta=0,1$, практическая же его величина еще ниже.

§ 4. Для уменьшенія коэффициента расхода пара въ компрессорахъ прямого дѣйствія вскорѣ отъ двухцилиндровыхъ компрессоровъ перешли къ трехцилиндровымъ и четырехцилиндровымъ съ двойнымъ сжатіемъ воздуха. Двойное сжатіе въ этого рода компрессорахъ имѣло бы болѣе существенное значеніе, если бы воздухъ, послѣ первого сжатія могъ охлаждаться; этого однако нѣтъ. Поэтому при разсматриваемыхъ нами условіяхъ выигрышъ въ коэффициентъ утилизаціи пара можетъ быть полученъ, главнымъ образомъ, отъ соотвѣстoenнаго выбора соотношеній объемовъ цилиндровъ и распредѣленія въ нихъ работы пара и воздуха.

Замѣтимъ при этомъ, что коэффициентъ утилизаціи пара для любой системы компрессоровъ прямого дѣйствія, вообще говоря, зависитъ не отъ давленія рабочаго пара P , а отъ наибольшаго возможнаго сжатія воздуха p . Дѣйствительно, если наибольшее сжатіе воздуха равно давленію свѣжаго пара, то коэффициентъ утилизаціи пара будетъ:

$$\eta = \frac{1}{P} \frac{v_1}{v}, \text{ или } \eta = \frac{1}{p} \frac{v_1}{v},$$

гдѣ v_1 объемъ воздушнаго, а v объемъ парового цилиндра, въ который поступаетъ свѣжій паръ.

Если тоже самое сжатіе достигается при давленіи пара $p\alpha$, то, очевидно, объемъ каждаго парового цилиндра долженъ быть въ $\frac{1}{\alpha}$ разъ

больше, вслѣдствіе чего: $\eta = \frac{1}{p\alpha} \frac{v_1\alpha}{v} = \frac{1}{p} \frac{v_1}{v} \dots \dots \dots (3).$

Слѣдовательно, коэффициентъ утилизаціи пара, вычисленный для случая, когда $P=p$, будетъ такимъ же и тогда, когда $P \neq p$, если только въ обоихъ случаяхъ наибольшія возможные сжатія воздуха равны между собою. Итакъ, при всѣхъ послѣдующихъ выводахъ для простоты ихъ будемъ считать, что наибольшее возможное сжатіе воздуха равно давленію свѣжаго пара, поступающаго въ компрессоръ.

Перейдемъ теперь къ рассмотрѣнію различныхъ другихъ системъ паровыхъ компрессоровъ прямого дѣйствія.

§ 5. Трехцилиндровый компрессоръ состоитъ изъ одного парового и двухъ воздушныхъ неодинаковой величины цилиндровъ, расположен-

*) Т. е. вычисленный теоретически по указанной выше формулѣ (2).

ныхъ на одной оси. Наружный воздухъ поступаетъ въ большой воздушный цилиндръ II, откуда перегоняется въ малый цилиндръ III, гдѣ, затѣмъ, окончательно сжимается до максимальнаго давленія (см. схему на фиг. 2).

Для возможности работы компрессора необходимо, чтобы давленіе со стороны пара всегда было не меньше сопротивленія отъ сжимаемаго воздуха, такъ что мы можемъ написать:

$$v P = (v_1 - v_2) p_1 + v_2 p.$$

Такъ какъ максимальное значеніе $P = p$, то

$$v p = (v_1 - v_2) p_1 + v_2 p;$$

откуда

$$p (v - v_2) = p_1 (v_1 - v_2);$$

но съ другой стороны

$$p_1 = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^n ;$$

Слѣдовательно,

$$p (v - v_2) = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^n (v_1 - v_2).$$

По раздѣленіи обоихъ частей уравненія на v_1 и нѣкоторыхъ преобразованій, получили:

$$p \frac{v}{v_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^n \left(1 - \frac{v_2}{v_1} \right) + p \frac{v_2}{v_1}.$$

Слѣдовательно, коэффициентъ утилизаціи пара η_2 будетъ:

$$\eta_2 = \frac{1}{p} \frac{v_1}{v} = \frac{1}{\left(\frac{v_1}{v_2} \right)^n \left(1 - \frac{v_2}{v_1} \right) + p \frac{v_2}{v_1}} \dots \dots \dots (4).$$

Опредѣлимъ теперь, каково должно быть значеніе $\frac{v_1}{v_2}$, чтобы η_2 было максимумомъ. Нетрудно замѣтить, что η_2 будетъ имѣть максимумъ, когда знаменатель выраженія (4) будетъ имѣть минимумъ, ибо числитель—величина постоянная. Для этого первую производную по

$$\left(\frac{v_1}{v_2} \right) \text{ отъ } \left[\left(\frac{v_1}{v_2} \right)^n \left(1 - \frac{v_2}{v_1} \right) + p \frac{v_2}{v_1} \right]$$

приравниваемъ нулю, при чемъ получаемъ:

$$n \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{n-1} \left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{-1} \right] + \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^n \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{-2} - p \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{-2} = 0 \quad (5)$$

или

$$n \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{n-1} - (n-1) \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{n-2} - p \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{-2} = 0.$$

Чтобы убѣдиться, что это—минимумъ, беремъ вторую производную

по $\left(\frac{v_1}{v_2} \right)$:

$$n(n-1) \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{n-2} - (n-1)(n-2) \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{n-3} + 2p \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{-3}.$$

Такъ какъ $2 > n \geq 1$, то вторая производная всегда больше нуля; слѣдовательно, мы получили искомый минимумъ.

Уравненіе (5) можетъ быть представлено въ слѣдующемъ болѣе простомъ видѣ:

$$n \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{n+1} - (n-1) \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^n - p = 0 \quad (6).$$

Если бы существовало достаточное охлажденіе воздуха послѣ перваго его сжатія, то можно было бы считать $n=1$, и тогда наше уравненіе приняло бы видъ:

$$\left(\frac{v_1}{v_2} \right)^2 - p = 0,$$

откуда

$$\frac{v_1}{v_2} = \sqrt{p} \quad *)$$

и

$$\eta_2 = \frac{1}{2\sqrt{p}-1} = \frac{1}{p} \frac{p}{2\sqrt{p}-1} \quad (7).$$

*) Отрицательныхъ корней и другихъ, не имѣющихъ реальнаго значенія, не приводимъ.

Вслѣдствіе того, что въ паровыхъ компрессорахъ прямого дѣйствія охлажденія не существуетъ, мы должны принять $n=1,4$; тогда мы получимъ болѣе сложное уравненіе:

$$1,4 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{2,4} - 0,4 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{1,4} - p = 0.$$

Чтобы рѣшить это уравненіе, помножимъ его на $\left(\frac{v_1}{v_2} \right)^y$, гдѣ у такъ выбрано, чтобы $2,4+y=(1,4+y) 2$, т. е., чтобы получить уравненіе второй степени. Такъ какъ $y=-0,4$, то получаемъ:

$$1,4 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^2 - 0,4 \left(\frac{v_1}{v_2} \right) - p \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{-0,4} = 0 \dots \dots \dots (8)$$

Для перваго приближенія принимаемъ по прежнему $\frac{v_1}{v_2} = p^{0,5}$; слѣдовательно, наше уравненіе приметъ видъ:

$$1,4 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^2 - 0,4 \left(\frac{v_1}{v_2} \right) - p^{0,8} = 0;$$

откуда

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{0,4 + \sqrt{0,16 + 5,6 p^{0,8}}}{2,8},$$

что даетъ слѣдующія значенія при различныхъ давленіяхъ p для $\frac{v_1}{v_2}$ (второе приближеніе):

p.	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	атм.
$\frac{v_1}{v_2}$	1,76	1,92	2,04	2,13	2,22	2,31	2,40	2,47	2,55	2,62	2,70	2,76	2,82	2,89	2,95	3,00	—

Полученныя величины для $\frac{v_1}{v_2}$ подставляемъ въ послѣдній членъ уравненія (8) и, рѣшивъ его снова, получаемъ болѣе близкія къ истинѣ значенія $\frac{v_1}{v_2}$ и т. д. Такимъ образомъ, получаемъ послѣ третьяго приближенія слѣдующія величины, на которыхъ можемъ остановиться:

p.	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	атм.
$\frac{v_1}{v_2}$	1,85	2,00	2,13	2,25	2,36	2,45	2,55	2,64	2,73	2,81	2,88	2,96	3,03	3,10	3,18	3,24	—

При этомъ, если коэффициентъ утилизаціи пара η_2 представимъ въ видѣ: $\eta_2 = \frac{1}{p} \frac{v_1}{v}$, то для $\frac{v_1}{v}$ будемъ имѣть слѣдующія значенія:

p.	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	атм.
$\frac{v_1}{v}$	1,37	1,54	1,64	1,72	1,80	1,88	1,95	2,04	2,09	2,17	2,23	2,29	2,35	2,41	2,47	2,52	$p \eta_2$

Чтобы болѣе иллюстрировать вопросъ, приведемъ теоретическую диаграмму для одного періода работы компрессора (фиг. 3). Внутри прямоугольника съ лѣвой стороны изображена совмѣстная диаграмма работы пара и сопротивленія отъ сжатія воздуха; *) изъ нея можно видѣть, что въ началѣ хода существуетъ значительный избытокъ давленія пара на штокъ поршня надъ давленіемъ воздуха. Понятно, что этотъ избытокъ идетъ на увеличеніе скорости поршней, вслѣдствіе чего вмѣстѣ съ возрастаніемъ скорости увеличивается и сопротивленіе пара, поступающаго въ цилиндръ. равно какъ и прочія сопротивленія, причемъ неизбѣжно происходитъ паденіе давленія пара. Въ концѣ же хода поршней вслѣдствіе увеличенія сопротивленія отъ полезной работы скорость поршней уменьшается, давленіе пара повышается до нормальнаго. Такимъ образомъ, избытокъ работы пара, имѣющійся въ началѣ хода, утилизируется тѣмъ менѣе, чѣмъ больше скорость поршней, т. е. чѣмъ меньше масса возвратно движущихся частей.

§ 6. Четырехцилиндровые паровые компрессоры прямого дѣйствія могутъ быть подраздѣлены на компрессоры періодическаго и не періодическаго дѣйствія. Въ первомъ случаѣ, когда одна пара поршней движется — другая пара стоитъ и на оборотъ. При не періодической работѣ обѣ пары поршней работаютъ одновременно. Понятно, что вслѣдствіе этого производительность у компрессоровъ второго рода (при равенствѣ прочихъ условій) больше, чѣмъ у компрессоровъ, работающих періодически.

Чаще всего четырехцилиндровые компрессоры періодическаго дѣйствія устраиваются такъ, что оба паровые цилиндра и второй воздушный между собою равны; первый же воздушный цилиндръ, въ который поступаетъ наружный воздухъ имѣетъ объемъ въ два раза больше объема каждаго парового (фиг. 4). Такъ какъ въ компрессорахъ періодическаго дѣйствія воздухъ засасывается въ оба воздушные цилиндра, то коэффициентъ утилизаціи пара η_3 для разсматриваемаго случая будетъ:

$$\eta_3 = \frac{1}{p} \frac{v_1 + v_2}{2v}; \dots \dots \dots (9)$$

*) Какъ на этой такъ и на слѣдующихъ диаграммахъ работа пара отмѣчена горизонтальной штриховкой, а работа сопротивленія воздуха, наклонной или вертикальной.

а такъ какъ $v_2 = v$ и $v_1 = 2v$ то получаемъ:

$$\eta_3 = \frac{3}{2} \frac{1}{p} \dots \dots \dots (9 \text{ bis})$$

Такимъ образомъ, при указанныхъ выше обычныхъ отношеніяхъ объемовъ цилиндровъ этотъ компрессоръ на 50% экономичнѣе простаго двухцилиндроваго.

Отношеніе $\frac{v_1 + v_2}{2v}$ можетъ быть сдѣлано и болѣе $\frac{3}{2}$, благодаря чему возможно увеличить и коэффициентъ утилизаціи пара у этого компрессора.

Въ самомъ дѣлѣ, если три цилиндра имѣютъ равные объемы:

$$v_0 = v = v_2,$$

то давленіе воздуха p_1 во второмъ воздушномъ цилиндрѣ, послѣ перваго сжатія воздуха не можетъ быть больше P , но

$$p_1 = \left(\frac{v_1 + v_2}{v_2} \right)^n = \left(1 + \frac{v_1}{v_2} \right)^n,$$

а такъ какъ $P = p$ и $v_2 = v$, то

$$p \geq \left(\frac{v_1}{v} + 1 \right)^n \dots \dots \dots (10)$$

Съ другой стороны, давленіе на штокъ поршня въ первой парѣ цилиндровъ со стороны сжатаго воздуха должно быть не больше давленія отъ пара, т. е.

$$v_1 p_1 \leq Pv,$$

что на основаніи приведенныхъ выше соотношеній даетъ:

$$\left(\frac{v_1}{v} + 1 \right)^n \leq p \frac{v}{v_1} \dots \dots \dots (11)$$

Но такъ какъ $v_1 > v$ и $p > 1$, то условіе (11) является вполнѣ достаточнымъ, потому что при выполненіи условія (11) одновременно выполняется и условіе (10).

Итакъ, коэффициентъ утилизаціи пара η'_3 для рассматриваемаго случая выражается слѣдующимъ образомъ:

$$\eta'_3 = \frac{1}{2} \frac{1}{p} \left(1 + \frac{v_1}{v} \right) \dots \dots \dots (12)$$

гдѣ $1 + \frac{v_1}{v}$ опредѣляется изъ уравненія:

$$\left(1 + \frac{v_1}{v}\right)^{n+1} - \left(1 + \frac{v_1}{v}\right)^n - p = 0 \quad (13)$$

Корни этого уравненія могутъ быть опредѣлены по методу Ньютона. Если обозначимъ лѣвую часть этого уравненія черезъ $f(x)$, гдѣ

$x = 1 + \frac{v_1}{v}$, то приближенное значеніе корня этого уравненія выра-

жается слѣдующимъ образомъ:

$$x = x_1 - \frac{f(x_1)}{f'(x_1)},$$

гдѣ x_1 какое-либо извѣстное намъ приближенное значеніе корня уравненія (13).

Принимаемъ, какъ первое приближенное значеніе $\frac{v_1}{v}$,

$$x_1 = \sqrt[n+1]{p}.$$

Послѣ нѣсколькихъ подстановокъ получаемъ слѣдующій рядъ значеній $\frac{v_1}{v}$ для различныхъ давленій p отъ 5 до 20 атм.:

p	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Атм.
$\frac{v_1}{v}$	1,37	1,56	1,67	1,80	1,92	2,04	2,13	2,27	2,33	2,42	2,50	2,58	2,67	2,75	2,84	2,91	

Подставляя найденныя величины $\frac{v_1}{v}$ въ выраженіе (12), получимъ слѣдующій рядъ значеній для η'_{3p} при различныхъ давленіяхъ p :

p	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Атм.
η'_{3p}	1,19	1,28	1,34	1,40	1,46	1,52	1,62	1,64	1,67	1,71	1,75	1,79	1,84	1,88	1,92	1,96	

Изъ приведенныхъ таблицъ видно, что при обычныхъ отношеніяхъ объемовъ цилиндровъ, когда $v_1 = 2v$, эти компрессоры не мо-

гутъ правильно работать ниже 10 атм, такъ какъ въ этомъ случаѣ давленіе пара не можетъ преодолѣть перваго сжатія воздуха.

§ 7. Полезное дѣйствіе компрессора разсматриваемой системы увеличится еще болѣе, если и паровые цилиндры не будутъ равны между собою. Обозначимъ объемъ перваго парового цилиндра черезъ v' , а второго черезъ v и опредѣлимъ тѣ соотношенія между объемами цилиндровъ, при которыхъ коэффициентъ утилизаціи пара будетъ наибольшимъ.

Составляемъ уравненіе, выражающее условіе равновѣсія давленій на поршни первой пары цилиндровъ въ концѣ его хода.

$$PV' = \left(1 + \frac{v}{v_1}\right)^n v_1,$$

или

$$\frac{v'}{v} = \frac{1}{P} \frac{v_1}{v} \left(1 + \frac{v_1}{v}\right)^n;$$

прибавляемъ къ каждой части уравненія по 1-цѣ:

$$\frac{v' + v}{v} = \frac{1}{P} \frac{v_1}{v} \left(1 + \frac{v_1}{v}\right)^n + 1;$$

помножимъ каждую часть уравненія на $\frac{v}{v_1 + v}$, получаемъ:

$$\frac{v' + v}{v_1 + v} = \frac{1}{P} \frac{v}{v_1 + v} - \left[\left(1 + \frac{v_1}{v}\right)^n \frac{v_1}{v} + P \right]$$

Коэффициентъ утилизаціи пара η''_3 будетъ равенъ:

$$\eta''_3 = \frac{1}{P} \frac{v_1 + v}{v' + v},$$

а такъ какъ $P = p$, то

$$\eta''_3 = \frac{1}{P} \frac{p \left(1 + \frac{v_1}{v}\right)}{\frac{v_1}{v} \left(1 + \frac{v_1}{v}\right)^n + p} \quad (14)$$

Обозначимъ $1 + \frac{v_1}{v}$ черезъ y ; тогда равенство (14) можетъ быть представлено въ слѣдующемъ видѣ:

$$\eta''_3 = \frac{1}{P} \frac{p \cdot y}{(y-1) y^n + p}, \quad (15)$$

и η''_3 будетъ имѣть максимумъ, когда выраженіе

$$\frac{p}{y} + y^{n-1} (y-1)$$

будетъ имѣть свой минимумъ.

Беремъ отъ него первую производную по y и приравниваемъ ее 0;

$$\frac{p}{y^2} + (n-1) y^{n-2} (y-1) + y^{n-1} = \frac{-p + ny^{n+1} - (n-1) y^n}{y^2} = 0;$$

Такъ какъ вторая производная всегда больше нуля, то мы, дѣйствительно, получаемъ для y значеніе, обращающее η''_3 въ максимумъ.

При разсмотрѣніи уравненія:

$$ny^{n+1} - (n-1) y^n - p = 0,$$

мы видимъ, что оно тождественно съ уравненіемъ (6) и, слѣдовательно, мы получимъ для y при различныхъ величинахъ p тѣ же значенія, что и для $\frac{v_1}{v_2}$ при изслѣдованіи трехцилиндроваго компрессора (§ 5).

Такимъ образомъ, мы имѣемъ слѣдующія значенія $\frac{v_1}{v}$ для настоящаго случая:

p	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	атм.
$\frac{v_1}{v}$	0,85	1,00	1,13	1,25	1,36	1,45	1,55	1,64	1,73	1,81	1,88	1,96	2,03	2,10	2,18	2,24	

Точно также и коэффициентъ утилизаціи пара въ рассматриваемомъ четырехцилиндровомъ компрессорѣ періодическаго дѣйствія одинаковъ съ коэффициентомъ утилизаціи пара η_2 въ трехцилиндровомъ компрессорѣ, если въ обоихъ случаяхъ взяты наивыгоднѣйшія соотношенія объемовъ цилиндровъ, такъ какъ η_2 и η''_3 тождественны между собою,

если только $y = \frac{v_1}{v_2}$.

Итакъ, получаемъ слѣдующія значенія для η''_3 $p = \frac{v_1 + v}{v' + v}$ при различныхъ давленіяхъ p :

p	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	атм.
$\eta''_3 p$	1,37	1,54	1,64	1,72	1,80	1,88	1,95	2,04	2,09	2,17	2,23	2,29	2,35	2,41	2,47	2,52	

Что касается отношенія $\frac{v'}{v}$, то оно опредѣлится изъ уравненія:

$$\frac{v'}{v} = \frac{1}{p} \left(1 + \frac{v'}{v} \right)^n \frac{v_1}{v} \dots \dots \dots (16)$$

или же на основаніи коэффициента утилизацію пара η''_3 , а именно:

$$\frac{v'}{v} = \frac{y - \eta''_3 p}{\eta''_3 p} \dots \dots \dots (17)$$

что дастъ для $\frac{v_0}{v}$ слѣдующій рядъ значеній при различныхъ величинахъ p:

p	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	атм.
$\frac{v'}{v}$	0,35	0,30	0,30	0,31	0,31	0,30	0,31	0,30	0,31	0,30	0,34	0,33	0,29	0,32	0,29	0,29	

Такимъ образомъ, при разсмотрѣнной нами системѣ четырехцилиндровыхъ компрессоровъ можетъ быть достигнуто увеличеніе ихъ полезнаго дѣйствія, если соответственнымъ образомъ измѣнить объемы паровыхъ цилиндровъ, такъ чтобы паровой цилиндръ второй пары былъ приблизительно раза въ три больше другого парового цилиндра.

Теоретическія діаграммы для этой системы компрессоровъ предана фиг. 5.

§ 8. Гораздо выше по своей производительности система четырехцилиндровыхъ компрессоровъ не періодическаго дѣйствія, работающая тоже полнымъ давленіемъ поступающаго въ цилиндры свѣжаго пара. Главное отличеніе этой системы отъ предыдущей заключается въ томъ, что воздухъ, сжимаемый въ первой парѣ цилиндровъ, переходя въ воздушный цилиндръ второй пары, помогаетъ перемѣщенію въ ней поршней (фиг. 6).

Условіе возможности движенія поршней до конца своего хода въ первой парѣ цилиндровъ выразится слѣдующимъ уравненіемъ:

$$Pv' = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^n v_1 \dots \dots \dots (18)$$

Условіе возможности движенія поршней во второй парѣ цилиндровъ представится тоже уравненіемъ:

$$P v = \left[p - \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^n \right] v_2 \dots \dots \dots (18 \text{ bis})$$

Для опредѣленія коэффициента утилизаціи пара производимъ рядъ преобразованій, при чемъ принимаемъ во вниманіе, что $P=p$.

$$\frac{v'}{v_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^n \frac{1}{p};$$

$$\frac{v}{v_2} = 1 - \frac{v'}{v_1};$$

Множимъ обѣ части послѣдняго равенства на $\frac{v_1}{v'}$ и къ каждой части придаемъ по 1-цѣ; получаемъ:

$$\frac{v+v'}{v'} = \left(1 - \frac{v'}{v_1} \right) \frac{v_2}{v'} + 1.$$

Затѣмъ умножаемъ каждую часть на $\frac{v'}{v_1}$, при чемъ получаемъ:

$$\frac{v'+v}{v_1} = \frac{v_2}{v_1} - \frac{v_2}{v_1} \frac{v'}{v_1} + \frac{v'}{v_1};$$

$$\text{такъ какъ } \frac{v'}{v_1} = \frac{1}{p} \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^n, \text{ то}$$

$$\frac{v'+v}{v_1} = \frac{v_2}{v_1} - \frac{1}{p} \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{n-1} + \frac{1}{p} \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^n.$$

Отсюда выводимъ значеніе коэффициента утилизаціи пара η_4 для разсматриваемаго компрессора:

$$\eta_4 = \frac{1}{p} \frac{v_1}{v'+v} = \frac{1}{p} \frac{p}{p \frac{v_2}{v_1} + \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^n \left(1 - \frac{v_2}{v_1} \right)} \dots \dots \dots (19)$$

Не трудно видѣть, что это та же самая формула, что (4) и (15); такъ что $\eta_4 = \eta_2 = \eta_3''$, и максимальное значеніе его η'_4 при $n=1$ тоже будетъ

$$\eta'_4 = \eta'_2 = \frac{1}{p} \frac{p}{2 \sqrt{p} - 1} \dots \dots \dots (19 \text{ bis})$$

Такимъ образомъ, если имѣются два компрессора, изъ которыхъ одинъ трехцилиндровый, а другой четырехцилиндровый періодическаго или не періодическаго дѣйствія, при чемъ для обоихъ отношенія $\frac{v_1}{v_2}$ равны, то коэффициенты утилизаціи въ нихъ пара равны, а значить, и отношеніе суммы объемовъ паровыхъ цилиндровъ ко второму воздушному тоже равны между собою.

Значенія $\frac{v_1}{v_2}$ нами были уже найдены (см. § 5); постараемся опредѣлить другія соотношенія между объемами цилиндровъ.

$$\frac{v_2}{v + v_0} = \frac{v_1}{v + v_0} \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{-1} = \eta_4 p \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{-1} \dots \dots \dots (20)$$

$$\frac{v_0}{v + v_0} = \frac{v_1}{v + v_0} \frac{v_0}{v_1} = \eta_4 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^n \dots \dots \dots (21)$$

$$\frac{v}{v + v_0} = \frac{v_0}{v + v_0} \frac{v}{v_0} = \eta_4 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^n \frac{p - \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^n}{\left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{n+1}}$$

такъ что:

$$\frac{v}{v + v_0} = \eta_4 \frac{p - \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^n}{\frac{v_1}{v_2}} \dots \dots \dots (22)$$

Принявъ $(v + v_0)$ за единицу, получаемъ слѣдующія значенія для v_0 , v , v_2 и $v_1 = \eta_4 p$ при давленіяхъ отъ $p = 5$ до $p = 20$ атмосферъ:

p	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Атм
v_0	0,65	0,67	0,67	0,67	0,67	0,66	0,66	0,67	0,66	0,66	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	—
v	0,35	0,33	0,33	0,33	0,33	0,34	0,34	0,33	0,34	0,34	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	—
v_2	0,74	0,77	0,77	0,76	0,76	0,76	0,76	0,77	0,76	0,77	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	—
v_1	1,37	1,54	1,64	1,72	1,80	1,88	1,95	2,04	2,09	2,17	2,23	2,29	2,35	2,41	2,47	2,52	$\eta_4 p$

Теоретическія діаграммы работы пара и воздуха (фиг. 7) нѣсколько подробнѣе выясняютъ обстоятельства работы этой системы компрессоровъ. Вслѣдствіе сообщенія между собою воздушныхъ цилиндровъ, полезная работа перваго парового цилиндра находится въ зависи-

мости отъ работы второй пары цилиндровъ. Первый паровой цилиндръ черезъ воздушную среду восполняетъ, въ случаѣ надобности, недостатокъ рабочей силы во второй парѣ цилиндровъ. Дѣйствительно, если противодавленіе со стороны второго воздушнаго цилиндра настолько велико, что штокъ съ поршнями не можетъ быть сдвинутъ давленіемъ пара во второмъ цилиндрѣ, — то сжатіе воздуха происходитъ только въ первомъ цилиндрѣ; штокъ второй пары стоитъ, пока въ первомъ цилиндрѣ давленіе не достигнетъ требуемой величины; въ нашемъ случаѣ эта величина $= p_1$. Ясно, что на эту величину можетъ быть во второмъ воздушномъ цилиндрѣ повышено давленіе на всемъ протяженіи хода поршня; но на самомъ дѣлѣ повышение это происходитъ только на необходимомъ для движенія второго штока промежуткѣ. Въ рассматриваемомъ случаѣ, какъ въ одной, такъ и въ другой парѣ цилиндровъ существуетъ избытокъ движущей силы надъ сопротивленіемъ въ началѣ хода поршней, но избытокъ этотъ, повидимому, меньше чѣмъ у другихъ рассмотрѣнныхъ нами системъ.

§ 9. Несмотря на всю простоту конструкцій паровыхъ компрессоровъ прямого дѣйствія, они долгое время примѣнялись почти исключительно для желѣзнодорожныхъ воздушныхъ тормазовъ. Одною изъ главнѣйшихъ причинъ, препятствовавшихъ болѣе широкому распространенію этихъ машинъ, было то обстоятельство, что онѣ, работая безъ расширенія пара, были слишкомъ не экономичны. Чтобы увеличить ихъ полезное дѣйствіе стали строить компрессоры съ расширеніемъ пара и двойнымъ сжатіемъ воздуха.

Простѣйшею конструкціей этого рода является двухцилиндровый паровой компрессоръ (фиг. 8). Отличительною его особенностію является то, что каждый цилиндръ одновременно служитъ и для пара и для воздуха: паръ поступаетъ подъ поршень малаго цилиндра, затѣмъ, когда поршень займетъ крайнее верхнее положеніе, оба цилиндра сообщаются и разностью давленій пара на два поршня они гонятся внизъ. Воздухъ, поступающій подъ нижнюю сторону поршня большого цилиндра, нагоняется въ пространство надъ поршнемъ малаго цилиндра, а затѣмъ полнымъ давленіемъ пара нагнетается въ отводную трубу.

Разсмотримъ условія, при которыхъ возможна работа этого компрессора. Самое опасное положеніе поршней будетъ при наибольшемъ расширеніи пара; поэтому для этого положенія составляемъ уравненіе на основаніи равновѣсія силъ движущихъ и сопротивленія:

$$v \left[\left(\frac{v_1}{v} \right)^n - P \frac{v}{v_1} \right] - \left[\left(\frac{v_1}{v} \right)^n - P \frac{v}{v_1} \right] v_1 = 0 \dots \dots \dots (23)$$

Такъ какъ v не равно v_1 , то

$$\left(\frac{v_1}{v} \right)^n = P \frac{v}{v_1};$$

а такъ какъ $P=p$, то

$$\frac{v_1}{v} = \sqrt[n+1]{p} \dots \dots \dots (24)$$

Такимъ образомъ, коэффициентъ утилизаціи пара η_5 у двухцилиндрового компрессора съ расширеніемъ пара выражается слѣдующимъ образомъ:

$$\eta_5 = \frac{1}{p} \frac{v_1}{v} = \frac{1}{p} \sqrt[n+1]{P} \dots \dots \dots (25)$$

Давленіе уходящаго вонъ изъ компрессора пара P_0 зависитъ отъ относительныхъ объемовъ цилиндровъ и выражается слѣдующимъ образомъ:

$$P_0 = P \frac{v}{v_1} = \frac{P}{\eta_5 P} = \frac{1}{\eta_5} \dots \dots \dots (25 \text{ bis}).$$

Итакъ, получаемъ для различныхъ давленій отъ 5 до 20 атмосферъ слѣдующія числа для $\frac{v_1}{v} = \eta_5 p$ и для P_0 :

p.	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	атм.
$\eta_5 p$	1,95	2,13	2,25	2,39	2,50	2,62	2,72	2,82	2,91	3,00	3,09	3,17	3,26	3,34	3,42	3,50	$\frac{v_1}{v}$
P_0	2,57	2,81	3,09	3,34	3,50	3,80	4,43	4,22	4,41	4,62	4,76	5,00	5,17	5,28	5,42	5,68	атм.

Такимъ образомъ, эта система можетъ дать экономію отъ 95 до 250%, смотря по давленію, до котораго предназначено насосу сжимать воздухъ, сравнительно съ простымъ двухцилиндровымъ компрессоромъ (§ 3). Диаграмма для этого компрессора представлена на фиг. 9.

§ 10. Перейдемъ къ четырехцилиндровымъ съ расширеніемъ пара компрессорамъ прямого дѣйствія, причемъ сначала разсмотримъ систему, въ которой окончательное сжатіе воздуха производится свѣжимъ паромъ, и каждая пара цилиндровъ, работает попеременно (періодически) (фиг. 10). Очевидно, что наименьшее давленіе пара во второмъ паровомъ цилиндрѣ равно давленію пара, уходящаго въ атмосферу P_0 ; слѣдовательно,

$$P_0 = \frac{P v}{v + v_0},$$

гдѣ v объемъ парового цилиндра, работающаго свѣжимъ паромъ, а v_0 — расширеннымъ паромъ. Давленіе же воздуха, сжатого въ первомъ воздушномъ цилиндрѣ, будетъ

$$p_1 = \left(\frac{v_1 + v}{v} \right)^n.$$

Составляемъ уравненіе, выражающее условіе равновѣсія давленій на штокъ второй пары цилиндровъ въ концѣ расширенія пара:

$$P_0 v_0 = p_1 v_1 ,$$

или

$$P \frac{v_0}{v_0 + v} = \left(\frac{v_1 + v}{v} \right)^n \frac{v_1}{v} ;$$

но такъ какъ $\frac{P v_0}{v_0 + v} = P - P_0$, то $\frac{v_1}{v}$ опредѣляется изъ уравненія:

$$P - P_0 = \left(\frac{v_1}{v} + 1 \right)^n \frac{v_1}{v} .$$

Если обозначимъ $1 + \frac{v_1}{v}$ черезъ x , то получимъ уравненіе слѣдующаго вида, аналогичнаго уравненію (13):

$$x^{n+1} - x^n - (P - P_0) = 0 \dots \dots \dots (26).$$

При этомъ коэффициентъ утилизаціи пара η_6 выражается слѣдующимъ образомъ:

$$\eta_6 = \frac{1}{P} \left(\frac{v_1}{v} + 1 \right) = \frac{1}{P} x \dots \dots \dots (27).$$

Если бы $P_0 = 0$, то η_6 было бы, какъ не трудно видѣть, въ двое больше η'_3 , причемъ $\frac{v_0}{v}$ должно бы равняться безконечности.

Опредѣлимъ значенія $\frac{v_0}{v}, \frac{v_1}{v} = \eta_6 P - 1$ при давленіи уходящаго пара $P_0 = 2$ атм.

Для опредѣленія $\frac{v_0}{v}$ имѣемъ формулу:

$$\frac{v_0}{v} = \frac{P - P_0}{P_0} ;$$

въ самомъ дѣлѣ:

$$(v_0 + v) P_0 = P v ; \quad \frac{v_0}{v} + 1 = \frac{P}{P_0} ;$$

слѣдовательно,

$$\frac{v_0}{v} = \frac{P - P_0}{P_0} ;$$

что касается $\frac{v_1}{v}$, что оно легко опредѣлится, разъ извѣстны корни

уравнения (26), которое решаемъ по одному изъ методовъ приближеннаго опредѣленія корней.

Приводимъ таблицу значеній $\frac{v_0}{v}$, $\frac{v_1}{v}$ и $\eta_3 p$ при $P_0 = 2$ атм.

p	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	атм.
$\frac{v_0}{v}$	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	—
$\frac{v_1}{v}$	1,11	1,28	1,37	1,56	1,67	1,80	1,92	2,04	2,13	2,27	2,33	2,42	2,50	2,58	2,67	2,75	—
$\eta_3 p$	2,11	2,28	2,37	2,56	2,67	2,80	2,92	3,04	3,13	3,27	3,33	3,42	3,50	3,58	3,67	3,75	—

Такимъ образомъ, при примѣненіи расширенія пара въ четырехцилиндровыхъ компрессорахъ описанной системы, полезное ихъ дѣйствіе увеличивается почти вдвое по сравненію съ полезнымъ дѣйствіемъ такихъ же компрессоровъ, но безъ расширенія пара.

На фиг. 11 представлена теоретическая діаграмма работы для разсмотрѣнной системы.

Изъ сравненія фиг. 9 и 11 видно, что при начальномъ сжатіи воздуха въ послѣдней системѣ существуемъ больший избытокъ движущей силы надъ сопротивленіемъ, чѣмъ въ предыдущей (§ 9). По отношенію же къ вторичному сжатію обѣ системы работаютъ почти одинаково.

§ 11. При періодическомъ дѣйствіи четырехцилиндрового компрессора и при окончательномъ сжатіи воздуха расширеннымъ паромъ давленіе воздуха въ концѣ сжатія въ первомъ цилиндрѣ (фиг. 12) будетъ:

$$p_1 = \left(\frac{v_1 + v_2}{v_2} \right)^n$$

Условіе возможности полного хода поршней въ первой парѣ цилиндровъ представляется въ слѣдующемъ видѣ:

$$Pv = \left(\frac{v_1 + v_2}{v_2} \right)^n v_1, \text{ гдѣ } P = p.$$

Условіе возможности полного хода поршней во второй парѣ цилиндровъ:

$$p v_2 = P_0 v_0,$$

но

$$v_2 = v \frac{P - P_0}{P};$$

слѣдовательно,

$$p = \left(1 + \frac{v_1}{v} \frac{P}{P - P_0} \right)^n \frac{v_1}{v}. \quad (28)$$

Изъ этого уравненія мы можемъ опредѣлить $\frac{v_1}{v}$; для этого обозначимъ $1 + \frac{v_1}{v} \frac{P}{P - P_0}$, равное $\frac{v_1 + v_2}{v_2}$, черезъ y ; получаемъ новое уравненіе:

$$y^n (y - 1) - \frac{P}{P - P_0} p = 0 \quad \dots \dots \dots (29)$$

Если бы P_0 равнялось нулю, то это уравненіе было бы тождественнымъ съ уравненіями (13) и (26), и тогда точно также $\frac{v_0}{v}$ равнялось бы безконечности.

Рѣшая это уравненіе по одному изъ способовъ нахождения приближеннаго значенія корней его, получаемъ также значенія и $\frac{v_1}{v}$ изъ уравненія:

$$\frac{v_1}{v} = (y - 1) \frac{P - P_0}{P}.$$

Коэффициентъ утилизаци пара η_7 для рассматриваемой системы будетъ:

$$\eta_7 = \frac{1}{p} \frac{v_1 + v_2}{v} = \frac{1}{p} y \frac{P - P_0}{P} \dots \dots \dots (30)$$

Не трудно замѣтить, что, если бы $P_0 = 0$, то $\eta_7 = \eta_6 = 2 \eta'_3$, и тогда, конечно, должно было бы имѣть мѣсто соотношеніе: $\frac{v_0}{v} = \infty$. Замѣтимъ при этомъ, что, какъ и въ предшествующемъ случаѣ, когда $P_0 \neq 0$,

$$\frac{v_0}{v} = \frac{p - P_0}{P_0},$$

такъ какъ $P = p$; для вычисленія же $\frac{v_2}{v}$ имѣемъ:

$$\frac{v_2}{v} = \frac{p - P_0}{p}.$$

Что же касается значеній $\frac{v_1}{v}$, то по прежнему мы можемъ опредѣлить ихъ при помощи $p \eta_7$, а именно:

$$\frac{v_1}{v} = p \eta_7 - \frac{v_2}{v}.$$

Итакъ, получаемъ слѣдующую таблицу для различныхъ значеній p отъ 5 до 20 атм.

p .	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	атм.
$\frac{v_0}{v}$	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	—
$\frac{v_2}{v}$	0,60	0,67	0,71	0,75	0,78	0,80	0,82	0,83	0,85	0,86	0,87	0,88	0,88	0,89	0,90	0,90	—
$\frac{v_1}{v}$	1,10	1,28	1,44	1,58	1,71	1,83	1,95	2,07	2,15	2,25	2,34	2,43	2,52	2,59	2,68	2,77	—
η_{TP}	1,70	1,95	2,15	2,33	2,49	2,49	2,77	2,90	3,00	3,11	3,21	3,31	3,40	3,48	3,58	3,67	—

На фиг. 13 представлены схемы теоретическихъ діаграммъ для разсмотрѣнной системы компрессоровъ.

§ 12. Перейдемъ теперь къ разсмотрѣнiю четырехцилиндрового компрессора, работающаго одновременно (не периодически) обѣими парами поршней, съ расширенiемъ пара и окончательнымъ сжатiемъ свѣжимъ паромъ.

Подобнаго рода компрессоръ работаетъ слѣдующимъ образомъ (фиг. 14): паръ, отработавшiй въ первомъ цилиндрѣ, переходитъ во второй, такъ что поршень перваго цилиндра всегда подвергается дѣйствию разности давленiй свѣжаго и расширяющагося пара. Что касается второй пары цилиндровъ, то въ нихъ движущая сила слугается изъ давленiя расширяющагося пара и давленiя сжимаемаго первымъ поршнемъ воздуха.

Обозначимъ наименьшее давленiе расширяющагося пара черезъ P_0 и объемъ второго цилиндра черезъ v_0 ; тогда движущая сила для первой пары поршней въ концѣ хода ихъ будетъ равна:

$$(P - P_0) v,$$

т. е. разности давленiй свѣжаго и расширяющагося пара, а сопротивленiе сжатаго воздуха будетъ:

$$\left[p - \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^n \right] v_2.$$

Для возможности работы въ первой парѣ цилиндровъ компрессора необходимо, чтобы

$$(P - P_0) v \geq \left[p - \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^n \right] v_2 \dots \dots \dots (31)$$

Съ другой стороны для возможности движенія поршней во второй парѣ цилиндровъ нужно, чтобы

$$P_v = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^n v_1 \dots \dots \dots (32)$$

Если $v_2 = v$ и, какъ раньше, $P = p$, то

$$p = \left(\frac{v_1}{v} \right)^{n+1},$$

откуда

$$\frac{v_1}{v} = \sqrt[n+1]{p} \dots \dots \dots (33).$$

При этомъ также необходимо, какъ видно изъ (31), чтобы

$$P_0 \leq \left(\frac{v_1}{v} \right)^n \dots \dots \dots (33 \text{ bis}).$$

Коэффициентъ утилизаціи пара η_s въ этомъ случаѣ будетъ равенъ:

$$\eta_s = \frac{1}{p} \frac{v_1}{v} = \frac{1}{p} \sqrt[n+1]{p} \dots \dots \dots (34)$$

Такимъ образомъ, если первая пара цилиндровъ имѣетъ одинаковые объемы, то коэффициентъ утилизаціи пара η_s и предѣльное давленіе при расширеніи пара P_0 для разсматриваемой конструкции тѣ же, что и для двухцилиндроваго компрессора съ расширеніемъ пара (§ 9), т. е. $\eta_s = \eta_5$.

§ 13. Однако въ четырехцилиндровомъ компрессорѣ только что разсмотрѣнной системы возможно довести давленіе уходящаго пара до наименьшаго возможнаго предѣла P_0 , при чемъ необходимо увеличить v_1 и v_2 , такъ чтобы $v_2 > v$. Тогда изъ уравненій (32) и (31) получаемъ:

$$p \frac{v}{v_2} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{n+1}; \dots \dots \dots (35)$$

$$(p - P_0) v = \left[p - \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^n \right] v_2; \dots \dots \dots (36)$$

откуда:

$$(p - P_0) \frac{v}{v_2} - p + p \frac{n}{n+1} \left(\frac{v}{v_2} \right)^{\frac{n}{n+1}} = 0 \dots \dots \dots (37)$$

При этомъ коэффициентъ утилизаціи пара η'_8 будетъ:

$$\eta'_8 = \frac{1}{p} \frac{v_1}{v} = \frac{1}{p} \frac{v_1}{v_2} \frac{v_2}{v} = \frac{1}{p} \left(p \frac{v}{v_2} \right)^{\frac{1}{n+1}} \left(\frac{v}{v_2} \right)^{-1},$$

или

$$\eta'_8 = \frac{1}{p} \sqrt[n+1]{p \left(\frac{v_2}{v} \right)^n} \dots \dots \dots (38)$$

Такъ какъ $v_2 > v$, то и η'_8 будетъ всегда болѣе η_8 . Значеніе величины $\left(\frac{v_2}{v} \right)^n$, входящей въ выраженіе для η'_8 , можетъ быть получено изъ уравненія (37), заключающаго неизвѣстное въ степеняхъ 1 и $\frac{n}{n+1}$.

Если бы $n=1$, то мы имѣли бы слѣдующее уравненіе:

$$(p-P_0) \frac{v}{v_2} + p^{\frac{1}{2}} \left(\frac{v}{v_2} \right)^{\frac{1}{2}} - p = 0; \text{ изъ котораго получили бы:}$$

$$\frac{v_2}{v} = \left[\frac{-p^{\frac{1}{2}} + p^{\frac{1}{2}} \sqrt{1 + 4(p-P_0)}}{2(p-P_0)} \right] - \frac{1}{2},$$

что даетъ для различныхъ значеній p при $P_0 = 2$ атмосфер. величины близкія къ единицѣ; поэтому примемъ, какъ приблизительную величину корня, $\frac{v_2}{v} = 1$ и вычислимъ по формулѣ (35) значенія $\frac{v_1}{v_2}$ при различныхъ давленіяхъ:

$$\frac{v_1}{v_2} = \sqrt[n+1]{\frac{v}{v_1} p}.$$

Если найденныя такимъ образомъ значенія подставимъ въ формулу (36), то получимъ первыя приближенныя значенія для $\frac{v_2}{v}$, которыя въ среднемъ дадутъ величину 1,28; принявъ это значеніе для всѣхъ давленій, опять подставляемъ его въ формулу (35), причемъ получаемъ второй рядъ приближенныхъ значеній для $\frac{v_1}{v_2}$:

$$\frac{v_1}{v_2} = \sqrt[n+1]{p \frac{1}{1,28}} = 0,9 \sqrt[n+1]{p}.$$

Найденныя величины $\frac{v_1}{v_2}$ подставляемъ снова въ уравненіе (36), получаемъ слѣдующее приближенное значеніе $\frac{v_2}{v}$, равное въ сред-

немъ 1,19. Подставляя эту величину въ (35) уравненіе, получаемъ для $\frac{v_1}{v_2}$ значеніе 0,88 $\sqrt[n+1]{p}$ и для $\frac{v_2}{v_1}$ среднюю величину 1,21. Производя еще разъ аналогичныя дѣйствія, получаемъ для $\frac{v_2}{v} = 1,20$. Чтобы не дѣлать дальнѣйшихъ выкладокъ, мы можемъ окончательно принять $\frac{v_2}{v}$ равнымъ среднему значенію изъ двухъ послѣднихъ приближенныхъ, причемъ получаемъ слѣдующія значенія для

$$\frac{v_2}{v}, \frac{v_1}{v_2}, \eta'_s p \text{ и } \frac{v_0}{v} = \frac{P}{P_0} \text{ при } P_0 = 2 \text{ атм.}$$

p	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	атм.
$\frac{v_2}{v}$	1,14	1,16	1,19	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,21	1,21	1,21	1,20	1,20	1,20	—
$\frac{v_1}{v_2}$	1,86	1,98	2,11	2,23	2,28	2,47	2,54	2,61	2,70	2,78	2,82	2,90	2,98	3,09	3,16	3,23	—
$\frac{v_1}{v}$	2,12	2,33	2,50	2,65	2,84	2,97	3,05	3,14	3,25	3,34	3,51	3,61	3,70	3,72	3,80	3,89	$\eta'_s p$
$\frac{v_0}{v}$	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	—

Такимъ образомъ, отъ измѣненія объемовъ цилиндровъ получается довольно значительная экономія (отъ 25% до 40%), причемъ по сравненію съ простымъ двухцилиндровымъ компрессоромъ полезная работа увеличивается въ 2—3 и даже почти 4 раза.

Діаграммы для работы пара и для сжатія воздуха имѣютъ видъ, представленный на фиг. 15. Второй паровой цилиндръ въ настоящемъ случаѣ принимаетъ на себя значительную часть работы, которую долженъ бы выполнять первый цилиндръ; при этомъ движеніе поршней имѣетъ приблизительно такой характеръ: отъ своихъ крайнихъ положеній раньше начинаютъ двигаться поршни второй пары цилиндровъ, между тѣмъ какъ въ первой парѣ цилиндровъ поршни стоятъ, пока разность давленій $P - P'$ (гдѣ P' давленіе расширеннаго пара) не будетъ въ состояніи преодолѣть давленіе отъ сжатого воздуха на первую пару поршней, причемъ и далѣе оно зависитъ отъ соотношеній между сопротивленіемъ и движущей силой въ той и другой парѣ цилиндровъ: если въ какой-либо парѣ цилиндровъ первое больше второй, то поршни другой пары, подавшись впередъ, доставляютъ при помощи сжатого воздуха недостающее давленіе. Можно доказать,

что оба паровыхъ цилиндра, всегда могутъ доставить необходимую работу для каждого изъ воздушныхъ цилиндровъ. Дѣйствительно, во второй парѣ цилиндровъ, вслѣдствіе того, что давленіе пара къ концу хода поршня падаетъ, а давленіе воздуха возрастаетъ и въ самомъ концѣ они сравниваются, вся работа совершается только однимъ расширяющимся паромъ. Что же касается до движущей силы въ первой парѣ цилиндровъ, то она складывается изъ давленій:

$$(P - P') \frac{v}{v_2} \text{ и } P' \frac{v_0}{v_1}.$$

Когда поршни первой пары цилиндровъ вслѣдствіе недостатка движущей силы останавливаются, то сжатіе воздуха въ обоихъ воздушныхъ цилиндрахъ возрастаетъ (а вмѣстѣ съ нимъ и вторая слагающая $P' \frac{v_0}{v_1}$) до тѣхъ поръ, пока общее давленіе на штокъ, равное

$\left[(P - P') \frac{v}{v_2} + P' \frac{v_0}{v_1} \right] v_2$, не преодолѣтъ давленія удаляемаго изъ компрессора воздуха, давленіе котораго не выше p . Изъ фигуры 16 легко

видѣть, что $(P - P') \frac{v}{v_2} + P' \frac{v_0}{v_1} > p$, если существуетъ условіе, что

$$\frac{v_0}{v_1} > 1 \text{ и } \frac{v}{v_2} < 1.$$

Дѣйствительно, изъ уравненій (35) и (36) получаемъ:

$$\frac{v}{v_2} = \frac{1 - \frac{v}{v_1}}{1 - \frac{P_0}{p}};$$

слѣдовательно, такъ какъ $\frac{v}{v_2} < 1$, то

$$\frac{P_0}{p} < \frac{v}{v_1}$$

Съ другой стороны, такъ какъ $\frac{v_0}{v_1} = \frac{v_0}{v} \frac{v}{v_1}$, то опять получаемъ согласно предыдущему:

$$\frac{v_0}{v} \frac{v}{v_1} > 1 \text{ и, значитъ, } \frac{P_0}{p} < \frac{v}{v_1}$$

Такимъ образомъ, оба неравенства $\frac{v_0}{v} > 1$ и $\frac{v}{v_2} < 1$ между собою

равносильны и поэтому достаточно принять одно изъ нихъ. Взявъ неравенство $\frac{v}{v_2} < 1$ и сопоставивъ его съ уравненіемъ (37):

$$p \frac{n}{n+1} \left(\frac{v}{v_2} \right)^{\frac{n}{n+1}} + (p - P_0) \frac{v}{v_2} - p = 0,$$

замѣчаемъ, что первые два члена, будучи всегда положительными, возрастаютъ вмѣстѣ съ $\frac{v}{v_2}$, а такъ какъ при $\frac{v}{v_2} < 1$ уравненіе обращается въ нуль, то при $\frac{v}{v_2} = 1$ получаемъ $p \frac{n}{n+1} + p - P_0 - p > 0$, откуда

$$P_0 < p \frac{n}{n+1},$$

или

$$P_0 < \frac{p}{\sqrt[n+1]{p}},$$

а въ предѣлѣ:

$$P_0 = \frac{p}{\sqrt[n+1]{p}} = \frac{1}{\eta_s}.$$

Это то же значеніе P_0 , которое мы получили для двухцилиндроваго компрессора съ расширеніемъ пара (§ 9).

Такимъ образомъ, P_0 можетъ имѣть какія угодно значенія, но не выше слѣдующихъ предѣльныхъ значеній:

p	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	атм.
P_0	2.57	2.81	3.09	3.34	3.50	3.80	4.03	4.22	4.41	4.62	4.76	5.00	5.17	5.28	5.42	5.68	

Если бы $P_0=0$, то изъ уравненія (37) мы могли бы получить слѣдующее уравненіе съ новымъ переменнымъ $\frac{v_1}{v}$:

$$\left(\frac{v_1}{v} \right)^{\frac{n+1}{n}} + \frac{v_1}{v} - p = 0$$

и, слѣдовательно, въ этомъ случаѣ коэффициентъ утилизаци пара (η'_s) $= \frac{1}{p} \frac{v_1}{v}$ былъ бы еще выше; но тогда $\frac{v_0}{v}$ должно бы равняться безконечности.

§ 14. Теперь рассмотрим систему четырехцилиндровых компрессоров съ расширеніемъ пара, тоже не періодическаго дѣйствія, но въ которой окончательное сжатіе воздуха производится расширяющимся паромъ (фиг. 17). Для поршней первой пары цилиндровъ имѣемъ уравненіе:

$$\left(\frac{v_1}{v_2}\right)^n v_1 = (P - P_0) v,$$

откуда

$$\frac{v_1}{v_2} = \left(P - P_0\right)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{v}{v_1}\right)^{\frac{1}{n}} \dots \dots \dots (39)$$

Для поршней второй пары цилиндровъ получаемъ:

$$p v_2 - v_2 \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^n = P v,$$

откуда

$$p - \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^n = P \frac{v}{v_2} \dots \dots \dots (39 \text{ bis})$$

Рѣшая совмѣстно уравненія (39) и (39 bis) и принявъ во вниманіе, что $P = p$, получаемъ:

$$p - \frac{v}{v_1} (p - P_0) - p (p - P_0)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{v}{v_1}\right)^{\frac{n+1}{n}} = 0;$$

откуда

$$p \left(\frac{v_1}{v}\right)^{\frac{n+1}{n}} - (p - P_0) \left(\frac{v_1}{v}\right)^{\frac{1}{n}} - p \left(p - P_0\right)^{\frac{1}{n}} = 0 \dots \dots (40)$$

При этомъ коэффициентъ утилизаціи пара η_9

$$\eta_9 = \frac{1}{p} \frac{v_1}{v}$$

Если бы $n = 1$, то мы имѣли бы для опредѣленія $\frac{v_1}{v}$ квадратное уравненіе, изъ котораго получили бы:

$$\frac{v_1}{v} = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \frac{P_0}{p} + \sqrt{\left(1 - \frac{P_0}{p}\right)^2 + 4 p \left(1 - \frac{P_0}{p}\right)} \right\} \dots \dots (41)$$

Если бы въ тоже время и $P_0 = 0$, то

$$\frac{v_1}{v} = 0.5 \left(1 + \sqrt{1 + 4p} \right);$$

при этомъ коэффициентъ утилизаціи пара η'_9 будетъ:

$$\eta'_9 = \frac{1}{p} \frac{v_1}{v} = \frac{1}{p} \left(\sqrt{p + \frac{1}{4}} + \frac{1}{2} \right).$$

Такъ какъ p не равно единицѣ, то мы можемъ рѣшить уравненіе (40) по одному изъ приближенныхъ способовъ, напр., по способу Ньютона. Для этого беремъ первую производную отъ лѣвой части уравненія (40), при чемъ получаемъ:

$$\frac{n+1}{n} p \left(\frac{v_1}{v} \right)^{\frac{1}{n}} - \frac{1}{n} (p - P_0) \left(\frac{v_1}{v} \right)^{\frac{1-n}{n}} = f'(x)$$

вмѣсто $\frac{v_1}{v}$ подставляемъ его приближенное значеніе:

$$x_1 = \sqrt{p + \frac{1}{4}} + \frac{1}{2},$$

тогда второе приближенное значеніе $\frac{v_1}{v}$ будетъ

$$x_2 = \sqrt{p + \frac{1}{4}} + \frac{1}{2} - \frac{f(x_1)}{f'(x_1)}$$

Третье приближенное значеніе будетъ:

$$x_3 = x_2 - \frac{f(x_2)}{f'(x_2)}$$

и т. д., пока не получимъ величинъ, весьма мало другъ отъ друга отличающихся.

Соотношенія между объемами цилиндровъ опредѣляются по формуламъ:

$$\frac{v_0}{v} = \frac{P}{P_0} \text{ и } \frac{v}{v_2} = 1 - \left(1 - \frac{P_0}{P} \right) \frac{v}{v_1}$$

Приводимъ таблицу значеній $\frac{v_0}{v}$, $\frac{v_2}{v}$ и $\frac{v_1}{v} = \eta_9 p$ при $P_0 = 2$ атмосферамъ.

р.	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	атм.
$\frac{v_0}{v}$	2,5	3,0	3,5	4,5	5,0	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	—
$\frac{v_2}{v}$	1,52	1,47	1,47	1,45	1,43	1,41	1,39	1,39	1,39	1,37	1,35	1,35	1,33	1,33	1,33	1,31	—
$\frac{v_1}{v}$	1,82	2,06	2,25	2,60	2,60	2,73	2,86	2,99	3,09	3,18	3,28	3,37	3,46	3,53	3,64	3,70	η_0 р.

Какъ и въ предыдущемъ случаѣ, для возможности работы компрессора рассматриваемой системы необходимо, чтобы $\frac{v_0}{v_2} > 1$ и $\frac{v}{v_1} < 1$.

Въ самомъ дѣлѣ, мы можемъ представить $\frac{v_0}{v}$ въ видѣ слѣдующаго произведенія:

$$\frac{v_0}{v_2} = \frac{v_0}{v} \cdot \frac{v}{v_2};$$

$$\text{а такъ какъ } \frac{v_0}{v} = \frac{P}{P_0} \text{ и } \frac{v}{v_2} = 1 - \left(1 - \frac{P_0}{p}\right) \frac{v}{v_1}, \text{ то}$$

$$\frac{v_0}{v_2} = \frac{p}{P_0} - \left(\frac{p}{P_0} - 1\right) \frac{v}{v_1}$$

Если бы $\frac{v}{v_1} = 1$, то и $\frac{v_0}{v_2} = 1$, но такъ какъ $\frac{v_0}{v_2} > 1$, то и $\frac{v}{v_1} < 1$;

такъ что, очевидно, оба неравенства взаимно связаны, причемъ одно вытекаетъ изъ другого. Поэтому достаточно задаться однимъ: $\frac{v}{v_1} < 1$; сопоставляя это условіе съ уравненіемъ (40), въ результатѣ, когда $\frac{v}{v_1} = 1$ получаемъ:

$$P_0^n = p^n (p - P_0).$$

Предѣльные значенія P_0 опредѣляются изъ уравненія:

$$P_0^n + p^n P_0 - p^{n+1} = 0,$$

которое даетъ слѣдующія максимальныя величины P_0 для различныхъ значеній p :

р	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	атм.
P_0	4,2	5,2	6,2	7,0	7,9	8,8	9,6	10,6	11,6	12,6	13,6	14,6	15,5	16,5	17,5	18,5	

Разсмотримъ теперь теоретическую диаграмму работы компрессора вышеприведенной системы (фиг. 18). Для первой пары цилиндровъ въ началѣ хода движущая сила является недостаточною, поэтому первая пара поршней не двигается, пока не получится достаточная величина $P - P'$. Вторая же пара поршней въ это время будетъ совершать движеніе, ибо движущая сила въ началѣ значительно превышаетъ сопротивленіе. Черезъ нѣкоторый промежутокъ времени картина мѣняется, и первая пара цилиндровъ въ свою очередь начинаетъ помогать второй, добавляя черезъ воздушную среду къ давленію расширяющагося пара еще и давленіе сжимаемаго воздуха.

§ 15. Остается разсмотрѣть паровые компрессоры прямого дѣйствія съ двукратнымъ расширеніемъ пара, въ которыхъ паръ сначала работаетъ полнымъ давленіемъ, а затѣмъ послѣдовательно расширяется въ двухъ цилиндрахъ. Простѣйшимъ типомъ этого рода является трехцилиндровый компрессоръ съ двойнымъ сжатіемъ воздуха (фиг. 19). Изъ условія равновѣсія штока при работѣ одного расширяющагося пара получаемъ слѣдующее уравненіе (ходъ внизъ):

$$\left[\left(\frac{v_1}{v} \right)^n - P \frac{v}{v_2} \right] v - \left[\left(\frac{v_1}{v} \right)^n - P \frac{v}{v_2} \right] v_2 = 0 \quad (43)$$

При движеніи поршня въ противоположную сторону (вверхъ):

$$\left[\left(\frac{v_1}{v_2} \right)^n - P \frac{v}{v_1} \right] v_1 - \left[\left(\frac{v_1}{v_2} \right)^n - P \frac{v}{v_1} \right] v_2 + v (P - p) = 0 \quad (44)$$

Изъ этихъ уравненій имѣемъ при $P = p$:

$$\left(\frac{v_1}{v} \right)^n = p \frac{v}{v_2} \quad \text{и} \quad \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^n = p \frac{v}{v_1}$$

Но такъ какъ:

$$\frac{v_2}{v} = \frac{v_2}{v_1} \cdot \frac{v_1}{v},$$

то, подставляя въ это выраженіе значенія $\frac{v_2}{v_1}$ и $\frac{v_1}{v}$, находимъ:

$$\frac{v_2}{v} = p^{-\frac{1}{n}} \left(\frac{v}{v_1} \right)^{\frac{1}{n}} - \frac{1}{n} \frac{v_1}{v},$$

откуда получаемъ:

$$\frac{v_2}{v} = p^{\frac{1}{n^2+n-1}}$$

$$\text{При } n = 1,4 \quad \frac{v_2}{v} = p^{0,42};$$

съ другой стороны:

$$\left(\frac{v_1}{v}\right)^n = p \left(\frac{v_2}{v}\right)^{-1} = p^{1 - \frac{1}{n^2+n-1}};$$

следовательно,

$$\frac{v_1}{v} = p^{\frac{1}{n} - \frac{1}{n(n^2+n-1)}} = p^{\frac{n+1}{n^2+n+1}};$$

Поэтому коэффициентъ утилизации пара η_{10} будетъ:

$$\eta_{10} = \frac{1}{p} \frac{v_1}{v} = \frac{1}{p} p^{\frac{n+1}{n^2+n+1}} \dots \dots \dots (45)$$

при $n = 1$.

$$\eta_{10} = \frac{1}{p} p^{\frac{2}{3}}$$

Послѣ подстановки $n = 1,4$ получаемъ:

$$\eta_{10} = \frac{1}{p} p^{0,55} \dots \dots \dots (46)$$

Приводимъ таблицу значеній $\frac{v_2}{v_1}$, $\frac{v_1}{v} = \eta_{10} p$ и $P_0 = \frac{p}{\eta_{10} p}$

p	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Атм.
$\frac{v_2}{v}$	1.96	2.12	2.26	2.40	2.51	2.63	2.74	2.84	2.93	3.03	3.12	3.20	3.28	3.40	3.44	3.52	
$\frac{v_1}{v}$	2.42	2.68	2.91	3.14	3.35	3.55	3.74	3.92	4.11	4.27	4.44	4.60	4.75	4.90	5.05	5.19	$\eta_{10} p$
P_0	2.07	2.24	2.40	2.55	2.69	2.82	2.94	3.06	3.13	3.27	3.35	3.48	3.58	3.67	3.76	3.85	

Теоретическія діаграммы работы компрессора представлены на фиг. 20.

§ 16. Если соединимъ два двухцилиндровыхъ компрессора, въ которыхъ цилиндры одновременно служатъ для воздуха и для пара (§ 9), то получимъ въ такого рода четырехцилиндровомъ компрессорѣ тройное расширение пара, при этомъ паръ постепенно расширяется отъ объема v до v_1 и затѣмъ удаляется: воздухъ же наоборотъ: постепенно сжимается отъ начальнаго объема v_1 до v (фиг. 21).

Условіе возможности работы компрессора выражается тремя уравненіями, соотвѣтствующими равновѣснымъ положеніямъ поршней въ концѣ ходовъ:

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{v_1}{v}\right)^n &= p \frac{v}{v_3} \\ \left(\frac{v_1}{v_3}\right)^n &= p \frac{v}{v_2} \\ \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^n &= p \frac{v}{v_1} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (47)$$

Рѣшая эти уравненія, получаемъ:

$$\begin{aligned} \left(\frac{v_1}{v}\right)^n &= p \frac{v}{v_1} \frac{v_1}{v_3} = p \frac{v}{v_1} p^{\frac{1}{n}} \left(\frac{v}{v_2}\right)^{\frac{1}{n}} = \\ &= p \frac{v}{v_1} p^{\frac{1}{n}} \left(\frac{v}{v_1}\right)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\frac{1}{n}} = p \frac{v}{v_1} p^{\frac{1}{n}} \left(\frac{v}{v_1}\right)^{\frac{1}{n}} p^{\frac{1}{n^2}} \left(\frac{v}{v_1}\right)^{\frac{1}{n^2}}; \end{aligned}$$

Такъ что окончательно:

$$\left(\frac{v_1}{v}\right)^n = p^{\frac{n^2+n+1}{n^2}} \left(\frac{v_1}{v}\right)^{\frac{n^2+n+1}{n^2}},$$

откуда

$$\frac{v_1}{v} = p^{\frac{n^2+n+1}{n^3+n^2+n+1}}$$

Слѣдовательно, коэффициентъ утилизаціи пара у разсматриваемой системы компрессоровъ η_{11} будетъ:

$$\eta_{11} = \frac{1}{p} \frac{v_1}{v} = \frac{1}{p} p^{\frac{n^2+n+1}{n^3+n^2+n+1}} \dots \dots \dots (48)$$

При $n=1$ получимъ:

$$\eta_{11} = \frac{1}{p} p^{0,75}$$

$$\text{При } n=1,4 \text{ получаемъ } \eta_{11} = \frac{1}{p} p^{0,61} \dots \dots \dots (49)$$

Зная отношеніе $\frac{v_1}{v}$, можно найти также и относительные объемы прочихъ цилиндровъ, а именно:

$$\frac{v_3}{v} = \frac{p}{\left(\frac{v_1}{v}\right)^n} = p^{\frac{1}{n^3+n^2+n+1}} = p^{0,14}, \dots \dots \dots (50)$$

а затѣмъ

$$\frac{v_2}{v} = \frac{p}{\left(\frac{v_1}{v} \cdot \frac{v}{v_3}\right)^n} = p^{\frac{n+1}{n^3+n^2+n+1}} = p^{0,33} \dots \dots \dots (51)$$

Приводимъ ниже таблицу значеній η_{11} , $\frac{v_3}{v}$, $\frac{v_2}{v}$, $\frac{v_1}{v} = \eta_{11}$ p и $P_0 = \frac{p}{\eta_{11}}$ при различныхъ значеніяхъ p.

p	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Атм.
$\frac{v_3}{v}$	1.25	1.29	1.31	1.34	1.36	1.38	1.40	1.42	1.44	1.45	1.46	1.47	1.49	1.50	1.51	1.52	
$\frac{v_2}{v}$	1.72	1.82	1.92	2.00	2.08	2.16	2.23	2.29	2.35	2.41	2.47	2.52	2.57	2.62	2.67	2.72	
$\frac{v_1}{v}$	2.67	2.98	3.28	3.56	3.74	4.08	4.33	4.55	4.78	4.90	5.22	5.42	5.63	5.83	6.03	6.23	$\eta_{11} p$
P_0	1.87	2.01	2.13	2.20	2.41	2.45	2.54	2.64	2.72	2.85	2.87	2.95	3.02	3.09	3.15	3.21	Атм.

Діаграммы давленій пара и сжатого воздуха, приведенныя на фиг. 22 совершенно аналогичны діаграммамъ, представленнымъ на фиг. 20.

§ 17. Слѣдуетъ замѣтить, что въ послѣдней системѣ компрессоровъ съ увеличеніемъ числа паръ цилиндровъ коэффициентъ утилизаціи пара η_k возрастаетъ по закону:

$$\eta_k = p^{\frac{n^{k-2} + n^{k-3} + \dots + n^2 + n + 1}{n^{k-1} + n^{k-2} + \dots + n^2 + n + 1}} = \frac{\frac{1}{n} - 1}{1 - \frac{1}{n^k}} \dots \dots \dots (52)$$

Если

$$n = 1, \text{ то } \eta'_k = \frac{1}{p} p^{\frac{k-1}{k}} \dots \dots \dots (52)$$

гдѣ k—число всѣхъ цилиндровъ. Не трудно видѣть, что съ увеличеніемъ числа k, коэффициентъ утилизаціи пара η_∞ стремится къ

$\frac{1}{p} \sqrt[n]{r}$. При $p = 10$ атмосфер. мы получаемъ слѣдующія значенія для η_k при различныхъ величинахъ n и k :

$n = 1,4$						$n = 1$					
k	2	3	4	6	∞	k	2	3	4	6	∞
η_k	0.26	0.35	0.41	0.45	0.52	η_k	0.32	0.46	0.57	0.68	1.00

§ 18 Мы рассмотрѣли только тѣ системы паровыхъ компрессоровъ прямого дѣйствія, которыя имѣютъ уже въ технику примѣненіе или же представляются по своей конструкціи не болѣе сложными компрессорами, чѣмъ существующіе. Но этимъ вопросъ не исчерпывается, ибо возможно получить весьма большое число комбинацій воздушныхъ и паровыхъ цилиндровъ, удовлетворяющихъ необходимымъ условіямъ правильной работы сжатія воздуха. Переходя непосредственно отъ четырехцилиндровыхъ компрессоровъ къ шестицилиндровымъ, должно замѣтить, что послѣдніе точно также могутъ раздѣляться на компрессоры періодическаго и не періодическаго дѣйствія, и въ нихъ тоже окончательное сжатіе можетъ быть произведено свѣжимъ паромъ или же при первомъ, либо при вторичномъ его расширеніи. Различныя комбинаціи могутъ дать новыя системы. Разборъ этихъ системъ не входитъ въ задачу автора, ибо и четырехцилиндровые компрессоры прямого дѣйствія еще не получили широкаго распространенія въ технику. Можно ограничиться только указаніемъ, что изслѣдованіе можно вести совершенно аналогично изслѣдованію четырехцилиндровыхъ системъ. А priori можно сказать, что коэффициентъ утилизаціи пара не будетъ значительно отличаться отъ коэффициента утилизаціи пара у трехцилиндроваго съ двойнымъ расширеніемъ пара компрессора.

§ 19. Изъ всего вышесказаннаго можно сдѣлать слѣдующіе выводы:

1) Коэффициентъ утилизаціи пара у паровыхъ компрессоровъ прямого дѣйствія убываетъ по мѣрѣ возрастанія предѣльнаго давленія воздуха, которое компрессоръ способенъ развить.

2) Соотвѣтственнымъ выборомъ размѣровъ цилиндровъ и примѣненіемъ расширенія пара можно увеличить коэффициентъ утилизаціи пара въ паровыхъ компрессорахъ прямого дѣйствія въ нѣсколько разъ по сравненію съ простымъ двухцилиндровымъ компрессоромъ прямого дѣйствія.

3) Приведенныя въ настоящей статьѣ данныя могутъ служить для предварительнаго расчета компрессоровъ прямого дѣйствія; болѣе же детальный расчетъ можно произвести, пользуясь этими данными, графически. При этомъ нужно будетъ принять во вниманіе всѣ тѣ

обстоятельства, которые при настоящемъ изслѣдованіи, въ видахъ полученія общихъ, между собою сравнимыхъ результатовъ, были опущены.

Въ заключеніе приводимъ сводную діаграмму для относительныхъ коэффициентовъ утилизаціи пара различныхъ, рассмотрѣнныхъ нами системъ паровыхъ компрессоровъ прямого дѣйствія (фиг. 23). На оси абсциссъ въ этой діаграммѣ отложены давленія рабочаго пара p , а на оси ординатъ—величины, пропорціональныя произведеніямъ коэффициентовъ утилизаціи пара на давленіе максимальнаго сжатія воздуха (равное давленію p), причемъ относительный коэффициентъ для простаго двухцилиндроваго компрессора отмѣченъ цифрою 100, такъ что сравнительное увеличеніе коэффициента утилизаціи пара для различныхъ другихъ системъ выражается въ процентахъ по отношенію къ дѣйствію простаго двухцилиндроваго компрессора прямого дѣйствія.

Къ ст. С. П. Гомеля: „Сравнительный коэффициентъ утилизаціи пара въ паровыхъ компрессорахъ прямого дѣйствія“

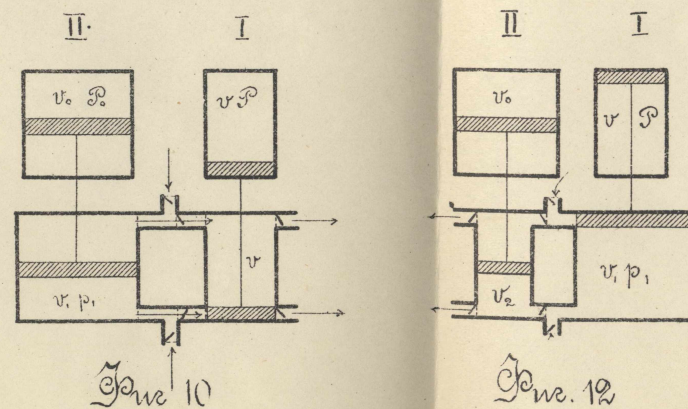
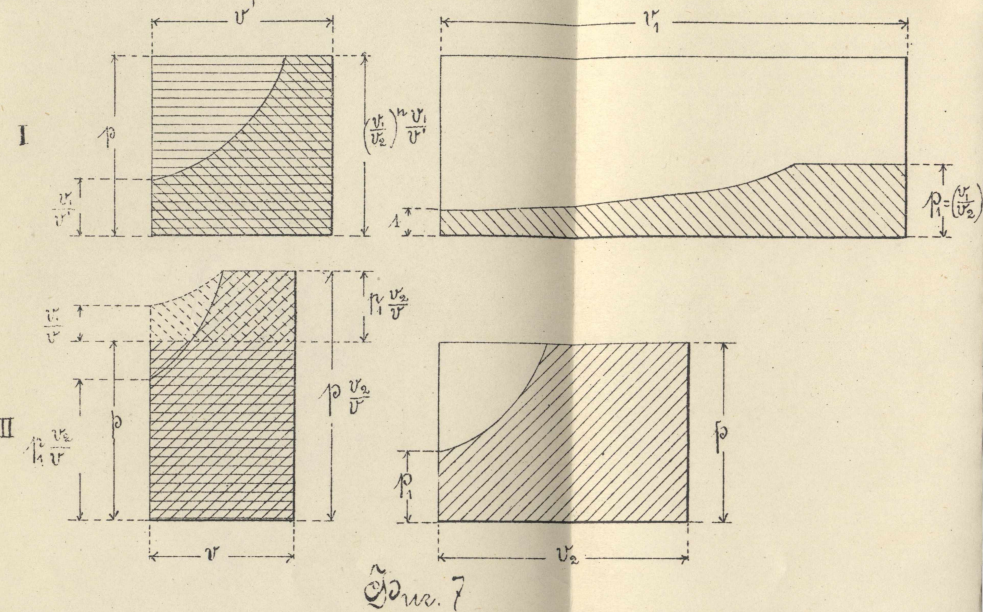
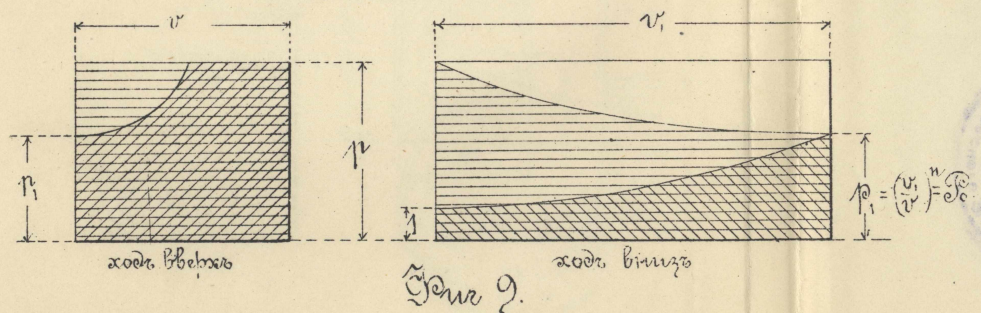
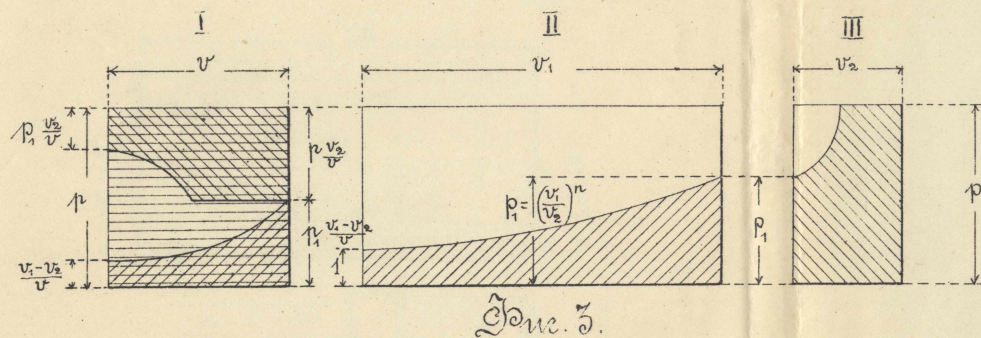
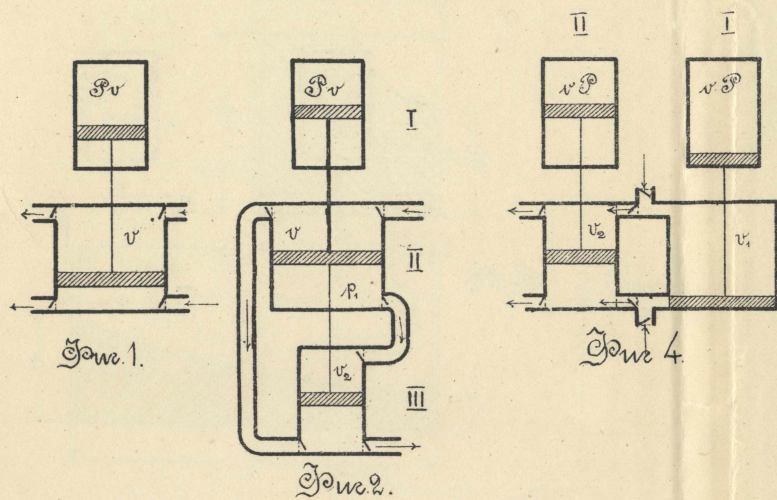
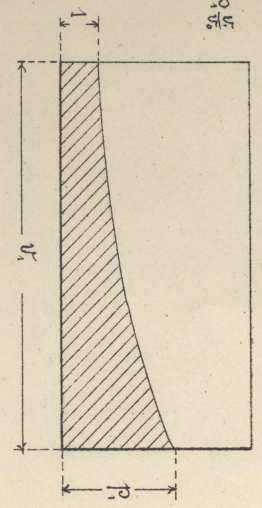
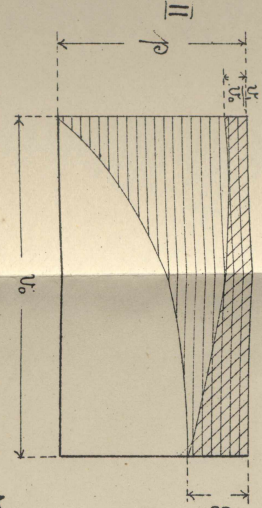
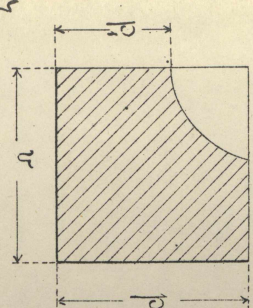
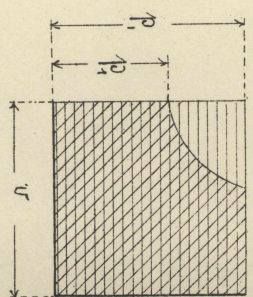
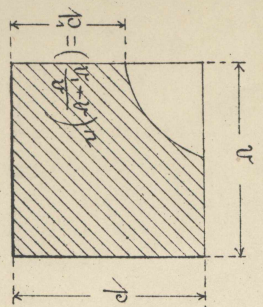
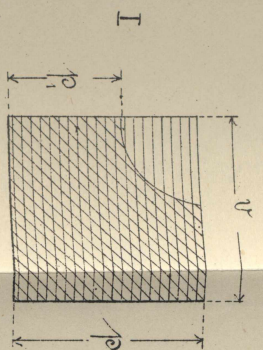
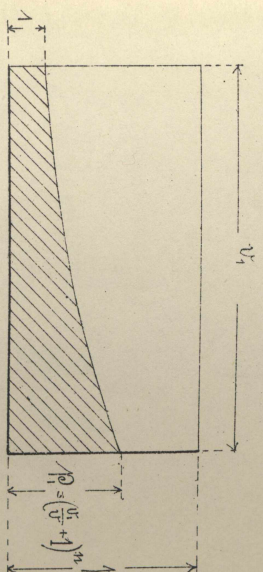
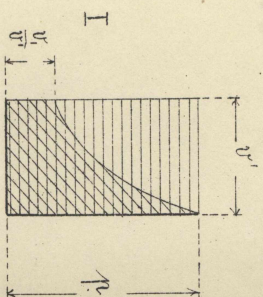
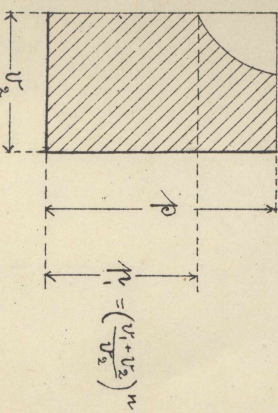
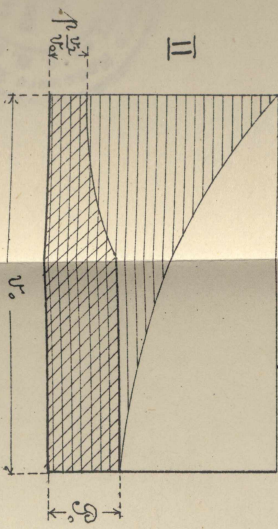
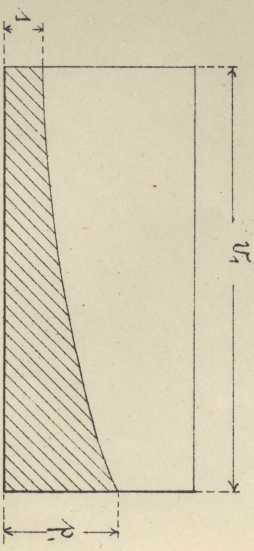
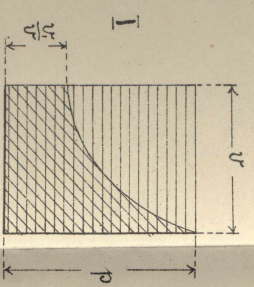
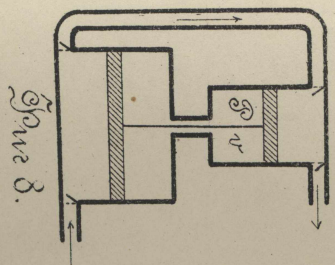
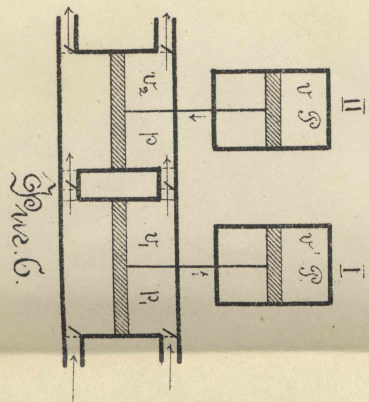


Табл. I.



Фиг. 5

Фиг. 11.



Фиг. 13.

Къ ст. С. П. Гомелля: „Сравнительный коэффициентъ утилизаціи пара въ паровыхъ компрессорахъ прямого дѣйствія“.

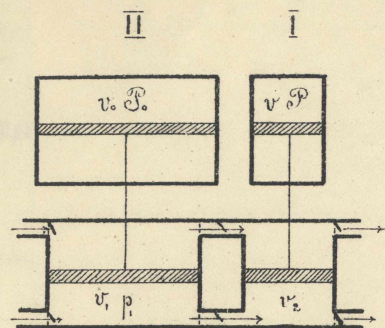


Fig. 14.

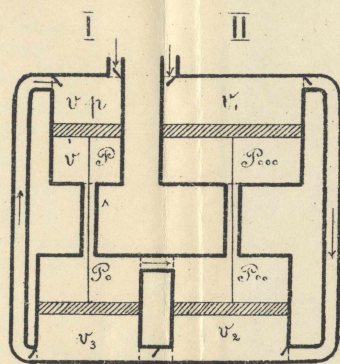


Fig. 21

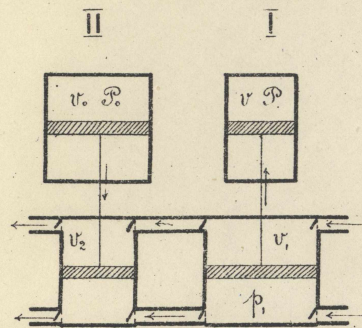


Fig. 17

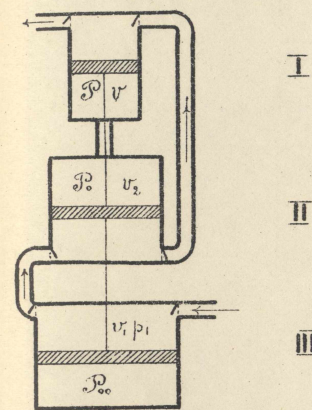


Fig. 19.

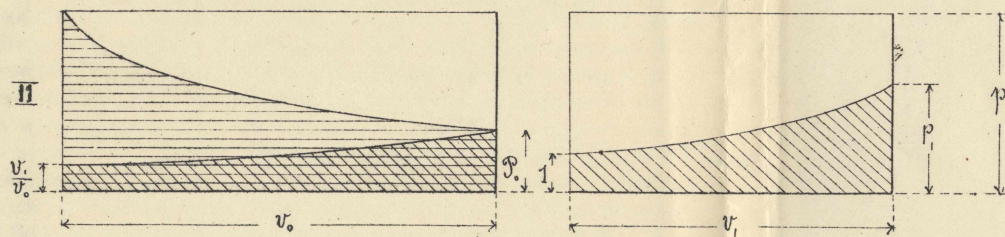
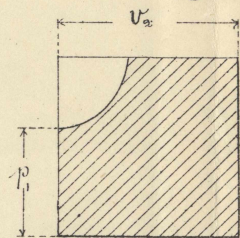
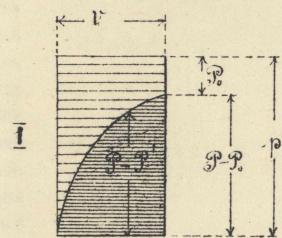


Fig. 15

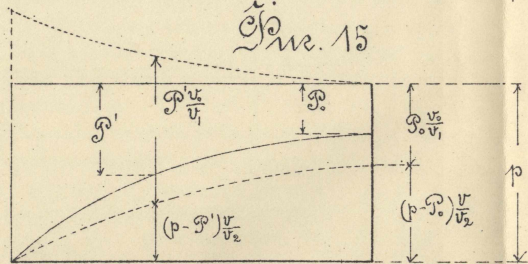


Fig. 16.

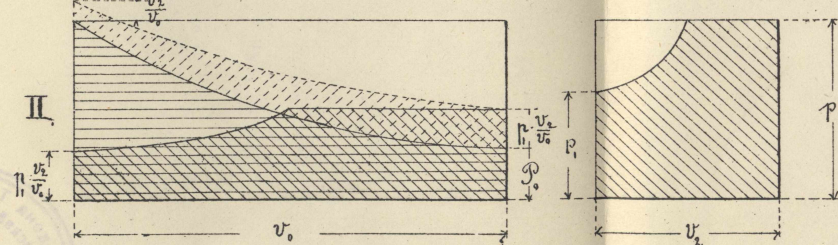
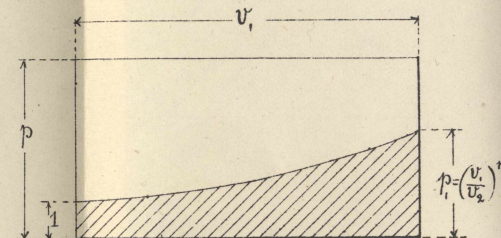
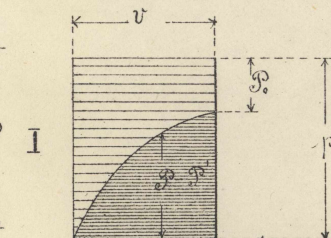


Fig. 18.

I

II

III

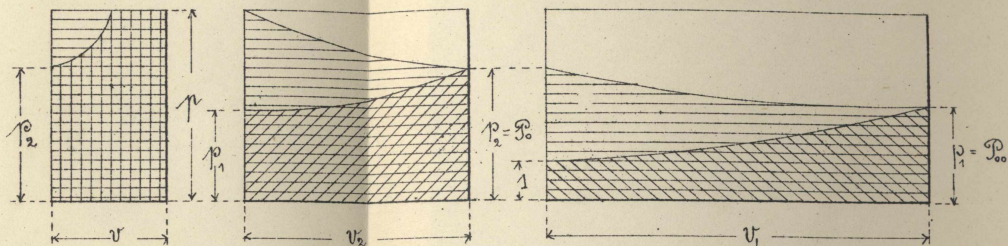


Fig. 20.

600%

500%

400%

300%

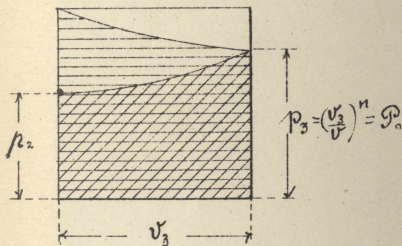
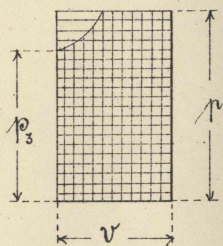
200%

100%

0

5

I



II

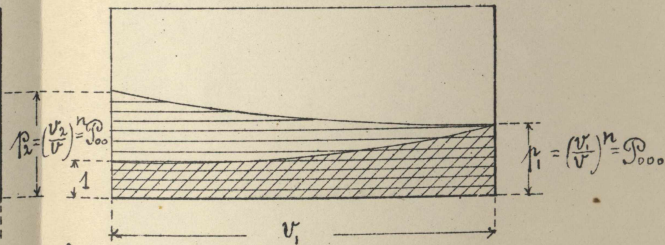
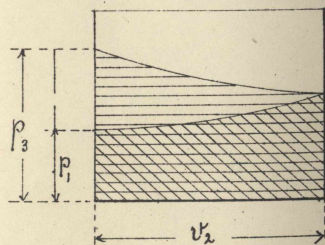


Fig. 22.

Табл. II.

