

ИЗВѢСТІЯ
Томскаго Технологическаго Института
Императора Николая II,
т. 9 1908. № 1.

III.

А. М. Крыловъ.

ТЕОРІЯ И РАСЧЕТЪ ИНЖЕКТОРА.

Глава I, II, III съ приложеніемъ 6 таблицъ чертежей. I—VI, 1—68.

Предисловіе.

Не смотря на широкое распространеніе инжектора для питанія заводскихъ котловъ, за нимъ прочно сохраняется установившаяся среди инженеровъ и техниковъ репутація прибора въ высшей степени капризнаго, ненадежнаго и потому мало пригоднаго для этой цѣли. Последнее ставятъ въ зависимость и отъ невозможности питать имъ котель регулярно и сообразно имѣющемуся расходу пара. Наоборотъ, въ полной мѣрѣ качества надежности, постоянства дѣйствія и полной регулярности питанія приписываются насосамъ.

Мнѣ кажется, происходитъ это отъ того, что рабочій процессъ насоса, покоющійся на простомъ и очевидномъ принципѣ равенства рабочего давленія имѣющимся сопротивленіямъ, легко понятенъ, въ то время какъ о рабочемъ процессѣ инжектора, основанномъ на непосредственномъ превращеніи тепловой энергіи въ кинетическую и послѣдней въ потенциальную, существуетъ весьма неопредѣленное представленіе.

Регулярности въ питаніи котла можно достигнуть и съ инжекторомъ, потому что у многихъ изъ нихъ можно имѣть значительно удаленные другъ отъ друга предѣлы maximum'a и minimum'a подачи. Нужно только съумѣть опредѣлить тѣ условія, при которыхъ это можетъ быть достигнуто въ каждомъ отдѣльномъ случаѣ.

Нашъ законъ объ установкѣ паровыхъ котловъ не регламентируетъ подробно, каковы должны быть питательные приборы у котла; говорится лишь о томъ, что ихъ должно быть два и что оба они должны дѣйствовать независимо другъ отъ друга.

Практика выработала правило, чтобы инжекторы ставились на двойное или даже тройное количество расходуемой котломъ воды. При такомъ инжекторѣ, конечно, можетъ быть и невозможно достигнуть непрерывнаго питанія, особенно въ случаѣ мало напряженной работы котла; но цѣна прибора столь мала, установка его требуетъ такъ мало мѣста, что всегда можно имѣть третій инжекторъ, по своей производительности какъ разъ отвѣчающій нормальнымъ условіямъ работы котла, и въ этомъ случаѣ подача воды можетъ быть всегда доведена до желаемой степени регулярности.

II.

Что касается первых двух недостатковъ, то они въ большей части случаевъ скорѣе могутъ быть отнесены къ капризу персонала, которому поручаютъ ухаживать за инжекторомъ, чѣмъ къ нему самому. При несоотвѣтствіи условій работы необходимымъ требованіямъ для возможности рабочаго процесса капризничать будетъ не только инжекторъ, но и насосъ, и любой механизмъ; и если этого не наблюдается въ дѣйствительности, то это потому, что эти процессы протекаютъ внѣшне, они болѣе очевидны и понятны.

Выяснить рабочій процессъ инжектора и на основаніи этого установить тѣ условія, при которыхъ онъ можетъ идти безукоризненно и вполне надежно, и было задачей, которую я преслѣдовалъ при составленіи этой книги.

Я далекъ отъ мысли, что она совершенно свободна отъ недостатковъ; наоборотъ, необходимость переработки нѣкоторыхъ частей, необходимость имѣть больше опытныхъ данныхъ, на которыя можно было бы съ увѣренностью положиться, вполне очевидна.

Не смотря на это, я полагаю, что и въ такомъ видѣ она можетъ принести пользу тѣмъ, кому приходится имѣть дѣло съ инжекторами, тѣмъ болѣе, что на русскомъ языкѣ, кромѣ брошюры г. Митте „Пароструйные приборы“ и нѣсколькихъ страницъ, посвященныхъ инжекторамъ, въ такихъ большихъ курсахъ, какъ „Паровые котлы“ г.г. Денна и Предтеченскаго, „Паровозы“ г. Мухачева, я ничего по вопросу объ инжекторахъ не встрѣчалъ. Я позволяю себѣ выразить надежду, что интересующіеся инжекторами и вообще пароструйными приборами лица не откажутъ въ своихъ замѣчаніяхъ и сообщеніи имѣющихся у нихъ данныхъ изъ практики для нужныхъ измѣненій и пополненій.

Помимо источниковъ, указанныхъ въ текстѣ, въ моемъ распоряженіи были еще слѣдующія пособія и статьи журналовъ.

Berthot, Traité de l'elevation des eaux.

Herrmann, E. Theorie des Injectors. Zeitschr. d. Oesterreich. Ing. und Archit. Ver., XXX, S. 114.

Richard, La chaudière locomotive et son outillage.

Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, vol. IX, p. 505. The best form of nozzles.

Pullen. Experimental Engineering.

Theorie d. Injectors, Cario. Zeitschr. für Dampfkessel und Maschinenbetrieb, 1904, S. 333.

ОГЛАВЛЕНИЕ.

	Стр.
Вступленіе. Общая теорія всасывающаго дѣйствія струи. . .	1— 8.
Паровая насадка. Истеченіе пара изъ насадокъ въ общемъ случаѣ и примѣнительно къ инжектору въ частности. Скорость истеченія пара при сходящейся конической и расходящейся насадкѣ. Опредѣленіе діаметра пасадки аналитически и графически помощью діаграммы температуръ-энтропій. Скорость истеченія мятаго пара. . .	9— 45.
Конденсаціонная насадка. Общія условія конденсаціи пара водой. Количество воды, необходимое для конденсаціи. Процессъ конденсаціи пара въ насадкѣ и вліяніе его на работу инжектора. Температура и плотность нагнетаемой воды.	46— 63.
Приемная насадка. Роль насадки въ работѣ инжектора. Законъ превращенія кинетической энергіи въ потенціальную. Профиль насадки при условіи равномерно-замедленнаго движенія струи въ ней. Потери энергіи въ насадкѣ	69— 82.
Теорія дѣйствія. Основныя уравненія въ теоріи инжектора. Расчетъ насадокъ при коэффициентѣ удара. Расчетъ ихъ при заданіи опредѣленнаго рабочаго противодавленія. Наибольшая и наименьшая мощность инжектора. Вліяніе начальной температуры воды и высоты всасыванія. Механическій и термическій коэффициентъ полезнаго дѣйствія	83—103.
Типы инжекторовъ. Конструктивное отличіе всасывающихъ инжекторовъ отъ невсасывающихъ	107—128.
Невсасывающіе инжекторы Schau, Фридмана, Nathan, Webb'a, Rue.	
Невсасывающіе инжекторы, работающіе мятымъ паромъ. Hamer, Davies, Metkalfе; Шефферъ и Буденбергъ; Holden & Brooke.	
Всасывающіе инжекторы. Оригинальный Жиффара. Metropolitan, Sellers'a; рестартингъ Шеффера и Буденберга, Holden & Brooke, Sirius, Siemens & Halske, Greham & Graven, Фридмана, Monitor, Penberthy.	

IV.

Стр.

Двойные или компаундъ-инжекторы, работающіе свѣжимъ и мятымъ паромъ. Davies & Metcalfe, Holden & Brooke.

Двойной Кертинга, Schutte, Metropolitan, Centralheizungs-und Apparate-Bau-Anstalt, Belfield, Buffalo, Albion.

Матеріалы для инжекторовъ, обработка частей ихъ, ремонтъ, изнашиваніе; правила установки и ухода . . . 128—133.
Испытаніе инжекторовъ. Цѣль испытанія. Графическое изображеніе результатовъ испытанія. Схемы установки инжектора для испытанія. 134—155.

ЗАМѢЧЕННЫЯ ОПЕЧАТКИ.

Стр.	Строка.	Напечатано.	Слѣдуетъ.
5	20 снизу	вытекающаго	вытекающаго
7	16 сверху	вѣса пара m къ вѣсу воды m_1	вѣса воды m къ вѣсу па- ра m_1
8	11 „	стдпени	степени
9	5 „	стверстіе	отверстіе
11	5 снизу	объему вѣса единицы	объему единицы
13	13 сверху	Roche	Rochet
17	19 „	соотніеніе	соотношеніе
18	7 „	извѣстнаго до предѣла	до извѣстнаго
18	11 снизу	$\gamma \frac{dG}{dp} = -u \frac{dz}{dp}$	$\gamma \frac{du}{dp} = -u \frac{dz}{dp}$
19	1 „	Напечатано: $pV = \frac{2}{k-1} p_1 v_1 - \frac{2}{k-1} p_1 v_1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}$	Слѣдуетъ: $pV = \frac{2}{k-1} p_1 v_1 - \frac{2}{k-1} p_1 v_1 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}$
		Слѣдуетъ: $pV = \frac{2}{k-1} p_1 v_1 - \frac{2}{k-1} p_1 v_1 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}$	
20	13 „	у входнаго	у выходнаго
25	3 сверху	по становка	ностановка
25	12 снизу	не-перегрѣтаго	перегрѣтаго
27		Неправильно показаны	звѣздочки у выносокъ.
32	6 сверху	поко	пока
39	8 „	идеитично	идентично
39	10 снизу	$w'^2 = \frac{2g(\lambda_0 - \lambda_1)}{A} =$	$w'^2 = \frac{2g(\lambda_0 - \lambda_1')}{A} =$
56	13 „	камера служить	камера f служить
57	5 сверху	воды	водѣ
73	3 снизу	$\frac{du}{dt} = \frac{g \cdot dp}{\gamma \cdot dl}$	$\frac{du}{dt} = - \frac{g \cdot dp}{\gamma \cdot dl}$
75	15 „	ввуди	внутри
78	5 „	$Z=20d_0$	$L=20d_0$
85	8 сверху { 3 снизу }	p'	p_1
94	16 „	$\left(\frac{d_0}{d_s} \right)^2 = \frac{\pi \gamma_s \dots}{2(\dots)}$	$\left(\frac{d_0}{d_s} \right)^2 = \frac{\pi \gamma_s \dots}{2(\dots)}$
98	10 сверху	$(p+1) \text{ kgr.}$	$(P+1) \text{ kgr.}$
100	форм. (26a)	$Q=0,04 \cdot d_s \cdot V \sqrt{\alpha p}$	$Q=0,04 d_s \gamma_s V \sqrt{\alpha p}$
102	„ (28b)	знаменатель $t-t_a$	t_e-t_a
115	5 „	всасывающую	всасывающую

Вступленіе.

Инджекторъ принадлежитъ къ большой и непрерывно разрастающейся въ своемъ разнообразіи группѣ струйныхъ приборовъ. Въ основу дѣйствія такого прибора, пока въ качествѣ работающаго тѣла мы имѣемъ дѣло со струей жидкости, должна быть положена механическая теорія удара; примѣненіе пара или какого-либо газообразнаго вещества въ качествѣ работающей жидкости вводитъ въ теорію дѣйствія прибора термодинамическій принципъ; наконецъ, въ случаѣ, когда перемѣщаемая жидкость, прежде чѣмъ получить въ приборѣ необходимую для движенія и преодоленія сопротивленій живую силу, должна быть поднята на нѣкоторую высоту, къ теоріи дѣйствія присоединяется третій принципъ,—всасывающаго дѣйствія протекающей струи. Каковы бы ни были жидкости рабочая и воспринимающая отъ нея ударъ, принципъ дѣйствія струйнаго прибора остается неизмѣннымъ,—это ударъ двухъ тѣлъ и слѣдующее за нимъ совмѣстное уже движеніе обѣихъ жидкостей.*) Особенно интереснымъ является, конечно, приборъ не только нагнетающій или перемѣщающій на значительную высоту какую-либо жидкость, подводимую къ нему подъ слабымъ напоромъ, но предварительно засасывающій ее на извѣстную высоту и затѣмъ уже сообщаящій ей запасъ энергіи, необходимый и достаточный для преодоленія имѣющихся сопротивленій. Поэтому, прежде чѣмъ перейти къ изученію дѣйствія инджекторовъ, мы рассмотримъ въ общемъ случаѣ всасывающее дѣйствіе протекающей струи.

Положимъ по трубѣ а (фиг. 1) прѣтекаетъ какая-либо жидкость, находящаяся подъ давленіемъ $p \frac{\text{kg}}{\text{mtr}^2}$; труба кончается конической сходящейся насадкой, площадь выходнаго отверстія которой ω , площадь сѣченія трубы ω_1 . Вытекая изъ отверстія, жидкость вступаетъ въ трубу b, сѣченіе которой ω_2 ; давленіе у входнаго отверстія трубы b назовемъ $p_1 \frac{\text{kg}}{\text{mtr}^2}$.

Труба b соединена съ герметически закрытымъ сосудомъ c; труба съ краномъ d соединяетъ внутренность этого сосуда съ резервуаромъ воды. Въ сосудѣ c и примыкающихъ къ нему трубахъ предъ пускомъ

*) Если мы расширимъ нѣсколько понятіе о жидкости, то сюда же могутъ быть отнесены вами сыпучія тѣла, какъ песокъ, мука, пыль и проч.

струи рабочей жидкости по трубѣ а находится воздухъ, давленіе котораго, конечно, равно p_1 .

Положимъ теперь, что изъ насадки а началось истеченіе жидкости съ опредѣленной и достаточно большой скоростью для того, чтобы она, не сливаясь въ сосудѣ с, входила непосредственно въ трубу в. На нѣкоторомъ разстояніи отъ входнаго отверстія жидкость заполнитъ все сѣченіе трубы в и вытолкнетъ находящійся предъ нею воздухъ; вслѣдствіе нарушенія равновѣсія воздухъ, находящійся въ сосудѣ с, станетъ притекать ко входному отверстию трубы в; частицы его, то подъ ударами частицъ жидкости, то треніемъ о поверхность струи будутъ увлекаться ею, и по трубѣ в вмѣстѣ съ жидкостью выходить въ пространство. По истеченіи нѣкотораго промежутка времени изъ сосуда с будетъ удалена часть воздуха, и въ немъ наступитъ разрѣженіе; если теперь открыть кранъ на трубѣ d, то начнется всасываніе воды изъ резервуара.

Разсмотримъ установившійся процессъ; пусть $p_{x \frac{\text{kg}}{\text{mtr}^2}}$ то давленіе, которое наступаетъ въ сосудѣ с послѣ удаленія изъ него нѣкоторой части воздуха. Кроме того, обозначимъ:

γ —плотность вытекающей жидкости, которую принимаемъ во все время истеченія постоянной;

v —скорость струи въ mtr. въ сек. при выходѣ изъ насадки;

v_1 — „ жидкости въ трубѣ в;

φ —скоростной гидравлическій коэффициентъ;

ψ —коэффициентъ сжатія струи.

Въ началѣ истеченія въ сосудѣ с давленіе равно $p_1 \frac{\text{kg}}{\text{mtr}^2}$; мы можемъ написать слѣдующее равенство:

$$\frac{1}{2g} \left(\frac{v}{\varphi} \right)^2 = \frac{p - p_1}{\gamma} + \frac{1}{2g} \left(\frac{v}{\varphi} \right)^2 \left(\frac{\psi \omega}{\omega_1} \right)^2 \quad \text{или}$$

$$v = \varphi \sqrt{2g \frac{p - p_1}{\gamma} \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{\psi \omega}{\omega_1} \right)^2}} \dots \dots (1).$$

Для простоты разсмотрѣнія положимъ, что ω_1 настолько больше ω , что при $\psi < 1$, вся дробь $\left(\frac{\psi \omega}{\omega_1} \right)^2$ очень мала по сравненію съ единицей; опуская ее, будемъ имѣть вмѣсто предыдущаго равенства

$$v = \varphi \sqrt{2g \frac{p - p_1}{\gamma}} \dots \dots \dots (1a).$$

Когда въ сосудѣ с установится давленіе $p_x \frac{\text{kg}}{\text{mtr}^2}$, то скорость истеченія будетъ (аналогично 1a)

$$v = \varphi \sqrt{2g \frac{p - p_x}{\gamma}} \dots \dots \dots (1b).$$

Въ трубѣ в жидкость отъ скорости v переходитъ почти внезапно къ скорости v_1 ; появляется ударъ и сопряженная съ нимъ потеря энергій, для которой, относя ее къ единицѣ вѣса, мы получимъ выраженіе

$$\frac{1}{2g}(v-v_1)^2.$$

Пусть длина трубы в равна l_2 , а діаметръ ея d_2 ; протекая по ней, жидкость испытываетъ треніе о стѣнки, и если ξ коэффициентъ тренія, то зависящая отъ него потеря энергій можетъ быть оцѣнена выраженіемъ:

$$\xi \frac{v_1^2}{2g} \frac{l_2}{d_2}.$$

Итакъ, выходя изъ насадки, струя обладаетъ энергіей $\frac{v^2}{2g}$, если отнесемъ ее къ единицѣ вѣса, при чемъ въ камерѣ с она находится подъ давленіемъ p_x ; давленіе у выходного отверстія трубы в равно p_1 ; пусть плотность жидкости въ трубѣ в будетъ γ_1 .

По закону сохраненія энергій можемъ написать такое равенство:

$$\frac{v^2}{2g} + \frac{p_x - p_1}{\gamma_1} = \frac{v_1^2}{2g} + \xi \frac{v_1^2}{2g} \frac{l_2}{d_2} + \frac{1}{2g}(v-v_1)^2 \quad \text{или}$$

послѣ преобразованій

$$\frac{p_x - p_1}{\gamma_1} = \frac{1}{2g} \left[v_1^2 \left(2 + \xi \frac{l_2}{d_2} \right) - vv_1 \right] \dots \dots \dots (2).$$

При установившемся движеніи въ трубѣ в съ постоянной плотностью γ_1 мы должны имѣть:

$$\omega v = \omega_2 v_1 \quad \text{или} \quad v_1 = \frac{\omega}{\omega_2} v = \alpha v.$$

Такъ какъ по (1а)

$$v = \varphi \sqrt{2g \frac{p_x - p_1}{\gamma}}$$

то

$$v_1 = \alpha \varphi \sqrt{2g \frac{p_x - p_1}{\gamma}}$$

Дѣлая подстановку въ равенствѣ (2), находимъ

$$\frac{p_x - p_1}{\gamma_1} = \frac{\alpha v^2}{2g} \left[\alpha \left(2 + \xi \frac{l_2}{d_2} \right) - 2 \right]$$

Такъ какъ длина насадокъ въ струйныхъ аппаратахъ очень мала, то членъ, выражающій потерю отъ тренія, можно опустить и мы получаемъ

$$p_x - p_1 = \frac{\alpha v^2 \gamma_1}{g} (\alpha - 1) \dots \dots \dots (3)$$

Здѣсь $\alpha = \frac{\omega}{\omega_2}$ и такъ какъ $\omega_2 > \omega$, то α меньше единицы.

Правая часть равенства, слѣдовательно, отрицательна и равенство возможно лишь тогда, когда будетъ отрицательна и лѣвая часть его. Это приводитъ насъ къ заключенію, что $p_x < p_1$, т. е. что въ сосудѣ с дѣйствительно получается разрѣженіе по отношенію къ наружному давленію у выходного отверстія трубы b.

Допустимъ, что p_1 — атмосферное давленіе; тогда по открытіи крана d, если высота трубы надъ уровнемъ воды въ резервуарѣ не превосходитъ величины $(10000 - p_x) : 1000$ при полномъ отсутствіи какихъ бы то ни было потерь, вода изъ резервуара будетъ засасываться въ сосудъ с.

Въ равенствѣ (3) замѣнимъ скорость v изъ (1b); тогда имѣемъ

$$p_1 - p_x = 2\alpha\varphi^2\gamma_1 (1 - \alpha) \frac{p - p_x}{\gamma} \dots \dots \dots (4)$$

Замѣтимъ, что $p - p_x = p - p_1 + p_1 - p_x$; если вмѣсто разности $p - p_x$ въ правой части вставимъ указанную величину, то найдемъ окончательное выраженіе

$$p_1 - p_x = \frac{2\alpha\varphi^2\gamma_1 (1 - \alpha) (p - p_1)}{\gamma - 2\alpha\varphi^2\gamma_1 (1 - \alpha)} \dots \dots \dots (5)$$

Равенство (5) даетъ намъ величину разрѣженія въ резервуарѣ с; оно вмѣстѣ съ тѣмъ характеризуетъ всасывающую способность струйнаго прибора. Мы видимъ, что высота всасыванія прямо пропорціональна разности давленій $(p - p_1)$; если $\alpha = 1$, то становятся невозможными разрѣженіе въ сосудѣ с, а, слѣдовательно, и присасываніе воды изъ резервуара; въ зависимости отъ α , т. е. отношенія $\frac{\omega}{\omega_2}$, всасывающая способность струи достигаетъ maximum'a при $\alpha = 1/2$, т. е. при $\omega_2 = 2\omega$ — значеніе, опредѣляемое съ помощью производной функции; кромѣ того, всасывающая способность тѣмъ больше, чѣмъ больше γ_1 плотность струи въ трубѣ b.

Если теперь въ лѣвую часть равенства (4) поставимъ вмѣсто разности $p_1 - p_x$ равную ей $(p - p_x) - (p - p_1)$ и сдѣлаемъ преобразованія, то получимъ такое выраженіе:

$$p - p_x = \frac{(p - p_1)\gamma}{\gamma - 2\alpha\varphi^2\gamma_1(1 - \alpha)} \dots \dots \dots (6).$$

Этимъ равенствомъ опредѣляется разность давленій, подъ вліяніемъ которой происходитъ истеченіе въ резервуаръ с. Она характеризуетъ намъ количество кинетической энергіи, приобретаемой струей; такъ какъ

$v = \varphi \sqrt{2g \frac{p - p_x}{\gamma}}$, то кинетическая энергія струи будетъ

$$\frac{v^2}{2g} = \frac{\varphi^2 (p - p_1)}{\gamma - 2\alpha\varphi^2\gamma_1 (1 - \alpha)} \dots \dots \dots (7).$$

Видно, что кинетическая энергія струи прямо пропорціональна той же разности давленій ($p - p_1$). Не трудно показать, что при $\alpha = 1/2$ и для кинетической энергіи струи получается наибольшая величина, чѣмъ въ случаяхъ $\alpha < 1/2$, при неизмѣнности всѣхъ прочихъ условій.

Итакъ, вотъ тотъ общій принципъ, на основаніи котораго является возможнымъ устройство всасывающихъ струйныхъ приборовъ.

Рабочей жидкостью можетъ служить паръ, вода, воздухъ; жидкостью всасываемой тѣ же вещества, любой газъ и нѣкоторые сыпучія тѣла. Но для устройства струйнаго прибора нагнетающаго, при чемъ давленіе резервуара, въ который производится нагнетаніе, равно или больше давленія сосуда, изъ котораго беремъ рабочую жидкость, необходимо еще новое условіе. Въ дальнѣйшемъ мы займемся исключительно разсмотрѣніемъ теоріи инжектора, изученіемъ процесса и работы, происходящихъ въ немъ, отысканіемъ наиболѣе правильныхъ очертаній и формы насадокъ его и наиболѣе выгоднаго положенія ихъ относительно другъ друга. Здѣсь же, замѣтивъ, что приведенная выше теорія всасывающаго дѣйствія струи очень долго лежала въ основѣ расчетовъ насадокъ инжектора, работающаго упругой жидкостью, ознакомимся съ самимъ приборомъ, способомъ его дѣйствія и употребительной номенклатурой. На фиг. (2) схематически изображенъ инжекторъ Жиффара. По трубѣ *a* изъ котла притекаетъ паръ; шпинделемъ *g* можно регулировать количество вытекающаго пара или совершенно прекратить истеченіе его изъ конической *паровой насадки*. Входя съ большою скоростью въ камеру *H* и свободно въ ней расширяясь, при чемъ струя принимаетъ видъ расходящагося конуса, паръ производитъ въ ней разрѣженіе, удаляясь вмѣстѣ съ воздухомъ по трубѣ *d*. Вода всасывается изъ находящагося ниже резервуара по трубѣ въ камеру *H* и конденсируетъ паръ; одновременно она получаетъ ударъ отъ струи пара и съ значительной скоростью смѣсь ея съ несгустившимся еще паромъ выходитъ изъ *конденсационной насадки b*; выходнымъ отверстіемъ ея смѣсь направляется въ *пріемную насадку c*, откуда, преодолевъ давленіе на клапанъ со стороны сосуда, въ который производится нагнетаніе, по трубѣ направляется къ послѣднему.

Эти три насадки—паровая, конденсационная и пріемная и являются существенно важными частями прибора.

Въ дальнѣйшемъ мы разсмотримъ болѣе подробно роль каждой изъ нихъ и укажемъ вліяніе размѣра и формы ея на работу инжектора, на его мощность и экономичность дѣйствія; здѣсь же упомянемъ лишь, что данная форма паровой насадки будетъ тѣмъ выгоднѣе, чѣмъ меньше расходуется ею пару; при этомъ противодавленіе, количество подаваемой приборомъ воды, температура всасываемой воды должны быть неизмѣнны.

Чѣмъ лучше данная форма конденсаціонной насадки, тѣмъ совершеннѣе будетъ происходить въ ней конденсація пара; въ зависимости отъ этого тѣмъ больше будетъ плотность смѣси при выходѣ изъ этой насадки, тѣмъ большимъ запасомъ кинетической энергіи будетъ обладать струя, входя въ приѣмную насадку.

Наконецъ, чѣмъ больше площадь сѣченія самаго узкаго мѣста приѣмной насадки, тѣмъ большее количество воды можетъ подать инжекторъ при той же скорости ея; чѣмъ правильнѣе форма профиля насадки въ продольномъ разрѣзѣ, тѣмъ большее количество кинетической энергіи струи будетъ преобразовано въ полезную работу струи.

Жиффаръ и первые послѣдователи его подбирали надлежащія формы профиля насадокъ и размѣры поперечныхъ сѣченій ихъ путемъ опыта. Такъ, напримѣръ, при одномъ и томъ же очертаніи для цѣлаго ряда насадокъ, отличавшихся другъ отъ друга только размѣрами поперечныхъ сѣченій, составлялись таблицы, въ которыхъ указывались расходъ пара и наибольшее и наименьшее количества подаваемой инжекторомъ воды. Сравненіе между собою данныхъ, заключающихся въ такихъ таблицахъ, для насадокъ одного и того же размѣра, но съ различными профилями очертанія, и насадокъ, различавшихся лишь размѣрами поперечнаго сѣченія, указывало, какая изъ нихъ является наиболѣе цѣлесообразной и выгодной.

На основаніи данныхъ, полученныхъ путемъ многочисленныхъ опытовъ, Жиффаръ предложилъ опредѣлять скорость струи въ самомъ узкомъ сѣченіи приѣмной насадки, въ *устьѣ* ея, по слѣдующей формулѣ:

$$\text{скорость} = V \sqrt{2ghk}.$$

Здѣсь g —ускореніе силы тяжести—9,81 mtr.—sec;

h —высота столба воды въ mtr, соотвѣтствующая давленію пара въ котлѣ и

k —коэффициентъ, вводимый для поправки отъ встрѣчаемыхъ струей на пути къ котлу сопротивленій. равный 1,7—2,0.

Жиффаръ указываетъ далѣе, что этотъ коэффициентъ k долженъ представлять собою отношеніе площади выходнаго отверстія паровой насадки къ площади устья приѣмной насадки; таково должно быть отношеніе для случая, когда вытекающій изъ насадки паръ имѣетъ ту же плотность, что и въ котлѣ, и когда онъ весь конденсируется подводимой водой. Въ дѣйствительности, ни то, ни другое условіе не бываютъ соблюдены въ точности; поэтому, коэффициентъ k опредѣляется болѣе сложной формулой въ зависимости отъ давленій пара въ котлѣ и въ конденсаціонной насадкѣ и отъ плотностей пара въ котлѣ и при выходѣ изъ паровой насадки.

Механическая теорія инжектора основывается на теоремѣ о сохраненіи количествъ движенія двухъ ударяющихся тѣлъ до и послѣ удара.

Пренебрегая малой величиной скорости входа воды въ конденсаціонную насадку и обозначая чрезъ w_1 — скорость выхода пара изъ паровой насадки и чрезъ m_1 — вѣсъ его въ единицу времени; чрезъ u_1 — скорость струи при выходѣ изъ конденсаціонной насадки, а вѣсъ смѣси чрезъ $m + m_1$, гдѣ m — вѣсъ воды, подводимой къ инжектору соответственно вѣсу пара m_1 , согласно этой теоремы будемъ имѣть равенство

$$w_1 m_1 = (m + m_1) u_1$$

$$\text{или} \quad u_1 = w_1 \frac{1}{1 + \frac{m}{m_1}}$$

Для того, чтобы инжекторъ нагнеталъ воду въ котель, необходимо, чтобы эта скорость u_1 была равна или больше той скорости, съ которой вода вытекала бы чрезъ приѣмную насадку подъ напоромъ, соответствующимъ давленію въ котлѣ. Итакъ, необходимо условіе $u_1 \geq u_2$, или

$$w_1 \frac{1}{1 + \frac{m}{m_1}} \geq u_2 \dots \dots (8)$$

Какъ сказано, скорость u_2 опредѣляется давленіемъ котла или резервуара, въ который инжекторъ подаетъ воду. Ясно, что отношеніе вѣса пара m къ вѣсу воды m_1 должно быть тѣмъ меньше, чѣмъ выше давленіе, противъ котораго работаетъ струя, и наоборотъ, чѣмъ ниже это давленіе, тѣмъ больше можетъ быть это отношеніе при одной и той же скорости w_1 въ обоихъ случаяхъ.

Это въ дѣйствительности и наблюдается для большей части имѣющихся въ практикѣ инжекторовъ, паровое сопло которыхъ представляетъ сходящійся конусъ.

Не вдаваясь пока въ разсмотрѣніе вопроса о скорости истеченія пара изъ насадокъ, замѣтимъ лишь, что общепринятая формула для опредѣленія скорости истеченія пара изъ конической сходящейся насадки даетъ при различныхъ давленіяхъ отъ 2-хъ до 14 атм. очень мало отличающіяся величины. Кинетическая энергія струи остается почти безъ измѣненія, поскольку она зависитъ отъ скорости; но при этомъ возрастаетъ количество вытекающаго въ единицу времени пара; поэтому, естественно, что при увеличеніи давленія, а, слѣдовательно, и скорости u_2 , необходимо должно уменьшаться отношеніе $\frac{m}{m_1}$.

Очень незначительное приращеніе кинетической энергіи струи съ увеличеніемъ давленія ясно указываетъ на нераціональность постановки коническихъ сходящихся насадокъ. Непосредственнымъ опытомъ не трудно убѣдиться, что струя вытекающаго пара по выходѣ изъ отверстія на разстояніи 3—4 діаметровъ отъ него становится видимой и принимаетъ

въ свою очередь форму конуса, обращеннаго вершиной къ отверстию. Такую форму струя принимаетъ единственно только благодаря имѣющему мѣсто расширенію пара въ направленіи, перпендикулярномъ его движенію. Моментальные фотографическіе снимки такой струи указываютъ еще и на присутствіе вихревого движенія частицъ внутри ея; (см. фиг. 3 и 4) *) этимъ, разумѣется, нарушается концентрація удара и появляется потеря.

Но если дать возможность пару, какъ упругой жидкости, свободно расширяться въ направленіи движенія, то по выходѣ изъ отверстія струи имѣетъ видъ, указанный на фиг. 5. Ударъ такой струи обладаетъ большимъ эффектомъ, и въ очень высокой стѣпени возрастаетъ кинетическая энергія струи.

Если въ (8) примемъ знакъ равенства, то для сохраненія неизмѣннымъ отношенія $\frac{m}{m_1}$ при увеличеніи u_2 очевидно необходимо соответственное увеличеніе w_1 , скорости истеченія пара; такъ какъ дѣйствіе прибора основано на ударѣ двухъ тѣлъ, то неизбѣжна потеря кинетической энергіи; въ этомъ и заключается причина того, что съ механической точки зрѣнія приборъ является весьма несовершеннымъ. Удерживая прежнія обозначенія, мы можемъ потерю энергіи одѣнить формулой

$$\frac{1}{2g} (w_1 - u_1)^2 \cdot \frac{m \cdot m_1}{m + m_1};$$

мы видимъ, что она будетъ тѣмъ больше, чѣмъ больше скорость w_1 . По отношенію къ инжектору, одаако, это не имѣетъ важнаго значенія. Дѣло въ томъ, что увеличенія скорости истеченія пара мы можемъ достигнуть только за счетъ расширенія его въ насадкѣ, безъ увеличенія количества его въ единицу времени; во вторыхъ, потому, что потерянная на ударъ кинетическая энергія въ видѣ тепла будетъ принесена водою обратно въ котель.

Такимъ образомъ постановка насадки иной формы, при которой возможно расширеніе пара, дастъ возможность инжектору нагнетать воду въ томъ же количествѣ при бѣльшемъ противодавленіи или въ бѣльшемъ количествѣ при томъ же противодавленіи; если то и другое остаются неизмѣнными, то тѣхъ же результатовъ можно будетъ достигнуть при меньшемъ расходѣ пара.

*) О видѣ струи см. Митте, Пароструйные приборы.

Паровая насадка.

Обратимся теперь къ вопросу объ истеченіи пара изъ насадокъ. Пусть x характеризуетъ степень сухости пара (удѣльное паросодержаніе, т. е. вѣсъ сухого пара, заключеннаго въ единицѣ вѣса влажнаго пара); давленіе пара дано. Положимъ теперь, что у насъ имѣется резервуаръ большой емкости, изъ котораго черезъ хорошо округленное стверстіе по трубѣ малаго діаметра вытекаетъ паръ въ какую-либо среду (фиг. 6). Допустимъ, что стѣнки резервуара имѣютъ температуру находящагося въ немъ пара и что между ними и послѣднимъ нѣтъ обмѣна тепломъ. Чтобы возможно было истеченіе пара, давленіе его въ резервуарѣ должно быть больше давленія среды, въ которую происходитъ истеченіе; чтобы процессъ истеченія имѣлъ характеръ явленія непрерывнаго, и движеніе пара было установившимся, необходимо предположить, что разность давленій резервуара и среды—величина конечная. Разъ это такъ, то процессъ истеченія будетъ процессомъ необратимымъ, и къ нему мы можемъ примѣнить лишь первый принципъ термодинамики, алгебраическое выраженіе котораго таково

$$dQ = A (dE + dW + dK) \dots \dots (1)$$

Здѣсь dQ —безконечно малое количество тепла;

dE —приращеніе внутренней энергіи;

dW внѣшняя работа;

dK —приращеніе кинетической энергіи;

A —термическій эквивалентъ работы.

Равенство (1) выражаетъ собой общій законъ сохраненія энергіи.

Обозначимъ черезъ E_1 и E_2 внутреннюю энергію пара въ резервуарѣ, гдѣ скорость его пусть будетъ w_1 , и въ какомъ либо сѣченіи трубы, гдѣ скорость его пусть будетъ w_2 ; пусть состояніе пара въ резервуарѣ характеризуется величинами p_1 и v_1 , а въ сѣченіи, гдѣ скорость w_2 —величинами p_2 и v_2 ; p и v —давленія и объемъ единицы вѣса пара.

Внутренняя энергія пара при состояніи его (p_1, v_1) будетъ

$$\frac{q_1 + p_1 x_1}{A}, \text{ а при состояніи } (p_2, v_2) = \frac{q_2 + p_2 x_2}{A};$$

здѣсь q_1 , p_1 и q_2 , p_2 находятся по таблицамъ для водяныхъ паровъ

соотвѣтственно даннымъ p_1 и p_2 ; x_1 и x_2 опредѣляются опытно или для нихъ выбираемъ подходящее значеніе.

Вытекая изъ резервуара въ трубу, паръ будетъ расширяться; внутренняя энергія его будетъ уменьшаться, и это уменьшеніе ея можетъ быть представлено разностью $E_1 - E_2$, т. е.

$$\frac{q_1 + p_1 x_1}{\Lambda} - \frac{q_2 + p_2 x_2}{\Lambda_2}$$

Измѣненіе внутренней энергіи при сдѣланномъ нами предположеніи адиабатическаго процесса можетъ быть представлено и въ такомъ видѣ

$$dE = \int_{v_1}^{v_2} p dv.$$

(Мы относимъ явленіе къ единицѣ вѣса въ единицу времени). Приращеніе кинетической энергіи можетъ быть представлено разностью

$$\frac{w_2^2}{2g} - \frac{w_1^2}{2g}$$

Намъ остается еще опредѣлить приращеніе работы внѣшнихъ силъ. Изъ низъ прежде всего надо обратить вниманіе на работу силы тяжести: вліяніе ея, однако, въ инжекторѣ, благодаря незначительности размѣровъ насадки, такъ мало, что ею можно пренебречь безъ большой погрѣшности для конечнаго результата.

Расчленимъ протекающую въ трубѣ струю пара на пучекъ струекъ малаго поперечнаго сѣченія; каждая такая струйка испытываетъ на периферіи отъ смежныхъ съ ней нѣкоторое давленіе, но такъ какъ это давленіе направлено перпендикулярно къ оси, т. е. къ направленію перемѣщенія частицъ пара, то работа этого давленія равна 0.

Разобьемъ теперь струю на элементы сѣченіями, перпендикулярными оси, проведенными бесконечно близко одно отъ другого; благодаря расширенію пара, давленія на концевыхъ плоскостяхъ элемента будутъ различны; по отношенію къ этому элементу давленія смежныхъ съ нимъ спереди и сзади будутъ силами внѣшними. Намъ и нужно опредѣлить сумму работъ такихъ элементарныхъ силъ, которая даетъ намъ искомое приращеніе работы внѣшнихъ силъ. Обозначимъ площадь поперечнаго сѣченія большаго резервуара чрезъ F_1 , площадь поперечнаго сѣченія трубы F_2 ; выдѣлимъ объемъ пара $F_1 ds_1$, давленіе котораго p_1 ; пусть подъ вліяніемъ указанныхъ силъ перемѣщенія его будутъ послѣдовательно ds_1' , ds_1'' , ds_1''' , и т. д. и соотвѣтствующія опредѣленнымъ положеніямъ его давленія p_1' , p_1'' , p_1''' и т. д.; для трубы въ томъ мѣстѣ, гдѣ скорость пара мы принимали w_2 , давленіе его равно p_2 ; пусть давленія въ предшествующихъ положеніяхъ элемента $F_2 ds_2$ будутъ p_2' , p_2'' , p_2''' и т. д., а перемѣщенія его предъ этимъ соотвѣтственно ds_2' , ds_2'' , ds_2''' и т. д.

Съ передней грани перваго элемента давленіе на него будетъ $F_1 p_1$; если его перемѣщеніе въ единицу времени ds_1 , то работа этого давленія на элементъ будетъ $F_1 p_1 ds_1$; работа передняго давленія на элементъ при слѣдующемъ его перемѣщеніи будетъ $F_1 p_1' ds_1'$ и т. д.; работа давленія со стороны предпоследняго элемента предъ сѣченіемъ, гдѣ давленіе p_2 , будетъ $F_2 p_2 ds_2$; сумма этихъ работъ:

$$F_1(p_1 ds_1 + p_1' ds_1' + p_1'' ds_1'' + \dots) + F_2(\dots + p_2'' ds_2'' + p_2' ds_2' + p_2 ds_2).$$

Сумма такихъ элементарныхъ работъ, производимыхъ задними по отношенію къ элементу и его положенію давленіями, будетъ:

$$F_1(p_1' ds_1' + p_1'' ds_1'' + \dots) + F_2(\dots + p_2'' ds_2'' + p_2' ds_2' + p_2 ds_2).$$

Такъ какъ давленія $p_1', p_1'', \dots$ и p_2'', p_2', p_2 являются противоадавленіями, т. е. дѣйствіе обусловленныхъ ими силъ направлено въ сторону, противоположную движенію, то вся вторая сумма должна быть взята съ отрицательнымъ знакомъ, это—отрицательная работа внѣшнихъ силъ. Вычитая ее изъ первой, мы найдемъ искомое приращеніе работы внѣшнихъ силъ, произведенной ими надъ струей. Итакъ, будемъ имѣть:

$$dW = F_1 p_1 ds_1 - F_2 p_2 ds_2.$$

Если мы допустимъ, что перемѣщенія ds_1 и ds_2 происходятъ въ конечный промежутокъ времени, напр., въ одну секунду, то очевидно $ds_1 = w_1$ и $ds_2 = w_2$, и, слѣдовательно,

$$dW = F_1 w_1 p_1 - F_2 w_2 p_2.$$

Если движеніе установилось, то для непрерывности струи должны имѣть

$$F w_1 = v_1 \text{ и } F w_2 = v_2;$$

при этомъ площади и скорости должны быть таковы, что въ одну секунду протекаетъ одна вѣсовая единица пара. Дѣлая замѣну, найдемъ, что

$$dW = p_1 v_1 - p_2 v_2.$$

Для уясненія вопроса явленіе можно еще представить происходящимъ такимъ образомъ. Положимъ въ большемъ резервуарѣ вставленъ поршень, движущійся безъ тренія; пусть началось истеченіе пара; давленіе въ резервуарѣ падаетъ. Для того, чтобы поддерживать его постояннымъ, необходимо будетъ производить сжатіе пара въ резервуарѣ. Если истеченію вѣсовой единицы пара, какъ мы разсматриваемъ явленіе, соответствуетъ перемѣщеніе поршня S_1 , то работа внѣшней силы, которую надо приложить для сжатія пара, будетъ $F_1 p_1 S_1$; но $F_1 S_1$ есть объемъ, описанный поршнемъ за время, когда въ среду вытекла вѣсовая единица пара, т. е. $F_1 S_1 = v_1$, объему вѣса единицы вѣса пара. Такимъ образомъ, положительная внѣшняя работа будетъ $p_1 v_1$. Въ дѣйствительности, вмѣсто совершенія этой внѣшней работы, имѣетъ мѣсто сообщеніе тепла котлу и испареніе за счетъ его извѣстнаго количества воды въ немъ.

Представимъ себѣ теперь, что такой же движущійся безъ тренія поршень вставленъ въ трубѣ въ томъ ея мѣстѣ, гдѣ мы предполагаемъ давленіе p_2 ; когда поршень въ резервуарѣ перемѣщается на длину S_1 , этотъ второй, преодолевая давленіе p_2 , перемѣстится на длину S_2 ; работа противодавленія будетъ $p_2 v_2$, а дѣйствительно затраченная внѣшняя работа при истеченіи единицы вѣса пара будетъ

$$p_1 v_1 - p_2 v_2.$$

Возвращаясь теперь къ алгебраическому выраженію перваго закона термодинамики и принимая $dQ=0$, т. е. процессъ предположенъ адиабатическимъ, мы найдемъ:

$$\frac{w_2^2}{2g} + p_2 v_2 + \frac{q_2 + \rho_2 x_2}{A} = \frac{w_1^2}{2g} + p_1 v_1 + \frac{q_1 + \rho_1 x_1}{A} \dots (2)$$

Въ дѣйствительности, адиабатическимъ процессъ быть не можетъ, т. е. всегда будетъ происходить обмѣнъ тепломъ между резервуаромъ и окружающей его средой и, кромѣ того, металлическія части, хорошо проводящія тепло, будутъ передавать его частицамъ пара при низшей его температурѣ, заимствуя его у резервуара, въ которомъ паръ находится при высшей температурѣ.

Мы всегда можемъ резервуаръ избрать настолько большимъ по объему, что скорость w_1 будетъ мала, и членомъ суммы, зависящимъ отъ нея, можно будетъ пренебречь. Рѣшая затѣмъ полученное такимъ образомъ равенство относительно w_2 , будемъ имѣть:

$$\frac{w_2^2}{2g} = \frac{q_1 + \rho_1 x_1}{A} - \frac{q_2 + \rho_2 x_2}{A} + p_1 v_1 - p_2 v_2 \dots (3)$$

Положимъ теперь, что объемъ v_1 состоитъ изъ $x_1 u_1$ —объема, занимаемаго сухимъ паромъ, и τ_1 —объема, занимаемаго водой, обуславливающей влажность пара, т. е. $v_1 = x_1 u_1 + \tau_1$; соотвѣтственно $v_2 = x_2 u_2 + \tau_2$. Такъ какъ измѣненіе объема воды вѣ зависимости отъ температуры очень мало, то можно положить $\tau = \tau_1 = \tau_2 = 0,001$. Дѣлая въ равенствѣ (3) замѣну v_1 и v_2 указанными выраженіями, получаемъ:

$$A \frac{w_2^2}{2g} = q_1 + \rho_1 x_1 - q_2 - \rho_2 x_2 + A p_1 u_1 x_1 - A p_2 u_2 x_2 - A \tau (p_1 - p_2).$$

Такъ какъ $A p u + \rho = r$, то

$$\frac{A w_2^2}{2g} = q_1 - q_2 + r_1 x_1 - r_2 x_2 + A \tau (p_1 - p_2) \dots (4).$$

Послѣдній членъ правой части очень малъ: $\tau = 0,001$ и $A = \frac{1}{427}$; отбрасывая его, получаемъ для опредѣленія w_2 формулу:

$$w_2 = \sqrt{\frac{2g}{A} (q_1 - q_2 + r_1 x_1 - r_2 x_2)} \dots (5).$$

Если извѣстны давленія p_1 и p_2 , то по таблицамъ могутъ быть найдены q_1 , q_2 , r_1 и r_2 ; x_1 и x_2 должны быть опредѣлены въ каждомъ случаѣ непосредственно или опредѣлены приблизительно. Если извѣстно x_1 (въ большинствѣ случаевъ его можно считать равныхъ 0,98), то x_2 можно найти, во-первыхъ, по уравненію, представляющему состояніе вещества при адиабатическомъ процессѣ:

$$\frac{x_1 r_1}{T_1} + \Phi_1 = \frac{x_2 r_2}{T_2} + \Phi_2 \dots \dots \dots (6),$$

гдѣ Φ_1 и Φ_2 —энтропіи пара въ двухъ его состояніяхъ, а T_1 и T_2 —абсолютныя температуры;

2) приблизительно, по уравненію Клаузіуса:

$$x_2 = \frac{T_2}{r_2} \left(\frac{x_1 r_1}{T_1} + c \lg \frac{T_1}{T_2} \right) \dots \dots (6a),$$

гдѣ c —средняя теплоемкость воды;

3) наконецъ, по эмпирической формулѣ Roche:

$$x_2 = 0,50 + (x_1 - 0,50) \frac{147 + t_2}{147 + t_1} \dots \dots (6c).$$

Эта формула даетъ досаточно точные результаты для $x_1 > 0,6$, что и имѣетъ мѣсто для случая инжектора, работающаго свѣжимъ паромъ.

Замѣтимъ еще, что q_1 и q_2 —количества тепла, необходимыя для нагреванія воды до соответствующихъ температуръ, можно принять равными этимъ послѣднимъ, такъ какъ q вообще мало возрастаетъ съ измѣненіемъ t .

Дѣлая такую замѣну въ формулѣ (3) и вычисляя $\sqrt{\frac{2g}{A}}$, получимъ

$$w_2 = 91,53 \sqrt{t_1 - t_2 + r_1 x_1 - r_2 x_2} \dots \dots (5a).$$

При площади трубы F_2 , количество пара, вытекающаго въ секунду, будетъ:

$$\left. \begin{aligned} G &= \frac{F_2 w_2}{x_2 u_2 + c_2} \\ \text{или приближено} \quad G &= \frac{F_2 w_2}{x_2 u_2} \end{aligned} \right\} \dots \dots 7.$$

Обращаясь теперь къ разсмотрѣнію формулы для скорости (5a), мы замѣчаемъ, что при данномъ начальномъ состояніи пара w_2 зависитъ отъ его конечнаго состоянія.

Напишемъ ту же формулу въ такомъ видѣ:

$$w_2 = 91,53 \sqrt{(t_1 + x_1 r_1) - (t_2 + x_2 r_2)}.$$

Для всѣхъ случаевъ, когда $p > p_1$, разность подъ корнемъ при $x_1 = x_2$ положительна; но такъ какъ адиабатическій процессъ сопровождается конденсаціей пара, то x_2 будетъ меньше x_1 , т. е. численное значеніе разности возрастаетъ. Слѣдовательно, w_2 будетъ тѣмъ больше, чѣмъ ниже температура t_2 или соотвѣтствующее ей давленіе p_2 .

Какъ видно изъ предыдущаго, величины p_2 , F_2 и пр. взяты нами для нѣкотораго произвольнаго сѣченія трубы. Возникаетъ теперь вопросъ, применимы ли выведенныя формулы для того случая, когда по нимъ желаемъ вычислить скорость истеченія пара и количество его въ случаѣ истеченія его въ среду съ постояннымъ и опредѣленнымъ давленіемъ p .

При рѣшеніи такого рода задачъ обыкновенно принимали, что давленіе пара у выходнаго отверстія какъ разъ равно давленію среды; при такомъ предположеніи, для опредѣленія w_2 и G надо было лишь взять по таблицамъ соотвѣтствующія величины для буквъ въ формулахъ (5а) и (7) и опредѣлить тѣмъ или инымъ изъ указанныхъ способовъ x_2 .

Однако опытъ указалъ, что количества пара, вычисляемое по выведеннымъ выше формуламъ и опредѣляемое непосредственно взвѣшиваніемъ послѣ конденсаціи, сильно разнятся между собою, даже принимая во вниманіе возможные неточности; при этомъ было также замѣчено, что тѣ и другіе результаты при данномъ давленіи p_1 очень близко соотвѣтствуютъ другъ другу лишь до нѣкотораго опредѣленнаго давленія среды, въ которую происходитъ истеченіе. Лишь только давленіе среды становится ниже извѣстнаго предѣла, тотчасъ же начинается разногласіе между результатами, даваемыми теоріей и опытомъ. Последнее обстоятельство по необходимости должно было повести къ заключенію о томъ, что предположеніе, будто давленіе пара при его выходѣ изъ трубки или насадки равно давленію среды, неправильно. Это мы и покажемъ сейчасъ теоретически.

Мы имѣли (формула 3)

$$\frac{w_2^2}{2g} = \frac{q_1 + p_1 x_1}{A} - \frac{q_2 + p_2 x_2}{A} + p_1 v_1 - p_2 v_2$$

Разность $\frac{1}{A} [(q_1 + p_1 x_1) - (q_2 + p_2 x_2)]$ указываетъ намъ, какая часть внутренней энергіи пара превратилась при разсматриваемомъ явленіи въ кинетическую энергію. Замѣнимъ эту разность выраженіемъ, которое зависѣло бы отъ давленій и объемовъ, характеризующихъ паръ въ его начальномъ и конечномъ состояніи; такая замѣна будетъ означать, что будто бы вся кинетическая энергія струи пріобрѣтается ею за счетъ внѣшней работы. Но такъ какъ мы разсматриваемъ процессъ происходящимъ безъ обмѣна тепломъ, т. е. адиабатическимъ, и такъ какъ при такомъ процессѣ внѣшняя работа, совершаемая паромъ и эквивалентная

измѣненію его внутренней энергіи $E_1 - E_2$, равна

$$E_1 - E_2 = \int_{v_1}^{v_2} p dv,$$

то вмѣсто указаннаго выше равенства мы можемъ написать:

$$-\frac{w_2^2}{2g} = p_1 v_1 - p_2 v_2 + \int_{v_1}^{v_2} p dv \dots \dots \dots (8)$$

Законъ измѣненія давленія и объема при этомъ выражается соотношеніемъ:

$$p v^k = p_1 v_1^k = p_2 v_2^k = \text{const};$$

если паръ предъ расширеніемъ сухой насыщенный, то k равно 1,135; если же онъ влаженъ и его удѣльное паросодержаніе x , то $k = 1,035 + 0,1x$ (для x въ предѣлахъ отъ 0,7 до 1,0).

Пользуясь этимъ закономъ, опредѣлимъ $\int_{v_1}^{v_2} p dv$.

$$\int_{v_1}^{v_2} p dv = p_1 v_1^k \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v^k} = \frac{p_1 v_1}{k-1} \left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} \right].$$

Такъ какъ

$$\left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} = \frac{p_2 v_2}{p_1 v_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}},$$

то въ равенствѣ (8) можно замѣнить разность $(p_1 v_1 - p_2 v_2)$ соотвѣтствующимъ ей выраженіемъ:

$$p_1 v_1 - p_2 v_2 = p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} \right];$$

будемъ имѣть:

$$-\frac{w_2^2}{2g} = p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} \right] + \frac{p_1 v_1}{k-1} \left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} \right].$$

Отсюда послѣ преобразованій и подстановки вмѣсто $\left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1}$ равнаго ему отношенія $\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}$, для скорости w_2 получимъ слѣдующее выраженіе:

$$w_2 = \sqrt{2g \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \dots \dots \dots (9).$$

Опредѣлимъ по вѣсу количество пара, протекающаго чрезъ произвольное сѣченіе, площадь котораго F_2 , и давленіе въ которомъ p_2 . Пусть плотность пара $\delta_2 = \frac{1}{v_2}$, а вѣсъ пара G , тогда

$$\frac{G}{\delta_2} = F_2 w_2 \text{ или } G = \frac{F_2 w_2}{v_2}.$$

Такъ какъ $\frac{1}{v_2} = \frac{1}{v_1} \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}}$, то

$$G = \frac{F_2 w_2}{v_1} \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}} = F_2 \sqrt{2g \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{v_1}} \cdot \sqrt{\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}}}. \quad (10).$$

Отнесемъ эту формулу къ выходному отверстию трубы; допустимъ, что паръ оставляетъ трубу какъ разъ съ тѣмъ давлѣнiемъ, подъ которымъ находится среда, въ которую происходитъ истечение. Положимъ теперь, что давлѣнiе среды равно начальному давлѣнiю пара, т. е. $p_2 = p_1$; находимъ, что G —вѣсъ пара—равно 0. Это понятно: разъ нѣтъ разности давлѣнiй, не можетъ быть истечения. Положимъ, что истечение происходитъ въ абсолютно разрѣженное пространство; давлѣнiе p_2 должно быть равно 0.

Для вѣса пара G опять получаемъ значенiе 0. Этотъ результатъ явно невозможенъ, такъ какъ въ данномъ случаѣ имѣется наибольшая разность давлѣнiй, которая должна бы, казалось, обуславливать наибольшiй вѣсъ вытекающаго пара. Мы обязаны заключить, что либо не вѣрна сама формула, либо неправильно сдѣланное нами допущенiе, что давлѣнiе пара при выходѣ и давлѣнiе среды равны между собою. Мы покажемъ далѣе, что невѣрно именно послѣднее, теперь же замѣтимъ, что для вѣса G въ зависимости отъ частныхъ значенiй буквъ, входящихъ во второй корень, возможенъ maximum расхода при данной площади F_2 .

Обозначимъ чрезъ Z разность $\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}}$ и, принимая p_2 за независимое переменное, найдемъ то значенiе p_2' , при которомъ для Z получается наибольшее значенiе. Дифференцируя *) и приравнявая первую производную 0, найдемъ, что

$$p_2' = p_1 \left[\frac{2}{k+1} \right]^{\frac{k}{k-1}}.$$

Если положить $k = 1,135$, т. е. считать паръ во все время истеченiя сухимъ, то вычисленiе даетъ намъ $p_2' = 0,5744 p_1$.

*)

$$Z = \frac{1}{p_1^{\frac{1}{k}}} \left[p_2^{\frac{2}{k}} - p_1^{\frac{1-k}{k}} \cdot p_2^{\frac{k+1}{k}} \right];$$

$$\frac{dz}{dp_2} = \frac{1}{p_1^{\frac{1}{k}}} \left[\frac{2-k}{k} p_2^{\frac{2-k}{k}} - \frac{k+1}{k} p_1^{\frac{1-k}{k}} p_2^{\frac{1}{k}} \right] = \frac{p_2^{\frac{1}{k}}}{k p_1^{\frac{1}{k}}} \left[2 p_2^{\frac{1-k}{k}} - (k+1) p_1^{\frac{1-k}{k}} \right] = 0,$$

$$\text{т. е.} \quad 2 p_2'^{\frac{1-k}{k}} = (k+1) p_1^{\frac{1-k}{k}};$$

отсюда

$$\frac{p_2'}{p_1} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}.$$

Указанное выше противорѣчіе, заключающееся въ томъ, что при $p_2=0$ формула для вѣса пара G даетъ значеніе 0, межъ тѣмъ какъ должно бы имѣть мѣсто maximum истечения впервые было отмѣчено Saint-Venant'омъ и Wantzel'емъ въ 1839 г. Они, въ объясненіе этого, высказали предположеніе, что количество вытекающаго воздуха (ихъ работы относятся къ изученію истечения послѣдняго) не зависитъ отъ давленія предъ отверстіемъ въ извѣстномъ интервалѣ измѣненій отношенія $\frac{p_2}{p_1}$, именно

при измѣненіи отъ $\frac{p_2}{p_1} = 0$ до $\frac{p_2}{p_1} = p_2'$. Опыты Fliegner'a надъ истеченіемъ воздуха подтвердили справедливость сдѣланнаго ими предположенія. Онъ нашелъ, что до тѣхъ поръ пока давленіе воздуха въ резервуарѣ въ два раза превосходитъ давленіе атмосферы, въ которую происходитъ истеченіе, давленіе въ отверстіи составляетъ 0,5767 давленія въ резервуарѣ.

Это значитъ, что разъ соблюдено условіе $p_1=2p$, гдѣ p давленіе среды, воздухъ покидаетъ отверстіе всегда съ давленіемъ большимъ p , отъ него независимымъ и опредѣляемымъ лишь указаннымъ отношеніемъ его къ p_1 .

Первые опыты относительно истеченія пара были сдѣланы Нэпиромъ. Онъ нашелъ и для пара такое же точно соотношеніе между начальнымъ давленіемъ и давленіемъ у выходнаго отверстія. Анализируя его опыты, Rankine пришелъ къ заключенію, что давленіе въ отверстіи никогда не можетъ быть ниже того, которое соотвѣтствуетъ при данныхъ условіяхъ наибольшему расходу пара. Опыты Нэпира (Napier) были повторены Kunhardt 'омъ въ лабораторіи Технологическаго Института Массачузета. Паръ вытекалъ черезъ короткія насадки, діаметромъ въ 0,25 дюйма и дли-

Что при этомъ значеніи $p_2=p_2'$ имѣетъ мѣсто дѣйствительно maximum для Z , убѣждаетъ насъ слѣдующее вычисленіе:

$$\frac{d_2 Z}{d(p_2)^2} = \frac{k+1}{k^2} \cdot \frac{p_2^{\frac{2(1-k)}{2}}}{p_1^{\frac{k}{2}}} \left[\frac{2(2-k)}{k+1} - \frac{p_1^{\frac{1-k}{1-k}}}{p_2^{\frac{k}{k}}} \right] \text{ или}$$

$$\frac{d_2 Z}{d(p_2)^2} = \frac{k+1}{k^2} \cdot \frac{p_2^{\frac{2(1-k)}{2}}}{p_1^{\frac{k}{2}}} \left[\frac{2(2-k)}{k+1} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right].$$

Знакъ второй производной зависитъ отъ выраженія въ скобкахъ: опредѣляемъ его, замѣняя p_2 найденнымъ выше значеніемъ; имѣемъ:

$$\frac{2(2-k)}{k+1} - \frac{2}{k+1} = \frac{2}{k+1} (1-k).$$

Такъ какъ $K=1,135$ и вообще большіе единицы, то, слѣдовательно, вторая производная меньше 0, т. е. при этомъ частномъ значеніи p_2 для Z дѣйствительно имѣетъ мѣсто maximum.

ной въ 1,5, 0,5 и 0,25 дюйма. Непосредственнымъ наблюдениемъ было установлено, что отношеніе между давленіемъ у выходнаго отверстія и начальнымъ было соответственно 0,634, 0,615, и 0,583. Опыты Blaess и Guttermuth, произведенные въ 1902 и 1904 г. г. подтвердили справедливость гипотезы Сень-Венана и для пара воды; количество вытекающаго пара при уменьшеніи отношенія $\frac{P}{P_1}$, гдѣ p —давленіе среды, отъ единицы постепенно увеличивается извѣстнаго до предѣла, съ достиженіемъ котораго оно остается постояннымъ, даже если бы $\frac{P}{P_1}$ было доведено до 0, т. е. истеченіе происходило въ абсолютный вакуумъ. Чтобы показать теоретически независимость количества вытекающаго пара въ извѣстныхъ условіяхъ отъ давленія среды, проанализируемъ явленіе слѣдующимъ образомъ. Пусть G вѣсъ пара, вытекающаго въ единицу времени чрезъ отверстіе даннаго размѣра; пусть p —давленіе среды, въ которую происходитъ истеченіе, δ —плотность пара и u —скорость его въ моментъ выхода. Если F_2 площадь отверстія, то

$$G = F_2 \delta u.$$

Возьмемъ производную по p ; максимумъ расхода пара будетъ въ томъ случаѣ, когда $\frac{dG}{dp} = 0$. Такъ какъ F_2 постоянно, то

$$\frac{dG}{dp} = F_2 \delta \frac{du}{dp} + F_2 u \frac{d\delta}{dp};$$

отсюда имѣемъ для $\frac{dG}{dp} = 0$:

$$\begin{aligned} \delta \frac{dG}{dp} &= -u \frac{d\delta}{dp} \text{ или} \\ \frac{du}{dp} &= -\frac{u}{\delta} \frac{d\delta}{dp} \dots\dots\dots (11). \end{aligned}$$

Замѣняя частныя дифференціалы полными дифференціалами, мы получимъ

$$\frac{du}{u} = -\frac{d\delta}{\delta},$$

откуда находимъ:

$$\begin{aligned} \lg u &= c - \lg \delta \text{ или} \\ \lg (u \delta) &= c, \end{aligned}$$

т. е.

$$u = \frac{1}{\delta} e^c, \text{ гдѣ } e \text{ основаніе Нэперовыхъ логарифмовъ.}$$

Такъ какъ e и c постоянны, то скорость u при данномъ начальномъ состояніи пара зависитъ лишь отъ плотности его δ въ моментъ выхода

изъ отверстія. Последняя же опредѣляется конечнымъ состояніемъ пара, но не давленіемъ среды.

Допустимъ все таки, что оба эти давленія, т. е. среды и пара при выходѣ одинаковы.

Скорость u , согласно (9), будетъ

$$u^2 = \frac{2gk}{k-1} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right].$$

Найдемъ производную по p .

$$\frac{du}{dp} = - \frac{g v_1}{u} \cdot \left(\frac{p_1}{p} \right)^{\frac{1}{k}}.$$

Такъ какъ $p v^k = p_1 v_1^k$, то $\left(\frac{p_1}{p} \right)^{\frac{1}{k}} = \frac{v}{v_1}$ и

$$\frac{du}{dp} = - \frac{g v}{u}.$$

Тоже соотношеніе $p v^k$ можетъ быть написано и такъ:

$$\frac{p}{\delta^k} = \frac{p_1}{\delta_1^k} \text{ или } \delta = \frac{p}{p_1} \delta_1^{\frac{1}{k}}.$$

Производная по p будетъ

$$\frac{d\delta}{dp} = \frac{1}{k p v}.$$

Вставляя вмѣсто производныхъ найденныя значенія въ равенство (11), получимъ:

$$- \frac{g v}{u} = - \frac{u}{\delta} \cdot \frac{1}{k p v}.$$

Такъ какъ $\delta v = 1$, то

$$u^2 = k g p v \text{ и } u = \sqrt{k g p v} \dots (12).$$

Равенство (12) опредѣляетъ намъ ту скорость пара, при которой будетъ имѣть мѣсто maximum расхода его чрезъ данное отверстіе трубы. Но внѣшнему виду выраженіе для скорости вполне тождественно съ формулой Лапласа для скорости распространенія звука въ газообразной средѣ. Но если u соотвѣтствуетъ этой послѣдней, то тотчасъ же ясно, что давленіе пара у выхода можетъ не быть одинаковымъ съ давленіемъ среды, такъ какъ скорость распространенія звука зависитъ отъ состоянія газа или пара въ моментъ истеченія. Допустимъ, что скорость u , опредѣляемая (12), и w_2 , опредѣляемая изъ (9), равны между собою; мы будемъ имѣть:

$$p v = \frac{2}{k-1} p_1 v_1 - \frac{2}{k-1} p_1 v_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}.$$

Такъ какъ $p_2 v_2^k = p_1 v_1^k$, то $\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \frac{p_2 v_2}{p_1 v_1}$,

мы получимъ

$$p v = \frac{2}{k-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2).$$

Допустимъ далѣе что состояніе пара, характеризуемое величинами $p_2 v_2$ тождественно съ состояніемъ его, опредѣляемымъ величинами $p v$; дѣлая замѣну, мы получимъ

$$p v + \frac{2}{k-1} p v = \frac{2}{k-1} p_1 v_1.$$

и послѣ приведенія

$$p v = \frac{2}{k+1} p_1 v_1.$$

Пользуясь тѣмъ же равенствомъ $p_1 v_1^k = p v^k$, мы получимъ

$$p = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} p_1,$$

т. е. для p получается то же значеніе, какъ и ранѣе для p'_2 , конечнаго давленія пара, при которомъ имѣетъ мѣсто наибольшій расходъ пара.

Итакъ, на основаніи всего вышесказаннаго, мы приходимъ къ заключенію, что явленіе истеченія пара при переменномъ давленіи его въ началѣ распадается на два періода. Пока давленіе пара p_1 остается меньше $\frac{p}{0,6}$, или, если p равно атмосферному давленію, пока p_1 меньше 1,66

atm., количество расходуемаго пара зависитъ отъ разности $p_1 - p$, такъ какъ у входнаго отверстія паръ имѣетъ это давленіе p . Но лишь только ко этотъ предѣлъ достигнуть и давленіе p_1 дѣлается большимъ, чѣмъ

$\frac{p}{0,6}$ количество расходуемаго пара при той же площади зависитъ толь-

отъ его начальнаго состоянія. Дѣйствительно, вставляя въ (10) вмѣсто

p_2 значеніе его $\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} p_1$, мы приходимъ къ такой формулѣ для скорости:

$$w_2^2 = \frac{2gk}{k+1} p_1 v_1 \dots (13).$$

Выше были уже указаны способы опредѣленія паросодержанія въ моментъ выхода пара. Для той же цѣли можетъ послужить и слѣдующее указаніе.

Пусть объемъ сухого насыщеннаго пара u ; при паросодержаніи x , объемъ единицы смѣси пара и воды будетъ:

$$v = xu + \sigma (1-x).$$

Такъ какъ $\tau=0,001$ мало, а x почти не отличается отъ единицы, то можно съ достаточной точностью считать

$$v=xu.$$

Обозначимъ начальное паросодержаніе въ котлѣ, соответственно давлению p_1 , чрезъ x_1 ; тогда

$$v_1=x_1u_1.$$

Раздѣляя почленно, получаемъ:

$$\frac{x}{x_1} = \frac{v}{v_1} \cdot \frac{u_1}{u} \dots\dots\dots (14).$$

Зависимость между давленіемъ и объемомъ сухого насыщеннаго пара дается равенствомъ:

$$p_1 u_1^n = p u^n = D,$$

гдѣ $n=1,0646$, D —постоянная величина, равная 1,7617, если давленіе выражено въ kg/cm^2 ; такъ какъ для смѣси пара и воды имѣетъ мѣсто зависимость

$$pv^k = p_1 v_1^k,$$

то (14) можетъ быть представлено такъ:

$$\frac{x}{x_1} = \left(\frac{p}{p_1} \right)^{\frac{k-n}{nk}} \dots\dots\dots (15).$$

Разъ извѣстно p_1 и x_1 , то для каждаго давленія можетъ быть найдено и x въ соотвѣствующемъ сѣченіи трубы.

Если истеченіе происходитъ въ среду, давленіе которой $\leq 0,5744 p_1$, то давленіе пара при выходѣ, какъ видѣли, опредѣляется равенствомъ

$$p = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} p_1.$$

Вставляя въ (15) получаемое отсюда отношеніе $\frac{p}{p_1}$, мы находимъ:

$$\frac{x}{x_1} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k-n}{k(n-1)}}.$$

Такъ какъ n точно равно $\frac{33}{31}$, а $k=1,035+0,1x_1$, то при данномъ x_1 , можно всегда точно опредѣлить x .

Если положить, что $x_1=1$, то для всѣхъ давленій p_1 паросодержаніе при выходѣ остается неизмѣннымъ и равнымъ

$$x = 0,9685.$$

Если мы сдѣлаемъ, считая $x_1=1$, вычисленіе въ формулахъ (9) и (10), то онѣ примутъ слѣдующій видъ

$$w_2 = 323 \sqrt{p_1 v_1} \dots\dots\dots (16)$$

$$\frac{G}{F} = 199 \sqrt{\frac{p_1}{v_1}} \dots\dots\dots (17)$$

Съ помощью этихъ выраженій вычислена таблица А.

Т А Б Л И Ц А А.

Начальное давленіе въ котлѣ kg/cm ²	Давленіе у выходнаго отверстія $p=0.5744 p_1$	Скорость истеченія w_2 въ mtr.	Кинетиче- ская энергія струи $k=\frac{w_2^2}{2g}$	Количество пара на 1 пло- щади попереч- наго сѣченія $\frac{G}{F_2}$
5	2,887	442,4	9977 kgr. mtr.	727
6	3,465	444,9	10088 " "	867
7	4,042	447,0	10182 " "	1007
8	4,619	448,8	10265 " "	1146
9	5,197	450,4	10339 " "	1285
10	5,774	451,8	10405 " "	1423
11	6,352	453,1	10465 " "	1561
12	6,929	454,3	10521 " "	1698

Таблица указываетъ намъ, какъ мало увеличивается скорость истеченія съ повышеніемъ начальнаго давленія. Кинетическая энергія струи также остается почти постоянной и равной при давленіяхъ отъ 5 до 12 atm. приблизительно 10300 kgr. mtr.

Отсюда понятно, почему работа инжектора при болѣе высокихъ давленіяхъ пара становится менѣе производительной. Если бы количество притекающей въ конденсаціонную камеру воды оставалось неизмѣннымъ, то струя пара и при болѣе высокомъ давленіи его могла бы сообщить ей лишь мало увеличивающуюся скорость, межъ тѣмъ какъ сопротивленіе проникновенію ея въ котелъ растетъ прямо пропорціонально давленію. Для того, чтобы работа была возможна, необходимо уменьшать количество воды; скорость ея будетъ больше; но одновременно повышается температура ея, и если инжекторъ работаетъ съ открытымъ сливомъ, то дѣйствіе прибора можетъ быть скоро и совсѣмъ нарушено.

Таблица В, содержащая результаты опытовъ съ инжекторомъ Жиффара, произведенныхъ М. Deloy, хорошо иллюстрируетъ вышесказанное.

Т А Б Л И Ц А В.

Температура пит. воды.	Темпер. нагнетаемой воды.	Давленіе пара въ котлѣ въ атмосферахъ.	Kgr. воды на одинъ kgr израсходовано пара.
9,5°Ц.	38° Ц.	2,25	20,88
"	47	5	15,94
"	52,5	5,5	14,30
"	70	6,5	9,63
"	59,5	7,75	11,80
"	60,5	8	11,63

Т А Б Л И Ц А С.

Температура пит. воды.	Темпер. нагнетаемой воды.	Давленіе пара въ котлѣ въ atm.	Kgr воды на 1 kgr пара.	Наибольшее давленіе, которое можетъ преодолѣть инжекторъ.
38,0°Ц.	65° Ц.	2	21,5	2,15
38,75	68	2,5	19,8	2,75
38,0	70	3	18,0	3,40
39,75	74,5	3,5	16,5	4,0
40,0	80	4	15,0	4,75
41,75	83	4,5	13,8	5,35

Таблица С содержитъ результаты опытовъ Villiers'a которыми, между прочимъ, пользовался Грасгофъ для опредѣленія плотности струи смѣси. Здѣсь также ясно видно уменьшеніе количества подаваемой воды съ увеличеніемъ давленія. Цифры послѣдняго столбца указываютъ тѣ предѣльные давленія, которыя могутъ быть въ резервуарѣ при данномъ рабочемъ давленіи пара; но инжекторъ работаетъ противъ нихъ лишь въ томъ случаѣ, когда притокъ воды къ нему будетъ уменьшенъ противъ указаннаго въ таблицѣ. Какъ видно, температура нагнетаемой при этомъ

воды уже достаточно высока; при температурѣ питательной воды въ 45° Ц. инжекторъ уже не работаетъ. Интересно отмѣтить еще, что скорость пара при 4,5 атм. вычислена Villiers' равной 550 mtr; межъ тѣмъ какъ, согласно приведенныхъ выше формулъ, она при обыкновенной у первыхъ и многихъ позднѣйшихъ инжекторовъ конической сходящейся паровой насадки, не можетъ быть выше 450 mtr. даже при вдвое большемъ давлении пара. При этомъ какъ видѣли, имѣетъ мѣсто еще и наибольший расходъ пара. Все это съ очевидностью указываетъ на нерациональность употребленія въ качествѣ парового сопла инжектора конической сходящейся насадки.

Но недостатки ея не ограничиваются только указанными обстоятельствами: она не только плохо утилизируетъ тепловую энергію пара, превращая ее въ кинетическую, но и самую струю дѣлаетъ менѣе способной къ совершенію наибольшей работы. Достаточнымъ указаніемъ на это можетъ служить отмѣченное уже совпаденіе выходной скорости со скоростью распространенія звука: въ выходящей струѣ пара должны возникнуть волнообразныя движенія вдоль оси. Это, дѣйствительно, подтверждается и опытомъ. Для струи воздуха впервые съ помощью фотографіи это было указано Mach'омъ и Emden'омъ*); на снимкѣ струи видны правильно слѣдующія другъ за другомъ темныя и свѣтлыя линіи. Присутствіе такихъ же волнъ въ вытекающей струѣ пара, замѣченное еще Parenty, ясно доказано опытами Stodola**) (черт. 7) надъ истеченіемъ пара изъ насадокъ.

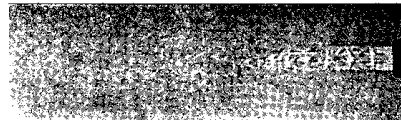
Stodola установилъ, что существуетъ одно противодавленіе, когда эти колебанія частицъ пара въ струѣ исчезаютъ, но малѣйшее отклоненіе въ ту или другую сторону тотчасъ же вызываетъ появленіе значительныхъ волнъ, въ видѣ симметрично расположенныхъ крестообразныхъ линій, наблюдаемыхъ даже простымъ глазомъ. Истеченіе пара изъ такой насадки, кромѣ того, сопровождается поперечнымъ расширеніемъ струи; на образующемся расходящемся конусѣ, форму котораго принимаетъ струя, иногда замѣтны суженія поперечнаго сѣченія и слѣдующія за нимъ вновь расширенія. При такихъ условіяхъ невозможно использовать выгодно ударную силу струи: помимо потери кинетической энергіи отъ самаго удара, въ этомъ случаѣ неизбѣжны еще потери прибавочныя, зависящія отъ образованія вихревыхъ движеній, отъ нецентральности удара и пр.

Нужно замѣтить, что постановка сходящейся конической насадки для пара объясняется недостаточнымъ знаніемъ законовъ, управляющихъ истеченіемъ упругихъ жидкостей, во время появленія инжектора. Къ

*) Wiedemanns Annalen, 1890, Bd. 41 и 1899, Bd. 69.

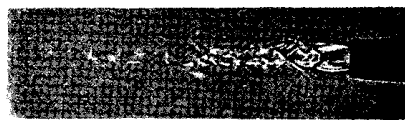
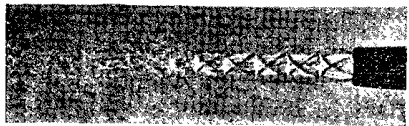
**) Присутствіе волнъ наблюдать также Gutermuth, Z. d. V. d. Ing. 1904. Stodola, Dampfturbinen.

$p=2,3 \text{ atm.}$



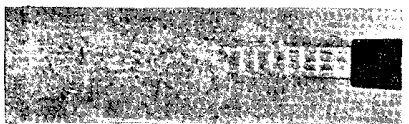
Коническая насадка съ діаметромъ 2,65 m.m.;
давленіе истеченія
 $p=2,9 \text{ atm.}$

$p=3,85 \text{ atm.}$



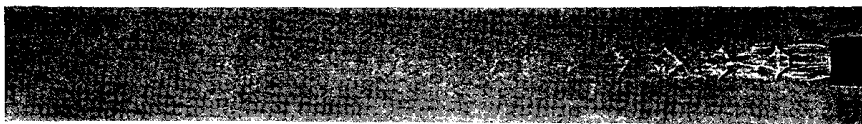
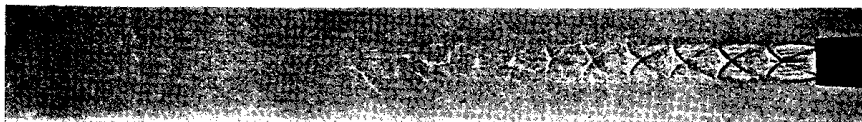
$p=5 \text{ atm.}$

$p=2,6 \text{ atm.}$



Коническая насадка съ діаметромъ 3,63 m.m.;
 $p=3,3 \text{ atm.}$

$p=5 \text{ atm.}$



$p=6 \text{ atm.}$



Истеченіе углекислоты изъ той же насадки;
 $p=5 \text{ atm.}$

Цилиндрическая насадка
 $d=2,72 \text{ m.m.}$
 $p=4,1 \text{ atm.}$



Коническая насадка съ діаметромъ 0,3 m.m.;
 $p=7 \text{ atm.}$

Фотографическіе снимки Emden'a вытекающихъ изъ насадокъ струй воздуха.

истеченію пара, забывая о его способности расширяться, были примѣнены непосредственно выводы, добытые экспериментально надъ наблюденіемъ истеченія жидкости. Для воды, напр., по станковка расходящейся насадки влечетъ за собою увеличеніе расхода ея и уменьшеніе конечной скорости. Какъ то, такъ и другое для инжектора не вѣлесообразно, и потому паровой насадкѣ была дана форма сходящагося конуса, которая, казалось, должна была обезпечить наименьшій расходъ при наибольшей скорости выхода. Въ дѣйствительности, дѣло обстоитъ иначе: такая насадка обуславливаетъ почти неизмѣнность энергии струи съ увеличеніемъ давленія пара и сильно увеличивающійся расходъ его. Поэтому, помимо указанной уже выше причины того, что при увеличеніи давленія приходилось довольствоваться меньшимъ количествомъ подаваемой воды, сильно возрастающее количество теплоты, приносимой паромъ, вслѣдствіе большаго расхода его, вызывало значительное увеличеніе температуры струи, и тѣмъ самымъ еще болѣе суживало предѣлы, въ которыхъ была возможна работа прибора. Расходящаяся насадка, удерживая расходъ пара почти неизмѣннымъ, даетъ возможность пару расширяться въ направленіи движенія струи, а это поведетъ къ значительному увеличенію конечной скорости.

Но помимо этого, какъ указываетъ наблюденіе, струя въ этомъ случаѣ можетъ быть болѣе работоспособной, благодаря отсутствію отмѣченныхъ выше волнообразныхъ движеній. Фиг. 4 и 5 указываютъ видъ струи по выходѣ въ первомъ случаѣ изъ насадки съ прямолинейнымъ профилемъ, во второмъ—съ профилемъ очерченнымъ по кривой. Направленіе движенія частицъ пара почти параллельно оси насадки; въ первомъ случаѣ, однако, внутри струи замѣтенъ все-таки небольшой обратный конусъ, составляемый частицами болѣе влажнаго пара, межъ тѣмъ какъ наружныя, благодаря тренію о стѣнки, являются частицами болѣе сухого и даже слегка не-регрѣтаго пара. Отсюда ясна выгода поставить расходящуюся насадку, въ которой могло бы произойти свободное расширение пара до опредѣленнаго конечнаго давленія. Если это давленіе p , то нужно лишь въ формулу (5а) поставить взятые изъ таблицъ значенія для t_1 , t_2 , r_1 и r_2 и опредѣлить по одной изъ приведенныхъ формулъ x_2 , чтобы получить значеніе для выходной скорости w . Далѣе, такъ какъ количество пара остается тоже самое, то тотчасъ же можетъ быть найдена площадь выходнаго сѣченія.

Если площадь поперечнаго сѣченія въ узкомъ мѣстѣ насадки F_1 , то G равно:

$$G = \frac{F_1 w_1}{x_1 u_1}.$$

гдѣ w_1 , x_1 и u_1 должны опредѣляться по тому давленію, которое уста-

навливается въ этомъ узкомъ сѣченіи, т. е. $p_2' = 0,5744 p_1$. Пусть сѣченіе выхода F ; тогда для опредѣленія его имѣемъ соотношение

$$G = \frac{F_1 w_1}{x_1 u_1} = \frac{F \cdot w}{x \cdot u} \text{ и}$$

$$F = F_1 \frac{u x w_1}{u_1 x_1 w}$$

Если бы мы пожелали опредѣлить теоретически правильный профиль насадки отъ ея наименьшаго сѣченія до выходного, намъ надо было бы, задавшись длиною этой части, вычертить кривую адиабатическаго расширения; тогда въ каждомъ сѣченіи было бы опредѣлено давленіе пара, а тѣмъ самымъ соотвѣтствующіе ему x_1 , u и w и размѣръ сѣченія насадки. Насколько значительно при такой насадкѣ увеличивается скорость истечения и кинетическая энергія струи, показываетъ таблица D.

Т А Б Л И Ц А D.

Отношеніе давленій начальнаго въ котлѣ и послѣ расширения p_1/p	Отношеніе выходной скорости къ скорости въ устьѣ насадки w/w_2	Отношеніе площадей выхода и устья F/F_2	Отношеніе диаметровъ для круглыхъ насадокъ d/d_2	Удѣльное паросодержаніе при выходѣ x .
100	2,583	13,802	3,715	0,765
90	2,560	12,690	3,562	0,769
80	2,535	11,555	3,399	0,775
70	2,505	10,395	3,224	0,781
60	2,469	9,163	3,027	0,788
50	2,426	7,980	2,825	0,796
20	2,177	3,966	1,991	0,840
10	1,924	2,436	1,561	0,874
8	1,861	2,069	1,438	0,886
6	1,742	1,716	1,310	0,901
4	1,550	1,349	1,161	0,922
2	1,119	1,015	1,007	0,960
1,7318	1	1	1	0,968
или ($p = 0,57 p_1$).				

Изъ таблицы видно, что если начальное давленіе пара 10 atm. и расширеніе въ концѣ доведено до 1 atm., то скорость выхода будетъ $w=1,924w_2$, и такъ какъ по таблицѣ А, $w_2=451,8$, то w будетъ равно 869,26 mtr.

На фиг. 8 показана теоретически правильная насадка, какъ она получается согласно указаннаго выше способа опредѣленія различныхъ поперечныхъ сѣченій ея. Слѣдуетъ отмѣтить еще то обстоятельство, что дальнѣйшее расширеніе насадки влечетъ за собою уменьшеніе скорости. Это понятно, такъ какъ пройдя сѣченіе, соответствующее конечному давленію, равному давленію среды, паръ не расширяется, но происходитъ лишь измѣненіе его состоянія при постоянномъ давленіи р.*) Можно было бы показать, что за счетъ уменьшенія кинетической энергіи и тренія начнется увеличеніе паросодержанія въ струѣ; если насадка будетъ достаточна длинна, то по выходѣ паръ можетъ быть даже перегрѣтымъ.

Указанная выше форма насадки является затруднительной для изготовленія; нужна особенно тщательная работа и шлифовка поверхностей, чтобы по возможности устранить увеличеніе коэффициента тренія. Ниже мы укажемъ, какова потеря отъ тренія; шероховатая или бороздчатая поверхность при большой скорости струи эту потерю увеличили бы еще болѣе.

Впервые расширеніе пара въ насадкѣ было примѣнено Лавалемъ при паровой турбинѣ, гдѣ, какъ и у инжектора, важно имѣть по возможности большую скорость выхода. Его насадка указана на фиг. 9; часть ея до наименьшаго сѣченія или устья очень коротка, чтобы не удлиннять пути пара и тѣмъ уменьшить потери тренія. Въ расширяющейся части насадка имѣетъ форму конуса съ прямолинейной образующей и угломъ конусности около 10° ; при большемъ углѣ дѣлается вѣроятнымъ и возможнымъ отставаніе пара отъ стѣнокъ: струя не будетъ выполнять всего сѣченія насадки. Уголъ конусности, вообще, зависитъ отъ начальнаго давленія пара: чѣмъ оно выше, тѣмъ уголъ меньше; точно также наблюдаемое простымъ глазомъ расширеніе струи, при истеченіи ея въ атмосферу, указываетъ что очертаніе образующагося конуса собственно криволинейно, при чемъ кривизна тѣмъ больше, чѣмъ больше давленіе пара въ котлѣ. Въ слѣдующей таблицѣ Е указаны различные углы конусности для давленій пара отъ 8 до 1 atm., опредѣленные наблюденіемъ по тѣмъ слѣдамъ профиля, какіе оставляетъ струя на листѣ гигроскопической бумаги.**) Длина такого конуса измѣняется отъ 70 до 35 диаметровъ выпускнаго отверстія, уменьшаясь съ пониженіемъ упругости пара.

*) Митте, Пароструйные приборы.

**) Это подтверждаютъ опыты Büchner'a: при малыхъ давленіяхъ пара въ котлѣ, въ насадкѣ появлялось разрѣженіе, скорость уменьшалась, а паросодержаніе увеличивалось. См. Z. d. V. d. Ing. 1904 г., стр. 1098, табл. 8a и 8b.

Т А Б Л И Ц А Е.

Давленіе пара въ atm.	8	7	6	5	4	3	2	1
Величина угловъ конусности.	6°	7°	8°	10°	12°	16°	19°	23°

Данныя этой таблицы указываютъ, что уголъ конусности въ 10° является средней величиной для давленій пара отъ 3 до 8 атмосферъ.

Надъ истеченіемъ пара изъ насадокъ въ последнее время было произведено очень много опытовъ. Stodola при изученіи этого явленія пользовался насадкой, діаметръ устья которой былъ 7 mm., а діаметръ выходного отверстія 12 mm.; конечное давленіе пара было 1,05 kg/cm². Давленіе резервуара, въ который происходило истеченіе пара, могло измѣняться. При вакуумѣ въ этомъ резервуарѣ расширеніе пара происходило до конца насадки правильно, а затѣмъ начиналось волнообразное движеніе частицъ пара, какъ указываетъ кривая А на фиг. 10; когда противодавленіе въ резервуарѣ было равно конечному давленію струи, движеніе частицъ пара было болѣе правильно, что видно по кривой С, которая даетъ очень небольшія отклоненія отъ прямой; но лишь только противодавленіе было повышено, въ струѣ появились большія колебательныя движенія, указываемыя кривою D.

При второмъ опытѣ давленіе пара у выходного отверстія было 0,7 kg/cm²; при истеченіи въ вакуумъ было отмѣчено то же самое, что и въ первомъ случаѣ, кривая А фиг. 11. При противодавленіи въ резервуарѣ 0,7 kg/cm² истеченіе пара происходило безъ всякихъ слѣдовъ колебательнаго движенія и частицы пара двигались по точно прямой линіи. При повышеніи противодавленія вновь возникали колебательныя движенія частицъ пара и въ то же время повышалось давленіе пара въ самой насадкѣ передъ выходомъ его изъ нея.

Кривыя D фиг. 10 и С и D фиг. 11 указываютъ, что при истеченіи пара въ пространство, гдѣ давленіе больше конечнаго давленія пара послѣ его расширенія, имѣетъ мѣсто паровой ударъ, вызывающій уплотненіе его и повышеніе давленія предъ его выходомъ изъ насадки. Тѣ же самые результаты получены и Büchner'омъ при наблюденіи имъ зависимости истеченія пара изъ насадки Лаваля при увеличенномъ противодавленіи *). На фиг. 12 указаны наблюденныя имъ давленія пара въ различныхъ сѣченіяхъ насадки при различныхъ противодавленіяхъ у выхода; на фиг. 13 указаны сама насадка, очертаніе ея и положеніе отверстій въ стѣнкѣ ея, чрезъ которыя производилось наблюденіе давленій. Какъ

*) Zeit. d. V. d. Ing, 1904.

видно по діаграммѣ, въ различныхъ сѣченіяхъ насадки, въ зависимости отъ противодавленія, кривая расширенія пара, отвѣчающая атмосферному противодавленію, получаетъ подъемъ, т. е. передъ выходомъ паръ становится болѣе упругимъ. Это явленіе сопровождается потерей кинетической энергіи, такъ какъ скорость истеченія уменьшается; одновременно увеличивается паросодержаніе. Въ табл. F *) даны результаты наблюдений и вычислений, относящіеся къ той же насадкѣ; значки указываютъ положеніе сѣченій ея, къ которымъ относятся скорости и значенія для сухости пара.

ТАБЛИЦА F.

$p \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	p_6 противо- давленіе.
10,3	449	585	668	711	760	96,5	94,9	93,0	92,0	91,0	2,09
10,33	449	585	668	711	346	96,5	94,9	—	92,0	99,6	4,22
10,38	449	585	538	292	210	96,5	—	96,0	99,6	—	6,46
10,35	449	464	263	202	165	96,5	96,7	99,4	99,9	99,9	8,18
10,34	334	253	176	157	131	98,2	99,0	99,5	99,6	99,7	9,44

Для цѣлей настоящей главы о паровой насадкѣ инжектора имѣютъ особый интересъ данныя опытовъ Büchner'a при истеченіи пара въ атмосферу (т. е. при атмосферномъ давленіи).

Въ таблицѣ G приведены наблюденныя имъ давленія пара въ различныхъ сѣченіяхъ насадки.

На фиг. 14 указаны кривыя расширенія пара въ насадкѣ. Виѣшнимъ видомъ своимъ онѣ напоминаютъ намъ обычную кривую расширенія паровыхъ машинъ, и отличаются отъ нея лишь болѣе быстрымъ паденіемъ давленія. Это вполне понятно, такъ какъ у паровой машины при равныхъ частяхъ хода объемы, занимаемые паромъ увеличиваются равномерно, въ насадкѣ же расходящейся, благодаря ея конусности, объемы между равноотстоящими сѣченіями, равны между собою быть не могутъ. Въ виду болѣе быстрого расширенія пара въ насадкѣ возможно, что то количество пара, которое должно сконденсироваться въ воду при адиабатическомъ расширеніи, не успѣетъ обратиться въ жидкое состояніе. Въ этомъ, быть можетъ, и кроется причина того, что по даннымъ Büchner'a, независимо отъ начальнаго давленія пара, паросодержаніе въ концѣ рас-

*) Въ таблицѣ даны дѣйствительныя скорости, а не теоретическія.

ширения остается неизмѣннымъ и независимымъ отъ степени расширения. Это тѣмъ болѣе, вѣроятно, что большимъ степенямъ расширения соот-

Т А Б Л И Ц А Г.

Р ₀ давленіе въ котлѣ.	Р ₁	Р ₁ Р ₀	Р ₂	Р ₃	Р ₄	Р ₅	Р ₆ противо- давленіе у вых. сѣч.
12,80	7,34	0,573	4,44	3,03	2,31	1,78	0,96
11,28	6,50	0,577	3,93	2,68	2,05	1,57	0,96
10,36	5,84	0,564	3,61	2,46	1,87	1,46	0,97
9,24	5,28	0,572	3,22	2,20	1,67	1,30	—
8,24	4,75	0,577	2,89	1,97	1,49	1,17	0,97
7,14	4,08	0,572	2,50	1,70	1,30	1,03	0,99
6,10	3,47	0,569	2,13	1,45	1,11	0,87	0,99
5,08	2,89	0,569	1,80	1,22	0,92	0,72	1,00
4,08	2,30	0,564	1,42	0,97	0,76	0,60	1,02
3,13	1,75	0,559	1,12	0,77	0,61	0,87	1,02
2,07	1,15	0,553	0,70	0,54	0,72	0,94	1,02

вѣтствуетъ и большая скорость теченія струи, а въ связи съ этимъ большая потеря на работу тренія, которая, превращаясь въ тепло, идетъ на перегрѣваніе пара.

Далѣе, по этимъ діаграммамъ мы видимъ, что не смотря на значительную разность давленій въ котлѣ, давленіе при выходѣ очень мало отличается одно отъ другого, всего на сотыя доли атмосферы. Отсюда слѣдуетъ весьма небольшое колебаніе и выходной скорости струи въ значительныхъ предѣлахъ колебанія начальнаго давленія. На фиг. 15 построены кривыя скоростей для тѣхъ же сѣченій. Мы видимъ, что скорость выхода струи изъ одной и той же насадки въ предѣлахъ измѣненія начальнаго давленія отъ 12,8 atm. до 5,08 atm. измѣняется очень мало, и только при болѣе низкихъ давленіяхъ начинается рѣзкое уменьшеніе скорости выхода струи и скорости движенія ея въ самой насадкѣ *).

*) Этимъ, можетъ быть, объясняется то, что у многихъ инжекторовъ, выпущенныхъ для работы съ паромъ высокаго давленія и имѣющихъ нѣсколько расходящійся конусъ, начальнымъ рабочимъ давленіемъ указывается 3 atm. При слишкомъ малой скорости инжекторъ не можетъ дать нужнаго разрѣженія и всосать воду.

Если мы обратимся къ предыдущимъ діаграммамъ, указывающимъ процессъ расширения пара въ насадкѣ, то замѣтимъ, что оно идетъ совершенно одинаково и правильно только для давленій отъ 12,8 atm. до 7,14; при пониженіи давленія въ котлѣ далѣе, у выходного отверстія насадки давленіе начинаетъ увеличиваться, при чемъ это увеличеніе происходитъ тѣмъ раньше, чѣмъ ниже начальное давленіе. Соответственно этому увеличенію давленія внутри насадки въ извѣстномъ сѣченіи ея происходитъ и замедленіе въ движеніи струи.

Характеръ измѣненія пара въ насадкѣ и его кинетической энергіи, какъ то и другое вытекаетъ изъ данныхъ опыта, вполне отвѣчаетъ и предыдущему теоретическому разсмотрѣнію.. Величина противодавленія до тѣхъ поръ, пока оно меньше давленія пара въ концѣ расширения, на процессъ послѣдняго не вліяетъ, и только въ томъ случаѣ, когда оно больше, предъ выходнымъ отверстіемъ изъ насадки начинается сжатіе пара и замедленное движеніе струи.

Мы можемъ теперь, опираясь на выводы предыдущаго разсмотрѣнія и сравненія между собою опытныхъ данныхъ, сказать, какъ отразится на работѣ инжектора постановка паровой расходящейся насадки.

При конической сходящейся насадкѣ давленіе у выходного отверстія равно 0,57 начального и скорость истеченія почти не зависитъ отъ начального давленія, измѣняясь очень мало для различныхъ давленій пара (разность выражается въ единицахъ метровъ); количество вытекающаго пара всегда maximum для даннаго давленія.

При конической расходящейся насадкѣ скорость истеченія пара увеличивается почти въ 2 раза, при чемъ въ предѣлахъ колебаній начального давленія пара на 50—60% она остается почти одна и та же; слѣдовательно, инжекторъ съ такой насадкой теоретически можетъ подать почти въ два раза большее количество воды.

Что касается инжекторовъ для низкаго давленія пара, то согласно данныхъ опытовъ Büchner'a, для нихъ выгоднѣе постановка коническихъ сходящихся насадокъ или же болѣе короткихъ расходящихся. Такъ, напр., вмѣсто насадки въ $50 \frac{m}{m}$ длиной, считая отъ входного отверстія для пара и до выхода изъ насадки, которая пригодна для давленій отъ 12,8 atm. до 5,08 atm, нужно поставить насадку длиной въ $36,5 \frac{m}{m}$ при давленіи въ 4,08 atm. и въ $27 \frac{m}{m}$ при давленіи въ 2,07 atm.

Послѣдніе выводы, однако, не имѣютъ абсолютнаго значенія. Паденіе давленія пара при расширеніи въ насадкѣ ниже господствовавшаго у выходного отверстія противодавленія и вызванное этимъ передъ выходомъ сжатіе пара могло произойти отъ несоотвѣтствія угла конусности насадки этимъ начальнымъ давленіямъ, т. ч. струя не могла выполнить всего сѣченія ея.

Отысканіе наиболѣе выгоднаго угла конусности при заданныхъ предѣлахъ высшаго и низшаго начальнаго давленія пара, при которыхъ работоспособность инжектора должна измѣняться возможно мало, должно составить задачу конструктора. Въ настоящее же время для рѣшенія вопроса пока не имѣется достаточныхъ данныхъ.

Точно также мы не можемъ пока сказать ничего опредѣленнаго и о процессѣ расширенія въ насадкѣ, по скольку онъ зависитъ въ инжекторѣ отъ соприкосновенія стѣнокъ ея съ притекающей холодной водой.

Можно лишь предполагать, что благодаря малой длинѣ насадки и быстротѣ процесса расширенія, вліяніе этого не должно сказаться значительнымъ отклоненіемъ кривой расширенія отъ вида, который она имѣетъ при истеченіи пара въ атмосферу. Только по выходѣ пара изъ насадки, когда начинается непосредственное соприкосновеніе его съ водой и быстрая конденсація его, должно рѣзко сказаться уменьшеніе давленія.

Если справедливы результаты опытовъ Stodola, — а именно, что только при равенствѣ давленія пара у выходнаго отверстія и противодавленія движеніе частицъ пара происходитъ по прямой, мы должны ожидать возникновенія волнообразнаго движенія частицъ смѣси, а, слѣдовательно, и связанной съ этимъ потери кинетической энергіи.

Если это такъ, то паровая насадка всасывающаго инжектора должна дать возможность пару расширяться до давленія ниже атмосфернаго, т. е. быть болѣе длинной, чѣмъ у инжектора, работающаго съ водой, подводимой къ нему подъ напоромъ.

Намѣчаемые здѣсь вопросы относительно процесса расширенія пара въ насадкѣ инжектора въ присутствіи холодной воды могутъ быть разрѣшены, конечно, только опытнымъ путемъ.

До сихъ поръ мы рассматривали движеніе струи пара происходящимъ безъ сопротивленій; въ дѣйствительности же, благодаря большой скорости движенія, это сопротивленіе должно значительно измѣнить запасъ кинетической энергіи струи противъ исчисляемаго по формуламъ.

Stodola, на основаніи своихъ опытовъ, полагаетъ, что при насадкахъ до $50^m/m$ длины, при діаметрахъ устья отъ 6 до $10^m/m$ и небольшой конусности ихъ, эту потерю кинетической энергіи отъ тренія можно считать равной 10—15% полнаго количества ея.*) По опытамъ турбиностроительнаго завода Лавала въ Стокгольмѣ потеря энергіи выражается тѣмъ же числомъ; уменьшеніе же скорости слѣдуетъ считать равнымъ 5—8% теоретически вычисляемой. Результаты испытаній Büchner'a даютъ эту потерю также равной 7—8%, пока она зависитъ только отъ тренія; при замедленіи же струи вслѣдствіе подпора со стороны выхода потеря въ скорости составляетъ 35—49%.

*) Опыты Левицкаго надъ истеченіемъ мало перегрѣтаго пара даютъ возможность заключить, что потеря составляетъ 8% (Z. d. V. d. Ing., 1903 г.).

Разсмотримъ теперь вліяніе влажности пара на конечную скорость его. Для скорости имѣемъ формулу (5)

$$w=91,53 \sqrt{q_1-q_2+r_1 x_1-r_2 x_2}.$$

Мы полагали, что паросодержаніе въ начальномъ состояніи $x_1=1$.

Если паръ будемъ подводить влажнымъ, то тѣмъ самымъ уменьшаемъ численную величину члена суммы $r_1 x_1$; паросодержаніе x_2 въ концѣ расширенія также уменьшится, но такъ какъ сильно увеличивается r_2 , то подкоренное количество уменьшается.

Пусть, напримѣръ, начальное давленіе пара 10 atm. и $x_1=1$; расширение до 1 atm.

По таблицамъ для насыщеннаго водяного пара находимъ

$$\begin{aligned} p_1 &= 10 \text{ atm.}; & q_1 &= 181,243; & r_1 &= 479,817; & x_1 &= 1. \\ p_2 &= 1 \text{ atm.}; & q_2 &= 99,576; & r_2 &= 537,146; & x_2 &= 0,873 \end{aligned}$$

Здѣсь x_2 опредѣлено по формулѣ

$$\frac{x_1 r_1}{T_1} + \Phi_1 = \frac{x_2 r_2}{T_2} + \Phi_2.$$

$$\text{По таблицамъ } p_1=10 \text{ atm.}, \Phi_1=0,50986; \quad \frac{r_1}{T_1}=1,0618 \text{ и } x_1=1.$$

$$p_2=1 \text{ atm.}, \Phi_2=0,31108; \quad \frac{r_2}{T_2}=1,4436 \text{ и } x_2=?$$

Вычисленіе даетъ

$$1,0618 + 0,19878 - 1,4436 x_2 \text{ и } x_2=0,873.$$

Дѣлая подстановку въ формулѣ для скорости, находимъ значеніе w .

$$w=91,53 \sqrt{81,667+10,889}=880,5 \text{ mtr.}$$

Положимъ теперь, что $x_1=0,95$; для x_2 находимъ значеніе 0,836, и соответственно для скорости будемъ имѣть

$$w=91,53 \sqrt{81,667+6,772}=91,53 \sqrt{88,439}=860,9 \text{ mtr.};$$

скорость уменьшилась на 19 mtr., что составляетъ около 2,27%.

Въ 1873 году Allaire взялъ патентъ на инжекторъ съ перегрѣтымъ паромъ; онъ имѣлъ въ виду главнымъ образомъ достигнуть значительнаго подогреванія воды; предполагалось также, что въ этомъ случаѣ къ инжектору можно подводить болѣе горячую воду. Однако, его попытка успѣха не имѣла.

Изъ подсчета скорости при влажномъ парѣ видно, что для инжектора его слѣдуетъ брать въ томъ мѣстѣ котла, гдѣ сухость его наибольшая.

Присутствіе влаги въ струѣ пара невыгодно отзывается и на службѣ самой насадки. Онѣ отливаются изъ бронзы, и нужна особенно тща-

тельная формовка и отливка, чтобы во всѣхъ мѣстахъ насадки получить однородныя по сплаву и по качеству поверхности. Въ случаѣ появленія болѣе мягкихъ мѣстъ на поверхности насадки, онѣ будутъ вытираться водою, проходящей по нимъ съ большою скоростью. Насколько важно имѣть не только въ началѣ службы насадки, но и по истеченіи извѣстнаго срока гладкую полированную поверхность внутри ея, можно судить по діаграммѣ 16 *). Кривыя В—Е были получены при насадкѣ, у которой въ соотвѣтствующемъ мѣстѣ оказалась пористая поверхность; такая же пористость, царапины или плохо полированная поверхность послѣ обточки при входѣ въ насадку вызоветъ сжатіе струи пара; на кривой расширенія получается направленный внизъ зубецъ. Сжатіе струи при входѣ влечетъ за собой уменьшеніе количества вытекающаго пара и пониженіе давленія во всѣхъ сѣченіяхъ насадки.

Расширеніе пара въ насадкѣ впервые къ инжектору было примѣнено Schau въ 1869 году въ Германіи, наиболѣе же распространено употребленіе такихъ насадокъ въ Америкѣ. Въ употребленіе онѣ были тамъ введены еще въ 1860 году, слѣд., раньше Schau, Will. Sellers'омъ.

Путемъ широко поставленныхъ опытныхъ изысканій ему удалось настолько усовершенствовать приборъ Жиффара, что въ настоящее время на многихъ желѣзныхъ дорогахъ Франціи, родины изобрѣтателя, инжекторы Sellers'a считаются единственно допустимыми для постановки на паровозахъ.

Въ нижеслѣдующей таблицѣ Н. приведены результаты испытаній инжектора Sellers'a, типа 1876 г., произведенныхъ въ 1879 г. въ Бостонѣ

Т А Б Л И Ц А Н.

Давленіе пара въ котлѣ.	Подача воды въ литрахъ въ часъ		Отно- шеніе $\frac{\text{minim.}}{\text{maxim.}}$	Температура			Давленія пара, не- обходимыя для работы на проти- водавленіе, указанное въ I столб.
	Maximum.	Minimum.		Пита- тельной воды.	При maxim.	При minim.	
2,10 $\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$	2400	1500	0,625	20° Ц.	50° Ц.	51° Ц.	1,10 $\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$
4,20 „	3230	1900	0,559	—	54° „	57° „	2,30 „
6,30 „	3880	1870	0,479	—	59° „	67° „	3,50 „
8,40 „	4270	2210	0,516	—	65° „	69° „	4,90 „
10,50 „	4270	2490	0,586	—	71° „	77° „	6,80 „

*) Stodola, Dampfturbinen.

М. К. Н. Вуеллемъ; инжекторъ № 6, высота всасыванія 1,5 mtr., сливъ закрытый. *).

Наибольшія предѣльныя температуры для питательной воды показаны для различныхъ давленій въ слѣдующей таблицѣ J.

Т А Б Л И Ц А J.

Давленіе пара.	1,4	2,8	4,2	5,6	7,0	8,4	9,8	10,5
Температура	59°	58°	55°	55°	56°	56°	53°	53°

Если сравнимъ данныя этихъ таблицъ съ результатами, полученными Villiers при испытаніи инжектора Жиффара, то будемъ имѣть таблицу K.

Т А Б Л И Ц А K.

Инжекторъ Жиффара.			Инжекторъ Селлера.		
Р Рабочее давленіе пара.	Р ₁ Возможное при немъ противодав- леніе.	Отношеніе Р ₁ : Р	Рабочее давленіе пара Р.	Возможное при немъ противодав- леніе. Р ₁	Отношеніе Р ₁ : Р.
2	2,15	1,075	1,10	2,10	1,9
2,5	2,75	1,1	2,3	4,20	1,8
3	3,40	1,13	3,5	6,30	1,8
3,5	4,0	1,14	4,9	8,40	1,7
4	4,75	1,18	6,8	10,5	1,5
4,5	5,35	1,19	—	—	—

При рабочемъ давленіи пара въ 3,5. atm. инжекторъ Sellers'a можетъ работать противъ давленія въ $\frac{6,3}{4} = 1,57$ раза большаго, чѣмъ инжекторъ Жиффара.

Въ теоріи инжектора, какъ она изложена во многихъ руководствахъ, при сходящейся конической насадкѣ очень видную роль играетъ отношеніе выходной площади паровой насадки къ наименьшему сѣченію приѣмной насадки. Какъ установилъ Жиффаръ оно должно быть въ предѣлахъ 1,7—2.

*) Procée d. et Civil Engin., XXIV.

Измѣнивъ это отношеніе, Rue*) построилъ инжекторъ, который при рабочемъ давленіи пара въ 5,5—6 atm. нагнетаетъ воду при противодавленіи въ 28—30 atm. Это возможно, конечно, при большомъ уменьшеніи количества подаваемой имъ воды. Однако преимущество одной системы инжектора передъ другой заключается не въ этомъ. Важно, чтобы инжекторъ, какъ питательный приборъ при котлѣ, давалъ возможность достаточно широко измѣнять количество подаваемой имъ воды, сообразно испарительности въ котлѣ; важно также, чтобы отношеніе между предѣльными количествами подаваемой имъ воды по возможности мало измѣнялось съ колебаніями въ давленіи пара. Таблица II указываетъ, насколько хорошихъ результатовъ въ этомъ отношеніи удалось достигнуть съ приборомъ.

Перейдемъ теперь къ опредѣленію размѣровъ паровой насадки. Если насадка представляетъ коническій сходящійся конусъ, то конечное давленіе пара при выходѣ изъ нея будетъ равно 0,57 начального давленія. По одной изъ указанныхъ въ предыдущемъ формулъ, вычисляемъ скорость выхода пара.

Положимъ, что каждый kgr. пара подаетъ y kgr. воды; полное количество воды, которое нужно подать въ секунду пусть будетъ P kgr.; слѣдовательно, мы должны будемъ израсходовать $\frac{P}{y}$ kgr. пару въ секунду.

Удѣльный объемъ пара при выходѣ

$$v = xu + \sigma.$$

Объемъ вытекающаго пара будетъ $\frac{P}{y} v$.

Такъ какъ скорость выхода пара w , то площадь паровой насадки, имѣющей форму сходящагося конуса, будетъ

$$\omega = \frac{P}{y} \frac{v}{w}.$$

Положимъ, что имѣется паръ 8 atm. давленія по манометру.

Въ выходномъ сѣченіи насадки давленіе его будетъ равно 0,57. $8 = 4,56$ atm. Если начальное паросодержаніе $x=1$, то при выходѣ $x_2=0,9685$.

Скорость выхода будетъ 448,8 mtr.

Примемъ, что каждый kgr. пара подаетъ 12 kgr. воды; количество воды можно опредѣлить и въ зависимости отъ начальной и конечной температуръ ея. Пусть начальная температура воды 15° Ц. и желательно подавать воду въ котель нагрѣтой до 70° Ц.

*) Handbook of the Locomotive, 7 ed., p. 230.

1 kgr. паръ при выходѣ изъ насадки содержитъ
 150,918+0,9685.501,170=636,3 калорій;
 4,71 калорій содержитъ находящаяся въ смѣси съ нимъ вода.
 Итого 641 калорія.

Имѣемъ равенство:

$$571=y(70-15) \text{ и } y=10,4. \text{ kgr.}$$

Удѣльный объемъ пара $v=0,3765$.

Если котель расходуетъ въ часъ 1200 kgr. воды, то въ секунду нужно подать 0,33 kgr. *).

Слѣдовательно, площадь выходного отверстія насадки будетъ

$$\omega = \frac{0,33 \cdot 0,3765}{10,4 \cdot 448,8} \text{ квад. метровъ.}$$

$$\omega = 0,000026619 \text{ кв. мет. или } 26,62 \text{ mm}^2.$$

Диаметръ выходного отверстія долженъ быть $\propto 5,82 \frac{\text{m}}{\text{m}}$.

Если теперь расширить насадку отъ найденнаго сѣченія и дать возможность пару свободно расширяться до давленія въ конденсаціонной насадкѣ, которое примемъ равнымъ 0,3 atm. abs.**), то скорость выхода въ этомъ случаѣ будетъ:

$$w=91,53 \sqrt{171,493-68,93+489,692-558,535x_2}.$$

Для опредѣленія x_2 пользуемся формулой

$$\frac{r_1 x_1}{T_1} + \Phi_1 = \frac{r_2 x_2}{T_2} + \Phi_2$$

и при $x_1=1$

$$\Phi_1=0,488; \quad \frac{r_1}{T_1}=1,1$$

$$\Phi_2=0,2253; \quad \frac{r_2}{T_2}=1,635.$$

Вычисляемъ x_2

$$x_2=0,833.$$

Дѣлая подстановку и производя указанныя дѣйствія, находимъ скорость w' равной 1018,7 mtr.

$$\text{Удѣльный объемъ пара } 0,833 \cdot 5,3 + 0,001 = 4,42.$$

*) На практикѣ обыкновенно берутъ инжекторъ, подающій въ 2—3 раза большее количество воды.

**) Почти крайній предѣлъ для всасывающихъ холодную воду инжекторовъ. Смори главу „испытаніе инжекторовъ“.

Для опредѣленія выходной площади замѣтимъ, что она должна изменяться прямо пропорціонально объемамъ и обратно пропорціонально скоростямъ, т. е.

$$\frac{\omega'}{\omega} = \frac{v'}{v} \cdot \frac{w}{w'} \quad \text{или}$$

$$\omega' = \frac{0,000027 \cdot 4,42 \cdot 448,8}{0,3765 \cdot 1018,7} = 0,000124 \text{ кв. метр. или } 124 \text{ м.}^2.$$

Отсюда діаметръ расширенной насадки въ концѣ ея долженъ быть равенъ 12,6 мм, такъ что отношеніе $\frac{d_1}{d} = \frac{12,6}{5,8} \approx 2,02$.

Мы производили подсчетъ, не принимая во вниманіе потери скорости отъ тренія. Благодаря этой потерѣ, чтобы не тормазить движенія пара, выходное сѣченіе насадки должно быть нѣсколько увеличено въ зависимости отъ коэффиціента, представляющаго отношеніе дѣйствительной скорости къ теоретически вычисляемой.

Въ частномъ, разсматриваемомъ нами случаѣ примѣненія насадки къ инжектору остается совершенно открытымъ вопросъ, какъ опредѣлить этотъ коэффиціентъ и, слѣдовательно, насколько увеличить площадь выходного отверстія. Неопредѣленность вносить, именно, возможное паденіе давленія въ насадкѣ, благодаря соприкосновенію стѣнокъ ея съ холодной водой, и зависящая отъ этого конденсація пара въ насадкѣ; данныя нѣкоторыхъ опытовъ указываютъ, что эта конденсація значительна и замѣтно отражается на вѣсѣ расходуемаго пара. *)

Такъ, напримѣръ, Delou при испытаніи инжектора, работавшаго паромъ въ 7 атм. давленія, опредѣлили расходъ пара въ 0,205 kgr. въ секунду; при истеченіи пара въ резервуаръ, въ которомъ онъ затѣмъ конденсировался, расходъ пара черезъ тотъ же инжекторъ былъ опредѣленъ (по вѣсу конденсата) равнымъ 0,120 kgr. въ секунду; такимъ образомъ, вліяніе воды сказалось увеличеніемъ расхода пара въ 1,7 раза.

Увеличеніе количества вытекающаго пара было замѣчено также Цейнеромъ.

Всѣ вопросы относительно паровой насадки могутъ быть просто и наглядно рѣшены съ помощью энтропійной діаграммы. Мы имѣемъ шесть величинъ, изъ которыхъ часть дана, другія должны быть найдены; это давленіе пара, объемъ его, температура, энтропія, скорость и площадь того сѣченія насадки, къ которому они относятся.

*) Это, однако, плохо согласуется съ наблюдаемымъ повышеніемъ температуры питательной воды, прошедшей инжекторъ, и вычисляемымъ подогреваніемъ ея тѣмъ количествомъ пара, которое вычисляется по формуламъ истеченія. Разница между температурами по наблюденію и подсчету очень мала; по опытамъ же Delou нужно было бы ожидать большого разногласія. Въ виду этого, приводимое указаніе на эти опыты абсолютнаго значенія не имѣетъ и служитъ лишь иллюстраціей малаго обслѣдванія вопросовъ, связанныхъ съ работой инжектора.

Положимъ, имѣемъ паръ, начальное давленіе котораго $p \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$; по таблицахъ для водяныхъ паровъ намъ извѣстны температура его и энтропія. Въ системѣ прямоугольныхъ осей координатъ, абсциссами у которой служатъ энтропіи, а ординатами температуры, строимъ тепловую діаграмму (черт. 17). Процессъ истеченія, какъ и прежде, считаемъ адиабатическимъ; при $x=1$, адиабата расширенія пара въ тепловой діаграммѣ изобразится прямой ab ; пусть скорость пара въ точкѣ a равна w_0 , а въ точкѣ b — w_1 .

Чтобы изъ воды 0°Ц. получить паръ, состояніе котораго идентично съ состояніемъ его въ точкѣ a нашей діаграммы, мы должны затратить λ_0 единицъ тепла; оно равно площади $odcabe$; послѣ расширенія пара и превращенія части тепловой энергіи его въ кинетическую, онъ содержитъ въ себѣ λ_1 тепловыхъ единицъ; если bd соответствуетъ той температурѣ пара, а, слѣдовательно, давленію, до котораго производится расширеніе, то имѣющаяся въ парѣ теплота λ_1 будетъ дана площадью $odbe$. Мы имѣемъ:

$$\frac{A}{2g} (w_1 - w_0)^2 = \lambda_0 - \lambda_1.$$

Такъ какъ начальная скорость пара равна 0, то

$$w_1^2 = \frac{2g (\lambda_0 - \lambda_1)}{A} \text{ или } w_1^2 = \frac{2g}{A} \times \text{площадь } abdc.$$

Съ помощью той же діаграммы мы можемъ найти любую промежуточную скорость.

Напр., мы хотимъ знать скорость въ тотъ моментъ, когда состояніе пара соответствуетъ точкѣ k адиабаты ab ; теплота испаренія равна λ' и равна площади $omke$.

Скорость w' въ точкѣ k равна

$$w'^2 = \frac{2g(\lambda_0 - \lambda_1)}{A} = \frac{2g}{A} = \text{площадь } astk.$$

Теплоты испаренія $\lambda_0, \lambda_1, \dots$ и т. д. мы можемъ, зная масштабъ, замѣнить измѣреніемъ соответствующей площади планиметромъ, или же взять ихъ по таблицамъ для насыщенныхъ паровъ воды *).

Если процессъ происходитъ не адиабатически, а по какой-либо кривой ag , то и въ этомъ случаѣ получается простое рѣшеніе для нахождения скорости пара въ точкѣ g .

*) Очень просто рѣшается вопросъ объ опредѣленіи скорости, теплоты испаренія, паросодержанія пара и пр. по діаграммѣ I. S. Mollier'a (Z. d. V. d. Ing. 1904 г., стр. 272).

Теплота испаренія для начальнаго состоянія дава площадью $osae$, въ концѣ расширенія площадью $odgh$; скорость истеченія, такимъ образомъ, будетъ найдена по формулѣ:

$$w_1^{1/2} = \frac{2g}{\Lambda} \times (\text{площадь } abdc - \text{площадь } ebgh).$$

Скорость истеченія въ этомъ случаѣ будетъ меньше; площадь $ebgh$ представляетъ потерю тепла, благодаря неадиабатичности процесса.

По тепловой діаграммѣ ясно видно, что для полученія наибольшей скорости, мы должны брать паръ возможно сухой.

Чѣмъ ближе кривая расширенія идетъ къ пограничной кривой $x=1$, тѣмъ меньшее количество теплоты будетъ преобразовано въ кинетическую энергію.

Предполагая, какъ и раньше, процессъ адиабатическимъ, мы можемъ вычислить скорость, задаваясь извѣстнымъ $\%$ потери энергіи. Допустимъ, что потеря составляетъ 18% ; тогда на линіи db , линіи температуры пара, до которой доводимъ расширеніе, мы откладываемъ отъ точки b отрѣзокъ bg' такой величины, чтобы площадь $bg'eh'$ составляла $0,18$ площади $abdc$. Въ самомъ дѣлѣ, мы при неадиабатическомъ расширеніи пара по кривой ag' , скорость его опредѣлимъ по разности площадей $abdc$ и $bg'eh'$; такъ какъ $bg'eh'=0,18 abdc$, то кинетическая энергія пара (скорость w_2) будетъ

$$\Lambda \frac{w_2^2}{2g} = 0,82 \text{ площади } abdc.$$

Итакъ съ помощью тепловой діаграммы, мы найдемъ скорость пара въ любомъ сѣченіи его. Посмотримъ, какъ опредѣлить объемъ пара въ любомъ сѣченіи, гдѣ намъ извѣстна скорость его, или, что тоже, при томъ состояніи его, которое дано какой либо точкой на тепловой діаграммѣ.

Строимъ, какъ и прежде, тепловую діаграмму въ прямоугольныхъ осяхъ координатъ; по оси абсциссъ влѣво отъ точки O въ какомъ либо масштабѣ откладываемъ давленія пара, выраженные въ kg/cm^2 ; такъ какъ ось ординатъ вверхъ отъ точки O представляетъ температуры, то въ лѣвомъ квадрантѣ вверхъ получаемъ кривую, характеризующую намъ измѣненія давленія пара въ зависимости отъ температуры его [$p=f(t)$]. (черт. 18).

Внизъ по оси ординатъ откладываемъ въ масштабѣ объемы пара, соотвѣтствующие давленіямъ его p_1, p', p'' и т. д. и строимъ кривую MN , представляющую законъ измѣненія объемовъ отъ давленія при постоянномъ паросодержаніи $x=1$.

Пусть данное состояніе пара указано намъ въ тепловой діаграммѣ точкой a ; мы хотимъ найти объемъ пара.

Проводимъ прямую параллельную оси абсциссъ до пересѣченія съ кривой $p=f(t)$; изъ точки пересѣченія проводимъ вертикаль до пересѣче-

нія съ кривой $v=f_1(p)_{x=1}$ и вновь параллель оси абсциссъ чрезъ найденную точку пересѣченія вертикали съ кривой $v=f_1(p)$.

Изъ точки пересѣченія прямой, проходящей чрезъ a || оси абсциссъ, и пограничной кривой $x=1$, опускаемъ вертикаль и ищемъ точку встрѣчи съ предыдущей прямой; изъ точки пересѣченія той же прямой чрезъ a съ пограничной кривой $x=0$, опускаемъ перпендикуляръ на ось абсциссъ; соединяемъ точки d и e ; проводя изъ a вертикаль внизъ, а изъ точки встрѣчи ея съ прямой ed горизонталь a_1a' , находимъ точку a' , какъ пересѣченіе ея съ вертикалью, соотвѣтствующей данному давленію пара въ точкѣ a . Последняя перенесена, такимъ образомъ изъ тепловой діаграммы въ діаграмму p и v .

На чертежѣ показано второе построеніе для точки b .

Въ основу этого построенія положена связь между p и v и энтропией, данная уравненіемъ Кляпейрона:

$$\frac{r}{u} = AT \frac{dp}{dt} \quad \text{или}$$

$$Au = \frac{r}{T} \cdot \frac{dt}{dp}.$$

Отрѣзки горизонталей между обѣими пограничными въ тепловой діаграммѣ даютъ въ извѣстномъ масштабѣ частное $\frac{r}{T}$; $\frac{dp}{dt}$ есть тангенсъ угла касательной къ кривой $p=f(t)$, который она дѣлаетъ съ осью t со стороны положительныхъ p (черт. 19), т. е. $\frac{dp}{dt} = \operatorname{tg} \beta$.

Построимъ при точкѣ a уголъ $\alpha = 90 - \beta$ и продолжимъ сторону выстроеннаго угла до пересѣченія съ адиабатой $x=1$ въ точкѣ c . Имѣемъ

$$\overline{bc} = \frac{r}{T} \operatorname{tg} \alpha = \frac{r}{T} \operatorname{tg} (90 - \beta) = \frac{r}{T} \cdot \frac{1}{\operatorname{tg} \beta}.$$

Но $\operatorname{tg} \beta = \frac{dp}{dt};$

слѣдовательно, $\overline{bc} = \frac{r}{T} \cdot \frac{dt}{dp}$ и

отрѣзокъ $\overline{bc}$ даетъ въ масштабѣ Au .

Проектируемъ точку a на ось абсциссъ и строимъ при a' тотъ же уголъ α и отрѣзокъ $b's'$; проектируемъ его на вертикаль, соотвѣтствующую давленію p въ b_1c_1 ; точка c_1 принадлежитъ кривой p_1 .

Извѣстно, что $v=u+\sigma x$; такъ какъ $x=1$, то

$$v=u+\sigma.$$

Видимъ, что ось діаграммы pv лежитъ на σ выше нашей горизонтальной оси u , по малости величины σ , съ нею совпадаетъ, т. е. c_1 и есть точка, принадлежащая діаграммѣ pv .

Тѣмъ самымъ данъ путь для построения кривой насыщения въ лѣвомъ нижнемъ квадрантѣ [т. е. помощью касательныхъ къ кривой $p=f(t)$]; но ее можно выстроить, пользуясь таблицами для паровъ воды; лѣвая пограничная кривая для $x=0$ въ діаграммѣ p_v , очевидно, изобразится прямой, совпадающей съ осью абсциссъ, такъ какъ величиной σ мы пренебрегаемъ.

Итакъ, любую точку діаграммы тепловой мы графическимъ построениемъ перенесемъ въ діаграмму p_v , и въ каждый моментъ расширения пара найдемъ занимаемый имъ объемъ.

Обратимся теперь къ чертежу 20.

Отъ начальнаго давленія паръ расширяется до давленія p' съ потерей энергіи, равной 15% (площадь $b_1cfe=0,15 abb_1d$); выстроены кривая $p=f(t)$ и $p=\varphi(v)$; съ помощью указаннаго выше графическаго метода кривая расширения пара перенесена въ лѣвый нижній квадрантъ. Для любой точки мы находимъ численную величину скорости и объемъ пара v ; откладывая по горизонтали, проходящей чрезъ v_k эту скорость въ извѣстномъ масштабѣ, мы получимъ кривую скоростей, которая будетъ проходить чрезъ точку O , начало координатъ. Одна точка этой кривой, именно точка пересѣченія ея съ кривой $p=\varphi(v)$ опредѣляется непосредственно, какъ критическая скорость, зависящая отъ давленія 0,57 начальнаго. Объему пара, который опредѣляется этой точкой, соответствуетъ устье паровой насадки. Если количество вытекающаго въ секунду пара 1 kgr., то существуетъ равенство

$$F.w=Gv=v,$$

такъ какъ $G=1$.

Отсюда вытекаетъ простой способъ нахождения графически площадей насадки F тамъ, гдѣ паръ имѣетъ скорость w . Прямая AB проведена вертикально внизъ на разстояніи отъ оси ординатъ, которое въ масштабѣ даетъ 1 kgr. пару.

Соединяемъ точку n (скорость w) съ началомъ координатъ и продолжаемъ прямую On до пересѣченія съ AB ; имѣемъ точку q . Отрѣзокъ Aq даетъ число квадратныхъ единицъ площади; дѣйствительно, изъ подобія треугольниковъ Ons и Oaq слѣдуетъ:

$$ns : Os = AO : Aq \text{ или}$$

$$Os \cdot AO = ns \cdot Aq \text{ или}$$

$$v \cdot 1 = w \cdot Aq = wF.$$

Далѣе, при точкѣ q строимъ уголъ $\alpha=38^\circ 4'$ и продолжаемъ сторону его до пересѣченія съ AO въ точкѣ z ; отрѣзокъ qz равенъ d^2 ; дѣйствительно, мы имѣемъ:

$$Aq = qz \cdot \cos \alpha.$$

$$F = 0,784 \cdot d^2.$$

Откладывая отъ прямой АВ вправо и влѣво $\frac{d}{2}$ по горизонталямъ для соответствующихъ скоростей w , находимъ профиль насадки, чрезъ которую въ секунду проходить одинъ kg. пару; пусть площадь устья μ и выхода ρ ; насадку надо сдѣлать на расходъ пара $D \text{ kg.}$; очевидно, что у нея площадь устья должна быть μD и площадь выхода ρD . Такимъ образомъ мы найдемъ профиль насадки, въ которой расширение пара происходитъ съ принятой нами потерей энергіи и чрезъ которую протекаетъ вполнѣ опредѣленное количество пара $D \text{ kg.}$ въ секунду.

Мы указали уже выше особенность инжектора, отмѣченную впервые самимъ Жиффаромъ и затѣмъ Deloy *), что онъ можетъ подавать воду при противодавленіи большемъ, чѣмъ давленіе работающаго въ немъ пара, но она не была своевременно оцѣнена ими. Deloy, напримѣръ, замѣтилъ, что отношеніе между противодавленіемъ и давленіемъ работающаго пара равно отношенію площади выходнаго отверстія паровой насадки къ площади устья пріемной **). Только Hamer и Davies ***)) обратили вниманіе на эту особенность съ практической стороны, устроивъ инжекторъ для работы мятымъ паромъ.

Мы видѣли выше, что кинетическая энергія струи получается за счетъ теплоты пара; но извѣстно, какъ мало надо сообщать пару тепла для того, чтобы поднять давленіе его отъ одной атмосферы; напр., для полученія пара съ давленіемъ въ одну атмосферу нужно 1 kg. воды сообщить 637 калорій, а чтобы поднять давленіе его до 7 atm. , надо добавочно сообщить всего 20 калорій; въ этомъ, вѣдь, и заключается главнымъ образомъ неэкономичность паровыхъ машинъ; даже при конденсации пара, когда давленіе въ цилиндрѣ ея падаетъ до $0,2 \text{ atm.}$, паръ заключаетъ въ среднемъ до 80% теплоты, необходимой для его полученія и не использованной для механической работы. Отсюда низкій коэффиціентъ полезнаго дѣйствія паровой машины, какъ термическаго двигателя.

Какъ велика можетъ быть энергія отработавшаго въ цилиндрахъ машины пара, т. называемаго мятаго пара, видно изъ числового примѣра.

Положимъ, что машина простого расширенія работаетъ съ начальнымъ давленіемъ пара въ 7 atm. ; паросодержаніе $x=1$. При расширеніи пара до $1,2 \text{ atm.}$ часть его конденсируется, но при началѣ періода сжатія количество содержимой однимъ kg. пара воды не будетъ тоже, что въ концѣ расширенія; каково оно въ дѣйствительности, точно опредѣлить невозможно. Hirn у машинъ съ конденсаціей считаетъ, что x

*) Annal. des Mines, 1860, XVII.

**) См. выше, инжекторъ Rue, сконструированный съ отступленіемъ отъ обычнаго правила и нагнетающій воду при очень большомъ противодавленіи.

***)) Bevue Industrielle, 1883.

будетъ единица; Zeuner, полагая $x=1$ въ началѣ работы и паръ не перегрѣтымъ, считаетъ паросодержаніе $x=0,808$ и даже ниже.*)

Будемъ считать $x=0,8$.

При истеченіи мятаго пара изъ конической сходящейся насадки въ конденсаціонную камеру инжектора, давленіе въ которой можно принять $0,4 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$, давленіе у выходного отверстія будетъ $0,57.1,1$ (давленіе пара, входящаго въ насадку беремъ $1,1 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$); слѣдовательно, давленіе у выхода $0,627 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$.

Опредѣляемъ x_2 по формулѣ

$$\frac{r_1 x_1}{T_1} + \Phi_1 = \frac{r_2 x_2}{T_2} + \Phi_2.$$

По таблицамъ при

$$p=1,1, \quad q=102,281; \quad \frac{r}{T}=1,4283; \quad \Phi_1=0,31833; \quad x=0,8; \quad r=535,255$$

$$p=0,6, \quad q=85,818; \quad \frac{r}{T}=1,5252; \quad \Phi_2=0,27341; \quad x=?; \quad r=546,754.$$

$$1,4283.0,8 + 0,31833 = 0,27341 + 1,5252x_2;$$

$$x_2=0,78.$$

$$\text{Скорость истеченія } w=91,53 \sqrt{q_1 - q_2 + r_1 x_1 - r_2 x_2}$$

$$w=390 \text{ metr.}$$

Мы видимъ, что она немногимъ отличается отъ скорости истеченія пара высокаго давленія чрезъ такую же насадку. Будемъ считать, что на 1 kgf. пару притекаетъ 18 kgf. воды, имѣющей скорость 10 метровъ; такой скорости соотвѣтствуетъ напоръ въ 5,1 mtr., т. е. разрѣженіе въ камерѣ должно быть около $\frac{1}{2}$ атмосферы, что вполне возможно. По теоремѣ о количествахъ движенія имѣемъ:

$$390 + 18.10 = 19.v.$$

и

$$v=30 \text{ mtr.}$$

Такой скорости отвѣчаетъ напоръ въ 45,8 mtr.; если считать для одной атмосферы высоту столба воды въ 10 mtr., то струя можетъ преодолѣть, пренебрегая вредными сопротивленіями, давленіе на питательный клапанъ со стороны котла въ 4,58 атм. Это согласуется съ данными практики. По опытамъ Sellers'a **) мятымъ паромъ можно нагнетать воду въ котелъ съ давленіемъ до 5 атм., при чемъ вислоько не увеличивается противодавленіе на поршень машины; при противодавленіи отъ 5 до 12

*) Zenner, Technische Thermodynamik, S. 396 и слѣд.

**) American Mashinist, 1882 г.

атм. можно работать тѣмъ же инжекторомъ, присоединяя къ нему насадку для свѣжаго пара, который даетъ окончательный сильный толчекъ водѣ.

На фиг. 21 и 22 указаны діаграммы паровой машины, снятыя индикаторомъ Ричарда для случаевъ, когда инжекторъ работалъ и не работалъ. Въ первомъ случаѣ давленіе на задней сторонѣ поршня машины было на $0,14 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ меньше, чѣмъ во второмъ *).

Инжекторъ расходуетъ около 6,5% пару, производимаго котломъ; если паропроизводительность котла 2000 kgf., то примѣненіе мятаго пара, когда онъ не расходуется для другихъ цѣлей, напр., отопления, подогреванія воды и пр., можетъ сохранить эти 130 kgf. пара въ часъ; вода при этомъ будетъ поступать въ котель при температурѣ 70—90°.

Широкому распространенію такихъ инжекторовъ однако препятствуетъ то обстоятельство, что вмѣстѣ съ мятымъ паромъ въ котель попадаетъ содержащееся въ немъ масло, которое, въ лучшемъ случаѣ, будетъ вызывать лишь вспѣніе воды въ котлѣ и тѣмъ препятствовать полученію сухого пара. Чтобы избѣжать загрязненія котла масломъ, надо поставить фильтръ для мятаго пара, который прежде всего отдѣляетъ эмульсію воды съ масломъ и затѣмъ фильтруетъ самый паръ. При паротурбинныхъ установкахъ примѣненіе инжектора, работающаго отходящимъ паромъ, должно найти болѣе широкое распространеніе.

Въ виду значительно бóльшаго объема пара, имѣющаго упругость въ 1,1 атм., размѣры насадки его болѣе значительны. Определеніе ихъ можетъ быть произведено по указаннымъ выше формуламъ.

*) Pompes et machines à élever les eaux, Poillon.

Конденсационная насадка.

Ниже въ главѣ о приѣмной насадкѣ мы будемъ видѣть, что площадь сѣченія устья ея и форма насадки за нимъ служатъ главными рѣшающими моментами въ работѣ инжектора, какъ питательнаго прибора. Но едва ли не важнѣе роль конденсаціонной насадки: только благодаря конденсаціи пара становится возможнымъ дѣйствіе прибора, и только съ тѣми газообразными тѣлами, которыя способны конденсироваться, можно получить приборы такого рода. М. Truchot *) удалось, именно, воспроизвести дѣйствіе инжектора, замѣняя водяной паръ струей амміачнаго газа; хотя здѣсь нѣтъ того явленія, которое мы называемъ конденсаціей, но за то на лицо явленіе быстрого поглощенія и растворенія водой струи газа. Не смотря на это, до сихъ поръ остается мало изученнымъ и выясненнымъ вліяніе размѣровъ насадки на быстроту и полноту конденсаціи, и именно въ этой части прибора, быть можетъ, еще много можно внести улучшеній, которыя будутъ способствовать общему усовершенствованію аппарата. Конденсационная насадка, говоритъ Жиффаръ представляетъ ту часть прибора, которая главнымъ образомъ путемъ опыта должна быть опредѣлена и по виду, и по размѣрамъ.***) Этого правила придерживаются и до сихъ поръ все фабриканы инжекторовъ, придавая насадкѣ ту форму, которая согласно взглядовъ конструктора, должна наилучшимъ образомъ удовлетворять своему назначенію. Для каждаго инжектора она и является, быть можетъ лучшей, но только лишь для однихъ, вполне опредѣленныхъ условій, и какъ только обстоятельства, при которыхъ приходится работать инжектору, измѣняются и не отвѣчаютъ этимъ условіямъ, тотчасъ же приборъ становится мало удовлетворяющимъ наличнымъ требованіямъ. Процессъ, происходящій въ этой насадкѣ, настолько сложенъ однако, что выразить и опредѣлить его точно и строго математическими формулами, представляется совершенно невозможнымъ. Можно лишь указать общее явленіе конденсаціи пара, какъ оно происходитъ, опредѣлить тѣ условія, которыя ей благопріятствуютъ, привести добытыя опытнымъ путемъ указанія, и уже на основаніи этого сдѣлать возможные и полезныя заключенія.

*) La Nature, 1879.

**) Ann. des Mines, XVII.

Если струя воздуха, вытекая съ большою скоростью, ударяется о поверхность воды, то мы замѣчаемъ, какъ отъ мѣста удара жидкость разгоняется, частицы ея приходятъ въ болѣе или менѣе сильное колебательное движеніе. Если скорость очень велика и вода въ мѣстѣ удара неглубока, то замѣтно даже разбрызгиваніе жидкости и разбрасываніе ея въ стороны.

При ударѣ пара о поверхность воды происходитъ то же самое, но при этомъ появляется еще и конденсація его: часть пара конденсируется въ мѣстѣ удара, другая часть его отходитъ отъ этого мѣста, паръ стекаетъ по поверхности воды, конденсируясь въ другихъ мѣстахъ. Отсюда вытекають слѣдующія два требованія по отношенію къ конденсаціонной насадкѣ.

Вытекающая изъ паровой насадки струя пара обладаетъ, какъ видѣли, очень большою скоростью, а притекающая въ конденсаціонную насадку вода идетъ сравнительно тонкимъ слоемъ. Форма конденсаціонной насадки должна быть такова, чтобы струя воды не разбивалась и не разбрызгивалась въ моментъ встрѣчи пара съ водой, но сохраняла бы вполнѣ непрерывность.

Второе требованіе, — форма и длина насадки должны быть таковы, чтобы въ нихъ дѣйствительно была возможна конденсація; если насадка къ выходному концу своему будетъ слишкомъ широка или коротка, то совершенной конденсаціи быть не можетъ.

Удается ли достигнуть полной конденсаціи при какомъ бы то ни было инжекторѣ, сказать трудно; состояніе смѣси въ моментъ ея прохожденія чрезъ устье пріемной насадки опредѣлить очень трудно, приходится дѣлать о немъ заключеніе по виѣшнему виду струи въ интервалѣ между конденсаціонной и пріемной насадкой. Струя имѣетъ по наблюденіямъ молочно-бѣлый видъ, непрозрачна, напоминая вспѣнную морскую волну. Возможно, что такой видъ придаютъ ей находящіеся въ водѣ несгустившіеся частицы пара; но такой видъ струя можетъ имѣть и въ томъ случаѣ, когда вода сильно насыщена воздухомъ, или когда внутри жидкости имѣютъ мѣсто вихревыя движенія. Zeuner*) наблюдалъ такой же точно видъ струи при водоструйныхъ аппаратахъ, если одна струя имѣла значительной скоростью.

Вода всегда содержитъ въ себѣ воздухъ; попадая съ ней въ конденсаціонную камеру, гдѣ давленіе незначительно, и гдѣ происходитъ быстрое нагрѣваніе воды, этотъ воздухъ выдѣляется. Его количество можетъ при этомъ быть значительно большимъ, чѣмъ обычное содержаніе въ водѣ, благодаря неплотности и негерметичности всасывающей трубы и соединеній ея. Minary et Resal**) опредѣлили, напр., его

*) Technische Thermodynamik.

**) Ann. des Mines. 1862, 1, 6-я серія.

количество въ 1 литръ на 1 kgr. воды. Мы будемъ говорить еще ниже о томъ, какъ сказывается на работѣ инжектора не вполнѣ совершенная конденсація пара и примѣсь воздуха.

Если намъ извѣстны давленіе и удѣльный объемъ пара ($v = ux + \tau$, т. е. главнымъ образомъ намъ нужно знать x —удѣльное паросодержаніе), то задаваясь начальной и конечной температурами воды, мы тотчасъ же можемъ опредѣлить то количество ея, которое должно поступить одновременно съ нимъ въ конденсаціонную насадку. Положимъ, даны давленіе p, x ; по таблицамъ для водяныхъ паровъ мы находимъ внѣшнюю и внутреннюю теплоты пара. Пусть въ секунду чрезъ паровую насадку вытекаетъ D kgr. пара; назовемъ чрезъ t_a начальную температуру воды; конечная должна быть t_e ; опредѣлимъ P —количество воды въ kgr., необходимое для полной конденсаціи пара.

Въ D kgr. смѣси будетъ Dx kgr. пара и $D(1-x)$ kgr. воды; теплота пара будетъ $Dx(q+r+Ar_i)$ или, т. к. $r+Ar_i=r$, то $Dx(q+r)$; теплота воды, содержимой паромъ $D(1-x)$ q . Послѣ конденсаціи образуется $(D+P)$ kgr. воды, которые при t_e будутъ содержать $(D+P)t_e$ единицъ тепла; теплота холодной воды Pt_a .

Мы имѣемъ равенство, пренебрегая незначительными потерями отъ лучеиспусканія и переноса воздухомъ,

$$Dx(q+r) + D(1-x)q + Pt_a = (D+P)t_e.$$

Отсюда находимъ P .

$$P = \frac{D(q+rx-t_e)}{t_e - t_a} \dots \dots \dots (1).$$

Раздѣляя на D , мы получаемъ

$$\frac{P}{D} = \frac{q+rx-t_e}{t_e - t_a} \dots \dots \dots (2)$$

выраженіе, которое даетъ намъ возможность сдѣлать нѣкоторыя заключенія о томъ, какъ измѣняется количество воды, отнесенное къ 1 kgr. пара, въ зависимости отъ его конечнаго состоянія и начальной и конечной температуръ воды. Оно въ связи съ равенствомъ, получаемымъ по теоремѣ о сохраненіи количествъ движенія, является основнымъ ур—іемъ въ теоріи инжектора.

Слѣдуетъ замѣтить, однако, что оно опредѣляетъ точно лишь то количество воды, которое надо привести для конденсаціи пара; если не желательно, чтобы дѣйствительная температура нагнетанія была выше t_e , надо ввести добавочное количество воды, которая должна поглотить теплоту, получаемую отъ превращенія при ударѣ кинетической энергіи обратно въ тепловую.

Изъ (1) видно, что $\frac{P}{D}$ должно уменьшаться, если должно увеличиваться t_c ; чѣмъ ниже t_a , тѣмъ меньше можно вводить воды на 1 kgr. расходуемаго пара для его конденсаціи; чѣмъ больше паросодержаніе x , тѣмъ большее количество воды слѣдуетъ подводить для конденсаціи. Если вытекающій паръ всегда сухъ, такъ что $x = 1$, то количество вводимой воды почти не зависитъ отъ суммы $(q + r)$, такъ какъ съ измѣненіемъ давленія она мѣняется незначительно.

Опытъ указываетъ, что всасывающіе инжекторы могутъ работать съ высотой всасыванія до 7 mtr. т. е. разрѣженіе въ конденсаціонной камерѣ достигаетъ 0,3 atm. Если принять, что въ среднемъ разрѣженіе въ этой насадкѣ достигаетъ 0,45, то полная теплота сухого насыщеннаго пара будетъ 630 калорій. Для этого числа вычислена слѣдующая таблица, указывающая, сколько kgr. воды нужно при различныхъ t_a и t_c для полной конденсаціи одного kgr. пара.

Эта таблица даетъ наглядное представленіе о томъ, какъ измѣняется $\frac{P}{D}$ въ зависимости отъ начальной и конечной температуръ воды. Она можетъ служить для приблизительной оцѣнки работоспособности инжектора и его совершенства относительно полноты конденсаціи.

Конденсація пара не происходитъ мгновенно, лишь только паръ, по выходѣ изъ паровой насадки, попадаетъ въ конденсаціонную; для этого необходимо предоставить ему извѣстное время. Продолжительность процесса измѣняется въ зависимости отъ поверхностей соприкосновенія пара съ водой; при однихъ и тѣхъ же вѣсовыхъ количествахъ пара и воды время, необходимое для конденсаціи, измѣняется въ обратномъ отношеніи къ этимъ поверхностямъ; при одной и той же поверхности соприкосновенія оно будетъ измѣняться пропорціонально вѣсу конденсируемаго пара.

Въ инжекторѣ вода подводится чрезъ кольцевое пространство, образуемое паровой и конденсаціонной насадками; въ самой насадкѣ конусъ воды охватываетъ струю пара снаружи. При незначительной длинѣ насадки и достаточной скорости воды (до 10 mtr.) можно полагать, что въ своемъ движеніи вода направляется только стѣнками насадки и на струю не дѣйствуетъ, напр., сила тяжести. Такъ какъ вода плохой проводникъ тепла, то передача теплоты паромъ водѣ можетъ происходить лишь по поверхностямъ непосредственнаго соприкосновенія ихъ; по мѣрѣ движенія къ выходному концу насадки струя воды будетъ стѣнками ея сжиматься болѣе и болѣе, охватывая струю конденсирующагося пара. Возможно, что передъ самымъ выходомъ изъ насадки или даже съ момента встрѣчи пара и воды появляется передача теплоты и непосредственнымъ смѣшеніемъ; вѣроятно, послѣ удара струя воды идетъ болѣе тонкимъ слоемъ, чѣмъ входитъ въ насадку, происходитъ, такъ сказать, вытягиваніе слоя,

иначе переходъ отъ входной къ скорости въ 2—4 раза бôльшей былъ бы связанъ съ разрывомъ струи; дѣйствіе пара на воду состояло бы въ

Началь- ная тем- пература t_a .	Kgr. воды на 1 kgr. пара при конечной температурѣ t_c .														
	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°	60°	65°	70°	75°	80°	85°	90°
5°	44,3	30	23,8	19,7	16,7	14,5	12,7	11,4	10,3	9,4	8,6	7,93	7,33	6,8	6,35
6°	45,2	31,5	24,7	20,5	17,2	14,9	13	11,6	10,5	9,6	8,75	8,0	7,43	6,9	6,43
7°	46,5	33,3	25,6	21,3	17,8	15,2	13,3	11,8	10,7	9,74	8,88	8,16	7,53	7,0	6,5
8°	50,5	35,3	27	22	18,3	15,7	13,7	12,13	10,9	9,9	9,03	8,28	7,64	7,1	6,6
9°	55	37,5	28,3	23	18,9	16,1	14	12,4	11,1	10,1	9,18	8,4	7,73	7,17	6,66
10°	60,5	40,0	29,3	24	19,6	16,4	14,4	12,7	11,3	10,3	9,33	8,54	7,85	7,26	6,8
11°	66,2	42,9	31,3	24,6	20	17,1	14,8	13	11,5	10,5	9,5	8,67	7,97	7,36	6,83
12°	75,6	46,2	33	25,6	20,9	17,6	15,1	13,25	11,8	10,66	9,65	8,8	8,1	7,46	6,9
13°	86,4	50	35	26,5	21,3	18,1	15,4	13,6	12	10,86	9,8	8,95	8,2	7,57	7,0
14°	101	55	37,2	28,1	22,5	19	16	14	12,3	11,1	10	9,1	8,3	7,67	7,1
15°	121	60	39,6	29,5	23,4	19,7	16,4	14,25	12,6	11,3	10,2	9,25	8,5	7,8	7,2
16°	152	66	42,5	31,1	24,1	20	16,9	14,6	12,85	11,5	10,4	9,4	8,6	7,9	7,3
17°	202	75	45,6	33	25,4	20,7	17,4	15	13,15	11,75	10,6	9,57	8,7	8,0	7,4
18°	303	86	49,6	34,5	26,6	21,5	18	15,4	13,4	12	10,8	9,74	8,9	8,13	7,5
19°	—	100	54,1	36,5	27,8	22,3	18,5	16	13,8	12,3	11,0	9,9	9	8,25	7,6
20°	—	120	59,5	39,5	29,3	23,2	19,1	16,3	14,1	12,5	11,2	10,1	9,2	8,4	7,7
21°	—	150	65,0	42,1	30,8	24,1	19,8	17	14,5	12,84	11,4	10,3	9,3	8,5	7,8
22°	—	200	74,4	45,4	32,4	25,1	20,6	17,3	14,8	13,1	11,65	10,5	9,5	8,65	7,94
23°	—	—	84,4	49,5	34,4	26,4	21,3	17,8	15,3	13,4	11,9	10,7	9,65	8,8	8,0
24°	—	—	99,2	53,6	36,5	27,6	22,1	18,4	15,7	13,8	12,2	10,9	9,8	8,93	8,18
25°	—	—	119	59	38,5	29,3	23	19	16	14,1	12,4	11,1	10	9,1	8,3
26°	—	—	149	65,6	42	30,5	23,9	19,6	16,4	14,5	12,7	11,3	10,2	9,24	8,43
27°	—	—	—	74,3	45	32,2	25	20,5	17,1	14,9	13,0	11,6	10,4	9,4	8,57
28°	—	—	—	84,3	49	34,1	26,14	20,7	17,7	15,3	13,3	11,8	10,6	9,6	8,7
29°	—	—	—	98,3	53,2	36,2	27,4	21,5	18,2	15,7	13,6	12,0	10,8	9,73	8,85
30°	—	—	—	147	58,5	38,6	28,75	22,4	19,2	16,1	14,0	12,3	11	9,9	9,0
31°	—	—	—	197	65	41,4	30,3	23,3	19,5	16,6	14,4	12,6	11,2	10,1	9,1
32°	—	—	—	—	73	44,6	32	24,1	20,2	17,0	14,7	13	11,5	10,3	9,3
33°	—	—	—	—	97,5	48,3	33,8	25,4	20,5	17,6	15,1	13,2	11,7	10,5	9,5
34°	—	—	—	—	117	53	35,9	26,7	21,7	18,2	15,5	13,5	11,9	10,7	9,64
35°	—	—	—	—	149	58	38,3	28	22,6	18,8	16	13,87	12,2	10,9	9,8
36°	—	—	—	—	—	—	41	29,4	23,5	19,5	16,5	14,2	12,5	11,1	10,0
37°	—	—	—	—	—	—	44,2	31,1	24,6	20,2	17,0	14,6	12,8	11,3	10,2
38°	—	—	—	—	—	—	48	33	25,7	20,9	17,5	15,0	13,1	11,6	10,4
39°	—	—	—	—	—	—	52,5	35	27	21,7	18,0	15,4	13,4	11,85	10,6
40°	—	—	—	—	—	—	57,5	37,3	28,3	22,6	18,6	15,9	13,75	12,1	10,8

этомъ случаѣ изъ ряда быстро слѣдующихъ другъ за другомъ толчковъ и было бы неустойчивымъ; это видно, напр., изъ того, что нѣкоторые инжекторы прекращаютъ работу въ случаѣ толчковъ или сотрясеній всасывающей трубы.

Отсюда видно, что конденсаціонная насадка по своимъ размѣрамъ къ выходному концу должна въ каждомъ сѣченіи отвѣчать извѣстнымъ

условіямъ происходящей въ ней конденсаціи пара, т. е. состоянію смѣси; понятно также, что размѣры насадки поѣтому не могутъ быть опредѣлены никакими даже приблизительными формулами, и только путемъ опыта можно опредѣлить, пригодна ли она для данныхъ условій или нѣтъ.

Можетъ возникнуть вопросъ, не лучше ли приводить въ приборъ паръ и воду въ обратномъ положеніи другъ къ другу, т. е. чтобы паровая струя охватывала струю воды. Инженеръ М. Audenet *) во Франціи производилъ опыты съ эжекторомъ конденсаторомъ Мортонъ, которыми имѣлось въ виду выяснитъ, въ какомъ случаѣ достигается бѣльшее разрѣженіе въ конденсаторѣ и въ связи съ этимъ наименьшее противодавленіе на поршень паровой машины. Оказалось, что лучшіе результаты изъ ряда опытовъ съ насадками различныхъ размѣровъ были въ томъ случаѣ, когда струя воды охватываетъ струю пара снаружи. Слѣдовательно, и въ инжекторѣ расположеніе струй пара и воды такъ, какъ оно выполняется, вполне правильно.

Итакъ, для быстроты конденсаціи необходимо соблюденіе слѣдующихъ условій:

- 1) Поверхность воды должна быть по возможности велика.

Такъ какъ поверхность для даннаго объема будетъ тѣмъ больше, чѣмъ тоньше слой воды, то воду надо приводить по возможности тонкимъ слоемъ. Для того же, чтобы воды при этихъ условіяхъ было достаточно, надо имѣть по возможности большую скорость входа. При всасывающемъ инжекторѣ эта скорость создается только напоромъ, равнымъ разности между давленіями атмосфернымъ и въ конденсаціонной насадкѣ. Если эта разность есть величина вполне опредѣленная, то тѣмъ лучше должно быть дѣйствіе прибора, чѣмъ меньше высота всасыванія, такъ какъ тѣмъ меньше будетъ вредныхъ сопротивленій, уменьшающихъ скорость и при- нуждающихъ къ увеличенію толщины слоя. При этомъ улучшится и механическое дѣйствіе инжектора, такъ какъ потеря при ударѣ будетъ тѣмъ меньше, чѣмъ меньше разность между скоростями ударяющихся тѣлъ. Въ слѣдующей таблицѣ указаны отношенія поверхности въ mtr.^2 къ объему въ mtr.^3 при различныхъ толщинахъ слоя воды въ $\frac{\text{m}}{\text{m}}$ для 1 kgr. воды.

Толщина слоя воды	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Отношеніе $\frac{S}{V}$	1	0,5	0,33	0,25	0,2	0,1667	0,1429	0,125	0,111	0,1	0,09	0,083

Видно, какъ быстро убываетъ это отношеніе съ увеличеніемъ толщины слоя.

*) Ledieu, Les nouvelles machines marines.

Справедливость указанного положенія подтверждается результатами тѣхъ же опытовъ Audenet. При толщинѣ слоя воды въ 1 mm. было получено наибольшее разрѣженіе; при толщинѣ слоя въ 2 mm. и 0,5 mm. оно было уже меньше, и въ послѣднемъ случаѣ, вѣроятно, потому, что нарушалась непрерывность струи, поверхность паромъ разрывалась.

2) Поверхность воды должна по возможности быстро мѣняться.

Это будетъ исполнено при достаточной скорости воды. Отсюда понятно требованіе, чтобы въ конденсаціонной насадкѣ всегда былъ возможно большій вакуумъ.

3) Для конденсаціи должно быть дано достаточно времени.

Это требованіе будетъ удовлетворено при достаточной длинѣ насадки. Чѣмъ больше скорости, съ которыми струя проходитъ насадку, тѣмъ длиннѣе она должна быть. Если инжекторъ хорошо работаетъ при малыхъ давленіяхъ пара, то при большихъ давленіяхъ его работа будетъ менѣе удовлетворительна; процентъ не конденсированнаго пара долженъ быть тѣмъ больше, чѣмъ больше скорость; разрѣженіе въ насадкѣ уменьшается и приборъ прекращаетъ, наконецъ, дѣйствіе.

4) Всѣ соединенія всасывающей трубы и инжектора съ ней должны быть абсолютно герметичны.

Проникновеніе воздуха въ конденсаціонную насадку отразится на степени разрѣженія; но помимо этого, его присутствіе вредно для процесса конденсаціи, т. к. своей плохой проводимостью тепла, онъ будетъ затруднять передачу его отъ пара къ водѣ, образуя въ послѣдней воздушныя прослойки.

Изъ этихъ условій особенно важными для работы инжектора надо считать первыя два.

Коэффициентъ тепло-передачи воды $\lambda=0,155$, т. е. чрезъ кв. метр. поверхности воды при толщинѣ слоя въ 1 mm. и разности температуръ поверхностей слоя въ 1° Ц. въ теченіе одной секунды проходитъ 0,155 калорій.

Если H —поверхность воды въ квадратныхъ метрахъ, z —время въ секундахъ, въ теченіе котораго происходитъ конденсація, η —толщина слоя воды и ϑ —разность температуръ на поверхностяхъ слоя, то количество тепла, передаваемое внутрь слоя, будетъ:

$$Q = \frac{\lambda \cdot H \cdot z \cdot \vartheta}{\eta} \dots \dots (3)$$

Пусть начальная температура воды 15° ; конечная температура пара при расширеніи его до 0,45 атм. 78° ; тогда при $H=z=\eta=1$

$$Q=9,765 \text{ калорій.}$$

Ко второму слою будетъ передано еще меньше, такъ какъ η увеличивается и ϑ уменьшается.

Съ другой стороны, коэффициентъ внешней теплопроводности, или коэффициентъ, характеризующій способность воды воспринимать теплоту, согласно R  clet можно принять въ 3,2 калоріи на 1 кв. метръ въ секунду при разности температуръ въ 1°.*) При той же разности температуръ $78-15=63^{\circ}$, 1 кв. м. въ секунду можетъ отнять отъ пара 201,6 калорій, т. е. почти въ 20 разъ болѣе. Ясно, насколько важно подводить воду тонкимъ слоемъ при наибольшей возможной скорости, чтобы поверхность ея быстро мѣнялась.

Итакъ, для процесса конденсаціи имѣетъ большое значеніе размѣръ входной площади для воды; это было правильно оцѣнено Жиффаромъ и первыми экспериментаторами, которые дѣлали насадку подвижной, чтобы урегулировать количество притекающей воды, установивъ для данной скорости притокъ ея наиболѣе тонкимъ слоемъ.

Что касается третьяго условія, то несмотря на всю важность, отъ точнаго соблюденія его приходится почти отказаться, такъ какъ иначе это было бы сдѣлано въ ущербъ компактности прибора. Длина насадки у инжекторовъ различныхъ типовъ, по отношенію къ діаметру устья пріемной насадки, колеблется въ зависимости отъ давленій пара и температуры питательной воды. Чѣмъ выше то и другая, тѣмъ длиннѣе должна быть насадка. Путемъ наблюденій Жиффаръ установилъ, что при діаметрѣ устья, принятомъ за 1, длина задней ея части

при низкихъ давленіяхъ до 3,5 атм. должна быть..... 6.

при среднихъ и высокихъ до 10 атм.10.

при давленіяхъ очень высокихъ14.

длина насадки въ передней части для всѣхъ случаевъ...4.

Однако оказывается, что и такое измѣненіе длины отъ 6 до 10 мало: анализируя результаты испытаній, Жиффаръ пришелъ къ заключенію, что плотность струи при прохожденіи ею устья пріемной насадки равна 0,66; такъ какъ для воды она 1, то отсюда видно, что конденсація далеко не совершенна. Опыты Villiers'a**) указали, что только 90% пара конденсируется, а 10% остается при вступленіи въ пріемную насадку еще не конденсированными; на основаніи этого, для давленій до 8 атм. длину насадки слѣдовало бы дѣлать еще нѣсколько болѣе, доводя ее до 14 и до 18 при давленіяхъ высшихъ.

Замѣтимъ, что интервалъ между насадками конденсаціонной и пріемной для работы инжектора не имѣетъ значенія; безъ него нагнетаніе

*) Этотъ коэффициентъ зависитъ отъ скоростей, съ которыми движутся вдоль другъ друга поверхности нагреваемой и охлаждаемой жидкости. Указанный коэфф. относится къ передачѣ тепла чрезъ мѣдную тонко-стѣнную трубку; при непосредственномъ соприкосновеніи пара и воды онъ, вѣроятно, значительно больше.

**) Ann. des Mines, 1860, XVII.

происходило бы такъ же успѣшно, какъ и при немъ. Онъ дѣлается лишь для того, чтобы непосредственно можно было наблюдать, работаетъ ли инжекторъ, или почему либо дѣйствіе его прекратилось.

Необходимость въ регулированіи количества входящей воды можно видѣть изъ слѣдующаго разсмотрѣнія. Положимъ, что инжекторъ нагнетаетъ наибольшее возможное количество воды, предварительно засасывая ее на высоту 1 метра, при опредѣленномъ давленіи пара.

Представимъ себѣ, что давленіе пара увеличилось; какова бы ни была форма насадки, тотчасъ увеличится количество вытекающаго пара; для такой же успѣшной конденсаціи, какъ прежде, необходимо увеличить и количество вводимой воды. Это можетъ быть сдѣлано или съ помощью увеличенія скорости, слѣд. напора, или чрезъ увеличеніе входной площади. Если расширеніе пара доводится до средняго давленія въ конденсаціонной насадкѣ, разрѣженіе въ ней можетъ измѣняться очень незначительно, и увеличенія скорости можно достигнуть лишь установленіемъ притока подъ напоромъ изъ верхняго бака; но увеличенія количества воды можно достигнуть, при той же скорости входа, увеличеніемъ кольцевого зазора между насадками, отодвигая конденсаціонную къ пріемной.

На фиг. 23 показано, что должно имѣть мѣсто при совершенномъ отсутствіи притока воды: паръ весь выходитъ чрезъ сливное отверстіе или вѣстовую трубу, не производя работы. При недостаточномъ притока воды, она будетъ разбиваться паромъ на мелкія частицы, которыя частью будутъ попадать въ пріемную насадку, но т. к. въ послѣдней не будетъ установившагося непрерывнаго движенія струи, то не можетъ быть приподнять клапанъ питательной трубы, и вода въ котелъ не пойдетъ.

Если теперь, наоборотъ, представимъ себѣ, что давленіе пара понижается, то соотвѣтственно этому уменьшаются и количество пара, и скорость его. Вода будетъ притекать въ избыточномъ количествѣ, и хотя конденсація будетъ полнѣе, но паръ не въ состояніи сообщить ей належущей скорости, и часть воды будетъ теряться чрезъ вѣстовую трубу. Если давленіе пара упадетъ еще ниже, вода будетъ имѣть столь малую кинетическую энергію, что окажется для нея невозможнымъ преодолѣть противодавленіе на клапанъ, и она въ большомъ количествѣ начнетъ сливаться чрезъ вѣстовую трубу. На фиг. 24 указанъ какъ разъ этотъ случай; такъ будетъ при достаточномъ по размѣрамъ отверстіи слива; если же вся вода не въ состояніи будетъ выйти чрезъ вѣстовую трубу, произойдетъ тормаженіе: паръ вытолкнетъ воду изъ всасывающей трубы, тѣмъ временемъ освободится сливная камера; инжекторъ вновь заберетъ, и снова повторится тоже самое, какъ только уровень воды въ сливной камерѣ перекроетъ выходное отверстіе конденсаціонной насадки.

На фиг. 25 указана схематически конденсаціонная насадка инжектора Rue, у котораго положеніе ея можно мѣнять увеличивая или уменьшая кольцевой зазоръ; пунктиромъ указано крайнее переднее ея положеніе. При давленіи пара въ 6 atm. инжекторъ нагнеталъ наибольшее количество воды безъ потери чрезъ сливъ; разстояніе конца конденсаціонной насадки отъ ливня ab было найдено равнымъ $15 \frac{m}{m}$; высота всасыванія была 0,3 mtr. Когда давленіе пара было поднято до 8,5 atm., температура нагнетаемой воды поднялась отъ 46 до 74°Ц.; такъ какъ эта температура указывала на недостатокъ приводимой воды, то насадку отодвинули еще на $10 \frac{m}{m}$; работая безъ слива, инжекторъ нагнеталъ теперь воду при температурѣ въ 64,5°. При тѣхъ же начальныхъ давленіи пара и положеніи насадки уровень воды въ резервуарѣ понизили, такъ что инжекторъ долженъ былъ работать при всасываніи на 1,8 mtr.; количество подаваемой воды на 1 kgr. пару уменьшилось и температура отъ 46° поднялась до 52,5°. Конденсаціонную насадку вновь отодвинули назадъ; инжекторъ сталъ давать нормальное для него количество воды при той же температурѣ нагнетанія въ 46°.

Эти данныя опыта указываютъ, что инжекторъ съ неподвижной насадкой при измѣненіи давленій пара или высоты всасыванія, далеко не достигающей возможной предѣльной, будетъ не въ состояніи работать одинаково экономично. Насколько много можетъ быть варіацій въ положеніи насадокъ паровой и конденсаціонной относительно другъ друга указываетъ слѣдующая таблица*).

Высота всасыванія.	Давленіе пара.	Разстояніе передняго конца конденсац. насадки отъ крайняго положенія.	
		При наибольшемъ расходѣ.	При наименьшемъ расходѣ.
0, 3 mt.	8,5 $\frac{kg}{cm^2}$	25	3,5
”	6 ”	15	1,0
”	4 ”	7	0,5
”	2 ”	1,5	0,5

Изъ таблицы видно, что при давленіи пара въ 6 atm. и неправильномъ положеніи насадки инжекторъ будетъ давать воды почти столько же, сколько и при давленіи въ 2 atm.

Отсюда, между прочимъ, можно вывести такое правило для инжекторовъ съ неподвижной насадкой: ея положеніе при наи-

*) Kneass, Injectors.

меньшемъ давленіи пара, при которомъ долженъ работать инжекторъ, должно соответствовать наибольшему количеству нагнетаемой воды; въ этомъ случаѣ при высшемъ давленіи пара инжекторъ будетъ давать возможный minimum нагнетанія; если бы было сдѣлано какъ разъ обратно, т. е. положеніе конденсаціонной насадки отвѣчало бы высшему давленію пара, то при пониженіи давленія пара количество входящей воды было бы такъ велико, что инжекторъ отказалъ бы въ работѣ при давленіи значительно большемъ, чѣмъ низшій предѣлъ его. При неподвижной насадкѣ, слѣд., ни въ коемъ случаѣ работа инжектора при различныхъ давленіяхъ пара не можетъ быть одинаково экономичной.

Хотя меньшее количество воды подаваемой при высокихъ давленіяхъ пара отчасти должно быть приписано сильно увеличивающемуся расходу послѣдняго, что уменьшаетъ отношеніе $\frac{P}{D}$, однако столь же важную роль будетъ играть и положеніе самой насадки, ограничивающей количество входящей воды. Ясно, что предпочтеніе въ данномъ случаѣ надо отдать насадкѣ переставляемой.

Перестановка отъ руки, однако, осложняетъ уходъ за приборомъ, и потому инжекторъ съ самопереставляющейся насадкой, какъ это дѣлаетъ Sellers, (Self-adjusting Injector) является въ этомъ отношеніи наиболѣе совершеннымъ приборомъ. На фиг. 26 показана насадка этого инжектора*). Здѣсь а—паровая насадка, е—конденсаціонная, d—пріемная, b—представляетъ конецъ выточенного внутри шпинделя, по которому идетъ небольшая струя пара предъ пускомъ инжектора въ работу; по трубѣ w—притекаетъ вода, по D—паръ. Головка конденсаціонной насадки е имѣетъ видъ поршня; въ выточкахъ положены поршневые пружины. Этого достаточно для того, чтобы камера о была почти герметически отдѣлена отъ водяной камеры г. Насадки е и d соединены между собою на рѣзбѣ; маленькая камера служитъ входомъ въ пріемную насадку и, кромѣ того, соединяется прорѣзами съ камерой о. Ниже, за втулкой h, направляющей движеніе пріемной насадки, находится кранъ, чрезъ который сливается вода передъ тѣмъ, какъ начнется нагнетаніе ея въ котель.

Струя пара, притекающая по шпинделю, производитъ засасываніе воды; какъ только послѣдняя покажется чрезъ кранъ, шпиндель выдвигаютъ изъ насадки, паровая струя начинаетъ нагнетать воду; это указываетъ усилившимся истеченіемъ и по скорости, и по объему чрезъ кранъ; его закрываютъ, и тогда энергія струи преодолеваетъ давленіе на питательный клапанъ, и вода входитъ въ котель. Если дѣйствіе инжектора почему либо прекратится, то это указываетъ

*) Proceed. of Inst. of Mechan. Eng., 1866.

истечение пара чрезъ отверстіе k , въ которомъ находится пружинный клапанъ, открывающійся при повышеніи давленія въ приборъ до извѣстнаго предѣла; во время работы инжектора, онъ плотно прижимается къ сѣдлу атмосфернымъ давленіемъ и силой небольшой пружины.

Идея саморегулированія заключается въ слѣдующемъ: если воды притекаетъ много, то излишекъ ея чрезъ прорѣзы камеры f сливается въ камеру o ; небольшого избытка давленія въ послѣдней по сравненію съ давленіемъ въ водяной камерѣ g достаточно, чтобы вся насадка передвинулась по направленію къ послѣдней; кольцевой зазоръ уменьшается, а, слѣд., и количество поступающей воды; насадка остановится какъ разъ въ томъ положеніи, когда количество поступающей воды будетъ соотвѣтствовать скорости пара и его вѣсу. Если теперь давленіе пара измѣнится, положимъ, возрастетъ, то при прежнемъ положеніи насадки воды будетъ поступать мало соотвѣтственно увеличившимся количеству пара и скорости струи; такъ какъ приемная насадка обладаетъ всасывающей способностью, то, при большей скорости, она возьметъ часть воды изъ камеры o . Давленіе въ послѣдней станетъ меньше, чѣмъ въ водяной камерѣ g ; дѣйствуя на головку поршень, это избыточное давленіе заставитъ насадку отойти назадъ и тѣмъ открыть большій доступъ водѣ; насадка вновь приметъ то положеніе, которое будетъ отвѣчать измѣнившимся условіямъ работы; не трудно прослѣдить, что также автоматически насадка будетъ переставляться и въ случаѣ уменьшенія давленія пара, или увеличенія и уменьшенія высоты всасыванія, т. е. при опусканіи или поднятіи уровня воды въ резервуарѣ, изъ котораго засасывается вода. Насколько совершеннѣе инжекторъ съ такой насадкой можно видѣть изъ слѣдующей таблицы, гдѣ указаны полученные опытомъ съ № 6 результаты *) и рядомъ данныя, опредѣляемые для того же номера инжектора Жиффара по его формулѣ для maximum'a мощности: $E=28 d^2 \sqrt{V_p}$, гдѣ d —діаметръ устья приемной насадки и p —давленіе пара въ котлѣ.

Данныя для инжектора Sellers'a получены при испытаніи на заводѣ изобрѣтателя; необходимыя для работы инжектора давленія и температуры питательной воды, при которыхъ инжекторъ перестаетъ работать, указаны среднія изъ ряда опытовъ; отклоненія весьма незначительны. Результатъ постановки саморегулирующей притокъ насадки выражается значительнымъ увеличеніемъ количества подаваемой воды; minimum Sellers'a почти до 3,5 atm. равенъ maximum'у расхода Жиффара.

Слѣдуетъ замѣтить еще, насколько значительно можетъ мѣняться количество подаваемой воды; напр. при 10,5 atm. расходъ можетъ быть измѣняемъ въ предѣлахъ 58,6 % maximum'a. Инжекторъ Sellers'a бла-

*) Peabody, Thermodynamics of the Steam Engine.

годаря большой эластичности въ подачѣ при измѣненіи давленія и высоты всасыванія въ особенности пригоденъ для паровозовъ, гдѣ давле-

Давленіе пара въ котлѣ kg/cm ²	Инжекторъ № 6-й подаетъ въ часъ воды въ kg.								
	Жи- фаръ.	Sellers съ автоматич. устанавлив. конд. насадкой.							
		Кол. вагнет.		Отнош. minim. къ maxim.	Температура.			Давле- ніе рабо- чего па- ра, необ- ходимое.	Высшая темпер. питат. воды.
		Maximum E=28d ² V p	Minim.		Пита- тельной воды.	При maxim.	При minim.		
0,7	845	2132	1800	0,845	19 ⁰	38 ⁰	34,5 ⁰	0,21	55,5 ⁰
1,4	1192	2333	1733	0,743	—	42,5	40,0	0,63	57,0
2,1	1461	2668	1600	0,600	—	45,5	47,0	1,1	57,0
2,8	1683	2835	1700	0,599	—	49,0	50,5	1,54	55,5
3,5	1885	3057	1832	0,597	—	51,0	51,5	1,89	55,0
4,2	2066	3300	1800	0,546	—	53,0	56,0	2,4	54,5
4,9	2228	3534	1800	0,510	19,5	54,5	61,0	2,8	54,5
5,6	2379	3766	1900	0,505	19,0	56,5	62,0	3,2	55,0
6,3	2520	4000	1968	0,492	19,5	58,0	64,5	3,6	55,5
7,0	2661	4168	1834	0,456	19,0	60,0	70,5	4,1	55,5
7,7	2792	4332	1900	0,439	19,5	62,0	72,0	4,4	—
8,4	2921	4435	2067	0,466	19,5	64,5	72,0	4,8	57,0
9,1	3040	4565	2100	0,46	19,0	65,5	74,0	5,3	54,5
9,8	3155	4690	2234	0,476	19,0	67,0	74,5	5,7	52
10,5	3266	4834	2000	0,414	19,0	69,5	75	6,2	49,5

ніе пара подвержено постояннымъ колебаніямъ въ зависимости отъ профиля пути, а также и высота воды въ тендерѣ.

Каждый инжекторъ можетъ въ извѣстныхъ предѣлахъ измѣнять количество нагнетаемой воды. Наибольшій расходъ инжектора зависитъ отъ конечной скорости струи при выходѣ ея изъ конденсаціонной насадки; температура нагнетаемой воды будетъ низкая, такъ какъ при этомъ воды можетъ притекать въ насадку больше, чѣмъ существенно необходимо для процесса конденсаціи.

Наименьшій расходъ инжектора опредѣляется, наоборотъ, температурой нагнетаемой воды, которая не можетъ быть выше нѣкоторой

предѣльной. Какъ скорость, такъ и предѣльная температура зависятъ отъ того разрѣженія, которое имѣетъ мѣсто въ конденсаціонной насадкѣ, т. е. зависятъ отъ быстроты и полноты конденсаціи. Разсмотримъ отдѣльно два процесса, происходящіе въ насадкѣ; первый—сообщеніе скорости притекающей воды, второй—конденсація пара. Пусть g_1 и g_2 —вѣса пара и воды, поступающихъ въ конденсаціонную насадку въ единицу времени, u_1 и u_2 —ихъ скорости; конечная скорость смѣси u . По теоремѣ о количествахъ движенія имѣемъ.

$$\begin{aligned} g_1 u_1 + g_2 u_2 &= g_1 u + g_2 u \\ g_1 (u_1 - u) &= g_2 (u - u_2), \\ \text{и } \frac{g_2}{g_1} &= \frac{u_1 - u}{u - u_2} \dots\dots (4). \end{aligned}$$

Если противодавленіе, которое должна преодолѣть струя для своего входа въ резервуаръ, извѣстно и неизмѣнно, то тѣмъ самымъ опредѣлена конечная скорость струи u . При этомъ противодавленіи тѣмъ больше будетъ $\frac{g_2}{g_1}$, чѣмъ больше u_1 и u_2 .

Но u_1 зависитъ отъ давленія въ насадкѣ, до котораго можетъ быть произведено расширеніе пара, такъ же точно какъ и u_2 , будетъ ли вода засасываться или идти подъ напоромъ; въ первомъ случаѣ, если давленіе въ насадкѣ p' , а давленіе атмосферы p , (въ kgr. на кв. mtr.),

$$u_2 = \sqrt{\frac{p - p'}{\gamma}} \cdot 2g; \text{ во второмъ } u_2 = \sqrt{2g \left(h + \frac{p - p'}{\gamma} \right)}; \text{ здѣсь } h \text{—напоръ}$$

въ mtr, т. е. высота уровня воды въ резервуарѣ надъ осью конденсаціонной насадки, и γ —плотность воды. Итакъ, наибольшій расходъ опредѣляется тѣмъ разрѣженіемъ, которое наступаетъ въ конденсаціонной насадкѣ; однако это не единственное условіе: необходимо, чтобы была въ тоже время и наиболѣе совершенная конденсація, а она, какъ видѣли, помимо количества воды, притекающаго на вѣсъ пара, зависитъ отъ времени, въ теченіе котораго можетъ происходить конденсація, или отъ длины насадки. Допустимъ, что вода притекаетъ въ количествѣ избыточномъ, но достаточномъ для того, чтобы u получалось надлежащей величины; пусть часть пара все таки остается не конденсированнымъ; его присутствіе въ струѣ выразится увеличеніемъ объема смѣси u , слѣдовательно, уменьшеніемъ плотности; скорость же u имѣетъ уже предѣльную величину. Если площадь устья приѣмной насадки F , то въ первомъ случаѣ имѣетъ мѣсто равенство:

$$Fu\gamma = g_1 + g_2, \dots\dots (5)$$

а во второмъ случаѣ должно быть

$$Fu\gamma_1 = g_1 + g_2, \dots\dots (6).$$

Такъ какъ $\gamma_1 < \gamma$, то очевидно, что вторая часть равенства во второмъ случаѣ не можетъ быть равна таковой же въ первомъ; часть смѣси не попадетъ въ приемную насадку и будетъ сливаться чрезъ вѣстовую трубу, и тѣмъ самымъ уменьшится въ дѣйствительности возможное отношеніе $\frac{g_2}{g_1}$.

Допустимъ теперь, что воды приводится въ количествѣ какъ разъ достаточномъ только для конденсаціи, и послѣдняя происходитъ совершенно и полно. Въ этомъ случаѣ скорость смѣси u будетъ имѣть иное значеніе именно $u' > u$. Часть энергіи струи будетъ при данномъ противодавленіи неиспользована, и струя могла бы преодолѣть давленіе большее, чѣмъ то, на которое она работаетъ. Въ то же время въ этомъ случаѣ создается, такъ сказать, избытокъ предѣла для несовершенства конденсаціи, при которомъ количество нагнетаемой воды $\frac{g_2}{g_1}$ остается неизмѣннымъ. Пусть H представляетъ напоръ въ метрахъ, соотвѣтствующій давленію въ резервуарѣ нагнетанія. Скорость u опредѣляется имъ такъ

$$\frac{u^2}{2g} = H \dots (7).$$

Но въ дѣйствительности скорость u' больше u ; ей отвѣчаетъ напоръ H' , связанный соотношеніемъ

$$\frac{u'^2}{2g} = H' \dots (8).$$

Пусть въ первомъ случаѣ плотность струи γ , во второмъ γ' ; принимая γ единицей, найдемъ, что H' должно быть равно $\frac{H}{\gamma'}$; два предыдущія равенства дадутъ намъ

$$\frac{u^2}{2g} = \frac{u'^2}{2g} \gamma'$$

или

$$\gamma' = \frac{u^2}{u'^2} \dots (9).$$

Это и есть то предѣльное значеніе для γ' , при которомъ $\frac{g_2}{g_1}$ будетъ оставаться постояннымъ; положимъ, соотвѣтственно давленію котла скорость u должна быть 30 mtr., а въ дѣйствительности она получается 32 mtr. $= u'$.

Если въ насадкѣ имѣетъ мѣсто полная конденсація, то въ устьѣ приемной насадки не все сѣченіе ея будетъ заполнено струей; при открытой вѣстовой трубѣ будетъ всасываться воздухъ; при закрытомъ сливѣ

можно устроить добавочный притокъ воды, или же увеличить притокъ воды непосредственно въ конденсаціонную камеру. Если въ насадкѣ не весь паръ конденсируется, то оставшееся количество его должно дать смѣси такой объемъ, чтобы плотность была $\gamma' = \frac{30^2}{32^2} = 0,88$. Если конденсація еще болѣе несовершенна, т. е. γ' получить значеніе меньшее 0,88, то снова излишекъ воды будетъ сливаться чрезъ вѣстовую трубу. Потеря воды чрезъ сливъ какъ въ первомъ, такъ и во второмъ случаѣ будетъ зависѣть не отъ недостатка воды, но отъ недостаточной длины насадки или недостатка времени для конденсаціи. Если она нежелательна, то устранить ее уменьшеніемъ количества воды не удастся: нужно или одновременно регулировать количество пара и воды, но при этомъ не будетъ использована возможная мощность прибора; или перемѣнить насадку на болѣе длинную, подавать болѣе холодную воду или приводить ее подъ напоромъ въ томъ же количествѣ, но болѣе тонкимъ слоемъ. Изъ предыдущаго ясно, что тотъ инжекторъ, у котораго конечная плотность смѣси при входѣ ея въ устье приѣмной насадки меньше единицы, подаетъ меньше воды, чѣмъ могъ бы. Дѣйствительно, если площадь устья F , то при $\gamma=1$, и скорости u , вѣсъ Q_1 , который м. б. поданъ

$$Q = Fu. \gamma = Fu.$$

При несовершенной конденсаціи плотность будетъ γ' и скорость u' ; вѣсъ Q_2 будетъ.

$$Q_2 = Fu' \gamma'$$

Отношеніе дѣйствительно подаваемого вѣса къ возможному или теоретическому Q_1 будетъ.

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{Fu' \gamma'}{Fu} = \frac{u' \gamma'}{u} = \sqrt{\gamma'} \dots \dots (10)$$

Для предыдущаго примѣра Q_2 составитъ 0,94 Q_1 .

Присутствіе воздуха въ избыточномъ количествѣ отразится на работѣ инжектора въ томъ же направленіи. Нѣкоторое количество его, соответствующее нормальному содержанію въ водѣ, неизбежно; но нужно устранять все то, что способствуетъ увеличенію его въ струѣ; таковы прежде всего всѣ неплотности во всасывающей трубѣ и на фланцахъ.

Если намъ извѣстно разрѣженіе въ конденсаціонной насадкѣ и установлено, что количество воды, притекающей въ нее, достаточно для полной конденсаціи, то величина $\sqrt{\gamma'}$ можетъ служить характеристикой совершенства этой насадки при данныхъ условіяхъ, по сравненію съ другимъ инжекторомъ, работающимъ при тѣхъ же условіяхъ. Непосредственно опредѣлить γ' затруднительно; температура смѣси въ моментъ прохожденія ея устья приѣмной насадки будетъ отлична отъ температуры въ нагнетательной тру-

бѣ; для точнаго опредѣленія нужно знать ее и давленіе. Можно для этого избрать два косвенныхъ пути. Если дано давленіе резервуара, куда происходитъ нагнетаніе, то мы можемъ знать скорость, съ которой вода стремится выходить изъ него. Пусть давленіе резервуара p , а предъ устьемъ p' ; тогда.

$$u' = \sqrt{2g \frac{p-p'}{\gamma}},$$

гдѣ γ соотвѣтствуетъ температурѣ при давленіи p . Скорость струи, вступающей въ приѣмную насадку, должна быть во всякомъ случаѣ равна или нѣсколько больше u' , т. е.

$$u > u'.$$

Этимъ самымъ опредѣленъ вѣсъ воды Q_1 , который можетъ быть поданъ; въ дѣйствительности же найдено измѣреніемъ, что подано Q_2 ;

тогда $\frac{Q_2}{Q_1} = \sqrt{\gamma'}$

$$\gamma' = \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)^2.$$

Для опредѣленія γ' вторымъ путемъ необходимо знать разрѣженіе въ конденсаціонной насадкѣ. Для этого можно рекомендовать слѣдующій способъ, указываемый Цейнером*). Черезъ инжекторъ пускаютъ воду подъ опредѣленнымъ напоромъ (фиг. 27); при этомъ необходимо наблюдать, чтобы вентиль на приводной трубѣ былъ открытъ на весь ходъ; на фиг. указаны лишь паровая и конденсаціонная насадки; если по конструкции инжекторъ не допускаетъ этого, то можно предоставить водѣ сливаться чрезъ вѣстовую трубу, но необходимо убѣдиться, что дѣйствительно выходитъ вся; для этого надо отнять паровую трубу и посмотреть, не наполняется ли водою паровая насадка; если это имѣетъ мѣсто, то значить сливное отверстіе мало; нужно будетъ либо увеличить послѣднее, либо уменьшить напоръ. Опредѣляя взвѣшиваніемъ вѣсъ вытекшей воды, по законамъ гидравлики находятъ коэффиціентъ сопротивленія. Пусть средній напоръ h ; тогда

$$h = (1 + \xi) \frac{w^2}{2g} \quad \text{и} \quad w = \sqrt{\frac{2gh}{1 + \xi}}; \dots (11)$$

Если площадь кольцевого зазора F въ кв. $mt.$, то $F \cdot w \cdot \gamma =$ вѣсу вытекающей воды $= Q$.

Отсюда опредѣлится $\xi = 2gh \left(\frac{F\gamma}{Q} \right)^2 - 1 \dots (12)$

*) Technische Thermodynamik, Zeuner.

Установивъ паровую трубу, если она была отнята, пускаютъ инжекторъ въ работу; при этомъ, вентиль на приводной трубѣ долженъ быть въ томъ же положеніи; работу прибора слѣдуетъ урегулировать паровымъ вентилемъ такъ, чтобы не было потери чрезъ сливъ; количество взятой воды должно быть измѣрено; пусть оно будетъ Q' ; тогда $Q': F\gamma = w.'$

Если назовемъ чрезъ p давленіе атмосферы въ kg/mt^2 и p' —давленіе въ конденсаціонной насадкѣ, то при среднемъ напорѣ h должно имѣть мѣсто равенство:

$$h + \frac{p-p'}{\gamma} = (1+\xi) \frac{w'^2}{2g},$$

изъ котораго находимъ

$$\frac{p-p'}{\gamma} = (1+\xi) \frac{w'^2}{2g} - h \dots (13)$$

Въ одномъ изъ опытовъ ξ было найдено Цейнеромъ равнымъ 1,277; т. к. ξ само зависитъ отъ скорости, то добавочный напоръ $\frac{p-p'}{\gamma}$ будетъ опредѣленъ не совсѣмъ точно. При приблизительныхъ подсчетахъ можно ограничиться лишь такимъ опредѣленіемъ:

т. к. F и γ постоянны, то

$$\frac{Q}{Q'} = V \sqrt{\frac{h}{h'}} \text{ и } h' = \left(\frac{Q'}{Q}\right)^2 h \dots (14)$$

Пусть, напр., $Q'=1800$, $Q=900 \text{ kgr.}$, $h=2 \text{ mtr.}$; опредѣляемъ h'

$$h' = \left(\frac{1800}{900}\right)^2 \cdot 2 = 8 \text{ mtr.}$$

Добавочный напоръ, обусловленный разрѣженіемъ, 6 mtr.; пусть высота барометра 735,5 м/м., тогда $p=10000 \text{ kg.}/\text{mt}^2$ и мы находимъ p' равнымъ

$$p' = 4000 \frac{\text{kg}}{\text{mt}^2} \text{ или } 0,4 \text{ atm. абс.}$$

Опредѣливъ p' , находимъ скорости u_1 и u_2 ; при данномъ давленіи резервуара, скорость u извѣстна.

Вычисляемъ

$$\frac{g_2}{g_1} = \frac{u_1 - u}{u - u_0}.$$

Пусть $\frac{g_2'}{g_1'}$ опредѣлено непосредственно опытомъ; если $\frac{g_2'}{g_1'} = \frac{g_2}{g_1}$, то имѣетъ мѣсто полная конденсація пара; если же $\frac{g_2'}{g_1'} < \frac{g_2}{g_1}$, то часть пара остается не конденсированнымъ.

Для перваго случая имѣемъ

$$Q_1 = Fu\gamma,$$

для втораго

$$Q_2 = Fu'\gamma'.$$

Отношеніе

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{u'\gamma'}{u\gamma};$$

такъ какъ $u = u' \sqrt{\gamma'}$, то

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{u'\gamma'}{\gamma u' \sqrt{\gamma'}}$$

и при $\gamma = 1$,

$$\gamma' = \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)^2.$$

Итакъ, наибольшій расходъ инжектора обусловливается конечною скоростью струи и совершенствомъ конденсаціи, поскольку послѣдняя вліяетъ на эту скорость. Для каждаго инжектора при данныхъ условіяхъ работы существуетъ опредѣленная граница; пусть это будетъ P kgr. воды на одинъ kgr. пара.

Если бы захотѣли увеличить P при тѣхъ же условіяхъ, то тотчасъ бы излишекъ сталъ сливаться чрезъ вѣстовую трубу; при увеличеніи P , необходимо должно уменьшиться u , и вся вода не въ состояніи войти въ устье пріемной насадки; точно также существуетъ предѣльное давленіе, на которое можетъ работать инжекторъ; если бы въ этомъ случаѣ уменьшили P , то, хотя скорость стала бы больше, уменьшилась бы плотность струи, и поэтому въ пріемной насадкѣ была бы получена меньшая потенциальная энергія, чѣмъ при нормальномъ вѣсѣ воды; при увеличеніи P , уменьшилась бы скорость, и въ зависимости отъ нея также точно и потенциальная энергія.

Наименьшій расходъ инжектора опредѣляется той температурой, которую имѣетъ смѣсь въ конденсаціонной камерѣ. При уменьшеніи количества воды, она будетъ нагрѣваться сильнѣе; при этомъ необходимо, чтобы температура ея была ниже, чѣмъ температура, соотвѣтствующая давленію въ насадкѣ; такъ, напр., при давленіи въ насадкѣ въ 0,4 atm., температура смѣси должна быть ниже 75°, примѣрно 65°—70°, для того, чтобы обратнымъ испареніемъ не уменьшалось разрѣженіе въ насадкѣ.

Если давленіе въ насадкѣ p' , атмосферное давленіе p , и давленіе, соотвѣтствующее температурѣ смѣси p_1 , то при высотѣ всасыванія h_1 должно существовать соотношеніе:

$$\frac{p}{\gamma} - h_1 > \frac{p'}{\gamma} > \frac{p_1}{\gamma} \dots \dots \dots (15).$$

Допустимъ, что температура смѣси поднялась такъ, что p_1 стало больше p' ; если высота всасыванія осталась та же, инжекторъ откажетъ въ работѣ. То же произойдетъ, если станемъ предварительно подогревать питательную воду; поэтому, при каждой высотѣ всасыванія для даннаго инжектора есть опредѣленный предѣлъ для начальной температуры воды; какъ только онъ будетъ достигнутъ, всасываніе прекратится. Инжекторъ вновь станетъ работать, если воду приводить къ нему подъ напоромъ. Но при открытомъ сливѣ здѣсь также устанавливается извѣстный предѣлъ: температура смѣси при проходѣ ею интервала между насадками не должна быть выше 85° (опыты Deloy) и какъ крайній предѣлъ 90° .

Какъ только чрезъ вѣстовую трубу у работающаго инжектора начинается выдѣленіе пара, это указываетъ на скорую возможность прекращенія имъ работы. Причина этого въ томъ, что струя въ интервалѣ начинаетъ испаряться; объемъ ея увеличивается, и она не въ состояніи войти въ пріемную насадку. Сущность дѣйствія прибора именно и заключается въ томъ, что большой объемъ пара, вытекающаго изъ паровой насадки, конденсаціей приводится къ столь малому объему, обладающему большой скоростью, что къ нему можетъ быть прибавлено значительное количество воды, которой онъ въ состояніи сообщить необходимую скорость для прохода устья пріемной насадки и достаточную кинетическую энергію для преодоленія опредѣленнаго противодавленія. Чѣмъ горячѣе вода, тѣмъ большее количество ея нужно для конденсаціи пара; поэтому для подогретой воды измѣненіе въ расходѣ инжектора будетъ меньше, чѣмъ для холодной; вмѣстѣ съ тѣмъ понизится и мощность инжектора. У инжекторовъ съ закрытымъ сливомъ конечная температура смѣси можетъ быть выше, доходя иногда до 105° ; горячую воду до 125° могутъ подавать двойные инжекторы, о которыхъ будемъ говорить ниже.

Итакъ, опредѣляющими величинами для количества подаваемой воды всасывающимъ инжекторомъ являются скорость струи пара и температура смѣси въ конденсаціонной насадкѣ; для невсасывающаго инжектора вмѣсто температуры въ конденсаціонной насадкѣ играетъ роль температура смѣси въ интервалѣ между нею и пріемной.

Выше мы приводили формулу, опредѣляющую количество воды, необходимое для конденсаціи пара, и сдѣлали оговорку, что на самомъ дѣлѣ воды нужно привести нѣсколько больше, чтобы конечная температура t_c имѣла опредѣленную величину. Приведемъ теперь для P болѣе общее выраженіе. Положимъ, что скорость пара въ моментъ встрѣчи его съ водою u_1 , скорость воды— u_2 и скорость смѣси послѣ удара u ; пусть P означаетъ число kg . воды, приходящейся на 1 kg . вытекающаго пара. Кинетическая энергія пара и воды до удара равна $\frac{u_1^2 + u_2^2 \cdot P}{2g}$, послѣ удара $\frac{u^2}{2g} (1 + P)$; разность ихъ представ-

ляетъ собою потерю на ударъ; выразимъ ее въ тепловыхъ единицахъ и будемъ имѣть:

$$\frac{Au_1^2}{2g} + \frac{APu_2^2}{2g} - \frac{A(P+1)u^2}{2g} \dots\dots\dots (16).$$

Эта потерянная кинетическая энергія при ударѣ переходитъ обратно въ теплоту; помимо этого, часть энергій будетъ потеряна на треніе въ насадкахъ при движеніи въ нихъ пара, воды и смѣси, но эти потери мы можемъ не вводить въ расчетъ, такъ какъ, происходя внутри прибора, онѣ, въ видѣ тепла, будутъ возвращены смѣси; итакъ скорости u_1 , u_2 и u —величины, опредѣленные теоретически по формуламъ безъ поправокъ на потери. Если указанную выше разность энергій въ тепловыхъ единицахъ раздѣлимъ на вѣсъ воды P , принимая теплоемкость ея постоянной и равной единицѣ, то получимъ приращеніе температуры воды $\Delta_1 t$; мы можемъ, слѣдовательно, написать:

$$\frac{Au_1^2}{2g} - \frac{APu_2^2}{2g} - \frac{A(P+1)u^2}{2g} = P\Delta_1 t \dots\dots (17).$$

Пусть конечное состояніе пара въ моментъ его выхода изъ паровой насадки характеризуется величинами p_2, v_2, x_2 ; количество теплоты, находящееся въ 1 kgr. пара, будетъ

$$q_2 + r_2 x_2;$$

если конечная температура смѣси t_e , то при конденсаціи должно быть отнято $q_2 + r_2 x_2 - t_e$ единицъ теплоты, которыя дадутъ для воды приращеніе ея температуры $\Delta_2 t$; имѣемъ

$$q_2 + r_2 x_2 - t_e = \Delta_2 t \cdot P \dots\dots\dots (18).$$

Конечная температура смѣси при начальной t_a будетъ

$$t_e = t_a + \Delta_1 t + \Delta_2 t \dots\dots\dots (19).$$

Послѣ подстановки въ это равенство вмѣсто $\Delta_1 t$ и $\Delta_2 t$ соотвѣствующихъ имъ выраженій, мы получимъ

$$t_e = \frac{q_2 + r_2 x_2 - t_e}{P} + \frac{A(u_1^2 - u^2)}{2gP} + \frac{A(u^2 - u_2^2)}{2g} + t_a \dots\dots (20)$$

Рѣшая это равенство относительно P , найдемъ

$$P = \frac{q_2 + r_2 x_2 - t_e + \frac{A}{2g}(u_1^2 - u^2)}{t_e - t_a + \frac{A}{2g}(u^2 - u_2^2)} \dots\dots (21)$$

Это и есть болѣе общее выраженіе, опредѣляющее вѣсъ воды, который долженъ быть приведенъ къ инжектору на 1 kgr. пару.

Оно отличается отъ выше указаннаго, опредѣляющаго вѣсъ воды, необходимой только для конденсаціи пара, членами, содержащими множитель A . Что касается члена $\frac{A}{2g} (u^2 - u_2^2)$ въ знаменателѣ, то вліяніе его на результатъ очень мало; такъ, при $u=50$ mt. и $u_2=10$ mt., онъ составляетъ лишь величину $=0,3$ калорій; но величина члена, находящагося въ числительѣ зависитъ отъ формы паровой насадки. При сходящейся конической насадкѣ, какъ видѣли, энергія струи остается почти постоянной и ее можно принять въ среднемъ равной 10.300 kgr./mtr. , т. е. $\frac{u_1^2}{2g} = 10,300$ до давленій въ 10 atm. ; изъ формулы ясно видно, что съ увеличеніемъ u количество подаваемой на единицу вѣса пара воды должно уменьшаться; такъ какъ съ повышеніемъ давленія сильно увеличивается количество вытекающаго пара, производительность инжектора возрастаетъ, но полезное дѣйствіе уменьшается. Если вмѣсто $\frac{A}{2g} u_1^2$ поставить равную ему величину $(q_1 + r_1 x_1 - q_2 - r_2 x_2)$ то мы получимъ

$$P = \frac{q_1 + r_1 x_1 - t_e - A \frac{u^2}{2g}}{t_e - t_a + \frac{A u^2}{2g} - \frac{A u_2^2}{2g}} \dots \dots (22)$$

Пусть p въ kgr./mtr.^2 представляетъ то давленіе, на которое долженъ работать инжекторъ, p_1 — давленіе въ конденсаціонной насадкѣ, которое мы принимаемъ затѣмъ равнымъ давленію въ устьѣ приѣмной, p_2 — атмосферное давленіе $= 10.000 \text{ kgr./mtr.}^2$; h и h_1 — соотвѣтствующіе двумъ первымъ напоры. Вода стремится выйти изъ котла со скоростью $u' = \sqrt{2g \frac{p - p_1}{\gamma}}$; u должно быть въ крайнемъ случаѣ при полномъ почти отсутствіи сопротивленій равно u' ; слѣд.,

$$\frac{u^2}{2g} = \frac{p - p_1}{\gamma} = h - h_1; \dots \dots (23)$$

пусть h_2 высота всасыванія; тогда скорость u_2 опредѣляется изъ равенства

$$u_2 = \sqrt{2g \left(\frac{p_2 - p_1}{\gamma} - h_2 \right)} = \sqrt{2g (10 - h_1 - h_2)} \dots \dots (24)$$

Замѣняя члены, представляющіе кинетическую энергію, соотвѣтствующими имъ напорами, мы получимъ для P равенство

$$P = \frac{q_1 + r_1 x_1 - t_e - A (h - h_1)}{t_e - t_a + A (h - 10 + h_2)} \dots \dots (25)$$

Какъ видимъ, въ это выраженіе для P входитъ цѣлый рядъ величинъ, опредѣляющихъ вѣсъ воды на 1 kgr. пара; отсюда видно, что при сравненіи работы инжекторовъ, нужно позаботиться объ выполненіи цѣлаго ряда условій, которыя должны сохраняться неизмѣнными при испытаніи каждаго изъ нихъ. Если намъ извѣстна температура воды t_e , при которой инжекторъ работаетъ безъ потери чрезъ сливное отверстіе, то этой формулой мы можемъ воспользоваться для опредѣленія возможнаго при данныхъ прочихъ условіяхъ minimum'a воды. Maximum подачи нужно опредѣлять по формулѣ, выводимой на основаніи теоремы о равенствѣ количествъ движенія, т. е.

$$P = \frac{u_1 - u}{u - u_2}.$$

Ниже мы будемъ говорить о томъ, насколько правильно будетъ пользоваться этой формулой для случая съ инжекторомъ, не вводя поправочнаго коэффиціента. Здѣсь же укажемъ, что при выводѣ этого соотношенія принимается плотность смѣси равной плотности воды, т. е. примѣняемъ теорему къ тому случаю, когда имѣетъ мѣсто полная конденсація пара; въ дѣйствительности же ея достигнуть можно лишь при особо благоприятныхъ условіяхъ указанныхъ ранѣе; присутствіе въ струѣ пара и воздуха скажется увеличеніемъ конечной скорости и уменьшеніемъ P . Также точно на величинѣ P можетъ отражаться большая или меньшая конденсація пара въ паровой насадкѣ, омываемой снаружи протекающей холодной водой, т. к. скорость пара уменьшается; Жиффаръ полагалъ, что плотность пара, вытекающаго изъ насадки, составляетъ всего 0,66 плотности его въ котлѣ. Чѣмъ сильнѣе выражена конденсація пара чрезъ охлажденіе водою, тѣмъ сильнѣе вліяніе этого обстоятельства отразится на способности инжектора брать горячую воду, т. к. при увеличившемся истеченіи пара температура смѣси все-таки должна оставаться ниже соотвѣтствующей давленію въ конденсаціонной камерѣ, т. е. температура начальная въ этомъ случаѣ должна быть соотвѣтственно ниже, чѣмъ если бы паръ былъ сухой.

Fig. 1.

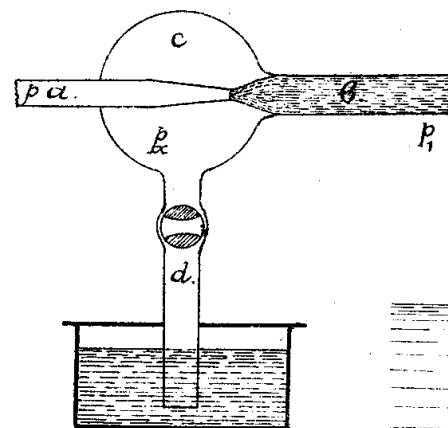


Fig. 2.

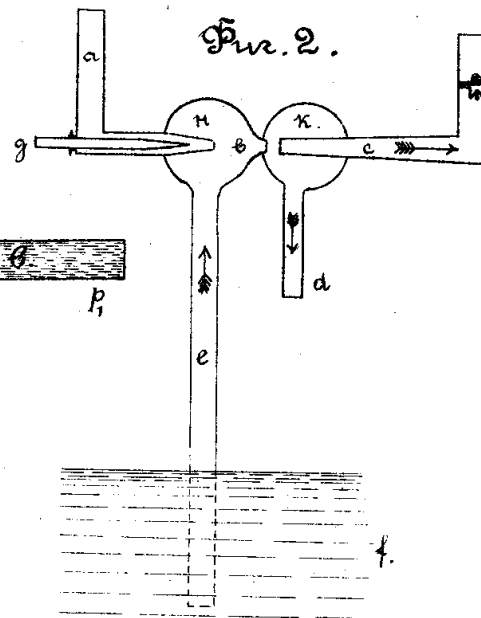


Fig. 3.

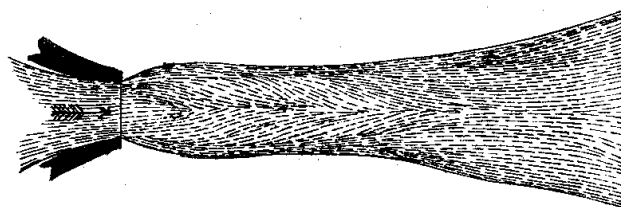


Fig. 4.

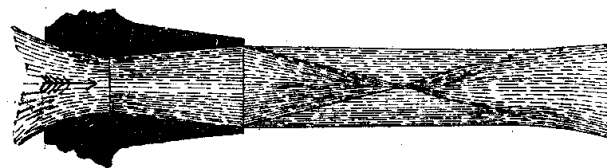
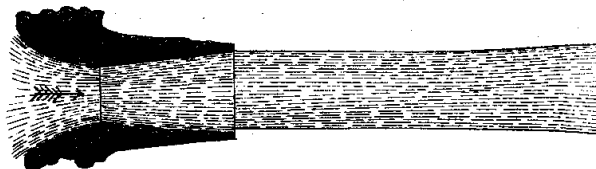
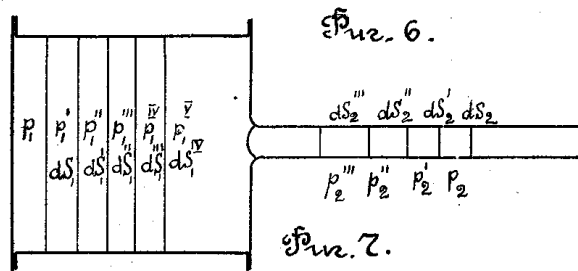
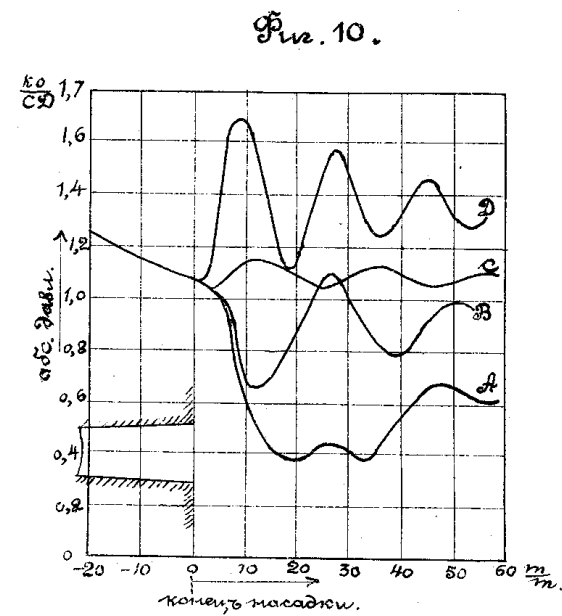
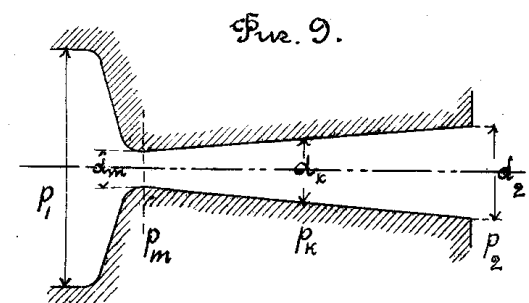
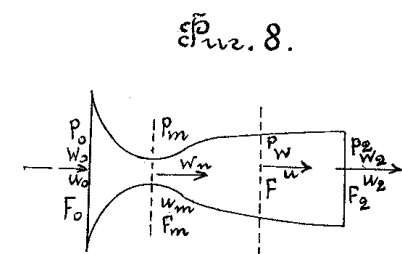
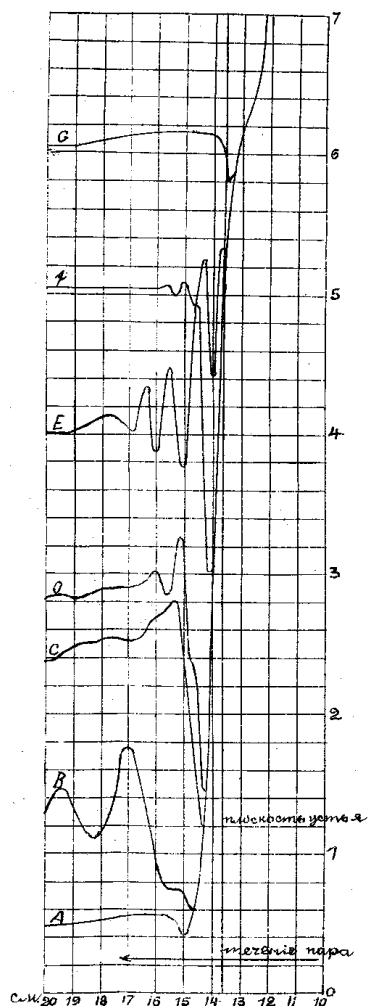


Fig. 5.

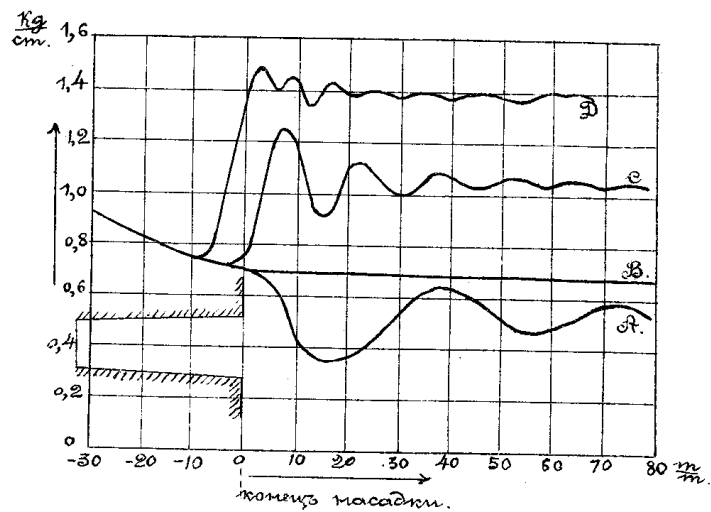




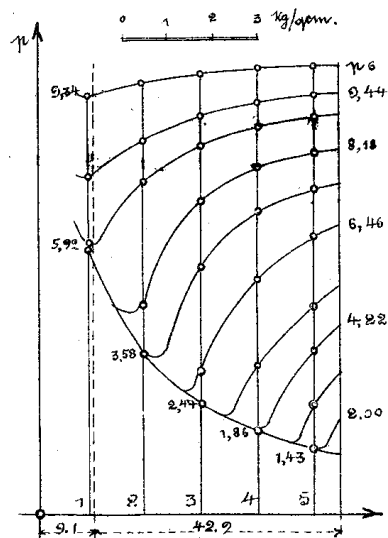
Кривые давлений при запуске
летательного аппарата.



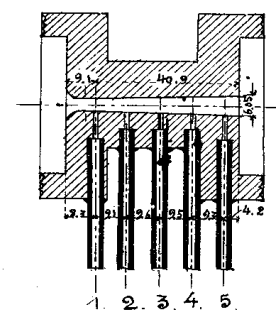
Pr. 11.



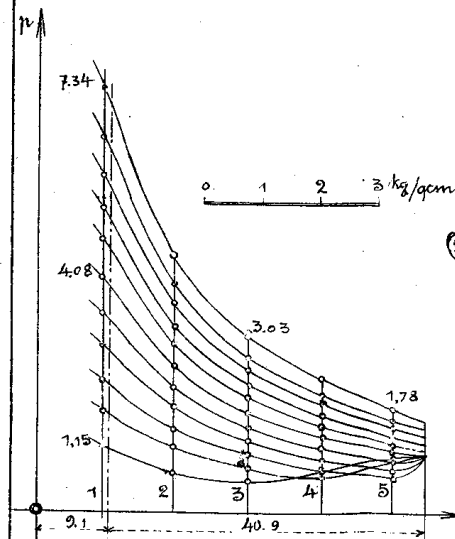
Fr. 12.



сп. 13.



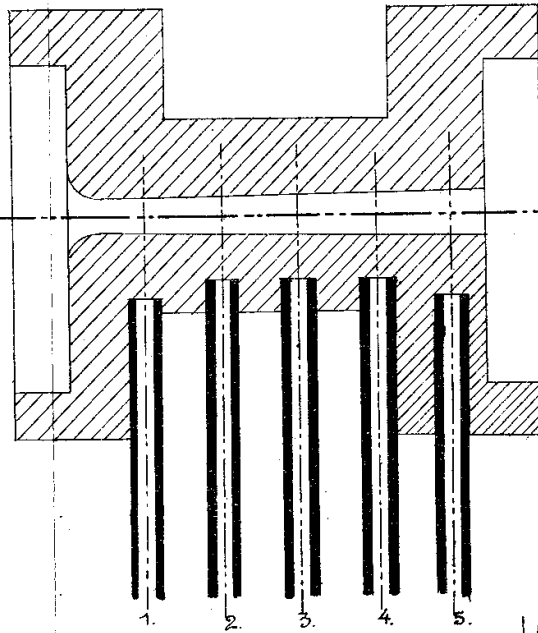
Fr. 14.



Размеры насадки фр. 13.

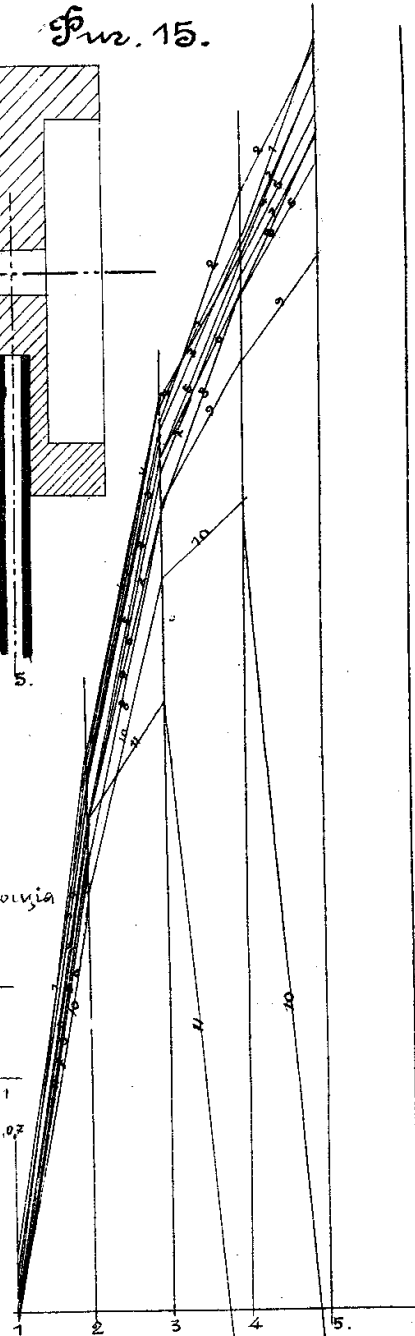
[illegible]

Фиг. 15.

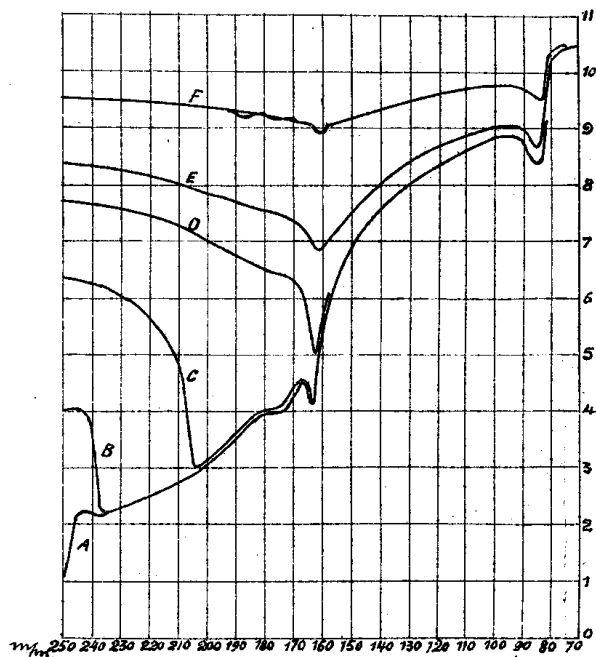
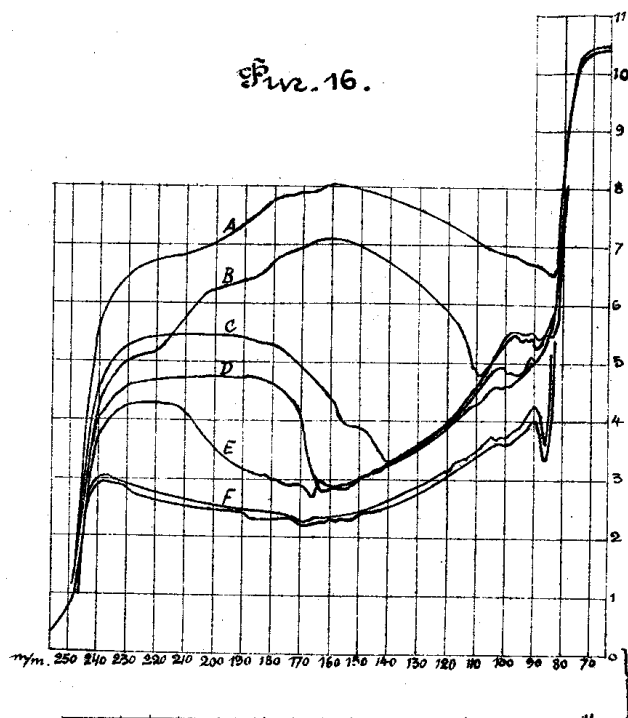


Давления соответствующих
кривых.

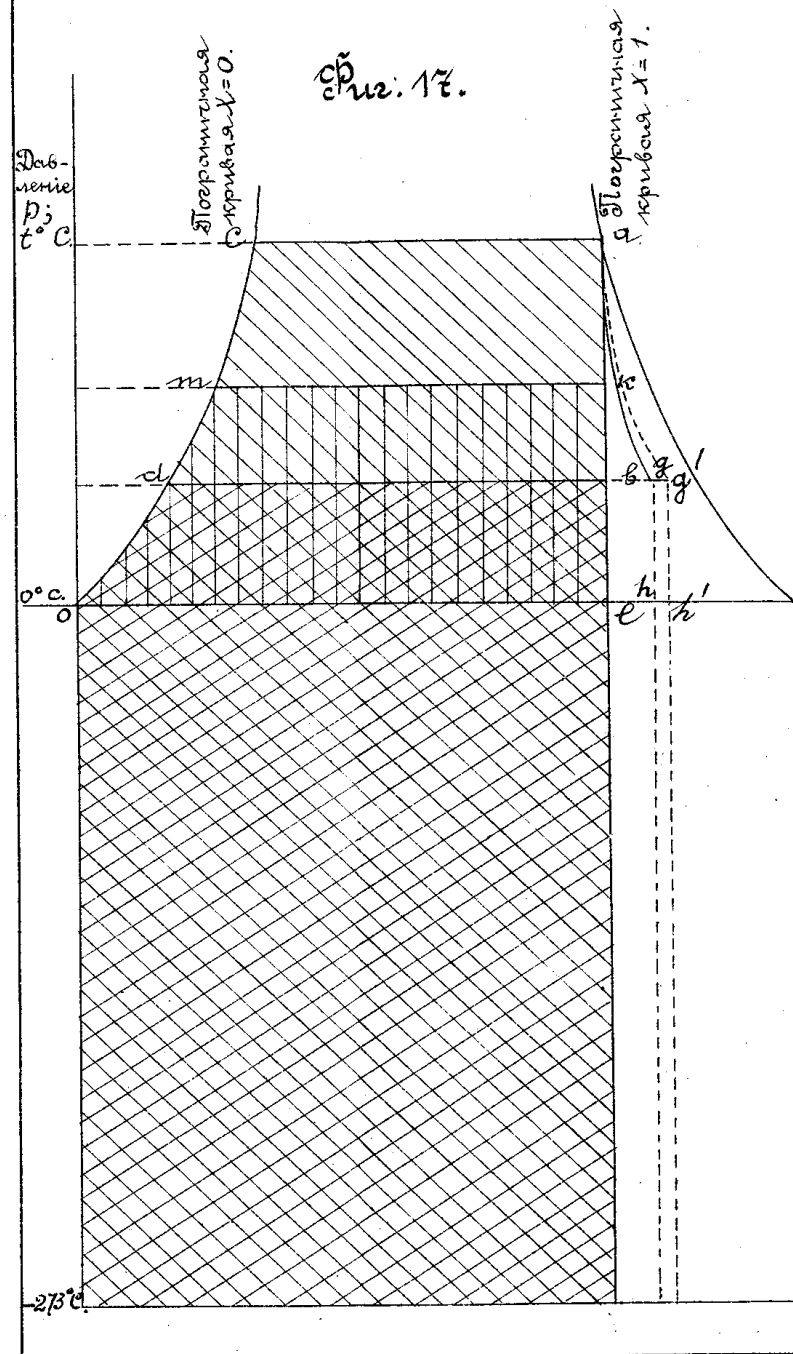
1.	2.	3.	4.	5.	
12.3	11.28	10.36	9.24	8.24	
6.	7.	8.	9.	10	11
7.14	6.10	5.08	4.08	3.15	2.07

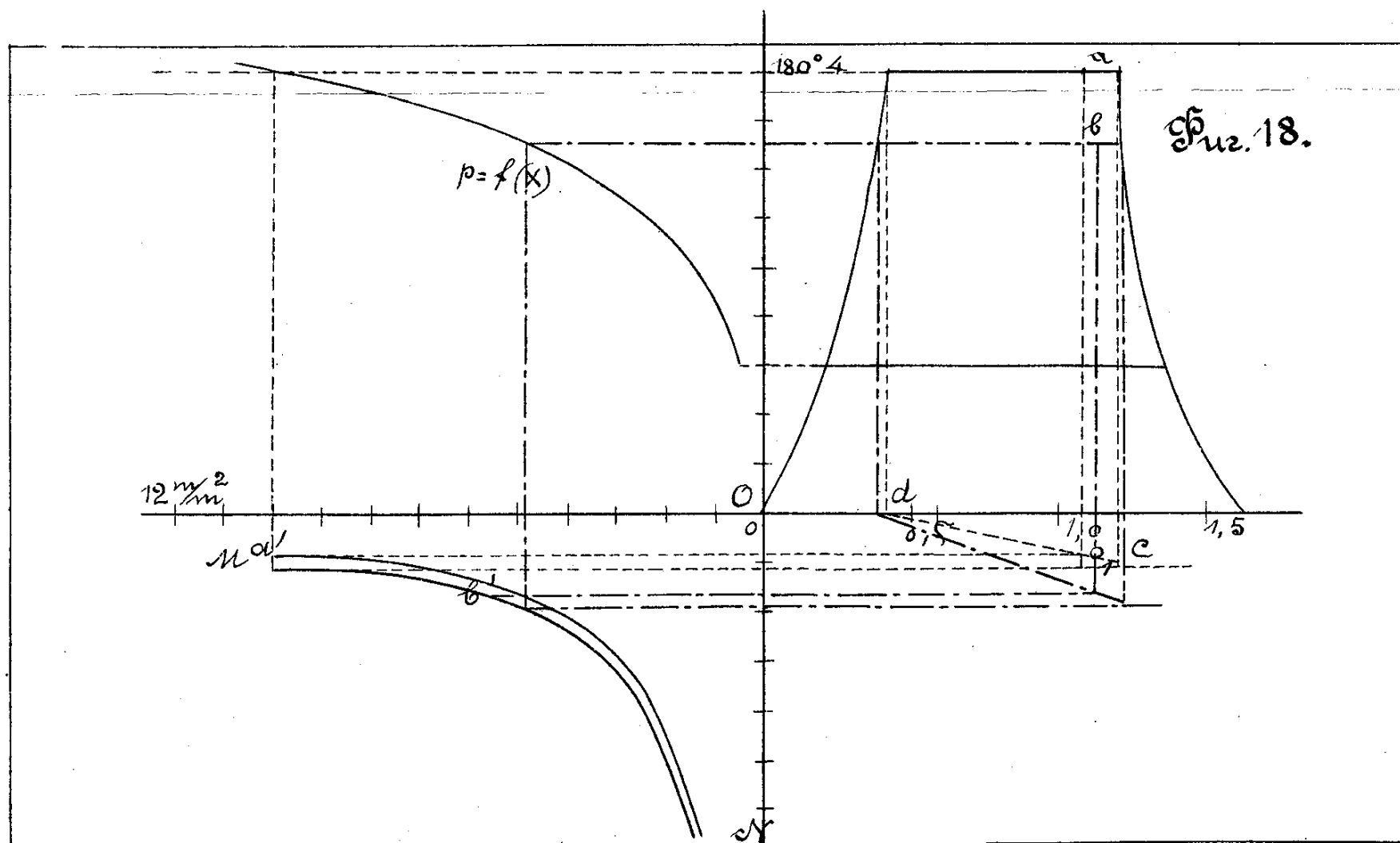


Зпр. 16.

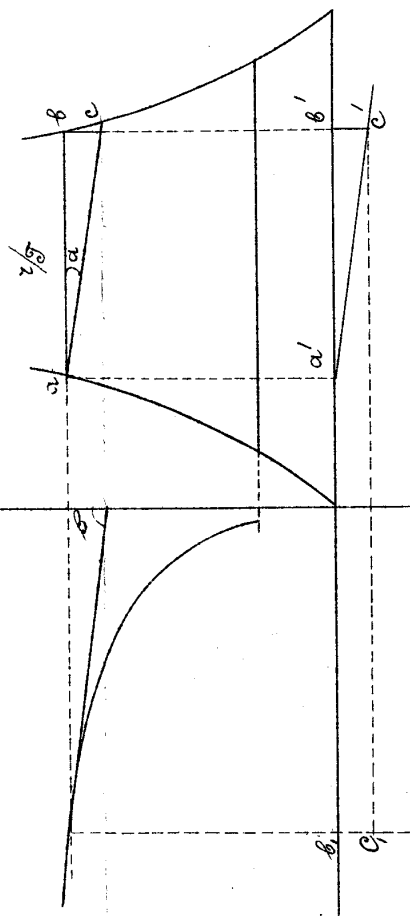


Зпр. 17.

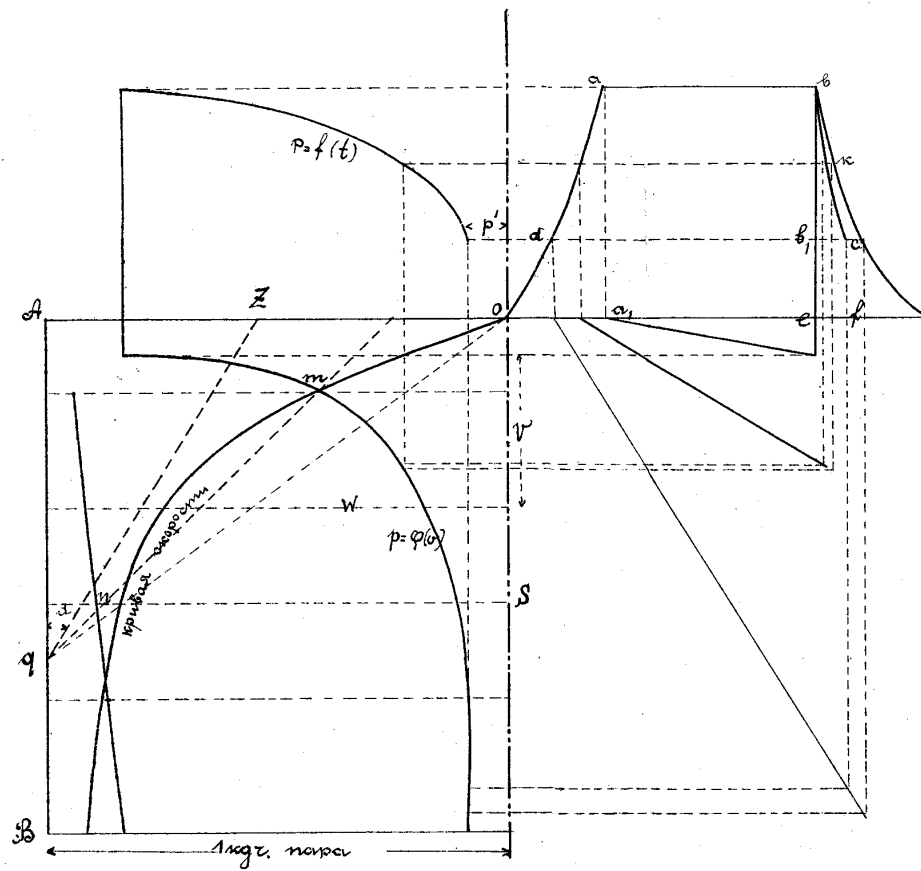




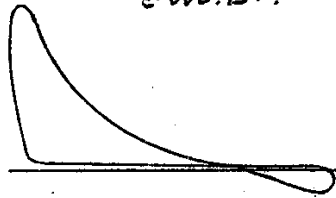
Зад. 19.



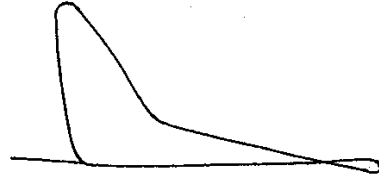
Зад. 20.



Фиг. 21.

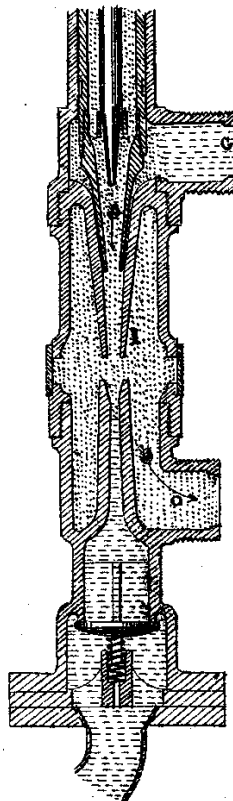


Фиг. 22.



Фиг. 23.

Типи издомување на пара



Фиг. 24.

Типи издомување вода.

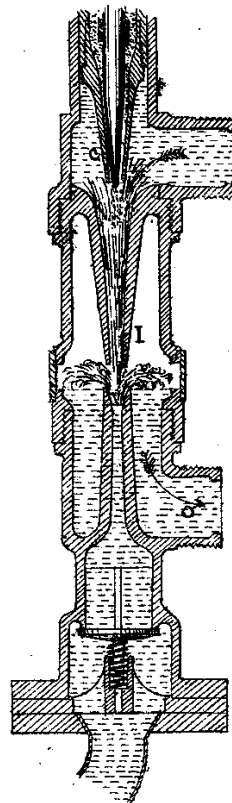


Рис. 26.

Рис. 25.

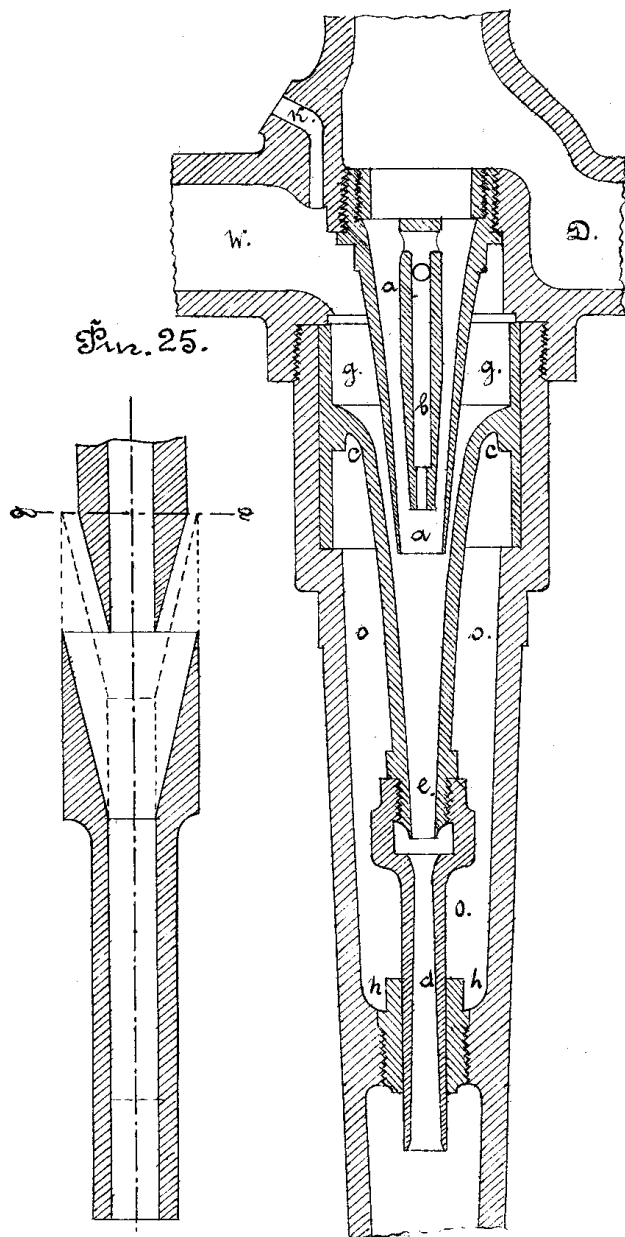


Рис. 27.

Рис. 28.

Рис. 29.

Рис. 30.

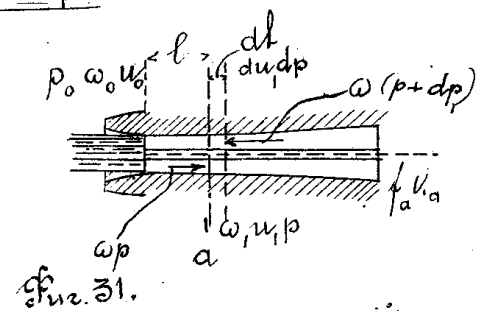
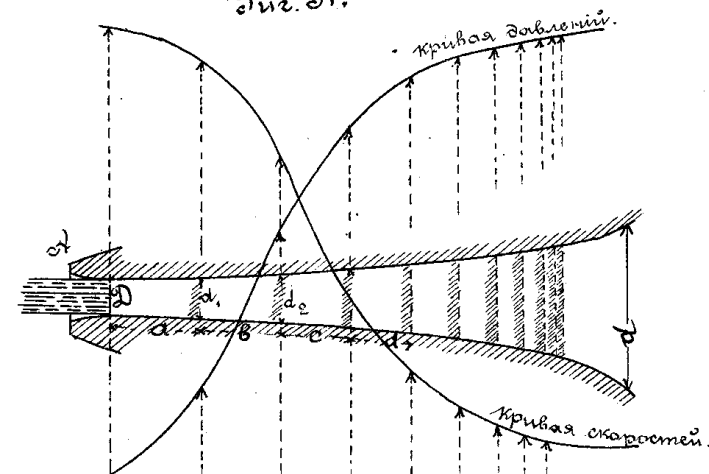
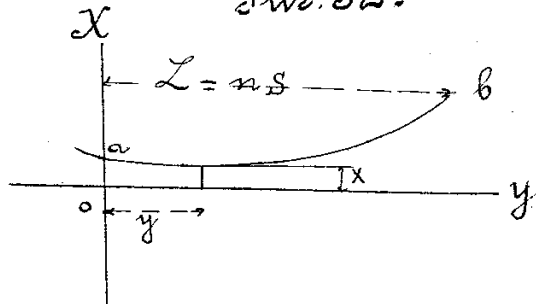


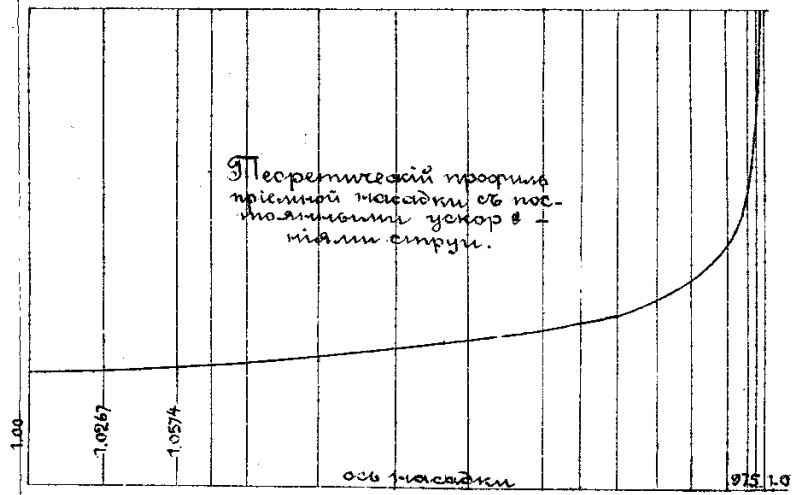
Рис. 31.



фиг. 32.



фиг. 33.



фиг. 34.

