

В.А. Аничков

Морские паровые машины

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 656
ББК 39.1
В11

В11 **В.А. Аничков**
Морские паровые машины / В.А. Аничков – М.: Книга по Требованию, 2021. – 408 с.

ISBN 978-5-458-68141-4

ISBN 978-5-458-68141-4

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2021
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2021

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

Подставляя значение интеграла в выражение работы L_m , получаем:

$$\begin{aligned} L_m &= p_a v_a - p_c \cdot v_a + \frac{p_a v_a}{1-k} \left[\left(\frac{v_a}{v_0} \right)^{k-1} - 1 \right] - p_c (v_0 - v_a) = \\ &= p_a v_a + \frac{p_a v_a}{k-1} \left[1 - \left(\frac{v_a}{v_0} \right)^{k-1} \right] - p_c \cdot v_0 = \\ &= p_a v_a \left[\frac{k}{k-1} - \frac{1}{k-1} \left(\frac{v_a}{v_0} \right)^{k-1} - \frac{p_c v_0}{p_a v_a} \right] = \\ &= \frac{k}{k-1} p_a v_a \left[1 - \frac{1}{k} \left(\frac{v_a}{v_0} \right)^{k-1} - \frac{k-1}{k} \cdot \frac{p_c v_0}{p_a v_a} \right]. \end{aligned}$$

В случае полного расширения $p_c v_0^k = p_a v_a^k$ и последняя выведенная формула совпадает с выражением L_r .

В практическом проектировании машины часто рассматривают упрощенный или так называемый вспомогательный цикл, в котором давление p_c принимают равным нулю, а закон расширения — гиперболическим ($p \cdot v = \text{const.}$).

В этом случае площадь цикла определяется следующим выражением:

$$L = p_a v_a + \int_{v_a}^{v_0} p \cdot dv = p_a v_a + p_a \cdot v_a \int_{v_a}^{v_0} \frac{dv}{v} = p_a \cdot v_a \left(1 + \ln \frac{v_0}{v_a} \right).$$

Величину $v_0:v_a$ называют степенью расширения пара в цилиндре и обратную величину $v_a:v_0$ — степенью впуска. Последнюю обозначают обычно буквой ε .

§ 3. Среднее теоретическое индикаторное давление и выражение мощности

Представляя себе машину, эквивалентную данной по величине работы, но работающую при постоянном давлении на поршень, мы вводим понятие о так называемом среднем теоретическом индикаторном давлении p_{ti} , которое, на основании данного нами определения, получается из следующего равенства: $p_{ti} \cdot v_0 = L$ или, соответственно принятому образцовому циклу, L_m или L_r .

Таким образом для цикла Рэнкина:

$$p_{tir} = p_a \cdot \frac{k}{k-1} \cdot \varepsilon \cdot [1 - \varepsilon^{k-1}].$$

Для цикла Мейера p_{ti} равно:

$$p_{tim} = p_a \cdot \frac{k}{k-1} \varepsilon \cdot \left[1 - \frac{1}{k} \cdot \varepsilon^{k-1} - \frac{k-1}{k} \cdot \frac{p_c}{p_a} \cdot \frac{1}{\varepsilon} \right].$$

И наконец для вспомогательного цикла:

$$p_{ii} = p_a \cdot \varepsilon \cdot \left(1 + \ln \frac{1}{\varepsilon}\right).$$

Для простоты расчетов приведена табл. 1 величин $\varepsilon \left(1 + \ln \frac{1}{\varepsilon}\right)$, вычисленных для различных степеней наполнения ε .

Таблица 1

ε	$\left(1 + \ln \frac{1}{\varepsilon}\right)$	ε	$\left(1 + \ln \frac{1}{\varepsilon}\right)$	ε	$\left(1 + \ln \frac{1}{\varepsilon}\right)$	ε	$\left(1 + \ln \frac{1}{\varepsilon}\right)$	ε	$\left(1 + \ln \frac{1}{\varepsilon}\right)$
0,01	0,056	0,11	0,353	0,21	0,538	0,31	0,673	0,60	0,906
0,02	0,098	0,12	0,374	0,22	0,555	0,32	0,675	0,65	0,930
0,03	0,135	0,13	0,395	0,23	0,569	0,33	0,696	0,70	0,949
0,04	0,169	0,14	0,415	0,24	0,583	0,34	0,707	0,75	0,969
0,05	0,200	0,15	0,435	0,25	0,597	0,35	0,717	0,80	0,978
0,06	0,229	0,16	0,453	0,26	0,610	0,375	0,743	—	—
0,07	0,257	0,17	0,471	0,27	0,624	0,40	0,767	—	—
0,08	0,282	0,18	0,489	0,28	0,636	0,45	0,810	—	—
0,09	0,303	0,19	0,506	0,29	0,649	0,50	0,847	—	—
0,10	0,330	0,20	0,522	0,30	0,661	0,55	0,879	—	—

Основываясь на понятии о среднем теоретическом индикаторном давлении, определяется выражение теоретической индикаторной мощности машины, т. е. мощности, развиваемой теоретически паром в цилиндре машины:

$$N_t = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot 2 \cdot S \cdot p_{ii} \cdot \frac{n}{60 \cdot 75} \text{ и. л. с.},$$

где: D — диаметр цилиндра в см;

S — ход поршня в м;

n — число оборотов в минуту.

§ 4. Применение энтропийных диаграмм

Эти диаграммы являются удобными для термодинамического исследования рабочего процесса паровой машины. Рассмотрим построение теоретических процессов в диаграмме $T-S$.

В этой диаграмме цикл Рэнкина изображается фигурой $abcd$ для случая сухого пара и фигурой $abb'c''c'''da$ для перегретого (фиг. 2). Линия ab представляет собой процесс испарения воды в котле; линия bb' — перегрев, производимый в пароперегревателе

при постоянном давлении, отрезок bc (или, соответственно, $b'c''$) — адиабатическое расширение пара в цилиндре машины и наконец линия cd (или, соответственно, $c''c'''cd$) — охлаждение пара в конденсаторе (при постоянном давлении) и обращение его в воду. Отрезок da мыслится как нагрев воды до температуры котла, происходящий таким образом, что с повышением давления температура всегда соответствует точке кипения при данном давлении. Все процессы предполагаются обратимыми, т. е. происходящими без трения и с бесконечно малой скоростью.

Перенос цикла Мейера в диаграммы $T-S$ и $I-S$. В процессе Мейера к описанному построению в диаграмме $T-S$ цикла Рэнкина необходимо добавить учет неполноты расширения. Для внесения этой поправки рассмотрим процессы расширения bc' и выпуска $c'e$ (фиг. 2 и 1).

Расширение пара заканчивается в точке c' , перенос которой в диаграмму $T-S$ можно произвести, отмечая на адиабате bc температуру, соответствующую давлению пара в точке c' .

Указанную температуру можно определить по таблицам паров, так как рассматриваемая точка находится в области влажного пара. Далее процесс $c'e$ рассматриваем условно, как происходящий при постоянном удельном объеме, и переносим его в диаграмму $T-S$ по соответствующей линии равного удельного объема, проходящей через точку c' . Положение конечной точки e этого участка процесса (фиг. 2) можно определить следующим аналитическим расчетом.

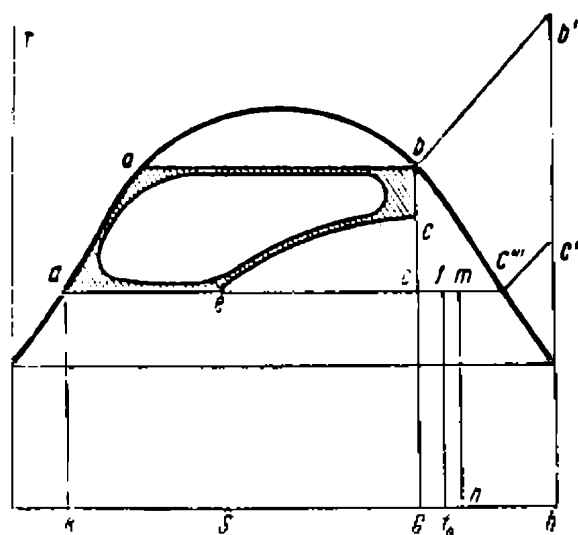
Объем пара V в точке e определяется по диаграмме $P-V$; соответствующий вес G определяется как количество пара, выпускаемого в машину за один ход поршня.

Этот вес может быть вычислен для рассматриваемого теоретического процесса по объему в точке b , считая паросодержание в этой точке равным единице.

Таким образом удельный объем пара в точке e равен:

$$v_e = \frac{V}{G}.$$

С другой стороны, объем v_e может быть выражен через удельный объем v_s сухого пара при давлении, соответствующем точке e ,



Фиг. 2.

помноженный на величину степени сухости пара в той же точке:

$$v_e = x_e \cdot v_s.$$

Сравнивая оба составленные уравнения, определяем величину паросодержания в точке e :

$$x_e = \frac{V}{G \cdot v_s}.$$

Определив x_e , построение точки e в диаграмме $T—S$ производим обычным методом деления отрезка отвечающей данному давлению горизонтали (между пограничными кривыми) в отношении $x_e:1$.

Изложенное построение, как это уже было нами указано выше, является условным и не отвечает физической сути явлений, происходящих при выпуске пара из цилиндра машины.

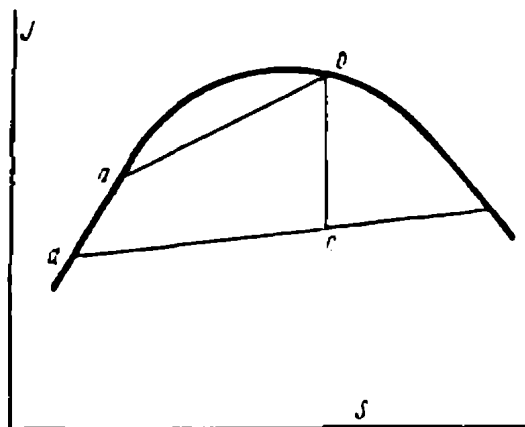
При исследовании действительных изменений состояния по линии $c'e$ мы должны были бы описать картину явлений, происходящих при выпуске пара из машины, следующим образом: с открытием щели выпускного канала пар начинает вытекать через нее с большой скоростью, расширяясь при этом адиабатически, по линии $c's$ (фиг. 2) до конечного противодавления после машины. Однако приобретенная при этом истечении живая сила не производит работы, но затухает благодаря образованию вихрей и внутреннего трения пара. Теплота, производимая трением и вихрями, сообщается пару вновь и увеличивает таким образом его энтропию до величины, соответствующей точке f , определяемой из условия равенства площадей $c'se$ и eff_0g . Приведенная при этом теплота, равная площадке eff_0g (рис. 2), является потерянкой (отведенной в холодильник).

Эта площадка выражает в тепловых единицах ту же потерю от неполноты расширения, которая в диаграмме $P—V$ выражалась (в единицах работы) площадью $c'sec'$ (фиг. 1) и которая была нами перенесена в диаграмму $T—S$ в виде площади $c'se$ (фиг. 2). Таким образом принципиальная неправильность переноса участка $c'e$ как изохорического процесса не изменила справедливости заключений о величине потери от неполноты расширения. С другой стороны, допущение постоянства количества пара в течение указанного процесса приводит к тому, что перенесенная в диаграмму $T—S$ линия $c'e$ не дает представления о состояниях пара. Так, например, паросодержание в точке e не соответствует действительности, так как истинное паросодержание в конце расширения отвечает точке f .

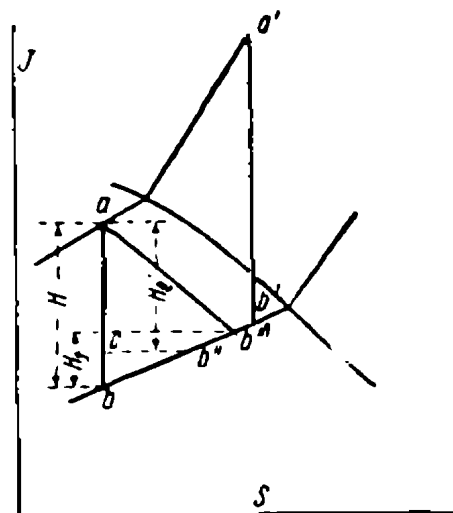
В диаграмме $I—S$ (Möller) цикл Рэнкина может быть изображен аналогично ($abcd$, фиг. 3). Однако полное изображение цикла в этих координатах не является необходимым, так как в данном случае отрезок bc адиабаты расширения, равный разности тепло-содержаний пара i_0 (в котле) и i_e (в холодильнике), определяет

работу цикла. Поэтому в практических диаграммах ограничиваются изображением лишь этого отрезка (или так называемого теплового напора, перепада тепла), как это иллюстрировано на фиг. 4 (ab — для начально влажного пара и $a'b'$ — для начально перегретого).

В цикле Мейера используется не весь тепловой перепад H , но лишь его часть H_p ; остальной отрезок cb равен площадке $c'se$ (фиг. 2), потерянной вследствие неполного расширения. Таким образом процесс расширения в этом цикле должен быть разбит на два участка: ac (расширение в цилиндре машины) и cb (истечение через выпускное окно).



Фиг. 3.



Фиг. 4.

Теплота, соответствующая этому отрезку, вновь сообщается пару вследствие трения, отчего теплосодержание повышается до точки b'' . Поэтому процесс Мейера должен быть изображен ломаной линией abb'' .

§ 5. Общее понятие о действительном процессе работы машины и тепловых потерях

Действительный рабочий процесс машины вследствие наличия тепловых потерь по площади меньше теоретического цикла и всегда заключен внутри последнего. На фиг. 1 и 2 заштрихованные площадки изображают величину тепловых потерь.

Последние, как легко показать на примерах, представляют собой тепло, заключенное в отработавшем и уходящем из машины паре. Так, например, по отношению к потере от неполного расширения высказанное положение является очевидным. Рассмотрим другую, имеющую большое значение, потерю от теплообмена

со стенками паровых каналов при впуске и выпуске пара из машины. В период впуска пар отдает тепло более холодным стенкам; при выпуске охлажденный пар вновь нагревается стенками и уносит тепло с собой. То же можно показать и по отношению к прочим потерям (за исключением потери через лучеиспускание в атмосферу).

Теплота, сообщаемая потерями отработавшему пару, увеличивает его теплосодержание и энтропию, ввиду чего состояние пара изменяется (увеличивается сухость и даже становится возможным перегрев). Описанное явление изображается в диаграмме $T-S$ (фиг. 2) таким образом, что состояние отработавшего пара переходит в точку m , причем подведенное к пару тепло, изображаемое площадкой $fmnf_0$, равно сумме всех тепловых потерь, указанных на той же фигуре заштрихованными площадками.

В диаграмме $I-S$ явление тепловых потерь изображается тем, что полезный тепловой перепад H_e уменьшается еще более, причем из-за наличия потерь H_f теплосодержание расширившегося пара возрастает, переходя из точки b'' в точку b''' . Ввиду того, что при построении рабочего процесса промежуточные состояния пара не являются предметом анализа, общее изменение состояния пара в машине можно считать условно проходящим по линии ab''' .

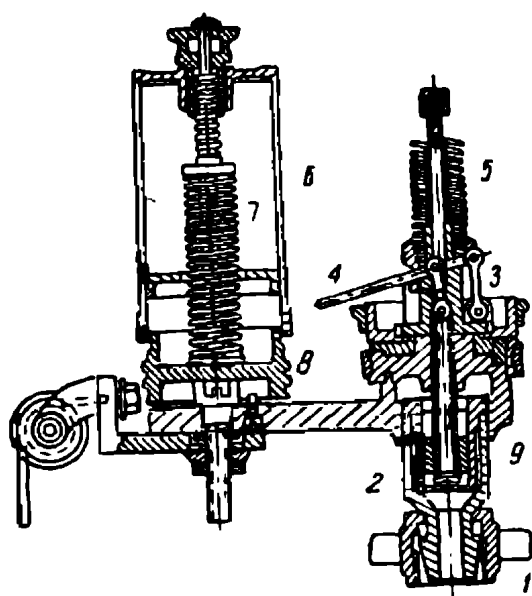
§ 6. Измерение работы машины путем испытаний.

Индикатор

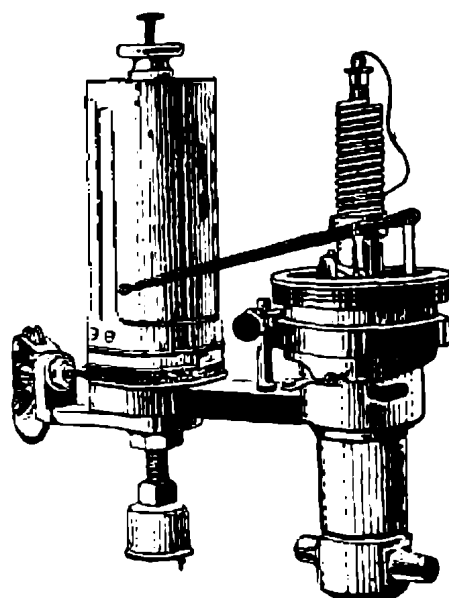
Рабочие диаграммы $P-V$ на испытаниях машин автоматически вычерчиваются специальными приборами — индикаторами, одна из новых конструкций которых изображена в разрезе на фиг. 5 и 6 (система Mayhac). Индикатор сообщается при помощи соединительной гайки 1 с крапом, установленным на цилиндре машины. Давление пара передается на поршень 2, движущийся в втулке 9 и соединенный верхней частью своего штока с рычажной системой 3, передающей перемещения поршня стрелке 4 пишущего прибора.

Кинематическая связь системы рычагов заставляет конец пишущего рычага совершать вертикальные прямолинейные перемещения соответственно перемещению поршенька индикатора, но в увеличенном масштабе. Запись диаграммы производится на бумаге, закрепленной на барабане 6, который приводится в движение около вертикальной оси обернутым через шкив 8 шнурком. Другой конец шнурка соединен с рычагом индикаторного привода, передающего в уменьшенном масштабе прямолинейно-возвратное движение поршня машины от какой-либо движущейся точки машины, жестко с ним связанной (крейцкопф, коромысло воздушного насоса и т. д.).

Таким образом повороты барабана индикатора относительно его вертикальной оси пропорциональны путям, проходимым поршнем машины. Для больших машин при индикаторе устанавливают особый ходоуменьшитель, схематически изображенный на фиг. 7.



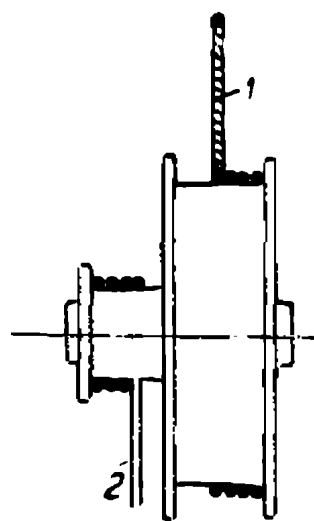
Фиг. 5.



Фиг. 6.

Ходоуменьшитель состоит из двух сидящих на общей оси шкивов, на которые навиты приводные шнуры; шнурок 1 соединен с приводом от машины, а шнурок 2 с барабаном индикатора. При обратном ходе поршня барабан возвращается в первоначальное положение связанной с ним специальной пружиной.

В старых конструкциях индикаторов поршень индикатора 2 сверху получал давление от пружины, помещенной внутри втулки. В настоящее время эти пружины 5 помещаются снаружи, как изображено на фиг. 6, чем достигаются предохранение пружины от нагрева и легкость ее замены. При каждом индикаторе прилагается комплект индикаторных пружин различной упругости, соответственно величине измеряемых давлений пара в цилиндрах. Каждая пружина дает определенный масштаб давлений на индикаторной диаграмме.



Фиг. 7.

Определение площади диаграммы производят либо обводом контура планиметром, либо вычислением ее по ряду проведенных ординат по правилу приближенного вычисления площадей (правило трапеций). В последнем случае основание диа-

грамм делят на 10 равных участков (ΔV) и, восстанавливая в местах делений ординаты, измеряют масштабом длину отрезков (фиг. 8).

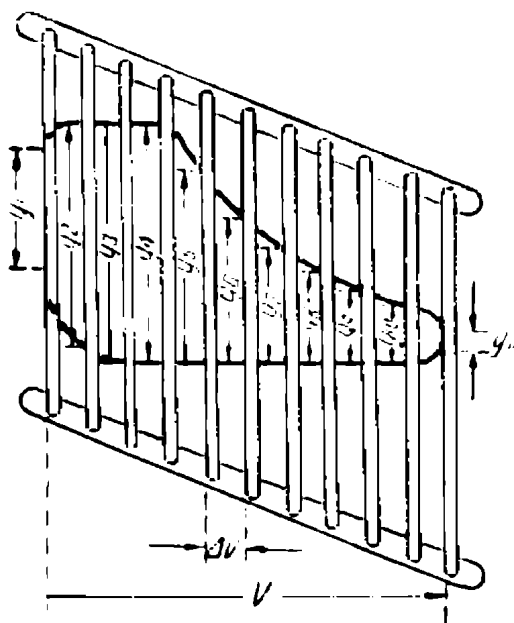
Среднее индикаторное давление определяется затем по формуле:

$$p_{mi} = \left(\frac{1}{2} y_1 + y_2 + \dots + y_{n-1} + y_n + \frac{1}{2} y_{n+1} \right) \frac{m}{10},$$

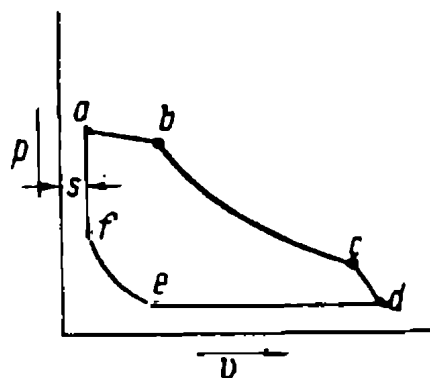
где m — указанный на пружине масштаб, определяющий нагрузку в кг/см^2 , соответствующую одному миллиметру высоты ординаты. Для ускорения деления диаграммы применяются специальные накладываемые на диаграмму шарнирные решетки (фиг. 8).

§ 7. Индикаторная диаграмма

Снятую при помощи индикатора геометрическую фигуру, изображающую зависимость давления пара в цилиндре от положения поршня (или описанного им объема) называют индикаторной диаграммой цилиндра (фиг. 9). Индикаторная диаграмма служит источником, из которого мы получаем сведения о действитель-



Фиг. 8.



Фиг. 9.

ной работе пара в цилиндре машины. Однако между индикаторной диаграммой и рабочим процессом в термодинамическом смысле имеются существенные различия, состоящие в том, что количество рабочего вещества в цилиндре за время совершения одного цикла переменное, в то время как в термодинамике постоянное количество вещества совершает замкнутый цикл изменений состояний.

Это разноречие может быть устранено, если отдельные участки процессов, изображенных на диаграмме, отнести не только к цилиндру машины, но также и к остальным звеньям установки —

котлу и конденсатору. Так, например, период впуска пара в цилиндр ab мы относим к паровому котлу, рассматривая его как процесс испарения, соответствующего впущенному в машину количеству пара. Точно так же период выпуска de мы рассмотрим как процесс конденсации пара, выпускаемого в холодильник. Таким образом мы как бы приводим индикаторную диаграмму к циклу с постоянным количеством рабочего вещества, часть которого в отдельные моменты может находиться в цилиндре и остальная часть — в виде воды — в котле или холодильнике.

Полное количество работающего вещества содержится в цилиндре лишь в течение периода расширения bc .

При этих предположениях индикаторная диаграмма может служить не только для определения работы пара в цилиндре и мощности машины, но и для исследования всего теплового процесса. К отличиям индикаторной диаграммы действительной машины от теоретических циклов можно отнести также следующее:

1) впуск пара в цилиндр совершается не в момент нахождения поршня в мертвой точке, но несколько ранее (в точке f). Другими словами, с приближением поршня к мертвой точке свежий пар впускается навстречу идущему поршню. Этот метод впуска называют опережением впуска пара, им преследуют цель смягчить действие сил инерции поршня, изменяющих в мертвых точках свое направление. Величина опережения впуска невелика и измеряется числом градусов поворота кривошипа от момента начала впуска и до мертвой точки (от 4 до 10°);

2) выпуск пара из цилиндра производится также ранее мертвой точки c с тем, чтобы при подходе к последней поршень был уже разгружен от рабочего давления, с указанной уже выше целью избежать порывистого перехода через мертвые точки (опережение выпуска).

3) Выпуск прекращается значительно ранее достижения мертвой точки, вследствие чего оставшийся в цилиндре пар подвергается сжатию ef . Этим преследуется, с одной стороны, практическая цель создания вблизи мертвых точек паровых подушек (для противодействия силам инерции движущихся частей) и, с другой, сжатие, как будет выяснено ниже, уменьшает некоторые тепловые потери в цилиндре (потерю от вредного пространства) и производит нагревание стенок цилиндра перед впуском в них свежего пара, что снижает потерю от так называемой начальной конденсации пара.

Детальное исследование тепловых потерь удобно производить, перенеся индикаторную диаграмму в энтропийные координаты.

§ 8. Вредное пространство

Рабочим объемом цилиндра называют объем, описанный поршнем при его движении от одной мертвой точки до другой. В мертвых положениях между поршнем и крышкой цилиндра из соображений безопасности (изменение положения поршня при износе подшипников, накопление на поверхности поршня конденсационной воды) оставляют зазор у [смотря по величине машины от 4 мм

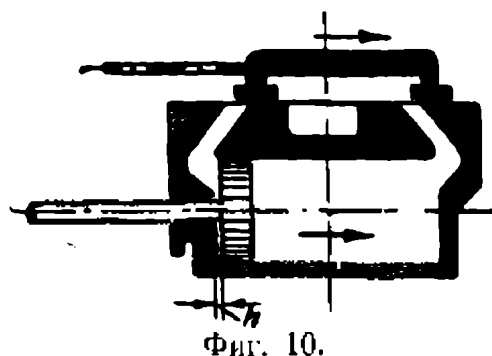


Таблица 2

Примерная высота вредных пространств вертикальных судовых машин в мм, в зависимости от хода поршня (по Sterling)

Ход поршня в мм	Высота вредных пространств в мм	
	верхняя полость	нижняя полость
До 400	5—6	8
400—600	6—7	10
600—800	6—7	12—13
800—1000	9—10	12—13
1000—1200	9—10	15—16
1200—1400	12—13	18—20

у самых малых машин и до 30 мм у больших (фиг. 10)]. Этот зазор носит название высоты вредных пространств, примерная его величина дана в табл. 2.

Если в машине отсутствует сжатие, то в конце хода выпуска пространство этого зазора требует наполнения свежим паром и потому называется вредным. К указанному объему добавляется также объем золотниковых каналов или вообще тот объем, который находится в постоянном сообщении с цилиндром. Отрицательное влияние вредного пространства сказывается, во-первых, в необходимости заполнения его в начале впуска дополнительным количеством пара и, во-вторых, в том, что поверхности стенок вредного пространства являются теми поверхностями, на которых происходит наиболее интенсивная конденсация пара при впуске его в машину. Поэтому при проектировании машины необходимо заботиться не только о наименьшем возможном объеме вредного пространства, но и о наименьшей поверхности вредного пространства.

Объем вредного пространства достигает у машин многократного расширения величины около $8-10\%$ и более от рабочего объема у ц. н. д. и от 12 до 16% у ц. в. д. Примерная величина объема вредных пространств современных морских машин приведена в табл. 3.