

ИЗВѢСТІЯ  
Томскаго Технологическаго Института  
Императора Николая II.  
т. 12. 1908. № 4.

III.

**В. Л. Малъевъ.**

Графическое построение тепловыхъ діаграммъ машинъ внутренняго горѣнія.

*Съ приложеніемъ 1 таблицы.*

1—24.

## Графическое построение тепловых диаграмм машинъ внутренняго горѣнія.

В. Л. Малѣевъ.

Индикаторная діаграмма, которой обычно пользуются при изслѣдованіи работы машинъ внутренняго горѣнія, даетъ наглядную картину явленій, происходящихъ въ цилиндрѣ машины, но лишь съ одной точки зрѣнія — измѣненія давленій въ цилиндрѣ въ различные моменты положенія поршня.

Для правильной оцѣнки работы машины весьма важно проникнуть глубже въ сущность происходящихъ въ цилиндрѣ явленій и получить представленіе объ нихъ съ точки зрѣнія тепловыхъ измѣненій, т. е. получить картину измѣненія температуръ и теплоты. Эта картина получится, если рабочій процессъ представить графически въ такихъ координатахъ, въ которыхъ площадь изображаетъ теплоту, подобно тому, какъ въ координатахъ  $PV$  (индикаторной діаграммѣ) площадь изображаетъ работу.

Энтропійная  
диаграмма.

Въ этихъ новыхъ координатахъ при бесконечно маломъ измѣненіи состоянія рабочаго тѣла (газа) отъ состоянія, выражаемаго точкой 1, до состоянія 2, черт. 1, бесконечно малая площадь  $122'1'1$  представитъ, слѣдовательно, въ нѣкоторомъ масштабѣ происшедшее измѣненіе тепла  $dQ$ , т. е.

$$dQ = y dx. \quad (1)$$

Одну изъ координатъ можно взять произвольно, именно возьмемъ за ординаты абсолютныя температуры  $T$ , тогда

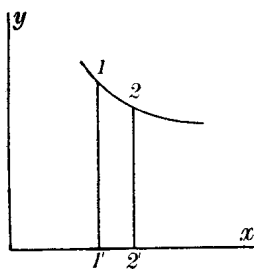
$$dQ = T dx,$$

откуда

$$x = \int \frac{dQ}{T}. \quad (2)$$

Выраженіе  $\int \frac{dQ}{T}$  по предложенію Клаузіуса принято называть энтропией и обозначать черезъ  $S$ . Такимъ образомъ

$$dQ = T dS. \quad (3)$$



Черт. 1.

Сравнивая ур-іе (3) съ общимъ дифференціальнымъ выраженіемъ тепла

$$dQ = cdT, \quad (4)$$

гдѣ  $c$  теплоемкость даннаго тѣла, можно сдѣлать заключеніе, что новое понятіе — энтропія  $S$  — должно быть отнесено тоже къ порядку теплоемкостей и выражается въ тѣхъ же единицахъ, т. е. въ тепл. ед. (калоріяхъ).

Численное значеніе для  $S$  легко найти, сопоставляя ур-іе (3) съ первымъ закономъ термодинамики

$$dQ = dU + APdv; \quad (5)$$

замѣтимъ, что для постояннаго газа, согласно закона Джоуля, измѣненіе внутренней энергіи

$$dU = c_v dT, \quad (6)$$

гдѣ  $c_v$  теплоемкость при постоянномъ объемѣ; далѣе, замѣнимъ во второмъ членѣ давленіе  $P$  его выраженіемъ изъ характеристическаго уравненія газа

$$Pv = RT; \quad (7)$$

послѣ этихъ подстановокъ ур-іе (5) приметъ видъ

$$dQ = c_v dT + \frac{ARTdv}{v},$$

или, раздѣливъ обѣ стороны на  $T$  и замѣтивъ, что по ур-ію (3)  $\frac{dQ}{T} = dS$ ,

получаемъ

$$dS = c_v \frac{dT}{T} + AR \frac{dv}{v}. \quad (8)$$

Если считать теплоемкость  $c_v$  постоянной величиной, то и первый и второй членъ правой стороны ур-ія (8) полныя дифференціалы; послѣ интегрированія получаемъ

$$S = c_v \lg_n T + AR \lg_n v + const. \quad (9)$$

Замѣтимъ, что произведеніе  $AR$  равно разности теплоемкостей при постоянномъ давленіи и постоянномъ объемѣ, т. е.

$$AR = c_p - c_v; \quad (10)$$

подставляя это значеніе  $AR$  въ ур-іе (9), получаемъ

$$S = c_v \lg_n T + (c_p - c_v) \lg_n v + const.;$$

такъ какъ  $\lg_n T$  и  $\lg_n v$  отвлеченныя величины, то это уравненіе еще разъ наглядно подтверждаетъ, что  $S$  относится къ порядку теплоемкостей.

Въ ур-іи (9)  $S = f(T, v)$ ; въ характеристическое уравненіе газа (7) входятъ три переменныхъ величины,  $P$ ,  $v$  и  $T$ ; пользуясь ур-іемъ (7), выраженіе для  $S$  можно представить въ видѣ функціи любой пары изъ этихъ трехъ величинъ, т. е. и въ видѣ  $S = f(P, v)$  и, наконецъ,  $S = f(P, T)$ .

Путемъ простого исключения получаемъ изъ ур-ія (9)

$$S = c_v \lg_n P + c_p \lg_n v + const., \quad (11)$$

и

$$S = c_p \lg_n T - AR \lg_n P + const. \quad (12)$$

Разумѣется, во всѣхъ трехъ выраженіяхъ (9), (11) и (12) постоянная величина *const.* различная. Пока мы не опредѣлимъ этихъ постоянныхъ, мы не будемъ знать дѣйствительной, т. е. абсолютной величины *S*, а вмѣстѣ съ тѣмъ не будемъ знать, гдѣ начало осей абсциссъ на черт. 1. Но такъ какъ при изслѣдованіи рабочихъ процессовъ насъ интересуютъ исключительно лишь послѣдовательныя измѣненія состоянія и проходящія при этомъ измѣненія *S*, т. е. лишь разности энтропій начальнаго и послѣдующаго состоянія, то по оси *S* начало осей координатъ можно брать произвольно, задавшись какой нибудь величиной *const.*; напр., можно положить *const.* = 0.

Если мы имѣемъ теперь индикаторную діаграмму машины внутренняго горѣнія, при чемъ, конечно, извѣстны ея масштабы давленій  $m_p$  и объемовъ  $m_v$ , затѣмъ знаемъ объемъ камеры сжатія  $V_c$ , составъ рабочаго газа (напр., по анализу продуктовъ горѣнія) и температуру въ какой нибудь одной точкѣ діаграммы, напр., въ началѣ сжатія, то мы имѣемъ всѣ данныя для переноса рабочей діаграммы изъ координатъ  $PV$  въ координаты  $TS$ . Именно, пользуясь ур-іемъ (11), легко вычислить величины *S* для послѣдовательнаго ряда точекъ индикаторной діаграммы, а по извѣстной температурѣ въ какой нибудь одной точкѣ діаграммы найти при помощи ур-ія (7) температуры въ соотвѣтствующихъ точкахъ. Такимъ образомъ получимъ въ осяхъ  $TS$  рядъ точекъ, который, соединенный непрерывной кривой, дастъ замкнутый контуръ, т. е. тепловую или, какъ ее иначе называютъ, энтропійную діаграмму, площадь которой представитъ тепло, превращенное въ работу въ данномъ циклѣ.

Однако такой способъ очень кропотливъ и требуетъ много времени. Этимъ нужно объяснить, почему тепловой діаграммой, несмотря на то, что она даетъ очень цѣнныя, можно сказать незамѣнимыя указанія при изслѣдованіи работы существующихъ машинъ внутренняго горѣнія, до настоящаго времени не пользуются или почти не пользуются, не только на практикѣ, но даже и при научно-лабораторныхъ изслѣдованіяхъ. Въ виду этого заслуживаетъ большого вниманія графическій способ<sup>1)</sup>, который не только значительно упрощаетъ переносъ индикаторной діаграммы въ координаты  $TS$ , но и требуетъ несравненно меньше времени.

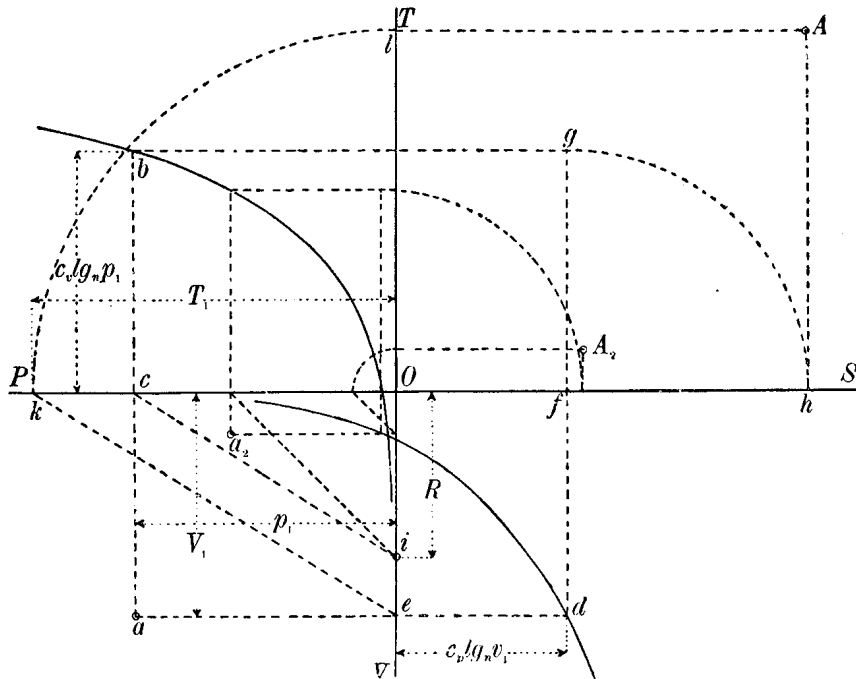
Графическое  
построеніе  
тепловой  
диаграммы.

<sup>1)</sup> Идея этого способа впервые была указана въ статьѣ Н. Mottet.—Le diagramme entropique appliqué à l'étude des cycles effectués par l'intermédiaire des gaz permanents.—Annales de l'Association des ingénieurs de Gand, 1907.

Основанъ этотъ способъ на слѣдующемъ: возьмемъ выраженіе  $S$  въ видѣ ур-ія (11), положивъ  $const.=0$ ,

$$S=c_v \lg_n P+c_p \lg_n v; \quad (11a)$$

нетрудно замѣтить, что каждый изъ правыхъ членовъ ур-ія (11a) представляетъ изъ себя линейную величину—ординату нѣкоторой логарифмической кривой. Чтобы найти  $S$  для какой нибудь точки  $a$ , для которой известны  $P$  и  $v$ , напр. даны графически въ координатахъ  $PV$ , черт. 2, про-



Черт. 2.

водимъ крестомъ 4 оси координатъ  $T$ ,  $S$ ,  $P$  и  $V$ . Взявъ затѣмъ ось  $OP$  за ось абсциссъ, а ось  $OT$  за ось ординатъ, строимъ, вычисляя по точкамъ и выбравъ масштабъ для  $c_v$ , логарифмическую кривую  $c_v \lg_n P$ . Очевидно, при  $P=S$  эта кривая пересѣчетъ ось  $OP$ , и дальше при  $P<1$  ординаты ея будутъ отрицательны. Далѣе, взявъ ось  $OV$  за ось абсциссъ и ось  $OS$  за ось ординатъ, строимъ такимъ же образомъ кривую  $c_p \lg_n v$ , сохраняя для  $c_p$  тотъ же масштабъ, который мы выбрали выше для  $c_v$ . Подобно предыдущему при  $V<1$  ординаты этой кривой будутъ отрицательны.

При помощи этихъ кривыхъ величина  $S_1$  для точки  $a$  найдется въ видѣ суммы ихъ ординатъ  $cb$  и  $ed$ . Графически это сложеніе производится слѣдующимъ образомъ: изъ точки  $b$  проводимъ прямую  $\parallel$  оси  $OS$ , а изъ точки  $d$  прямую  $\parallel$  оси  $OT$  до ихъ взаимнаго пересѣченія въ точкѣ  $g$ ; радиусомъ  $fg$  изъ точки  $f$  отсѣкаемъ на оси  $OS$  линію  $fh$ ;

$$fh+Of=Oh=c_v \lg_n P_1+c_p \lg_n v_1=S_1.$$

При этомъ, очевидно, масштабъ  $S$  будетъ тотъ же, что выбранный раньше для  $c_v$  и  $c_p$ .

Вторую координату—температуру  $T_1$ —находимъ тоже графически, замѣтивъ, что по ур-ю (7)  $T_1$  есть четвертая пропорціональная къ величинамъ  $P_1$ ,  $v$  и  $R$ . Выбираемъ для  $R$  масштабъ  $m_R$  и откладываемъ въ немъ  $Oi = R m_R$ , черт. 2; соединяемъ  $i$  съ  $c$  и проводимъ  $ek \parallel ic$ ; тогда  $Ok = T_1$ . Масштабъ  $m_t$  для температуръ, очевидно, получится

$$m_t = \frac{m_p \cdot m_v}{m_R}. \quad (13)$$

Теперь проводимъ дугу радиусомъ  $Ok$  до пересѣченія оси  $OT$  въ точкѣ  $j$ ; проведя черезъ точки  $j$  и  $h$  прямая  $\parallel$  соответственно осямъ координатъ, получаемъ въ пересѣченіи ихъ искомую точку  $A$ , соответствующую въ осяхъ  $TS$  точкѣ  $a$ , данной въ осяхъ  $PV$ .

Можетъ случиться, что  $V_2 < 1$ , точка  $a_2$ . черт. 2. Тогда  $c_p \lg_n v$  будетъ отрицательно, но весь ходъ построения, какъ видно по черт. 2, отъ этого не мѣняется.

Всѣ предыдущія ур-ія (1) — (12) были написаны для 1 кгр. газа; если имѣется  $G$  кгр. газа, то ур-іе (1) преобразуется въ

$$PV = GRT, \quad (14)$$

гдѣ  $V = Gv$ . вмѣсто величины  $R$  на черт. 2 надо отложить въ масштабѣ  $m_R$  величину  $GR$ . Что касается логарифмическихъ кривыхъ, то вмѣсто  $c_v \lg_n P$  и  $c_p \lg_n v$  надо взять  $Gc_v \lg_n P$  и  $Gc_p \lg_n v$ , т. е. ихъ пришлось бы перестроить, увеличивъ ординаты въ  $G$  разъ. Но такъ какъ масштабъ для  $c_p$ ,  $c_v$  и  $S$  не находится ни въ какой связи съ масштабами  $m_p$ ,  $m_v$ ,  $m_t$  и  $m_R$ , то гораздо проще, не перестраивая кривыхъ, считать, что масштабъ ихъ уменьшенъ въ  $G$  разъ.

Само собой разумѣется, что вмѣсто ур-ія (11) можно воспользоваться и остальными двумя ур-іями (9) и (12); способъ остается совершенно тотъ же.

Возьмемъ ур-іе (9), положивъ  $const. = 0$ ,

$$S = c_v \lg_n T + AR \lg_n v. \quad (9a)$$

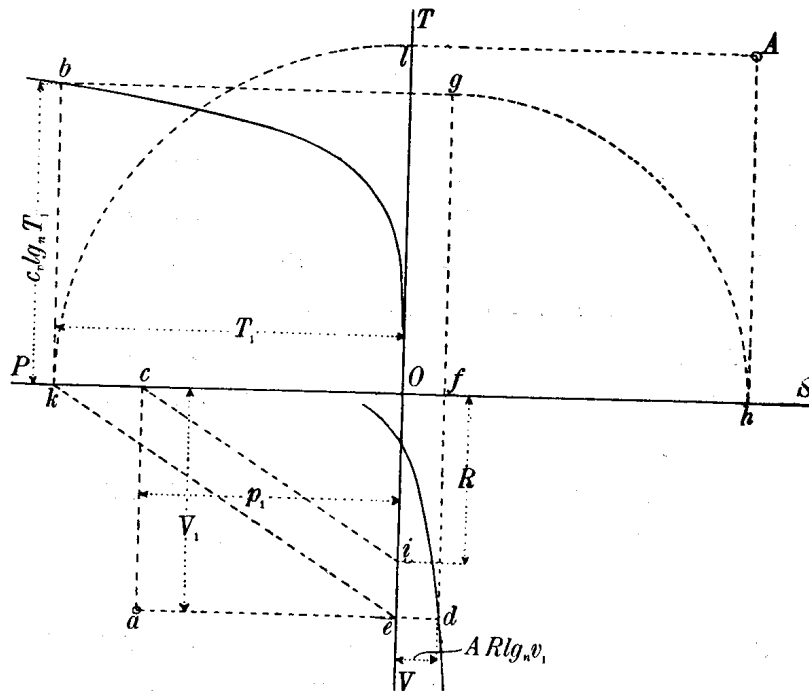
Имѣя въ виду ур-іе (13), выбираемъ масштабъ  $m_t$  для температуръ и строимъ, какъ и раньше, по точкамъ кривую  $c_v \lg_n T$ , взявъ ось  $OP$  за ось абсциссъ, а ось  $OT$  за ось ординатъ, черт. 3, и кривую  $AR \lg_n v$ , взявъ за ось абсциссъ ось  $OV$ , за ось ординатъ—ось  $OS$ .

Чтобы перенести точку, данную въ координатахъ  $PV$ , черт. 3, въ координаты  $TS$ , поступаемъ слѣдующимъ образомъ: проводимъ линію  $ad$  до пересѣченія съ кривой  $AR \lg_n v$ , тогда  $ed = Of = AR \lg_n v_1$ . Далѣе, описаннымъ выше приемомъ находимъ температуру  $T_1$  въ точкѣ  $a$ , отложивъ  $Oi = m_R R$ ,

въ видѣ отръзка  $Ok$ . Ордината  $kj = c_v \lg_n T$ . Производимъ, какъ и въ предыдущемъ случаѣ, графическое сложение ординатъ; получаемъ

$$S_1 = Of + fh = Oh;$$

затѣмъ чертимъ радиусомъ  $Ok = T_1$  изъ центра  $O$  дугу до пересѣченія съ



Черт. 3.

осью  $OT$  въ точкѣ  $j$  и въ пересѣченіи прямыхъ, проведенныхъ изъ точекъ  $j$  и  $h$  || соотв. осямъ координатъ, получаемъ искомую точку  $A$ .

Наконецъ, на черт. 4 показанъ примѣръ переноса точки  $a$  изъ осей  $PV$  въ оси  $TS$  при пользованіи ур-іемъ (12), при чемъ принято, какъ и въ предыдущихъ случаяхъ,  $const. = 0$ . Для построения кривой  $c_p \lg_n T$  за ось абсциссъ надо взять ось  $OT$ , за ось ординатъ ось  $OS$ ; для кривой  $AR \lg_n P$  за ось абсциссъ надо взять ось  $OP$ , за ось ординатъ—ось  $OT$ . Самый порядокъ переноса производится подобно описанному выше, нужно лишь помнитъ, что энтропія  $S_1$  равна въ этомъ случаѣ не суммѣ, а разности ординатъ  $jm$  и  $je$ ,

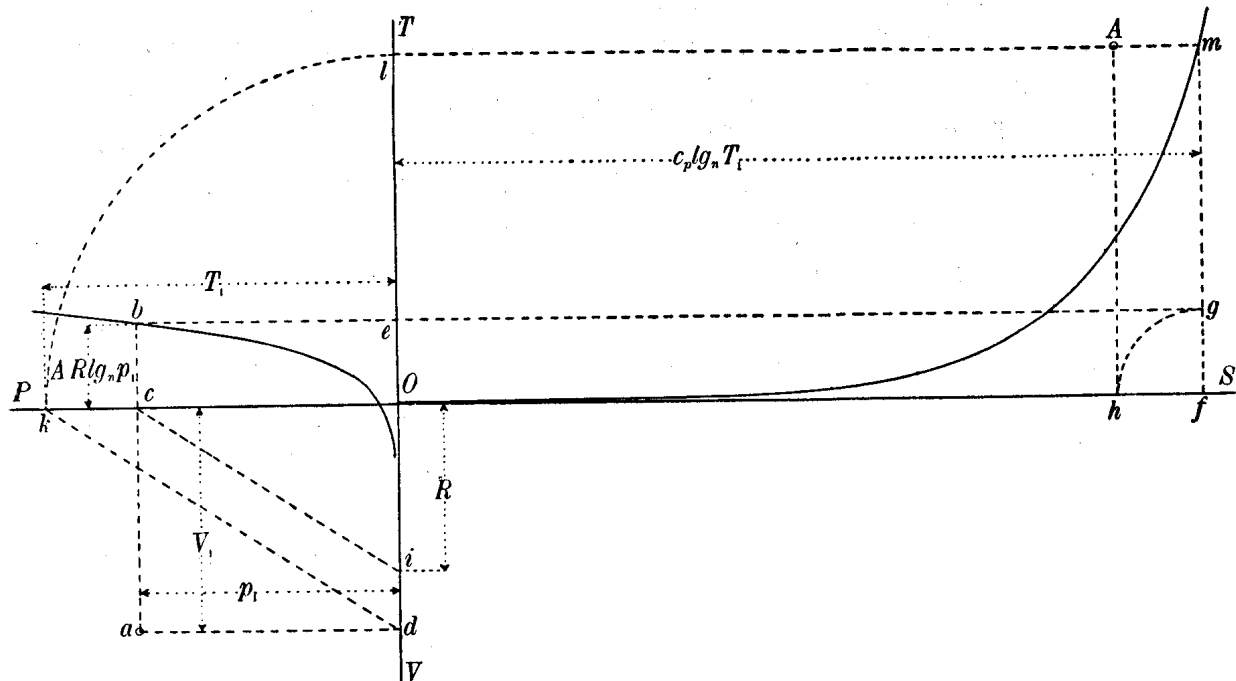
$$S_1 = Of - fh = Oh.$$

Нѣкоторыя свойства логарифмическихъ кривыхъ.

Прежде чѣмъ перейти къ разбору вопроса о переносѣ цѣлыхъ диаграммъ изъ осей  $PV$  въ оси  $TS$ , полезно напомнитъ нѣкоторыя общія свойства логарифмическихъ кривыхъ.

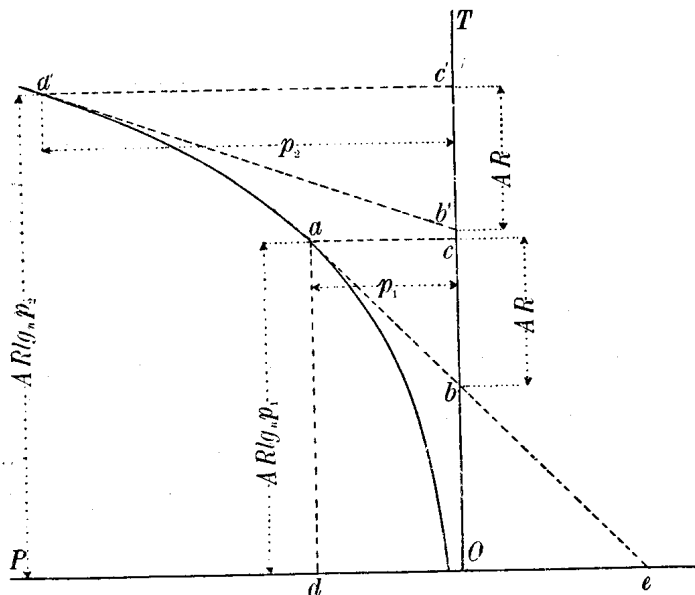
Если, какъ это мы дѣлали выше и будемъ дѣлать въ дальнѣйшемъ, считать, что теплоемкости  $c_p$  и  $c_v$  величины постоянныя (разность ихъ  $c_p - c_v = AR$  всегда постоянна), то подкасательныя къ логарифмическимъ кри-

вымы, входящимъ въ ур-ія (9), (11) и (12), суть величины тоже постоянныя и равны соответственно множителю передъ  $\lg_n$ . Въ самомъ дѣлѣ, возьмемъ



Черт. 4.

напр., кривую  $AR \lg_n P$  изъ ур-ія (12), черт. 5; продифференцировавъ уравненіе этой кривой



Черт. 5.

$$AR \lg_n P = S,$$

получаемъ

$$AR \frac{dP}{P} = dS,$$

откуда

$$P \frac{dS}{dP} = AR,$$

но  $P \frac{dS}{dP}$  какъ разъ и есть

искомая подкасательная  $bc$ , соотв.  $b'c'$  и т. д.

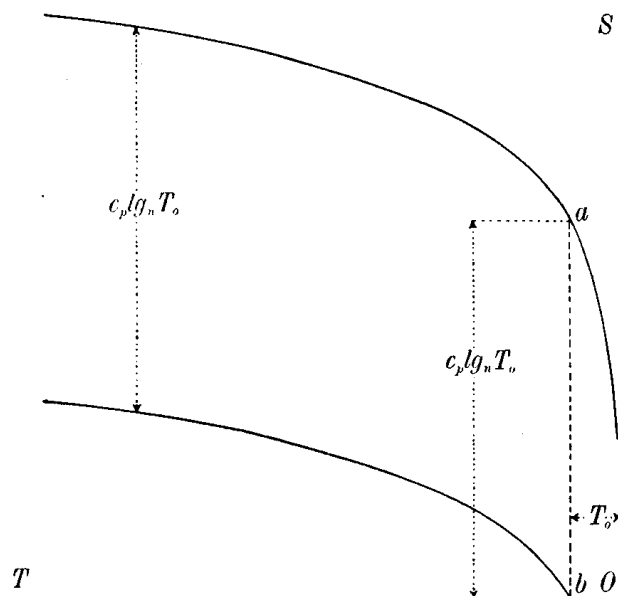
Указанное обстоятельство позволяет сразу

обнаружить ошибку, которая можетъ вкрасться при построении по точкамъ логарифмической кривой.



Конечно, за подкасательную нужно считать при этомъ отръзокъ, отсекаемый касательной къ кривой въ данной точкѣ и перпендикуляромъ, опущеннымъ изъ этой же точки на ось координатъ, къ которой логарифмическая кривая обращена своей выпуклой стороной. т. е. на ось, которую выше, при построении кривыхъ, мы брали за ось ординатъ. Напр., для точки *a*, черт. 5, подкасательная будетъ *bc*, а не *de*. Это обстоятельство слѣдуетъ запомнить, безъ него можно ошибиться, взявъ не ту ось.

Второе, важное для насъ свойство этихъ логарифмическихъ кривыхъ состоитъ въ томъ, что если мы положимъ *const.* въ ур-яхъ (9), (11) и (12) равнымъ не 0, а какой нибудь положительной или отрицательной величинѣ, то получимъ новыя кривыя, которыя будутъ эквидистантны первоначальнымъ кривымъ, но сдвинуты по оси ординатъ (оси зависимыхъ переменныхъ) на величину, которой мы приравняли *const.*



Черт. 6.

Напр., на черт. 6 показана кривая  $c_p \lg_n T$ , сдвинутая внизъ на величину  $c_p \lg_n T_0$ , т. е. взято  $const. = -c_p \lg_n T_0$ .

Такимъ образомъ, если въ какой нибудь изъ логарифмическихъ кривыхъ надо измѣнить *const.*, то для новой кривой не надо дѣлать никакихъ вычислений, а просто сдвинуть ее по точкамъ въ ту или иную сторону. Надо только помнить, что сдвигъ можно производить лишь вдоль оси зависимыхъ переменныхъ.

Изохора и  
изобара въ  
координатахъ *TS*.

Наконецъ, въ связи съ предыдущими свойствами полезно обратить вниманіе на то, какъ выражаются въ координатахъ *TS* кривыя  $V=const.$ , и  $p=const.$ , встрѣчающіяся на всякой діаграммѣ машинъ внутренняго горѣнія, по крайней мѣрѣ на теоретической діаграммѣ, которую всегда необходимо вчертить въ координаты *TS* для сравненія съ ней данной дѣйствительной діаграммы.

Для изохоры  $V=const.$  имѣемъ, полагая, какъ выше,  $c_v=const.$ ,

$$\frac{dQ}{dT} = c_v = const.,$$

но по ур-ю (3)  $dQ = TdS$ , слѣдовательно,

$$\frac{TdS}{dT} = c_v,$$

откуда

$$dS = c_v \frac{dT}{T},$$

и послѣ интегрированія

$$S_v = c_v \lg_n T + const.; \quad (15)$$

это уравненіе логарифмической кривой, которую мы уже встрѣтили въ ур-и (9).

Такимъ же образомъ находимъ для изобары  $p = const.$

$$S_p = c_p \lg_n T + const.,$$

уравненіе логарифмической кривой, знакомой намъ по ур-ю (12).

Перейдемъ теперь къ самому переносу индикаторныхъ диаграммъ въ координаты  $TS$ . На первый взглядъ кажется безразличнымъ, помощью какихъ логарифмическихъ кривыхъ, ур-я ли (9), или (11) или (12), т. е. по схемѣ ли черт. 2, или черт. 3 или черт. 4, дѣлать переносъ; на самомъ же дѣлѣ это не такъ. Какъ увидимъ ниже, ур-емъ (11) совершенно нельзя пользоваться, если согласно новѣйшихъ опытныхъ данныхъ считать теплоемкости  $c_p$  и  $c_v$  не постоянными, а возрастающими съ температурой. Изъ двухъ же остальныхъ ур-ій (9) и (12), въ которыхъ лишь по одной кривой зависитъ отъ координатъ  $P$  или  $V$ , удобнѣе пользоваться ур-емъ (12), такъ какъ въ немъ логарифмическая кривая зависитъ отъ давленія  $P$ , масштабъ котораго легче перестраивать, и который, кромѣ того, обыкновенно все равно приходится перестраивать, если хотятъ взять среднюю диаграмму опыта и принять въ расчетъ повѣрку масштаба пружины индикатора, который рѣдко бываетъ вполне равномеренъ.

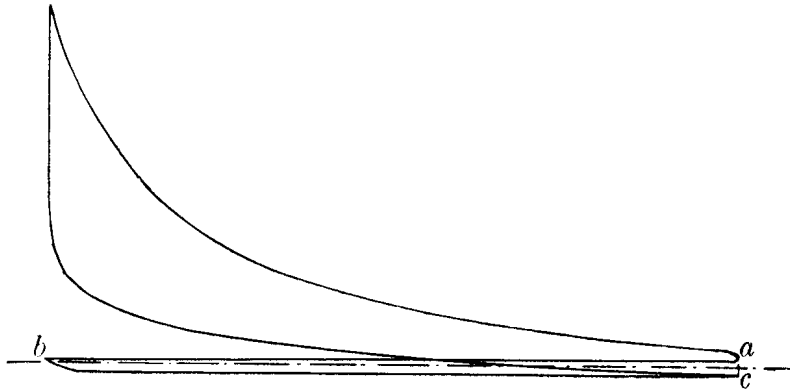
Затѣмъ слѣдуетъ обратить вниманіе на то, что при переносѣ диаграммы четырехтактной машины обыкновенно достаточно брать одну рабочую диаграмму, т. е. очерченную линіей сжатія, горѣнія и расширенія, замыкая ее въ мертвой точкѣ вертикальной линіей  $ac$ , черт. 7, см. стр. 10, и откидывая линіи выталкиванія продуктовъ горѣнія  $ab$  и засасыванія свѣжаго заряда  $bc$ , т. е. диаграмму заряжающаго насоса<sup>2)</sup>. Дѣлается это, съ одной стороны, въ виду того, что линіи выталкиванія и всасыванія при обычно употребляемомъ при индицированіи машинъ внутренняго горѣнія маломъ масштабѣ пружинъ почти сливаются другъ съ другомъ и съ атмосферной линіей, съ другой, еще и потому, что

<sup>2)</sup> Подробное изложеніе, какую часть снимаемой диаграммы и почему надо считать за индикаторную диаграмму машины внутренняго горѣнія, см.: В. Л. Малъевъ. — Вычисленіе индикаторной работы газовыхъ двигателей. Извѣстія СНБ. Политехн. Инст. 1905 г. т. III, выш. 1—2, стр. 159—176.

эти линии изображают процессы съ переменными количествами газа, (цилиндръ въ это время сообщенъ съ атмосферой соотв. съ газо- и воздухопроводомъ) и потому, хотя при переносѣ ихъ въ координаты  $TS$  площадь, ими ограниченная, и будетъ изображать въ tepl. ед. работу заряженія, но температуры  $T$ , которыя получатся на этой части діаграммы, не будутъ представлять дѣйствительныя температуры газовъ въ соотв. моменты, а будутъ фиктивными. Дѣйствительная температура  $T$  будетъ въ отношеніи полного вѣса заряда  $G$  къ вѣсу  $G'$  газовъ, находящихся въ данный моментъ въ цилиндрѣ, больше, именно

$$T = T' \frac{G}{G'} \quad (17)$$

Такимъ образомъ переносъ этихъ ходовъ въ координаты  $TS$  довольно бесполезенъ и потому почти никогда не дѣлается.



Черт. 7.

Въ двухтактныхъ машинахъ индикаторная діаграмма рабочаго цилиндра сама какъ разъ соотвѣтствуетъ указанной выше рабочей діаграммѣ четырехтактныхъ машинъ. Правда, для части этой діаграммы, отъ момента начала выпуска до конца впуска, вѣсъ газовъ, находящихся въ цилиндрѣ, является тоже переменной величиной, и температуры на тепловой діаграммѣ не будутъ соотвѣтствовать дѣйствительнымъ температурамъ, но съ этимъ приходится мириться, съ одной стороны, потому что дѣлать точный учетъ вѣса газа за этотъ періодъ слишкомъ трудно, если даже не невозможно, съ другой же, и періодъ этотъ на діаграммѣ не такъ ужъ великъ и, наконецъ, колебанія вѣса  $G$  несравненно менѣе, чѣмъ при заряденіи четырехтактныхъ машинъ. Въ двухтактныхъ машинахъ  $G_{\min} = 0,6$  до  $0,7 G$ , тогда какъ въ четырехтактныхъ  $G = 0,25$  до  $0,16 G$ , уменьшаясь по мѣрѣ увеличенія степени сжатія  $\varepsilon$ ; въ двигателѣ Дизеля  $G_{\min} \approx 0,04 G$ .

Итакъ, если переносить только рабочую діаграмму, четырехтактной ли машины, или двухтактной—безразлично, то, какъ это сразу видно, частью

логарифмической кривой  $c_p \lg_n T$  для  $T < 273^\circ$  не придется пользоваться; поэтому для сокращенія работы ее можно не вычислять, для уменьшенія же размѣровъ чертежа, что способствуетъ точности построенія, можно перенести на основаніи указанного выше свойства ея, см. черт. 6, эту кривую влѣво, положивъ

$$\text{const.} = -c_p \lg_n 273.$$

Разбираемый сейчасъ графическій переносъ диаграммы основанъ на поль- О газовой постоянной  $R$ .  
зованіи характеристическимъ уравненіемъ для газовъ

$$PV = GRT. \quad (14)$$

Въ этомъ уравненіи газовая постоянная  $R_1$  горючей смѣси до воспламененія, строго говоря, не равна постоянной  $R_2$  продуктовъ горѣнія. Въ большинствѣ случаевъ вслѣдствіе измѣненія числа газовыхъ молекулъ при образованіи трехатомныхъ  $CO_2$  и  $H_2O$ , а при жидкомъ топливѣ также и вслѣдствіе перехода жидкости въ газообразное состояніе, постоянная  $R$  претерпѣваетъ нѣкоторое измѣненіе. Если назвать коэффициентомъ молекулярнаго измѣненія  $\beta$  отношеніе общаго числа молекулъ 1 кгр. продуктовъ горѣнія къ ихъ числу въ горючей смѣси до воспламененія, то

$$R_2 = \beta R_1. \quad (18)$$

Величина  $\beta$  колеблется въ зависимости отъ состава горючаго и степени сжатія  $\epsilon$  отъ  $\beta = 0,92$ — $0,93$  при газообразномъ топливѣ до  $\beta = 1,07$  при жидкомъ топливѣ. Несмотря на эти довольно значительныя измѣненія постоянной  $R$  до и послѣ горѣнія, въ большинствѣ практическихъ случаевъ можно считать  $\beta = 1$ , какъ это и сдѣлано въ слѣдующемъ примѣрѣ. Впрочемъ ниже будетъ указано, какъ учесть и выразить на диаграммѣ это измѣненіе  $R$ , что однако приходится дѣлать лишь при особенно точныхъ изслѣдованіяхъ.

Такимъ образомъ при изслѣдованіи машинъ внутренняго горѣнія въ ур-ніи (14) будутъ извѣстны величины  $P$  и  $V$  по индикаторной диаграммѣ и въ зависимости отъ размѣровъ — хода и діаметра поршня—машины; величину  $R$  можно будетъ опредѣлить проще всего при помощи анализа продуктовъ горѣнія. Остается еще опредѣлить  $G$  и  $T$ .

Въ рѣдкихъ случаяхъ, преимущественно при лабораторныхъ изслѣдованіяхъ или при испытаніи неособенно большихъ машинъ, расходъ воздуха и горючаго опредѣляется непосредственными измѣреніями; тогда, конечно, легко вычислить вѣсъ  $G$  горючей смѣси, приходящейся на 1 ходъ машины. Последняя неизвѣстная величина  $T$  будетъ опредѣляться тогда при помощи изложеннаго выше графическаго приема.

Нѣсколько затруднительнѣе дѣйствовать въ тѣхъ случаяхъ, наиболѣе обычныхъ въ практикѣ, когда  $G$  неизвѣстно. Въ этихъ случаяхъ надо найти

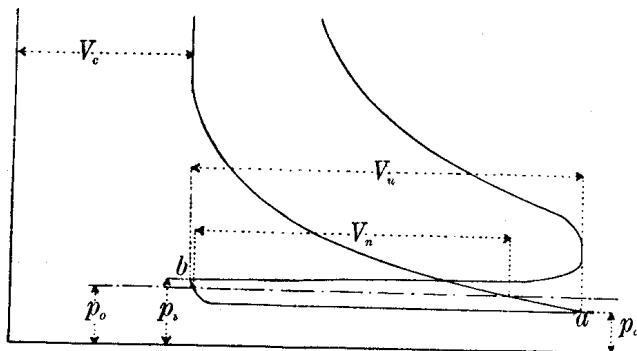
Опредѣленіе вѣса  $G$  рабочей смѣси.

$T$  для какой нибудь одной точки индикаторной діаграммы, затѣмъ по  $P, V, R$  и найденному  $T$  найти изъ ур-ія (14)  $G$ , а дальше дѣйствовать, какъ и въ предыдущемъ случаѣ.

Нахождение  
исходной  
температу-  
ры  $T$ .

Въ качествѣ исходной точки для нахождения  $T$  лучше всего брать моментъ начала сжатія.

Обозначимъ черезъ  $G_{см}$  вѣсъ смѣси въ точкѣ  $a$ , черт. 8,  $G_{пр}$  вѣсъ про-



дуктовъ горѣнія, оставшихся въ камерѣ сжатія въ концѣ выпуска, и  $G_{вр}$  вѣсъ вновь засосаннаго воздуха и горючаго. Тогда, очевидно,

$$G_{см} = G_{пр} + G_{вр}.$$

Выражая эти вѣса при помощи объемовъ, давленій и температуръ изъ характе-

Черт. 8.

ристическихъ уравненій для соотв. точекъ и считая постоянныя  $R$  одинаковыми ( $\beta=1$ ), получаемъ

$$\frac{(V_n + V_c) p_a}{T_a} = \frac{V_c p_b}{T_b} + \lambda_n \frac{V_n p_o}{T_o}, \quad (19)$$

гдѣ соотв. объемы и давленія показаны на черт. 8,  $T_a$  и  $T_b$  температуры въ точкахъ  $a$  и  $b$ ,  $T_o$  температуры засасываемаго воздуха и горючаго ( $T_o = 273 + t_o$  °Ц); наконецъ,  $\lambda_n$  коэффициентъ подачи при засасываніи, которымъ приходится задаваться въ зависимости отъ данныхъ опыта съ аналогичными машинами. Нѣкоторое указаніе относительно величины  $\lambda_n$  можно получить для данной машины, снявъ діаграмму при помощи слабой пружины, черт. 8, изъ отношенія  $\frac{V_n}{V_n} = \lambda_o$ , которое можно назвать объемной подачей.

Вслѣдствіе вліяніе горячихъ стѣнокъ  $\lambda_n < \lambda_o$ . Вообще  $\lambda_o$  мѣняется отъ 0,93 до 0,80 и даже до 0,65, въ зависимости отъ скорости поршня, величины открытія впускныхъ клапановъ и охлажденія ихъ.

Изъ ур-ія (19) опредѣляемъ  $T_a$  и, подставивъ  $\frac{V}{V_c} = \varepsilon$  и  $\frac{V_n}{V_c} = \varepsilon - 1$ , получаемъ искомую температуру

$$T_a = T_o \frac{\varepsilon p_a}{\lambda_n (\varepsilon - 1) p_o + \frac{T_o}{T_b} p_b}. \quad (20)$$

Въ этомъ ур-іи (20) атмосферное давленіе  $p_o = \frac{B}{735,5}$  кгр./см.<sup>2</sup>, гдѣ

В показаніе барометра во время испытанія машины въ мм. ртутнаго столба, давленія  $p_a$  и  $p_b$  берутся съ діаграммы, которую для этого нужно снимать слабой пружиной, дающей только нижнюю часть діаграммы, но зато въ крупномъ масштабѣ давленій.  $T_o$  въ ур-и (20) измѣряется непосредственно, а температурой  $T_b$  продуктовъ горѣнія въ точкѣ  $b$  приходится задаваться; съ достаточной точностью можно считать  $T_b$  равной температурѣ отходящихъ газовъ, измѣренной возможно ближе къ цилиндру.

Конечно, при подобныхъ изслѣдованіяхъ надо знать точно объемъ  $V_c$  камеры сжатія, для чего его лучше всего непосредственно измѣрить, заливая водой или еще лучше масломъ.

Переходя теперь къ построению тепловой діаграммы, надо замѣтить, что масштабъ ея ради точности построения надо брать достаточно крупный; для температуръ можно брать напр.  $m_t = 0,05 - 0,5$  мм. =  $1^\circ$  Ц. Такъ какъ ур-и (12) связаны  $m_t$ ,  $m_p$ ,  $m_v$  и  $m_R$ , изъ которыхъ  $m_p$  и  $m_v$  чаще всего даются заранѣе (индикаторная діаграмма), то масштабъ газовой постоянной  $m_R$  послѣ выбора  $m_t$  опредѣляется самъ собой; при этомъ нужно слѣдить, чтобы на чертежѣ отрѣзокъ  $GRm_R$  не получился малымъ, такъ какъ въ такомъ случаѣ вспомогательныя линіи при нахожденіи температуръ будутъ пересѣкать ось  $OP$  подъ слишкомъ острымъ угломъ, и нахожденіе температуръ, несмотря на крупный  $m_t$ , будетъ неточно. Въ подобномъ случаѣ полезнѣе нѣсколько уменьшить  $m_t$ , что дастъ болѣе крупный  $m_R$ . Въ тѣхъ случаяхъ, о которыхъ сказано ниже, когда индикаторную діаграмму все равно приходится перестраивать, нужно брать масштабы  $m_p$  и  $m_v$  покрупнѣе: для давленій примѣрно  $m_p = 10$  мм. = 1 атм., длину же діаграммы можно брать  $l = 80$  до 120 мм.

Масштабъ  $m_c$ , т. е. сколько мм. = 1 тепл. ед., для теплоемкостей  $c_p$  и  $c_v$ , опредѣляющій въ то-же время масштабъ энтропій  $m_s$  ( $m_s = m_c$ ), нужно брать покрупнѣе, примѣрно  $m_c = 200 - 400$  мм. = 1 тепл. ед. При этомъ, выбравъ  $m_c$ , объ логарифмическія кривыя проще всего строить, относя ихъ къ 1 кгр.; если вѣсь газовъ, совершающихъ циклъ, окажется при подсчетѣ  $G$  кгр., то масштабъ энтропій будетъ

$$m_s = \frac{m_c}{G}.$$

Конечно, теплоемкости  $c_p$  и  $c_v$  опредѣляются по тому же анализу газа, какъ и величина  $R$ .

Построивъ логарифмическія кривыя, вчерчиваютъ индикаторную діаграмму въ нижнюю лѣвую четверть, какъ показано на черт. 9 (на отдѣльной таб-

Выборъ масштабовъ.

лицѣ), сдвинувъ діаграмму отъ начала координатъ на величину  $V_c m_v$  и проведя атмосферную линію на  $\frac{B}{735,5} \cdot m_p$  выше линіи абсциссъ.

Самый переносъ рабочей діаграммы въ координаты  $TS$  производится по точкамъ, по описанному выше; при этомъ, если въ индикаторной діаграммѣ встрѣчается изобара или изохора, то точность построения легко провѣрить при помощи указанныхъ выше уравненій этихъ линій въ координатахъ  $TS$ .

При нахожденіи точекъ вычитаніе соотв. ординаты  $AR \lg_n p$  для ускоренія можно дѣлать не графически, какъ было описано, а просто откладывать эту величину циркулемъ отъ кривой  $c_p \lg_n T$  на соотв. изотермѣ.

Примѣръ переноса діаграммы.

На черт. 9 показанъ примѣръ переноса діаграммы 25-сильной керосиновой машины Горнсби-Акройджъ. Всѣ величины, которыя служили основаніемъ для переноса, указаны на чертежѣ.

Для того, чтобы оцѣнить работу машины, съ которой снята данная діаграмма, полезно здѣсь же вчертить діаграмму идеальной машины безъ потерь отъ вліянія стѣнокъ и отъ охлажденія водяной рубашкой.

Эта діаграмма будетъ ограничена въ координатахъ  $PV$ , черт. 9, впервыхъ, адіабатой сжатія  $ab_0$ , начальная точка которой совпадаетъ съ началомъ сжатія дѣйствительной діаграммы.

Далѣе идетъ изохора  $b_0 c_0$  мгновеннаго горѣнія; конечное давленіе, точку  $c_0$ , проще всего найти графически, вычисливъ предварительно конечную температуру горѣнія  $T_r$  по температурѣ сжатія  $T_c$  и количеству тепла  $Q$ , которое теоретически можетъ развить горючее, находящееся въ цилиндрѣ, при условіи полнаго горѣнія, именно

$$T_r = T_c + \frac{Q}{c_v G_{см}} \quad (21)$$

Найдя  $T_r$  и имѣя  $V_c$  и  $G_{см} R$ , находимъ графически наибольшее давленіе  $p_r$ .

Далѣе идетъ адіабата расширенія  $c_0 d_0$  и изохора выпуска  $d_0 a$ .

Переносъ теоретической діаграммы крайне упрощается свойствами составляющихъ ее линій: для адіабаты сжатія въ осяхъ  $TS$  проводимъ отъ начальной точки  $A$  вертикальную прямую  $AB_0$  до температуры  $T_c$ . Изохору горѣнія  $B_0 C_0$  строимъ по точкамъ, которыхъ достаточно взять всего 4—5, такъ какъ кривая (логарифмическая) идетъ очень плавно, и доводимъ ее до температуры  $T_r$ . Отъ точки  $C_0$  проводимъ опять адіабату — прямую  $C_0 D_0$  внизъ до температуры  $T_{вып}$ , которую легко найти графически по точкѣ  $d_0$ . Изохору выпуска  $D_0 DA$  легко построить, замѣтивъ, что она будетъ эквидистанта изохорѣ  $B_0 C_0$ , сдвинутая вправо на отрезокъ  $D_0 D'$ .

Сравнивая тепловую диаграмму  $AGBCEFDA$  данной машины съ диаграммой  $AB_0C_0D_0DA$  машины безъ потерь, обнаруживаемъ слѣдующія особенности данной машины : на линіи сжатія  $AB$  энтропія сначала возрастаетъ — тепло сообщается отъ стѣнокъ цилиндра, въ особенности же отъ раскаленныхъ до красна стѣнокъ запального шара; но къ концу хода вслѣдствіе увеличенія разности температуръ рабочей смѣси и охлаждаемыхъ водой стѣнокъ тепло начинаетъ отниматься; линія расширения  $CEFD$  обнаруживаетъ къ концу, около  $E$ , нѣкоторое приращеніе энтропіи, очевидно, происходитъ догараніе части вбрызнутого керосина, не успѣвающаго сгорать по линіи  $BC$ ; это запоздалое догараніе, повидимому, не успѣваетъ закончиться даже къ моменту начала выпуска.

Вмѣстѣ съ общими заключеніями о работѣ машины тепловая диаграмма Тепловой  
балансъ. позволяетъ легко подсчитать весь тепловой балансъ данной машины. Для этого надо только измѣрить планиметромъ соотв. площади и, зная масштабъ площадей, перечислить ихъ въ тепл. ед.:

1, при сжатіи отъ стѣнокъ въ общемъ получается тепло, равное разности площадей

$$a'AGg'a' - g'Gb'g' = 0,17 \text{ тепл. ед.};$$

2, при горѣніи въ мертвой точкѣ развито тепло, равное площади  $b'BCc'b' = 13,23$  тепл. ед., тогда какъ теоретически должно было быть развито тепло  $a'B_0C_0c_0'a' = 19,04$  тепл. ед., разность этихъ площадей  $= 5,81$  тепл. ед. показываетъ тепло, потерянное вслѣдствіе неполнаго горѣнія и отдачи тепла стѣнкамъ;

3, площадь  $EFf'e'E = 0,40$  тепл. ед. представляетъ тепло, развитое при горѣніи послѣ мертвой точки—явленіе догаранія;

4, въ индикаторную работу превращена площадь  $AGBCEFDA = 3,33$  тепл. ед.;

5, продуктами горѣнія унесено тепло, равное площади  $FDAa'f'F = 8,43$  тепл. ед. Относительно кривой выпускъ  $FDA$  надо помнить, что она, въ отличіе отъ остальныхъ линій диаграммы, представляетъ извѣненіе состоянія переменнаго количества газа, а потому, хотя площадь  $FDAa'f'F$ , ею ограниченная, и представляетъ тепло, унесенное продуктами горѣнія, сама кривая температуръ является совершенно фиктивной, реальныя—истинныя значенія имѣютъ лишь начальная точка  $F$  и конечная  $A$ . По этой кривой нельзя опредѣлить температуры, даже пользуясь поправкой, указанной выше, ур-іе (17), такъ какъ нельзя вычислить количества газовъ  $G'$ , находящагося въ данный моментъ въ цилиндрѣ;

6, тепловая отдача  $\eta_t$  данной машины

$$\eta_t = \frac{AGBCEFDA}{a'B_0C_0c_0'a'} = 0,175;$$



7, индикаторный коэффициентъ  $\eta_i$ , показывающій, насколько данная машина близка къ машинѣ безъ потерь,

$$\eta_i = \frac{AGBCDA}{AB_0C_0D_0DA} = 0,586.$$

Практическое пользование способомъ.

Для практическаго пользованія описанный способъ можетъ имѣть значеніе лишь тогда, если вычисливъ и вычертивъ логарифмическія кривыя для какой нибудь діаграммы, ими можно будетъ пользоваться не только для даннаго случая, но и для діаграммъ, снятыхъ при совершенно иныхъ условіяхъ и даже съ другихъ машинъ, и притомъ пользоваться съ наименьшей затратой времени, т. е. безъ передѣлки ихъ, а напр. просто перечерчивая ихъ на кальку.

Какъ мы сейчасъ увидимъ, этимъ условіямъ описанный сейчасъ способъ, именно, если пользоваться уравненіемъ

$$S = c_p \lg_n T - c_p \lg_n 273 - AR \lg_n P, \quad (22)$$

удовлетворяетъ въ полной мѣрѣ.

Въ самомъ дѣлѣ, разберемъ все случаи, когда мы имѣемъ діаграммы, снятыя при иныхъ условіяхъ, чѣмъ первая, для которой вычерчены логарифмическія кривыя.

Измѣненія основныхъ масштабъ.

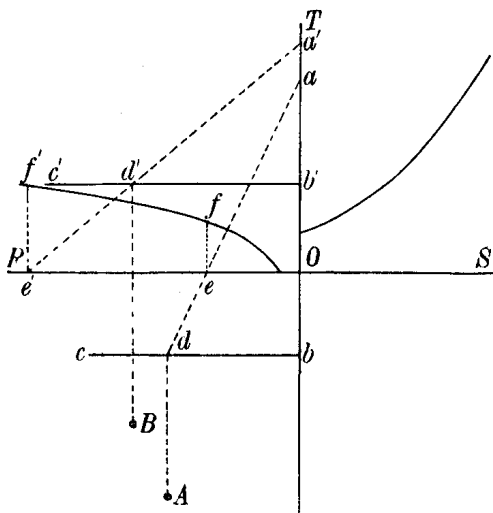
1, имѣется діаграмма иной длины  $l$ —снята другимъ ходоуменьшителемъ,— т. е. масштабъ объемовъ  $m_v$  измѣнился. Это не оказываетъ никакого вліянія на построеніе тепловой діаграммы, нужно лишь отложить объемъ камеры сжатія  $V_c$  въ новомъ масштабѣ  $m_v$  и измѣнить по ур-ю (13) масштабъ  $m_R$  при откладываніи величины  $GR$  для нахождения температуръ.

2, если имѣется діаграмма, снятая другой пружиной, т. е. съ инымъ масштабомъ давленій  $m'_p$ , то проще всего перестроить ея ординаты въ прежнемъ масштабѣ  $m_p$ , тѣмъ болѣе, что обыкновенно при калориметрическихъ изслѣдованіяхъ переносятъ въ координаты  $TS$  не отдѣльныя діаграммы, снятыя во время опыта, а среднюю діаграмму опыта, которая чаще всего строится по точкамъ на основаніи всехъ діаграммъ даннаго опыта; кромѣ того, при провѣркѣ масштаба пружины онъ оказывается часто настолько неравномѣрнымъ, что при точныхъ изслѣдованіяхъ діаграмму все равно приходится перестраивать въ какомъ нибудь одномъ опредѣленномъ масштабѣ давленій. Наконецъ, діаграммы машинъ внутренняго горѣнія обыкновенно приходится снимать настолько жесткой пружиной ( $m = 3,5$  до 1 мм.), что ради точности построенія діаграммы  $TS$  индикаторную діаграмму надо перестроить; при этомъ ординаты надо измѣрять, конечно, не линейкой съ дѣленіями, а штангенциркулемъ съ нониусомъ до 0,1 мм.

Однако на практикѣ возможенъ случай, когда въ качествѣ „средней диаграммы“ можно взять одну изъ дѣйствительныхъ диаграммъ, снятыхъ индикаторомъ, и масштабъ пружины настолько равномеренъ и великъ, что ради него нѣтъ основанія перестраивать ординаты диаграммы; въ такомъ случаѣ можно диаграмму для переноса въ координаты  $TS$  оставлять безъ измѣненій, а при самомъ переносѣ поступать по одному изъ слѣдующихъ двухъ способовъ: во-первыхъ, можно перестроить кривую  $AR \lg_n p$ , смѣстивъ ея точки сообразно новаго масштаба  $m'_p$ ; перестройка эта не требуетъ никакихъ вычисленій и производится очень быстро. При дальнѣйшемъ нужно лишь помнить, что масштабъ  $m_R$  вслѣдствіе измѣненія  $m_p$  по ур-ю (13) тоже долженъ быть измѣненъ. Во-вторыхъ, можно поступать такъ: для построения температуръ величину  $GR$  отложить въ новомъ масштабѣ  $m_R$ , какъ и въ предыдущемъ случаѣ, а затѣмъ для пользованія кривой  $AR \lg_n p$  находить для соотв. точекъ давленіе  $p$ , переведенное въ начальный масштабъ  $m_p$ ; это можно дѣлать или множа соотв. ординату на отношеніе  $\frac{m_p}{m'_p}$ ,

или графически, черт. 10 : откладываемъ по оси  $OT$  отрѣзокъ  $oa = m_p C$ ,

гдѣ  $C$  произвольный множитель; затѣмъ откладываемъ  $ab = m'_p C$ , проводимъ  $bc \parallel OP$ ; искомую ординату для точки  $A$ , нанесенной въ масштабѣ  $m'_p$ , найдемъ, опустивъ изъ  $A \perp Ad$  на  $cb$ ; пересѣченіе  $ad$  съ  $OP$  дастъ искомую ординату  $oe$ , линия  $ef$  будетъ соотв.  $AR \lg_n p$ .



Черт. 10.

затемнять дальнѣйшаго построенія, множитель  $C$  надо брать настолько большимъ (30 до 200), чтобы линия  $bc$  соотв.  $b'c'$  по возможности лежала ниже индикаторной диаграммы или соотв. выше логарифмической кривой; линіи  $ad$  соотв.  $a'd'$  лучше проводить не полностью, а лишь около пересѣченія съ осью  $OP$ . Въ остальномъ ходъ переноса диаграммы остается обычный.

На практикѣ первый пріемъ, перестройка кривой  $AR \lg_n p$ , пожалуй, проще и удобнѣе, хотя и второй не сложенъ.

Измѣненіе  $G$ . 3. измѣненіе вѣса  $G$  рабочей смѣси вызоветъ лишь соотв. измѣненіе длины отрѣзка  $GR$  при построеніи температуръ, а также дастъ измѣненіе масштаба теплоемкостей, а, слѣдовательно, и первоначальнаго масштаба энтропій  $m_s$ ; именно, новый масштаб  $m'_s$  будетъ, если  $G'$  измѣнившійся вѣсъ газовъ,

$$m'_s = m_s \frac{G}{G'} \quad (23)$$

Измѣненіе вѣса  $G$  рабочихъ газовъ можетъ происходить по самымъ разнообразнымъ причинамъ: напр., вслѣдствіе измѣненія нагрузки машины, вслѣдствіе измѣненія сопротивленій въ впускныхъ и выпускныхъ клапанахъ и трубопроводахъ, что, въ свою очередь, можетъ произойти или отъ засоренія трубъ или глушителя, или вслѣдствіе измѣненія числа оборотовъ; далѣе  $G$  можетъ измѣниться вслѣдствіе измѣненія барометрическаго давленія или давленія въ газовой сѣти или состава газа, или, наконецъ, при вычисленіи  $G$  по ур-іямъ (14) и (20) вслѣдствіе измѣненія температуры  $T_a$  въ началѣ сжатія, что въ свою очередь можетъ произойти отъ измѣненія температуръ  $T_0$  или  $T_b$  въ ур-и (20).

Измѣненіе  
 $R$  и  $k$ .

4, вслѣдствіе измѣненія условій работы—измѣненія горѣнія или состава горючаго или даже при примѣненіи вмѣсто газа жидкаго топлива и наоборотъ—можетъ измѣниться составъ продуктовъ горѣнія, это дастъ, въ свою очередь, измѣненіе вычисляемой по составу продуктовъ горѣнія газовой постоянной  $R$ . При этомъ возможны два случая: отношеніе теплоемкостей продуктовъ горѣнія  $\frac{c_p}{c_v} = k$  остается прежнее, и  $k$  измѣняется.

Первый случай можетъ имѣть мѣсто, если при измѣненіи состава продуктовъ горѣнія процентное содержаніе всѣхъ содержащихся въ нихъ двухатомныхъ газовъ (главнымъ образомъ  $O_2$ ,  $CO$  и  $N_2$ ), взятыхъ вмѣстѣ, не измѣнилось. Это происходитъ отъ того, что у всѣхъ двухатомныхъ газовъ одно и тоже  $k=1,40$ , у многоатомныхъ же газовъ, изъ которыхъ въ отработанныхъ газахъ содержится главнымъ образомъ  $CO_2$  и  $H_2O$ , въ свою очередь, тоже общее  $k=1,28$ .

Въ этомъ случаѣ надо лишь взять новый отрѣзокъ  $GR'$  для построенія температуръ и считать, что масштабъ энтропій  $m_s$  измѣнился, именно

$$m'_s = m_s \frac{c_p}{c_p'} = m_s \frac{R}{R'} \quad (24)$$

Во второмъ случаѣ—свое  $R'$  и новое  $k'$ —можно одну изъ логарифмическихъ кривыхъ оставить безъ измѣненій и лишь считать, что масштабъ ея измѣнился, другую же кривую приходится перестраивать.

Удобнѣе оставить кривую  $c_p \lg_n T$ , считая, что новый масштаб ея

$$m_s' = m_s \frac{c_p}{c_p'},$$

(но, конечно, отнюдь уже не  $m_s \frac{R}{R'}$ ), а перестроить кривую  $AR \lg_n p$ . Новая ордината у этой кривой будутъ

$$y = AR' \lg_n P m_s'. \quad (25)$$

Въ остальномъ надо поступать, какъ обычно.

5, если имѣются диаграммы, снятыя съ другой машины съ иными раз- Диаграммы съ другой машины.  
мѣрами, то это равносильно тому, что имѣется иной масштаб  $m_v'$  и иной машины.  
вѣсь рабочихъ газовъ  $G'$ . Такимъ образомъ этотъ случай просто сводится къ разобраннымъ выше случаямъ 1 и 3.

Разобранные 5 случаевъ охватываютъ собой все возможные случаи измененія условий, для которыхъ первоначально были построены логарифмическія кривыя. Какъ видимъ, во всехъ случаяхъ при переносѣ нѣсколькихъ диаграммъ пользованіе описаннымъ графическимъ способомъ даетъ особенно значительное сбереженіе времени и, кромѣ того, бѣольшую увѣренность въ правильномъ построеніи тепловой диаграммы, чѣмъ при болѣе кропотливомъ аналитическомъ вычисленіи  $T$  и  $S$  для отдѣльныхъ точекъ, такъ какъ провѣрка графическаго построенія занимаетъ всего лишь нѣсколько минутъ, тогда какъ провѣрка аналитическаго построенія требуетъ опять почти столько же времени, сколько надо первоначально затратить на самое построеніе.

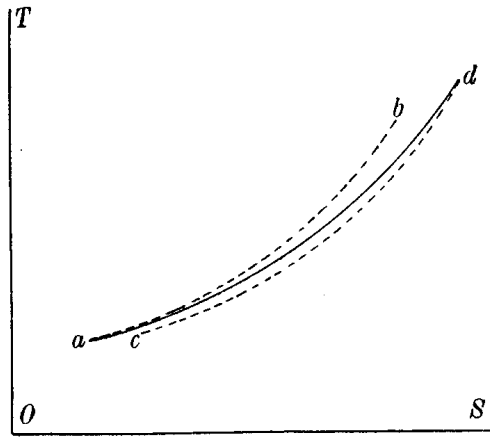
Остается еще сказать о тѣхъ случаяхъ, встрѣчающихся почти исклю- Учетъ измененія  $R$ .  
чительно при научно-лабораторныхъ изслѣдованіяхъ, когда желательнo учесть, какъ измененіе  $R$  при горѣніи, такъ равно и изменяемость теплоемкостей въ зависимости отъ температуры.

Измененіе постоянной  $R$  можетъ быть принято во вниманіе очень просто тѣмъ, что линію сжатія строить, пользуясь  $R_1$ , вычисленный по составу свѣжей смѣси, и соотв. логарифмическими кривыми, линію же расширения при помощи  $R_2$ , найденной по составу продуктовъ горѣнія, и новыхъ логарифмическихъ кривыхъ, у которыхъ ординаты кривой  $AR \lg_n P$  изменены въ отношеніи  $\frac{R_2}{R_1}$ , а ординаты кривой

$c_p \lg_n T$  въ отношеніи  $\frac{c_{p2}}{c_{p1}}$ . Линію горѣнія можно найти слѣдующимъ обра-

зомъ: сперва строить ее по  $R_1$ , кривая  $ab$ , черт. 11, потомъ по  $R_2$ , кривая  $cd$ ; дѣйствительная линія горѣнія будетъ лежать гдѣнибудь между  $ab$  и  $cd$ , при чемъ ей будутъ принадлежать точки  $a$  и  $d$ ; поэтому съ до-

статочной точностью можно провести эту линию, соединивъ  $a$  и  $d$  кривой  $ad$ , переведенной на глазъ такъ, чтобы она представляла постепенный переходъ отъ  $ab$  къ  $cd$ .



Черт. 11.

Въ виду того, что линіи  $ab$  и  $cd$  почти эквидистантны и лежатъ близко другъ отъ друга, такъ какъ вліяніе измѣненія ординатъ логарифмическихъ кривыхъ сравнительно невелико вслѣдствіе того что  $\beta$  близко къ 1 и притомъ энтропіи  $S$  соотв. точекъ равны разности этихъ ординатъ, можно не строить всей линіи  $cd$ , а ограничиться построениемъ линіи  $ab$  и одной лишь точки  $d$ . При этомъ за линію горѣнія

приходится принимать лишь видимую ея часть, напр. на черт. 9 линію  $BC$ ; явленіе догорания на линіи расширенія строится уже по  $R_2$ ; ошибка, происходящая отъ этого, меньше точности всего построения.

Переменныя  
теплоемкости.

Наконецъ, если при построении тепловой діаграммы отказаться отъ упрощающаго предположенія постоянства теплоемкостей и считать согласно новѣйшихъ данныхъ, что теплоемкости зависятъ отъ температуры и притомъ линейно, т. е. принять

$$c_p = c_{p0} + bT, \quad (26)$$

$$c_v = c_{v0} + bT, \quad (27)$$

гдѣ  $b$  нѣкоторый постоянный множитель, то и это обстоятельство легко учесть графически.

Такъ какъ наше ур-іе (12), или (22) было выведено для  $c_p = const.$  и  $c_v = const.$ , то надо вернуться къ ур-ію (5). Замѣнимъ въ ур-іи (5)  $dU$  выраженіемъ (6), а  $Pdv$  подставимъ изъ ур-ія (17), продифференцировавъ которое, получаемъ

$$Pdv + vdP = RdT,$$

тогда ур-іе (5) принимаетъ видъ

$$dQ = c_v dT + ARdT - AvdP;$$

замѣнивъ  $v$  изъ ур-ія (7) черезъ  $\frac{RT}{P}$ , далѣе  $AR$  черезъ  $c_p - c_v$  и раздѣ-

ливъ обѣ стороны на  $T$ , получаемъ, какъ и раньше,

$$dS = c_p \frac{dT}{T} - AR \frac{dP}{P}.$$

Замѣняя  $c_p$  черезъ его выраженіе (26), получаемъ

$$dS = c_{po} \frac{dT}{T} + b dT - AR \frac{dP}{P};$$

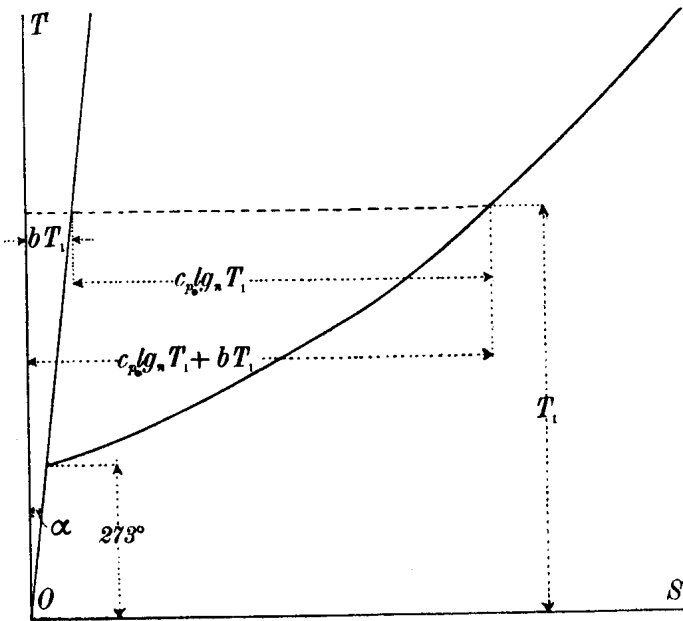
послѣ интегрированія этого ур-ія получаемъ

$$S = c_{po} \lg_n T + bT - AR \lg_n P + const. \quad (28)$$

Чтобы сократить, какъ и раньше, размѣры чертежа, можно положить произвольную постоянную  $const = -c_{po} \lg_n 273$ , тогда искомое уравненіе получается окончательно въ видѣ

$$S = c_{po} \lg_n T + bT - AR \lg_n P - 5,61 c_{po}. \quad (29)$$

Такъ какъ  $AR = c_p - c_v$  для даннаго газа есть величина постоянная даже при переменныхъ  $c_p$  и  $c_v$ , то кривая  $AR \lg_n P$  остается безъ измѣненія, ординаты же второй кривой надо увеличить соотв. на величину  $bt$ . Это увеличеніе проще всего сдѣлать спячь-таки графически, откладывая величины  $c_{po}(\lg_n T - 5,61)$  не отъ вертикали  $OT$ , какъ раньше, а отъ наклонной линіи  $OA$ , образующей съ осью  $OT$  уголъ  $\alpha$ , гдѣ  $tg \alpha = b$ , черт. 12.



Черт. 12.

Самый ход построения тепловой диаграммы остается безъ всякихъ измѣненій.

Для пользованія указаннымъ измѣненіемъ теплоемкостей полезно указать ихъ величины, по которымъ можно вычислять суммарную теплоемкость рабочаго газа. По даннымъ Р. Молліэ для вычисленія теплоемкостей при температурѣ  $T$  всѣхъ двухатомныхъ газовъ

( $H_2, O_2, N_2, CO$ ) для 1 куб. мт. при  $15^\circ C$ . и давленіи 1 кгр./см.<sup>2</sup>

$$(C_p)_T = 0,268 + 0,000045 T, \quad (30)$$

$$(C_v)_T = 0,188 + 0,000045 T; \quad (31)$$

чтобы получить теплоемкость, отнесенную къ 1 кгр. газа, надо указанные

выраженія множить на  $\frac{24,4}{\mu}$ , гдѣ  $\mu$  молекулярный вѣсъ соотв. газа.

Далѣе, теплоемкости углекислоты  $CO_2$ , для 1 кгр.,

$$(c_p)_T = 0,176 + 0,000106 T, \quad (32)$$

$$(c_v)_T = 0,129 + 0,000106 T; \quad (33)$$

теплоемкости водяного пара  $H_2O$  (перегарѣтаго), для 1 кгр.,

$$(c_p)_T = 0,459 + 0,000154 T, \quad (34)$$

$$(c_v)_T = 0,350 + 0,000154 T. \quad (35)$$

Итакъ можно считать доказаннымъ, что графическій способъ при пользованіи ур-іемъ (22) или (29) приложимъ ко всѣмъ безъ исключенія случаямъ переноса индикаторныхъ діаграммъ машинъ внутренняго горѣнія въ координаты  $TS$ .

Само собой разумѣется, что описанный графическій приѣмъ приложимъ также и при ислѣдованіи прочихъ поршневыхъ машинъ, въ которыхъ рабочимъ тѣломъ являются газы: машинъ, работающих горячимъ воздухомъ, компрессоровъ и воздуходувокъ, такъ какъ въ нихъ условія работы тѣ же и лишь нѣсколько проще, такъ какъ вслѣдствіе отсутствія химическихъ реакцій (горѣнія) постоянная  $R$  не претерпѣваетъ никакого измѣненія. Въ двухъ послѣднихъ типахъ машинъ не надо лишь сдвигать кривую  $c_p \lg_n T$  на величину  $c_p \lg_n 273^\circ$ , такъ какъ въ концѣ подачи и въ началѣ всасыванія фиктивная температура  $T$  (см. ур-іе 17) можетъ доходить въ нихъ до очень низкой величины  $10^\circ$ — $5^\circ$  абсол..

Построеніе  
кривыхъ тем-  
пературъ.

Въ заключеніе можно еще напомнить, что иногда можетъ быть желательнымъ прослѣдить за тепловыми измѣненіями въ машинѣ упрощеннымъ способомъ, не строя энтропійной діаграммы, а ограничиваясь построениемъ только кривыхъ температуръ.

На основаніи характеристическаго ур-ія (14) кривую температуръ можно построить очень простымъ способомъ, съ внѣшней стороны тождественнымъ съ нахожденіемъ характеристикъ Дёрфеля для діаграммъ паровыхъ машинъ. Въ качествѣ исходной точки можно взять или начало сжатія или конецъ его. Лучше брать послѣднюю точку, такъ какъ тогда масштаб температуръ получается крупнѣе. Очевидно, что графически соотв. исходный объемъ  $V$  приравняется  $GR$ , а соотв. давленіе  $P = T$ .

Прежде чѣмъ приступить къ построению, надо найти масштаб температуръ  $m_t$ . Для этого надо сперва вычислить по приведенному выше ур-ію (20) начальную температуру сжатія  $T_a$ . Нужная намъ температура  $T_c$  въ

концѣ сжатія найдется, если раздѣлить другъ на друга характеристическія уравненія для этихъ двухъ точекъ, въ видѣ

$$T_c = T_a \frac{p_c V_c}{p_a V_a} = T_a \frac{p_c}{p_a \epsilon}, \quad (36)$$

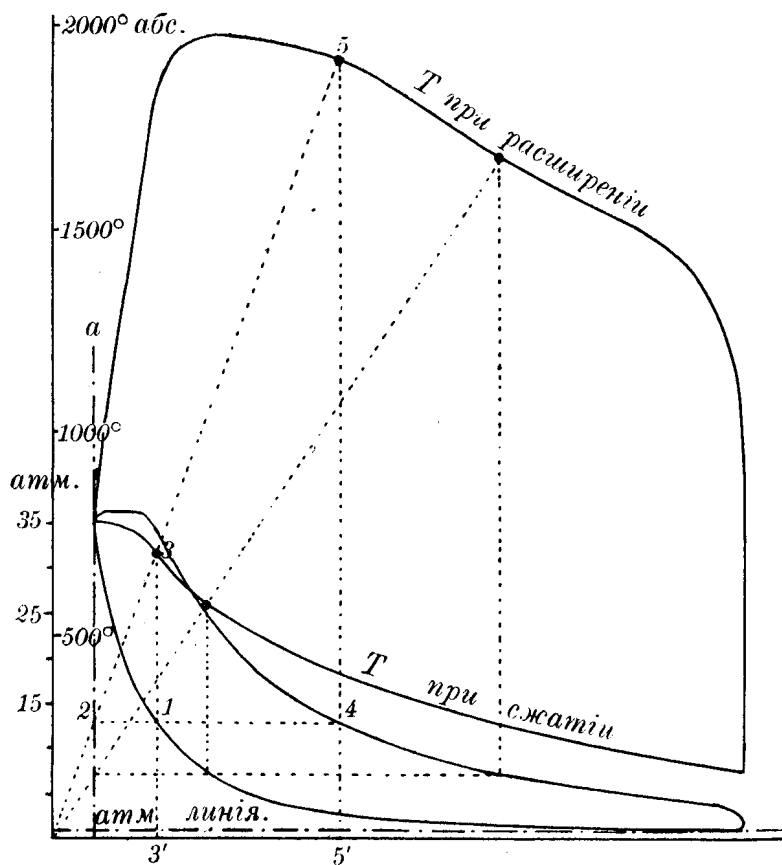
гдѣ вмѣсто давленій  $p_a$  и  $p_c$  можно непосредственно брать соотв. ординаты данной индикаторной диаграммы, а степень сжатія  $\epsilon$  должна быть опредѣлена заранее, какъ и при всякомъ калориметрическомъ изслѣдованіи.

Найдя  $T_c$  и зная масштабъ давленій  $m_p$ , найдемъ

$$m_t = \frac{m_p p_c}{T_c}. \quad (37)$$

На черт. 13 показанъ примѣръ построения кривыхъ температуръ для

Примѣръ построения кривыхъ температуръ



Черт. 13.

диаграммы машины Дизеля. Для простоты можно пренебречь увеличеніемъ вѣса газовъ вслѣдствіе вдуванія нефти; увеличенія это невелико, не болѣе 4%. Равнымъ образомъ можно пренебречь и измѣненіемъ  $R$  вслѣдствіе горѣнія. Къ тому же въ данномъ случаѣ  $\beta < 1$ , такъ что произведеніе  $GR$  дѣйствительно почти не мѣняется.



У разбираемой сейчасъ машины  $\varepsilon = 15,4$ ;  $m_p = 1$  мм. = 1 кгр./см.<sup>2</sup>. По ур-ю (20) вычислено  $T_a = 334^\circ$ ; исходная температура конца сжатія по ур-ю (36)

$$T_c = 334 \frac{35}{0,97 \cdot 15,4} = 782^\circ.$$

Отсюда масштаб температуръ по ур-ю (37)

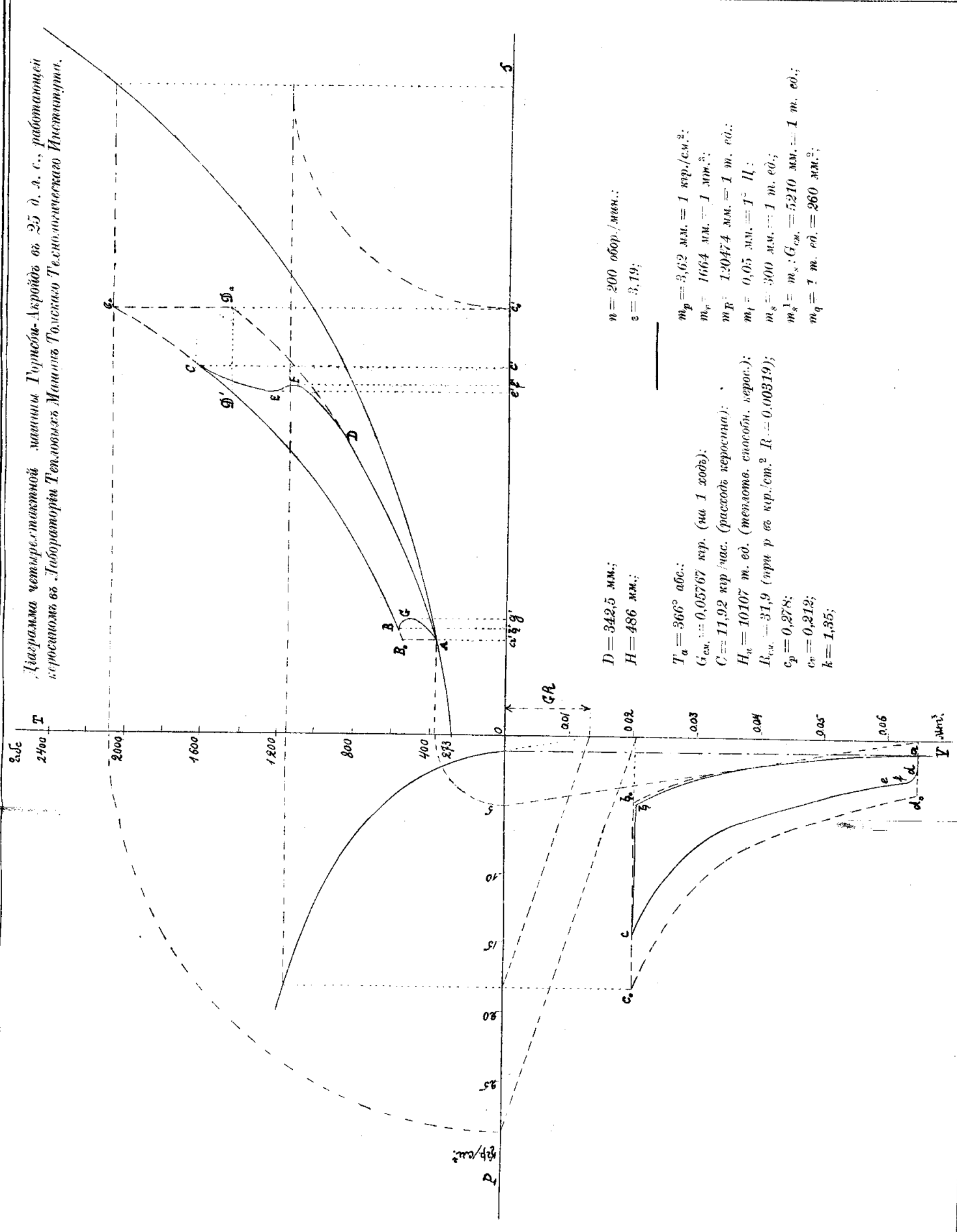
$$m_t = \frac{1,35}{782} \infty 0,045 \text{ мм.} = 1^\circ \text{ Ц.}$$

Самое построение, какъ видно по черт. 13, очень просто: сперва наносятся на диаграмму оси координатъ, линии поля давленій и поля объемовъ, затѣмъ проводимъ вертикаль *aa* черезъ конецъ сжатія. Температуру въ какойнибудь точкѣ 1 находимъ, проведя черезъ нее горизонталь до пересѣченія съ линіей *aa* въ точкѣ 2; черезъ начало координатъ *O* и точку 2 проводимъ прямую до пересѣченія въ точкѣ 3 съ вертикалью, проведенной черезъ точку 1; отрѣзокъ 3-3' есть искомая температура. Если продолжить прямую *O-2* до пересѣченія съ вертикалью, проведенной черезъ точку 4 на линіи расширенія ( $p_4 = p_1$ ), то получимъ отрѣзокъ 5-5', температуру въ точкѣ 4.

По полученнымъ такимъ образомъ кривымъ температуръ можно сдѣлать слѣдующія заключенія о работѣ данной машины: на линіи сжатія, какъ и слѣдовало ожидать, возрастаніе температуры по мѣрѣ приближенія къ внутренней мертвой точкѣ замѣтно замедляется, очевидно, вслѣдствіе увеличенія отдачи теплоты водѣ съ возрастаніемъ разности температуръ и уменьшеніемъ скорости поршня близъ мертвой точки. Кривая температуръ горѣнія и расширенія обнаруживаетъ, съ одной стороны, какъ далеко цикл данной машины отъ первоначальнаго теоретическаго цикла Дизеля съ горѣніемъ по изотермѣ, и, съ другой стороны, что горѣніе продолжается довольно далеко послѣ начала расширенія, т. е. указываетъ и въ этой машинѣ на явленіе догоранія.

Заканчивая этимъ свою статью, позволимъ себѣ высказать пожеланіе, чтобы графическіе методы, получившіе за послѣднее время столь широкое распространеніе въ самыхъ различныхъ областяхъ техники, получили поскорѣе права гражданства и при рѣшеніи вопросовъ термодинамическаго характера, а въ частности при изслѣдованіи работы машинъ внутренняго горѣнія, такъ какъ въ этой области пока остается еще особенно много невыясненныхъ вопросовъ.

Диаграмма четырехтактной машины Горнолы-Акройдъ въ 25 д. л. с., работающей керосиномъ въ Лаборатории Тепловыхъ Машинъ Геологическаго Института.



$n = 200$  обор./мин.;  
 $e = 3,19$ ;

$m_p = 3,62$  мм. = 1 крр./см.<sup>2</sup>;  
 $m_p^1 = 1664$  мм. = 1 мм.<sup>2</sup>;  
 $m_p^2 = 130474$  мм. = 1 м. ед.;  
 $m_1 = 0,05$  мм. = 1° Ц.;  
 $m_8^1 = 300$  мм. = 1 м. ед.;  
 $m_8^2 = m_8; G_{сж.} = 5210$  мм. = 1 м. ед.;  
 $m_q = 1$  м. ед. = 260 мм.<sup>2</sup>;

$D = 342,5$  мм.;  
 $H = 486$  мм.;

$T_a = 366^\circ$  абс.;  
 $G_{сж.} = 0,05767$  крр. (на 1 ходъ);  
 $C = 11,92$  крр./час. (расходъ керосина);  
 $H_u = 10107$  м. ед. (теплотв. способн. керос.);  
 $R_{сж.} = 31,9$  (при  $p$  въ крр./см.<sup>2</sup>  $R = 0,00319$ );  
 $c_p = 0,278$ ;  
 $c_v = 0,212$ ;  
 $k = 1,35$ ;