

ИЗВѢСТІЯ
Томскаго Технологическаго Института
ИМПЕРАТОРА НИКОЛАЯ II.
т. 18. 1910. № 2.

III.

В. Г. Карпенко.

ГРАФИЧЕСКОЕ ПОСТРОЕНІЕ ТЕПЛОВЫХЪ ДІАГРАММЪ МАШИНЪ ВНУТРЕННЯГО ГОРѢНІЯ.

Съ 2 таблицами чертежей.

1—15.

Графическое построение тепловых диаграмм машинъ внутреннего горѣнія.

В. Г. Карпенко.

Прежде чѣмъ приступить къ изложенію своей работы, я долженъ указать на то, что она является прямымъ продолженіемъ и развитіемъ работы проф. В. Л. Малтева, напечатанной подъ тѣмъ же заглавіемъ въ 1908 г. въ т. XII „Извѣстій Томскаго Технологическаго Института“. Чтобы не повторять того, что уже разобрано моимъ предшественникомъ, я въ дальнѣйшемъ изложеніи своей работы ограничусь однѣми ссылками на соотвѣтствующія мѣста, не останавливаясь на доказательствѣ разсмотрѣнныхъ тамъ положеній. Я предполагаю также, что лица, читающія мою статью, уже знакомы съ принципомъ построения тепловыхъ диаграммъ по работѣ проф. В. Л. Малтева.

Если мы имѣемъ какое-либо измѣненіе состоянія газа, то для начального состоянія мы можемъ величину энтропіи приравнять нулю. Въ самомъ дѣлѣ, начальное состояніе характеризуется тѣмъ, что газу еще не сообщено тепла, т. е. $dQ=0$, тогда и энтропія нуль въ отношеніи даннаго измѣненія.

Такимъ образомъ, для начального состоянія можно принять ¹⁾

$$dS = \frac{dQ}{T_0} = 0, \quad (38)$$

гдѣ T_0 —температура начального состоянія газа.

Уравненіе (38) представляетъ основное положеніе для нашихъ дальнѣйшихъ выводовъ. Разъ существуетъ такое положеніе, то мы имѣемъ частное значеніе функціи, когда мы можемъ опредѣлить постоянную S . Это условіе намъ необходимо, чтобы установить начало измѣненія состоянія газа относительно опредѣленныхъ координатъ. Координатами для изслѣдованій возьмемъ координаты TS . Всякій процессъ измѣненія состоянія

¹⁾ Мы приняли нумерацію уравненій и чертежей въ порядкѣ нумераціи по работѣ В. Л. Малтева: „Графическое построение тепловыхъ диаграммъ машинъ внутреннего горѣнія“.

газа, выраженный въ этихъ координатахъ, характеризуется тѣмъ, какъ сообщается тепло газу, и сколько ему сообщено тепла. Если имѣется рядъ измѣненій состоянія газа, при чемъ законы измѣненія указаны, то вслѣдствіе свойствъ газовъ можно каждый процессъ разсматривать совершенно самостоятельно, такъ какъ всякое новое измѣненіе не зависитъ отъ предыдущаго, а только отъ своего начального состоянія. Это положеніе намъ важно потому, что даетъ возможность опредѣлять каждый разъ постоянную въ выраженіи для энтропіи газа, какъ только мы переходимъ къ новому процессу измѣненій, и разсматривать процессъ относительно новыхъ координатъ.

Мы ограничиваемся разсмотрѣніемъ только одного уравненія энтропіи, именно уравненія (12)²⁾, которое выражаетъ S въ видѣ функціи T и p , $S=f(T, p)$. Оно болѣе удобно, чѣмъ другія уравненія, для графическаго построенія діаграммъ³⁾.

Возьмемъ уравненіе энтропіи

$$S = c_p \lg_n T - AR \lg_n p + C; \quad (12)$$

подставимъ вмѣсто T и p значенія начального состоянія газа T_0 и p_0 и приравняемъ нулю

$$S_0 = c_p \lg_n T_0 - AR \lg_n p_0 + C = 0,$$

откуда

$$C = -c_p \lg_n T_0 + AR \lg_n p_0.$$

Если мы теперь подставимъ найденное значеніе C въ уравненіе (12), то получимъ для любого состоянія газа въ предѣлахъ разсматриваемаго процесса для S

$$S = c_p \lg_n T - c_p \lg_n T_0 - AR \lg_n p + AR \lg_n p_0. \quad (39)$$

Такое измѣненіе S будетъ происходить только до тѣхъ поръ, пока будутъ оставаться неизмѣнными c_p и R ; но какъ только эти величины подвергнутся измѣненію, то это уравненіе (39) уже не примѣнимо, такъ какъ не достаточно только замѣнить въ уравненіи (39) c_p и R новыми ихъ значеніями; въ это время происходитъ измѣненія T и p , которыя связаны съ c_p уравненіями

$$Pv = RT, \quad c_p - c_v = AR.$$

Это измѣненіе, конечно, можно было бы выразить, но мы кромѣ того теряемъ представленіе о постоянной части интеграла, которую можно только опредѣлить по частному значенію функціи. Намъ же извѣстно значеніе энтропіи только въ начальномъ состояніи газа, когда мы при-
нимаемъ ее разною нулю. Это и заставляетъ насъ разсматривать

²⁾ Нумерація формулъ по соч. проф. В. Л. Матвея.

³⁾ См. объ этомъ тамъ же, стр. 9.

новый процессъ въ новыхъ координатахъ, что, какъ мы дальше увидимъ, не только не мѣшаетъ, но даже упрощаетъ графическое построение диаграммъ.

Начальное состояніе газа въ новомъ процессѣ должно быть извѣстно, для чего мы должны въ нашемъ случаѣ по имѣющейся индикаторной диаграммѣ знать давленіе и температуру, опредѣляя ее изъ характеристическаго уравненія

$$Pv = RT.$$

При измѣненіи R измѣняется и температура; поэтому начальная температура всякаго новаго процесса, въ которомъ мы имѣемъ новую газовую постоянную R , будетъ отличаться отъ температуры конечнаго состоянія предыдущаго процесса. При построеніи тепловыхъ диаграммъ машинъ внутренняго горѣнія нужно заранѣе учесть это измѣненіе. Это можно достигнуть тѣмъ, что построить кривую температуръ въ зависимости отъ измѣненія R . Именно, для ряда значеній p индикаторной диаграммы найти значенія T , которыя соотвѣтствуютъ R даннаго состава газа. Всѣ точки, полученныя такимъ путемъ соединяють плавной кривой, которая указываетъ измѣненіе температуры не только отъ измѣненія давленія и объема, но и отъ измѣненія R . Поэтому, разбивая циклъ машины на рядъ элементарныхъ процессовъ, въ каждомъ такомъ процессѣ имѣемъ начальную температуру, равную конечной предыдущаго процесса.

Итакъ, новый процессъ измѣненія состоянія газа, для котораго имѣемъ теплоемкость c_{p_1} и газовую постоянную R_1 , можно разсматривать совершенно самостоятельно въ новыхъ координатахъ. Совершенно аналогично предыдущему подставляемъ въ уравненіе (12) значенія T_1 и p_1 , а также c_{p_1} и R_1 , и приравниваемъ нулю

$$S_1 = c_{p_1} \lg^n T_1 - AR_1 \lg^n p_1 + C = 0,$$

откуда

$$C = -c_{p_1} \lg^n T_1 + AR_1 \lg^n p_1.$$

Послѣ подстановки получимъ

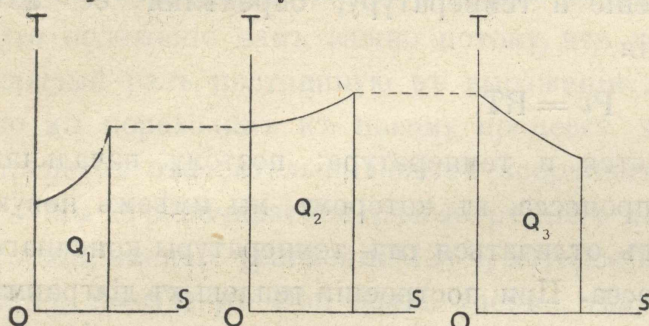
$$S = c_{p_1} \lg^n T - c_{p_1} \lg^n T_1 - AR_1 \lg^n p + AR_1 \lg^n p_1. \quad (40)$$

По этому уравненію мы опредѣляемъ величину S для любого состоянія газа въ предѣлахъ новаго разсматриваемаго процесса.

При новомъ измѣненіи c_p и R опять переходимъ къ новымъ координатамъ, т. е. разсматриваемъ процессъ опять самостоятельно; и т. д.

Если станемъ графически строить эти процессы измѣненія газа въ координатахъ TS , то получимъ нѣсколько площадей $Q_1, Q_2, Q_3, \dots$, выражаю-

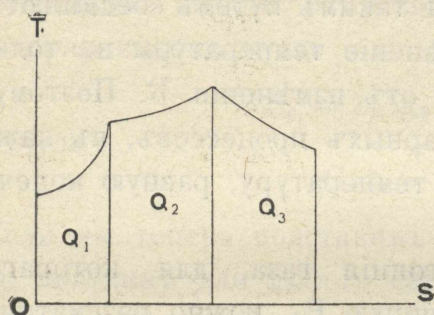
шихъ собой тепло, сообщенное или отнятое отъ газа въ соответственномъ процессѣ. Сумма этихъ площадей представляетъ общее количество тепла, участвовавшее во всѣхъ процессахъ. Если въ концѣ ряда процессовъ газъ придетъ въ начальное состояніе p_0, v_0 и T_0 , то алгебраическая сумма всѣхъ площадей будетъ представлять тепло,



Черт. 14.

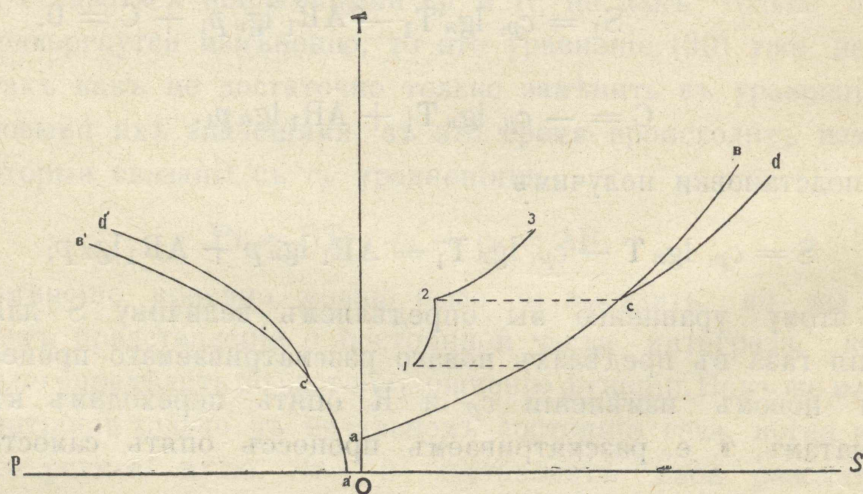
перешедшее въ работу. Чтобы графически просуммировать эти площади, удобнее всего сложить ихъ такъ, чтобы ордината начального состоянія газа второго процесса совпала съ ординатой конечнаго состоянія перваго

процесса и т. д., т. е. получить суммарную площадь всѣхъ площадей черт. 14, въ видѣ площади чертежа 15.



Черт. 15.

Въ машинахъ внутренняго горѣнія мы встречаемъ именно то обстоятельство, что съ извѣстнаго момента начинаютъ мѣняться c_p и R , такъ какъ во время сжатія имѣется горючая смѣсь, а потомъ горѣніе съ измѣненіемъ состава газа и, наконецъ, продукты горѣнія. Если бы мы пожелали провести построение тепловой диаграммы машины по способу, указанному проф. В. Л. Малевымъ (стр. 7, черт. 4), то мы должны были бы сначала построить логарифмическія кривыя для измѣненія газа съ начальной газовой постоянной R и c , ab и $a'b'$ (черт. 16),



Черт. 16.

по нимъ найти кривую измѣненія состоянія 1—2, потомъ съ измѣненіемъ c_p и R построить новыя логарифмическія линіи cd и $c'd'$, взявъ за

начало построения точки s и s' , по нимъ построить кривую 2—3 нового изменения газа и т. д.

Такъ какъ за сжатіемъ начинается горѣніе смѣси, въ теченіи котораго все время происходитъ измѣненіе состава газа, а слѣдовательно c_p и R , то необходимо будетъ построить не одну, а нѣсколько логарифмическихъ линій, разбивъ процессъ горѣнія на нѣсколько элементарныхъ процессовъ. Последняя логарифмическая линія будетъ служить для построения кривой измѣненія газа во время расширенія и выпуска.

Мы видимъ, что для построения тепловой діаграммы приходится строить каждый разъ нѣсколько логарифмическихъ линій, что требуетъ много времени и труда. Но это можно избѣжать, если имѣть таблицу заранее построенныхъ логарифмическихъ линій. Тогда при соблюденіи порядка построения по предыдущему, можно при помощи кальки сносить любую логарифмическую линію изъ таблицъ на чертежъ. Чтобы упростить далѣе построение, мы можемъ и не сносить кривыя на чертежъ, а получать соотвѣтствующія значенія энтропіи прямо изъ таблицъ, но для этого нужно сперва изучить свойства таблицъ.

У насъ построено двѣ таблицы: I построена по уравненію

$$S_p = c_p \lg_n T - c_p \lg_n T_0, \quad (41)$$

а II по уравненію

$$S_t = AR \lg_n p - AR \lg_n p_0, \quad (42)$$

Разсмотримъ ихъ послѣдовательно.

*Таблица логарифмическихъ линій S_p *).* Эти логарифмическія линіи построены въ координатахъ TS_p . За начало координатъ принято $T=0$ и $S_p = c_p \lg_n T_0$, гдѣ $T=288^\circ$ абс. или 15°C . Поэтому величины S_p при какихъ угодно теплоемкостяхъ при $T=T_0$ обращаются въ нуль или, иначе говоря, пересѣкаются въ одной точкѣ на оси ординатъ. Этою точкою будетъ $T_0=288^\circ$ абс. Отъ точки пересѣченія всѣ кривыя, отвѣчающія различнымъ теплоемкостямъ, расходятся. Разстояніе двухъ точекъ, отвѣчающихъ одной и той же температурѣ, но лежащихъ на двухъ какихъ угодно кривыхъ, мы будемъ называть расхожденіемъ кривыхъ и обозначать Φ_p .

Расхожденіе равно разности значеній S_p при различныхъ c_p и является функцией T . Эту зависимость можно получить такъ: возьмемъ уравненіе для какой-либо логарифмической кривой

$$S_p' = c_{p_n} \lg_n T - c_{p_n} \lg_n T_0,$$

потомъ для какой угодно другой

$$S_p'' = c_{p_m} \lg_n T - c_{p_m} \lg_n T_0$$

*) См. табл. I, таблица логарифм. линій I-я.

и возьмемъ разность какъ угодно, положимъ такъ

$$\Phi_p = S_p'' - S_p' = (c_{p_m} - c_{p_n}) (\lg^n T - \lg^n T_0). \quad (43)$$

Отсюда мы видимъ, что расхождение кривыхъ есть функція T и разности теплоемкостей. Будемъ изображать разность теплоемкостей вообще черезъ Δc_p . Возьмемъ $\Delta c_p'$ и составимъ по предыдущему уравненію для Φ_p'

$$\Phi_p' = \Delta c_p' (\lg^n T - \lg^n T_0),$$

другое уравненіе при $\Delta c_p''$ для Φ_p''

$$\Phi_p'' = \Delta c_p'' (\lg^n T - \lg^n T_0)$$

и раздѣлимъ одно уравненіе на другое

$$\frac{\Phi_p'}{\Phi_p''} = \frac{\Delta c_p' (\lg^n T - \lg^n T_0)}{\Delta c_p'' (\lg^n T - \lg^n T_0)} = \frac{\Delta c_p'}{\Delta c_p''}, \quad (44)$$

т. е. расхожденія относятся между собою, какъ разности теплоемкостей. Это положеніе даетъ возможность не вычислять всѣхъ кривыхъ таблицы, а вычислять только двѣ и построить остальные на основаніи уравненія (44). Такъ какъ на таблицѣ для логарифмическихъ кривыхъ взяты равныя разности теплоемкостей, то и расхожденія всѣхъ кривыхъ таблицы при одной и той же температурѣ будутъ равны.

Когда мы начинаемъ строить кривую измѣненія состоянія газа какого либо процесса, то намъ не мѣшаетъ то, что начало координатъ нашего процесса не совпадаетъ съ началомъ координатъ логарифмическихъ кривыхъ данной таблицы. Такъ какъ эта таблица построена въ предположеніи изслѣдованія процессовъ машинъ внутренняго горѣнія, то слѣдуетъ ожидать, что всѣ процессы въ нихъ будутъ имѣть температуру выше, чѣмъ она имѣется въ началѣ этихъ кривыхъ. Положимъ теперь, что начальная температура изслѣдуемаго процесса равна нѣкоторому T'_0 и что измѣненіе идетъ по изобарѣ. По основному нашему положенію мы должны вести построеніе, приравнявъ начальную величину энтропіи нулю, т. е. по уравненію

$$S_1 = c_p \lg^n T - c_p \lg^n T'_0,$$

тогда какъ, взявъ величину энтропіи изъ таблицы, мы будемъ имѣть

$$S_0 = c_p \lg^n T - c_p \lg^n T_0;$$

но, такъ какъ разность

$$S_0 - S_1 = c_p \lg^n T'_0 - c_p \lg^n T_0$$

остается постоянной при всякомъ значеніи T , то это не повліяетъ на кривую измѣненія состоянія газа.

Если съ известнаго момента у насъ измѣнится теплоемкость, то пользуясь таблицей логарифмическихъ линій, мы должны соотвѣтственную вспомогательную логарифмическую кривую сдвинуть параллельно самой себѣ такъ, чтобы она проходила черезъ предшествующую вспомогательную кривую въ точкѣ, по которой было опредѣлено конечное измѣненіе состояніе газа. Для этого нужно опредѣлить величину расхожденія кривыхъ при данной температурѣ въ нашей таблицѣ и при откладываніи всѣхъ послѣдующихъ S_p вычитать, если сдвигъ произведенъ влѣво, или прибавлять, если сдвигъ произведенъ вправо. Слѣдовательно, если мы перемѣнимъ величину теплоемкости въ уравненіи (41) и прибавимъ или вычтемъ сдвигъ, то будемъ разсматривать новый процессъ относительно новой вспомогательной логарифмической кривой, проходящей черезъ конечную точку предыдущаго измѣненія состоянія. Мы тогда должны откладывать всѣ значенія S_p отъ прежнихъ координатъ, чѣмъ мы сразу выполнимъ то суммирование площадей тепла, которое указано на черт. 15. Итакъ общій видъ уравненія для S_p при употребленіи нашихъ таблицъ будетъ

$$S_p = c_p \lg_n T - c_p \lg_n T_0 \pm X_p, \quad (45)$$

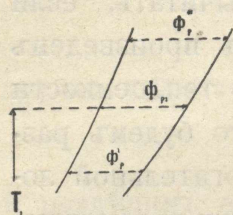
гдѣ X_p равняется расхожденію кривыхъ при данной температурѣ.

Гораздо сложнее обстоитъ дѣло съ опредѣленіемъ величины сдвига при непрерывномъ измѣненіи c_p , съ чѣмъ мы встрѣчаемся при процессѣ горѣнія. Такъ какъ температура газовъ зависитъ отъ количества выдѣленнаго тепла при горѣніи рабочей смѣси, то можно поставить измѣненія c_p въ зависимости отъ температуры, такъ какъ тѣмъ самымъ будемъ c_p измѣнять пропорціонально измѣненію состава газовъ. Такъ какъ заранѣе мы не знаемъ, шло ли горѣніе только строго опредѣленный промежутокъ времени, или перешло въ линію расширенія, то мы допускаемъ, что измѣненіе состава газовъ, а слѣдовательно и c_p , происходило по линіи горѣнія. Это допущеніе возможно, такъ какъ измѣненіе состава во время догоранія смѣси сравнительно ничтожно, а тѣмъ болѣе будетъ ничтожно измѣненіе c_p . Принявъ это, мы разбиваемъ весь процессъ горѣнія на рядъ элементарныхъ процессовъ и предполагаемъ, что въ предѣлахъ cadaго такого процесса теплоемкость не мѣняется, а мѣняется съ переходомъ къ новому процессу соотвѣтственно температурѣ. Строить кривую горѣнія прямо по конечному $c_{p_{np}}$ продуктовъ горѣнія нельзя, такъ какъ сдвигъ кривыхъ не одинаковъ при различныхъ температурахъ и зависитъ отъ величины расхожденія кривыхъ.

Пусть X_p — искомый сдвигъ кривыхъ, Δc_p — разность теплоемкостей смѣси $c_{p_{см}}$ и продуктовъ $c_{p_{np}}$, а n — число, на которое мы разбиваемъ весь процессъ горѣнія.

Разсмотримъ первый элементарный процессъ въ $\frac{1}{n}$ -ную всего процесса горѣнія. Какъ бы малъ ни былъ этотъ элементарный процессъ, все таки существуетъ разность расхожденія вспомогательныхъ логарифмическихъ кривыхъ для начального и конечнаго состоянія газа. Сдвигъ кривыхъ съ достаточной точностью можно считать равнымъ нѣкоторой средней величинѣ расхожденія за этотъ промежутокъ измѣненія

$$X_{p_1} = \Phi_{p_1} = \frac{\Phi_p' + \Phi_p''}{2}, \quad (46)$$



Черт. 17

твѣщающей какой либо температурѣ T_1 , но не средней арифметической температурѣ начального и конечнаго состоянія газа за элементарный процессъ.

Напишемъ теперь уравненіе, выражающее зависимость Φ_{p_1} отъ T_1 по уравненію (43)

$$\Phi_{p_1} = (c_{p_2} - c_{p_1}) (\lg_n T_1 - \lg_n T_0);$$

это выраженіе можно переписать иначе, если принять

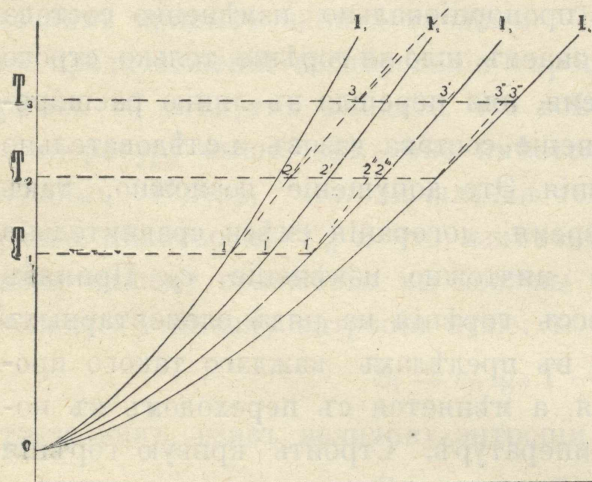
$$c_{p_2} - c_{p_1} = \frac{c_{p_{см}} - c_{p_{np}}}{n} = \frac{1}{n} \Delta c_p;$$

тогда имѣемъ

$$\Phi_{p_1} = \frac{1}{n} \Delta c_p (\lg_n T_1 - \lg_n T_0). \quad (47)$$

Эта величина Φ_{p_1} будетъ и первымъ сдвигомъ X_{p_1} .

Графическая величина второго сдвига по черт. 18 выражается отрѣзкомъ прямой 2—2''', такъ какъ кривую Ol_2 мы должны сдвинуть параллельно самой себѣ



Черт. 18.

въ эквидистантное положеніе 2—3. Весь сдвигъ мы можемъ разчленить на величину 2—2', которая равна первому сдвигу вслѣдствіе эквидистантности 1—2 и 1'—2' и на 2'—2'', что представляетъ расхожденіе Φ_{p_2} при T_2 . Выразимъ новое расхожденіе Φ_{p_2} какъ сумму расхожденія Φ_{p_1} и разности расхожденій $\Phi_{p_2} - \Phi_{p_1}$. Графически это получается, если провести кривую 1''—2'' эквидистантную

ol_2 , тогда $2''-2' = 1'-1'' = 1-1'$, а $2''-2'''$ есть разность расхожденій. Аналитически это представится:

$$\Phi_{p_2} = (c_{p_2} - c_{p_1}) (\lg_n T_1 - \lg_n T_0) + (c_{p_3} - c_{p_2}) (\lg_n T_2 - \lg_n T_1);$$

это уравнение, зная, что

$$c_{p_2} - c_{p_1} = c_{p_3} - c_{p_2} = \frac{1}{n} \Delta c_p,$$

можно переписать такъ

$$\Phi_{p_2} = \frac{1}{n} \Delta c_p (\lg^n T_1 - \lg^n T_0) + \frac{1}{n} \Delta c_p (\lg^n T_2 - \lg^n T_1)$$

или, что то же,

$$\Phi_{p_2} = \frac{1}{n} \Delta c_p (\lg^n T_2 - \lg^n T_0).$$

Слѣдовательно, второй сдвигъ равенъ

$$X_{p_2} = \Phi_{p_1} + \Phi_{p_2}. \quad (48)$$

Третій сдвигъ будетъ больше предыдущаго на величину расхожденія Φ_{p_3} при T_3 , которое равно

$$\Phi_{p_3} = \frac{1}{n} \Delta c_p (\lg^n T_2 - \lg^n T_0) + \frac{1}{n} \Delta c_p (\lg^n T_3 - \lg^n T_2)$$

или

$$\Phi_{p_3} = \frac{1}{n} \Delta c_p (\lg^n T_3 - \lg^n T_0).$$

Третій сдвигъ будетъ равенъ

$$X_{p_3} = \Phi_{p_1} + \Phi_{p_2} + \Phi_{p_3}, \quad (49)$$

и т. д.; и, наконецъ, Φ_{p_n} при T_n выразится

$$\Phi_{p_n} = \frac{1}{n} \Delta c_p (\lg^n T_n - \lg^n T_0);$$

а сдвигъ, выраженный суммою всѣхъ Φ_{p_i} представится въ видѣ

$$X_{p_n} = \sum \Phi_{p_i} = \frac{1}{n} \Delta c_p \lg^n (T_1 \cdot T_2 \cdot T_3 \dots T_n) - \Delta c_p \lg^n T_0, \quad (50)$$

что можно переписать такъ

$$X_{p_n} = \frac{\Delta c_p (\lg^n T_1 - \lg^n T_0) + \Delta c_p (\lg^n T_2 - \lg^n T_0) + \dots + \Delta c_p (\lg^n T_n - \lg^n T_0)}{n}. \quad (50a)$$

Слѣдовательно, конечный сдвигъ по кривымъ S_p равенъ среднему арифметическому всѣхъ расхожденій, въ предѣлахъ измѣненія температуръ, начальной и конечной логарифмическихъ кривыхъ.

Дѣйствительно—уравненіе

$$\Phi_{p_i} = \Delta c_p (\lg_n T_i - \lg_n T_0) = (c_{p_{см}} - c_{p_{np}}) (\lg_n T_i - \lg_n T_0)$$

выражаетъ расхожденіе для любого T_i между кривою смѣси и продуктовъ горѣнія.

Всѣ уравненія съ (47) до (50) даютъ возможность вычислить величину сдвига для каждаго элементарнаго процесса. Такъ какъ всѣ сдвиги мы при построеніи опредѣляемъ изъ таблицы графически, то намъ важно только провѣрить конечный сдвигъ аналитически по уравненію (50).

Такъ какъ допущеніе при составленіи уравненія (46) у насъ сдѣлано въ видѣ предположенія малой величины расхожденія въ элементарномъ процессѣ, то точность кривой измѣненія состоянія газа при горѣніи будетъ тѣмъ больше, чѣмъ больше n число элементарныхъ процессовъ. Практически достаточно точно выполняется построение при $n=4$, такъ какъ дальнѣйшее увеличеніе n настолько мало измѣняетъ величину сдвига, что графически это не уловимо. При подстановкѣ значеній T въ уравненіе (50) мы должны сперва вычислить T_1 по уравненію (46), а остальные значенія T можно получить, если прибавлять къ T_1 разность температуръ начальной и конечной для элементарнаго процесса, которая будетъ равна во всѣхъ процессахъ.

*Таблица логарифмическихъ линій St *).* Эти логарифмическія линіи построены въ координатахъ PS_t . За начало координатъ принято $p=0$ и $St = AR \lg_n p_0 = 0$, гдѣ $p_0 = 1$. Всѣ величины St при какихъ угодно газовыхъ постоянныхъ R будутъ пересѣкаться въ одной точкѣ на оси ординатъ, разъ p сдѣлается равнымъ p_0 . Точкою пересѣченія будетъ $p_0=1$. Отъ этой точки всѣ кривыя расходятся, и расхожденіе, которое мы будемъ обозначать черезъ Φ_t , будетъ зависеть отъ p и R . Возьмемъ уравненіе какой-либо логарифмической линіи

$$S_t' = AR_n \lg_n p - AR_n \lg_n p_0,$$

гдѣ $AR_n \lg_n p_0 = 0$; поэтому

$$S_t' = AR_n \lg_n p;$$

потомъ возьмемъ уравненіе какой либо другой логарифмической линіи

$$S_t'' = AR_m \lg_n p;$$

*) См. табл. I, таблица логарифмическихъ линій II-я.

разность этихъ двухъ уравненій будетъ расхожденіе при p

$$\Phi_t = S_t'' - S_t' = (R_m - R_n) A \lg_n p ; \quad (51)$$

обозначимъ разность газовыхъ постоянныхъ черезъ ΔR ; тогда уравненіе (51) можно переписать такъ

$$\Phi_t = \Delta R A \lg_n p . \quad (51 a)$$

Возьмемъ

$$\Phi_t' = \Delta R' A \lg_n p, \quad \Phi_t'' = \Delta R'' A \lg_n p$$

и раздѣлимъ одно на другое

$$\frac{\Phi_t'}{\Phi_t''} = \frac{\Delta R' A \lg_n p}{\Delta R'' A \lg_n p} = \frac{\Delta R'}{\Delta R''} \quad (52)$$

Уравненія (51) и (52) даютъ зависимость величины расхожденія Φ_t отъ p и R .

Сравнивая уравненія (51) и (52) съ уравненіями (43) и (44), видимъ, что свойства кривыхъ S_t тѣ же, что и свойства кривыхъ S_p . Поэтому построеніе кривыхъ S_t произведено по тому же порядку, по какому строились кривыя S_p . Кроме того мы видимъ, что всѣ дальнѣйшія положенія останутся тѣ же самыя для опредѣленія S_t при построеніи тепловыхъ діаграммъ, какія были выведены и для кривыхъ S_p .

Положенія эти слѣдующія:

а) на ходъ кривой измѣненія состоянія газа въ тепловой діаграммѣ не вліяетъ то, будетъ ли начальное давленіе изслѣдуемаго процесса совпадать съ p_0 или нѣтъ;

б) съ измѣненіемъ R мы должны соотвѣтствующую кривую сдвинуть въ положеніе эквидистантное самой себѣ на величину расхожденія кривыхъ при данномъ p ;

в) откладываніе величинъ S_t новаго процесса нужно производить отъ прежнихъ координатъ, если вычислять S_t по уравненію

$$S_t = AR \lg_n p \pm X_t , \quad (53)$$

гдѣ X_t равенъ расхожденію кривыхъ при данномъ p ;

д) при непрерывномъ измѣненіи состава газовъ и при непрерывномъ измѣненіи R нужно разсматривать процессъ, состоящимъ изъ ряда элементарныхъ процессовъ, для которыхъ послѣдовательно опредѣлять сдвигъ въ зависимости отъ предыдущихъ сдвиговъ.

Первый сдвигъ X_{t_1} получится аналогично сдвигу X_{p_1} . Онъ будетъ равенъ разности расхожденій и выразится

$$X_{t_1} = \Phi_{t_1} = \frac{1}{n} \Delta R A \lg_n p_1 , \quad (54)$$

гдѣ ΔR разность $R_{cm} - R_{np}$.

Второй сдвигъ

$$X_{t_2} = \Phi_{t_1} + \Phi_{t_2}, \quad (55)$$

гдѣ Φ_{t_2} — расхожденіе при p_2 и равняется

$$\Phi_{t_2} = \frac{1}{n} \Delta R A \lg_n p_2.$$

Третій сдвигъ

$$X_{t_3} = \Phi_{t_1} + \Phi_{t_2} + \Phi_{t_3}, \quad (56)$$

гдѣ Φ_{t_3} расхожденіе при p_3 и равняется

$$\Phi_{t_3} = \frac{1}{n} \Delta R A \lg_n p_3,$$

и т. д.; и, наконецъ, n ый сдвигъ

$$X_{t_n} = \Phi_{t_1} + \Phi_{t_2} + \Phi_{t_3} + \dots + \Phi_{t_n}. \quad (57)$$

Это уравненіе можно написать въ такомъ видѣ:

$$X_{t_n} = \sum \Phi_{t_i} = \frac{1}{n} \Delta R A \lg_n (p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot \dots \cdot p_n) \quad (57a)$$

Слѣдовательно, *конечный сдвигъ по кривымъ S_t равенъ среднему арифметическому всѣхъ расхожденій, въ предѣлахъ измѣненія давленій начальной и конечной логарифмическихъ кривыхъ.*

Зная, какъ найти значенія S_p и S_t изъ соотвѣствующихъ таблицъ, мы можемъ найти и величину энтропіи S по разности этихъ величинъ. Изъ уравненій (45) и (53) можно составить уравненіе для S при откладываніи величины энтропіи отъ однѣхъ и тѣхъ же координатъ. Уравненіе это слѣдующее:

$$S = c_p \lg_n T - c_p \lg_n T_0 + (\pm X_p) - AR \lg_n p - (\pm X_t), \quad (58)$$

гдѣ X_p и X_t опредѣляются каждый разъ при переходѣ къ новымъ логарифмическимъ кривымъ. Знакъ ставится тотъ, который будетъ выражать сдвигъ вправо или влѣво.

Примѣръ. Построимъ тепловую діаграмму для рабочаго процесса машины, работающей по циклу *Дизеля*.

Возьмемъ среднюю степень сжатія $\varepsilon=15,5$, начальное давленіе сжатія $p_a=0,9$, начальную температуру сжатія $T_a=335^0$ абс. и на основаніи соотношеній количествъ нефти и воздуха вычисляемъ значенія $c_{p_{см}}=0,24$, $R_{см}=29,4$, $c_{p_{np}}=0,27$ и $R_{np}=31,4$.

Сперва строимъ графически индикаторную діаграмму и по ней кривую температуръ. При построеніи кривой температуръ для процес-

са горѣнія мы должны учесть то обстоятельство, что газовая постоянная R все время мѣняется. Для этого мы соединяемъ точки r_1 и r_2 , см. диагр. Дизеля *), наклонною линіею и на ней опредѣляемъ температуры. Весь процессъ горѣнія разбиваемъ на четыре элементарныхъ процесса и соответственно четыремъ точкамъ начальнаго состоянія газа находимъ значенія температуръ и давленій. Передъ построеніемъ тепловой диаграммы проводимъ отъ какой-либо вертикальной линіи рядъ горизонтальныхъ линій, отвѣчающихъ найденнымъ значеніямъ температуръ *).

Построеніе тепловой диаграммы начинаютъ обычно съ начала сжатія и продолжаютъ въ порядкѣ, въ какомъ протекаетъ весь циклъ измѣненій. Какъ было указано ранѣе, первыя вспомогательныя логарифмическія кривыя намъ не нужно сдвигать, такъ какъ разность величинъ энтропій табличной и требуемой для процесса будетъ входить при откладываніи каждый разъ величиной постоянной и на кривую измѣненія состоянія газа не вліяетъ. Поэтому для сжатія величины ur —ія (58) X_p и X_t будемъ считать равными нулю. Слѣдуя уравненію (58) мы должны взять S_t изъ таблицы II-ой по логарифмической кривой для $R_{cm} = 29,4$ и вычесть изъ величины S_p , взятой изъ таблицы I-ой по кривой для $c_{p_{cm}} = 0,24$. Такъ какъ S_t по таблицѣ II-ой получается отрицательною величиною при $p_a = 0,9$, то въ ur —іе (58) она войдетъ со знакомъ плюсъ и мы должны будемъ линейную ея величину прибавить къ линейной величинѣ S_p . Не трудно видѣть, что всѣ эти дѣйствія можно опредѣлить съ помощью циркуля. Полученную такимъ образомъ величину энтропій мы откладываемъ на черт. 19 отъ оси OT . Слѣдующая точка y насъ будетъ имѣть $T = 360^\circ$ абс. и $p = 1,1$. Здѣсь величина S_t по таблицѣ II-ой получается положительной, и мы ее должны вычесть изъ S_p , т. к. она войдетъ въ ur —іе (58) со знакомъ минусъ. Такимъ образомъ мы доходимъ до конечной точки сжатія. Съ началомъ горѣнія мы должны будемъ мѣнять c_p и R . Для этого дѣлимъ разность $c_{p_{np}} - c_{p_{cm}}$ и $R_{np} - R_{cm}$ на четыре части въ зависимости отъ найденныхъ четырехъ значеній температуръ и получаемъ соответственныя значенія c_p и R

№	c_p	R
1	0,248	30,0
2	0,256	30,5
3	0,263	31,0
4	0,270	31,4

Удобно имѣть такую таблицу передъ собой при построеніи. Теперь намъ нужно при переходѣ къ новымъ вспомогательнымъ кривымъ находить каждый разъ величину сдвига. Въ данномъ случаѣ

*) Табл. II.

эта величина сдвига будетъ входить въ уравненіе (58) со знакомъ минусъ, т. к. при построении мы всё послѣдующія кривыя должны сдвигать влѣво. Слѣдовательно, прежде чѣмъ найти величину энтропіи для точки $p=35,2$ и $T=1100^0$ абс., мы находимъ X_p и X_t , которые равны среднему арифметическому изъ расхожденій кривыхъ при $T=780$ и $p=35,6$, и $T=1100^0$ и $p=35,2$. Когда первый сдвигъ найденъ, то мы находимъ по предыдущему изъ таб. II-ой S_t по кривой $R=30,0$, вычитаемъ изъ этой величины сдвигъ X_t , разность вычитаемъ изъ S_p , найденной по кривой $c_p=0,248$, и изъ новой разности вычитаемъ X_p . Съ переходомъ къ новымъ кривымъ мы опять находимъ сдвигъ и поступаемъ для опредѣленія энтропіи по предыдущему. Такъ какъ сдвигъ всегда равенъ суммѣ новаго и предыдущихъ расхожденій кривыхъ (ур--ія 50 и 57^a), то всё величины расхожденій нужно откладывать гдѣ-либо на прямой, чтобы ихъ можно было суммировать съ помощію циркуля.

Расширеніе и выпускъ мы строимъ, принимая конечный сдвигъ, по кривымъ $c_{p_{np}}=0,27$ и $R_{np}=31,4$.

Мы видимъ, что тепловая діаграмма *Дизеля* не замкнулась; это произошло отъ того, что продукты сгорания отличаются теплоемкостью c_p и газовой постоянной R отъ сжимаемой и рабочей смѣси. Это же обстоятельство сказывалось и на томъ, что полученная площадь $ab c d e a''$ получилась меньше на $4^0/0$ площади $a' b' c' d' e' a'$, построенной при постоянныхъ $c_{p_{np}}$ и R_{np} . Это и должно быть такъ, потому что съ увеличеніемъ теплоемкости и постоянной R продуктовъ сгорания будетъ увеличиваться и количество тепла, унесенное съ отходящими газами.

Для того, чтобы опредѣлить количество тепла, перешедшее въ работу, мы должны планиметромъ опредѣлить площадь $k b c d e k$ и раздѣлить на масштабъ единицы тепла.

Масштабъ тепла, если разсматривать процессъ для одного кгр. смѣси, равенъ:

$$m_q = m_s \cdot m_t = 500 \cdot 0,05 = 25 \text{ мм.} = 1 \text{ Т. ед.}$$

Если раздѣлить площадь $k b c d e k$ на m_q , то получимъ количество Т. ед., выраженныхъ этой площадью:

$$4220 : 25 = 168,5 \text{ Т. ед.}$$

Принимаемъ теплотворную способность нефти 10800 кал. 1 кгр. Такъ какъ нефть по вѣсу входитъ въ смѣсь съ воздухомъ какъ 1:21,5, то теплотворная способность одного кгр. смѣси будетъ:

$$H_u = \frac{10800}{22,5} = 480 \text{ Т. ед.}$$

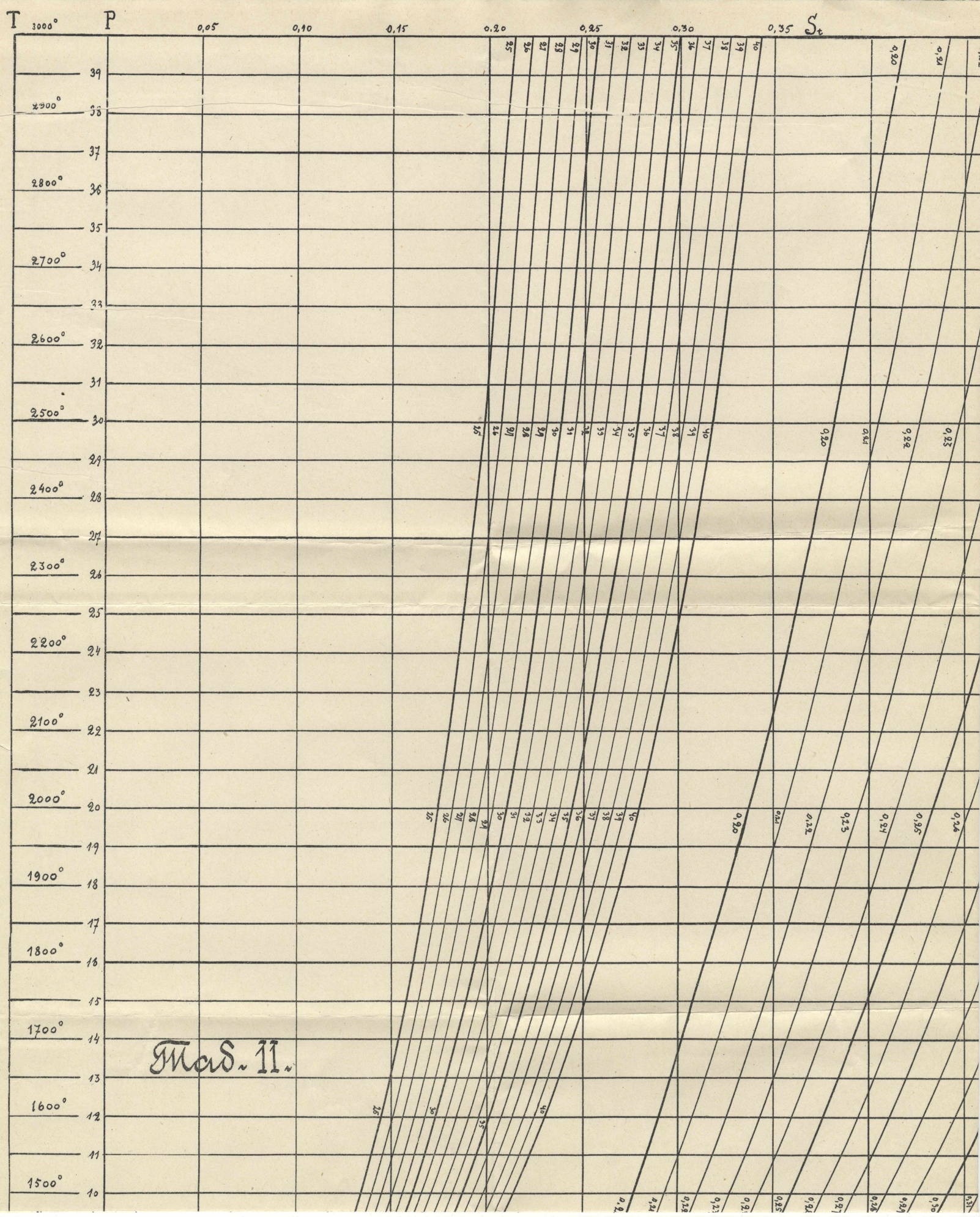
Слѣдовательно, тепловой индикаторный коэффициентъ полезнаго дѣйствія будетъ равенъ:

$$168,5 : 480 = 0,352.$$

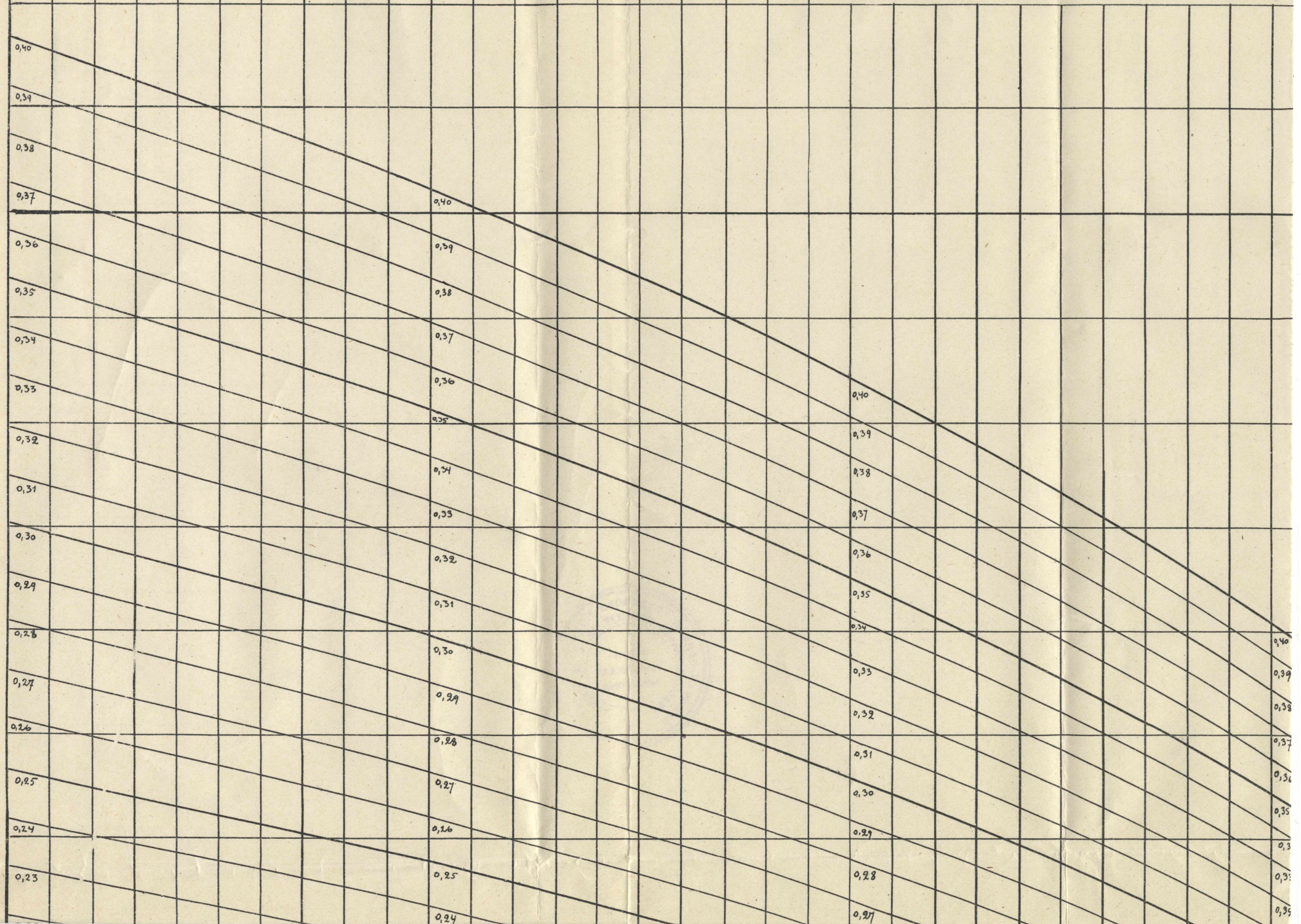
Изъ сравненія двухъ площадей $k b c d e k$ и $a' b' e' d' e' a'$ мы видимъ, что разниа получается не велика отъ того, учитываемъ ли мы или нѣтъ измѣненія c_p и R во время процесса. Поэтому въ тѣхъ случаяхъ, когда эти измѣненія еще меньше, чѣмъ въ данномъ примѣрѣ, можно не считаться съ измѣненіями теплоемкости и газовой постоянной и строить тепловую диаграмму машины, считая R и c_p постоянными.

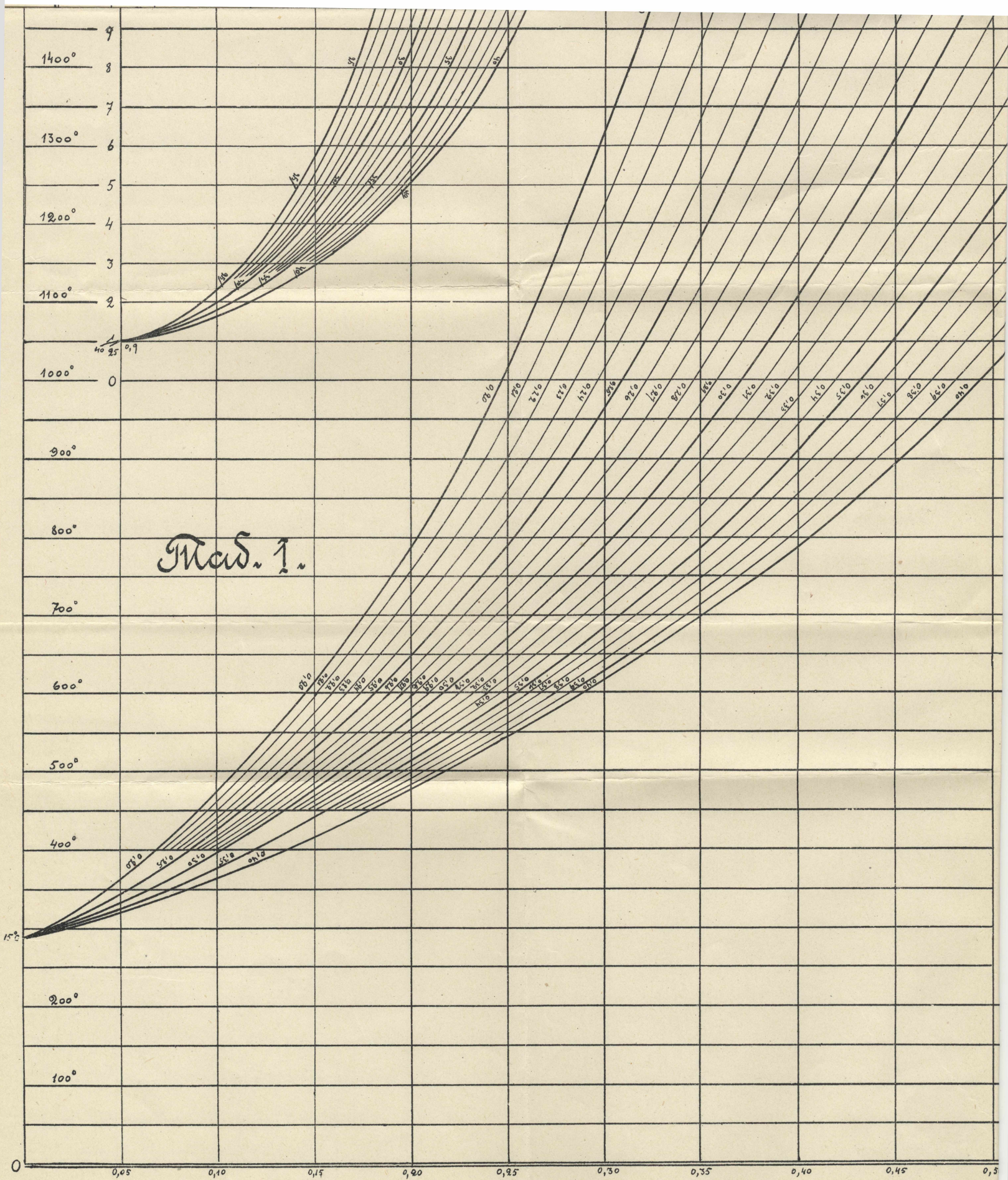
Томскъ. 28 ноября 1909 г.





Къ статьѣ инж. Вл. Карпенко „Графическое построение





тепловыхъ діаграммъ машинъ внутренняго горѣнія“.

Табл. I.

Таблицы логарифмическихъ
мнѣй
Масштабъ, дюймовъ 1 м. д. $\approx$ 500 м.
" температура $1^{\circ}\text{C}.$ $\approx$ $1\frac{1}{5}^{\circ}\text{F}.$
" давление 1 атм. $\approx$ 10 м.м.

0,55 0,60 0,65 0,70 0,75 0,80 0,85 0,90 0,95 1,00

Черт. 19.

