

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 машин внутреннего горения.

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. Малтєва*, 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 доказательствахъ разсмотрѣнныхъ тамъ положеній. Я предполагаю также, что лица, читающія мою статью, уже знакомы съ принципомъ построения тепловыхъ диаграммъ по работѣ проф. *В. Л. Малтєва*.

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. Малтєва*: „Графическое построение тепловыхъ диаграммъ машинъ внутреннего горения“.

газа, выраженный въ этихъ координатахъ, характеризуется тѣмъ, какъ сообщается тепло газу, и сколько ему сообщено тепла. Если имѣется рядъ измѣненій состоянiя газа, при чемъ законы измѣненiя указаны, то вслѣдствiе свойствъ газовъ можно каждый процессъ разсматривать совершенно самостоятельно, такъ какъ всякое новое измѣненiе не зависитъ отъ предыдущаго, а только отъ своего начальнаго состоянiя. Это положенiе намъ важно потому, что даетъ возможность опредѣлять каждый разъ постоянную въ выраженiи для энтропiи газа, какъ только мы переходимъ къ новому процессу измѣненiй, и разсматривать процессъ относительно новыхъ координатъ.

Мы ограничиваемся разсмотрѣнiемъ только одного уравненiя энтропiи, именно уравненiя (12)²⁾, которое выражаетъ S въ видѣ функцiи T и p , $S=f(T, p)$. Оно болѣе удобно, чѣмъ другiя уравненiя, для графическаго построенiя диаграммъ³⁾.

Возьмемъ уравненiе энтропiи

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

подставимъ вмѣсто T и p значенiя начальнаго состоянiя 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 значенiе C въ уравненiе (12), то получимъ для любого состоянiя 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 измѣненiе S будетъ происходить только до тѣхъ поръ, пока будутъ оставаться неизмѣнными c_p и R ; но какъ только эти величины подвергнутся измѣненiю, то это уравненiе (39) уже не применимо, такъ какъ не достаточно только замѣнить въ уравненiи (39) c_p и R новыми ихъ значенiями; въ это время происходитъ измѣненiя T и p , которыя связаны съ c_p уравненiями

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

Это измѣненiе, конечно, можно было бы выразить, но мы кромѣ того тернемъ представленiе о постоянной части интеграла, которую можно только опредѣлить по частному значенiю функцiи. Намъ же извѣстно значенiе энтропiи только въ начальномъ состоянiи газа, когда мы принимаемъ ее разною нулю. Это и заставляеть насъ разсматривать

²⁾ Нумерация формулъ по соч. проф. В. Л. Мальева.

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 построении 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 соединяютъ 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

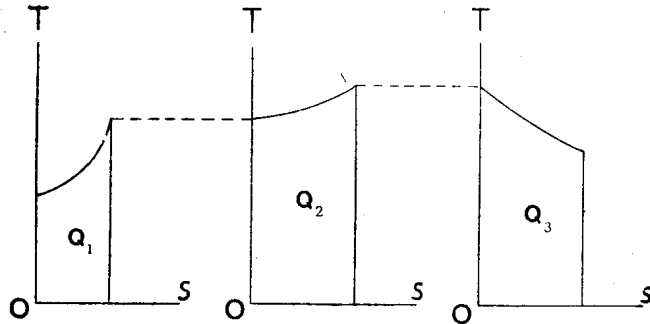
$$S = c_{p_1} \lg_n T - c_{p_1} \lg_n T_1 - AR_1 \lg_n p + AR_1 \lg_n p_1. \quad (40)$$

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-

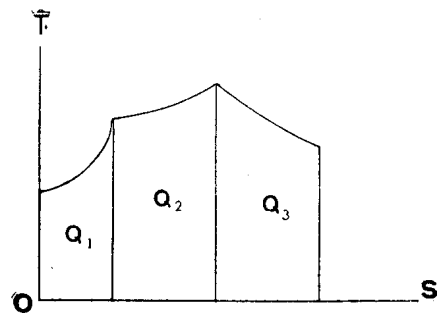
щихъ собой тепло, сообщенное или отнятое отъ газа въ соответственномъ процессѣ. Сумма этихъ площадей представляетъ общее количество тепла, участвовавшее во всѣхъ процессахъ. Если въ концѣ ряда процессовъ газъ придетъ въ начальное состояніе p_0, v_0 и T_0 , то алгебраическая сумма всѣхъ площадей будетъ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



Черт. 14.

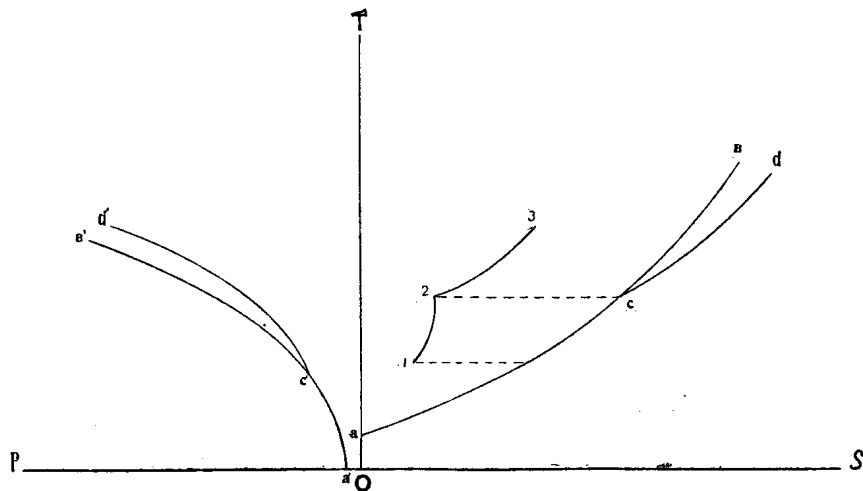
перешедшее въ работу. Чтобы графически просуммировать эти площади, удобнее всего сложить ихъ такъ, чтобы ордината начального состоянія газа второго процесса совпала съ ординатой конечнаго состоянія перваго

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 встрѣчаемъ 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 діаграммы машины по способу, указанному проф. *В. Л. Матвеевымъ* (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 изменение состава газа, а слѣдовательно c_p и R , то необходимо будетъ построить не одну, а нѣсколько логарифмическихъ линий, разбивъ процессъ горѣнія на нѣсколько элементарныхъ процессовъ. Последняя логарифмическая линия будетъ служить для построения кривой изменения газа во время расширения и выпуска.

Мы видимъ, что для построения тепловой діаграммы приходится строить каждый разъ нѣсколько логарифмическихъ линий, что требуетъ много времени и труда. Но это можно избѣжать, если имѣть таблицу заранее построенныхъ логарифмическихъ линий. Тогда при соблюденіи порядка построения по предыдущему, можно при помощи кальки сносить любую логарифмическую линию 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 линий S_p *)*. Эти логарифмическія линии построены въ координатахъ TS_p . За начало координатъ принято $T=0$ и $S_p = c_p \lg_n T_0$, гдѣ $T=288^0$ абс. или 15^0C . 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 $T_0=288^0$ абс. Отъ точки пересѣченія всѣ кривыя, отвѣчающія различнымъ теплоемкостямъ, расходятся. Расстояние двухъ точекъ, отвѣчающихъ одной и той же температурѣ, но лежащихъ на двухъ какихъ угодно кривыхъ, мы будемъ называть расхожденіемъ кривыхъ и обозначать Φ_p .

Расхождение 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. линий 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

$$S_0 - S_1 = c_p \lg_n T'_0 - c_p \lg_n T_0$$

остається 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 линий, мы должны соответственную вспомогательную логарифмическую кривую сдвинуть параллельно самой себѣ такъ, чтобы она проходила черезъ предшествующую вспомогательную кривую въ точкѣ, по которой было определено конечное измѣненіе состояніе газа. Для этого нужно определить 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 суммированіе площадей тепла, которое указано на черт. 1б. Итакъ общій видъ уравненія для S_p при употребленіи нашихъ таблицъ будетъ

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

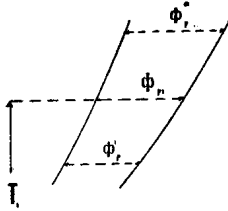
гдѣ X_p равняется расхожденію кривыхъ при данной температурѣ.

Гораздо сложнѣе обстоитъ дѣло съ определеніемъ 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 определеннаго промежутка 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 догорания 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 каждаго такого процесса теплоемкость не мѣняется, а мѣняется съ переходомъ къ новому процессу соответственно температурѣ. Строить кривую горѣнія прямо по конечному $c_{p_{np}}$ продуктово 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 продуктово $c_{p_{np}}$, 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

отвѣчающей 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

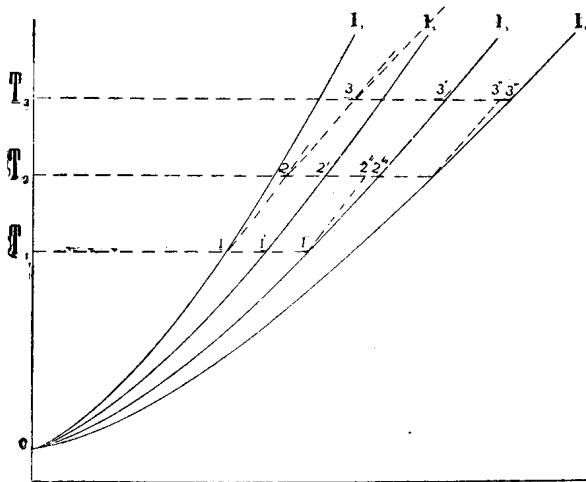
$$c_{p_2} - c_{p_1} = \frac{c_{p_{см}} - c_{p_{np}}}{n} = \frac{1}{n} \Delta c_p;$$

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 отрезкомъ прямой 2—2''', такъ какъ кривую $O1_3$ мы должны сдвинуть параллельно самой себѣ



Черт. 18.

въ эквидистантное положеніе 2—3. Весь сдвигъ мы можемъ разчлениить 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

$o1_2$, 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 расхождений, 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 продуктовоъ 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 построеніе 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 S_t *).* Эти логарифмическія линіи построены въ координатахъ PS_t . За начало координатъ принято $p = 0$ и $S_t = AR \lg_n p_0 = 0$, гдѣ $p_0 = 1$. Всѣ величины S_t 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 этих двух уравнений будет расхождение при p

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

обозначим разность газовых постоянных через ΔR ; тогда уравнение (51) можно переписать так

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

Возьмемъ

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

и разделимъ одно на другое

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

Уравнения (51) и (52) даютъ зависимость величины расхождения Φ_t отъ p и R .

Сравнивая уравнения (51) и (52) съ уравнениями (43) и (44), видимъ, что свойства кривыхъ S_t тѣ же, что и свойства кривыхъ S_p . Поэтому построение 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 построении тепловыхъ диаграммъ, какія были выведены и для кривыхъ S_p .

Положенія эти слѣдующія:

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

б) съ измѣненіемъ R мы должны соответствующую кривую сдвинуть въ положеніе эквидистантное самой себѣ на величину расхождения 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 $R_{см} - R_{np}$.

Второй сдвигъ

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

гдѣ Φ_{t_2} — расхождение 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} расхождение 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 уравнение можно написать въ такомъ видѣ:

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

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

Зная, какъ найти значенія S_p и S_t изъ соотвѣтствующихъ таблицъ, мы можемъ найти и величину энтропіи S по разности этихъ величинъ. Изъ уравненій (45) и (53) можно составить уравнение для S при откладываніи величины энтропіи отъ однѣхъ и тѣхъ же координатъ. Уравнение 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 діаграммы проводимъ отъ какой-либо вертикальной линіи рядъ горизонтальныхъ линій, отвѣчающихъ найденнымъ значеніямъ температуръ *).

Построеніе тепловой діаграммы 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 $T=360^0$ 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 соответственные 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 $T=1100^{\circ}$ абс., мы находимъ X_p и X_t , которые равны среднему арифметическому изъ расхожденій кривыхъ при $T=780$ и $p=35,6$, и $T=1100^{\circ}$ 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 помощью циркуля.

Расширеніе и выпускъ мы строимъ, принимая конечный сдвигъ, по кривымъ $c_{pnp} = 0,27$ 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 $abcdea''$ получилась меньше на 4% площади $a'b'c'd'e'a'$, построенной при постоянныхъ c_{pnp} 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 $kbcdek$ и раздѣлить на масштабъ единицы тепла.

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

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

Если раздѣлить площадь $kbcdek$ 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 кг. Такъ какъ нефть по вѣсу входитъ въ смѣсь съ воздухомъ какъ 1 : 21,5, то теплотворная способность одного кг. 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 $kbcdek$ и $a'b'e'd'e'a'$ мы видимъ, что разница 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.



T 3000° P

0,05

0,10

0,15

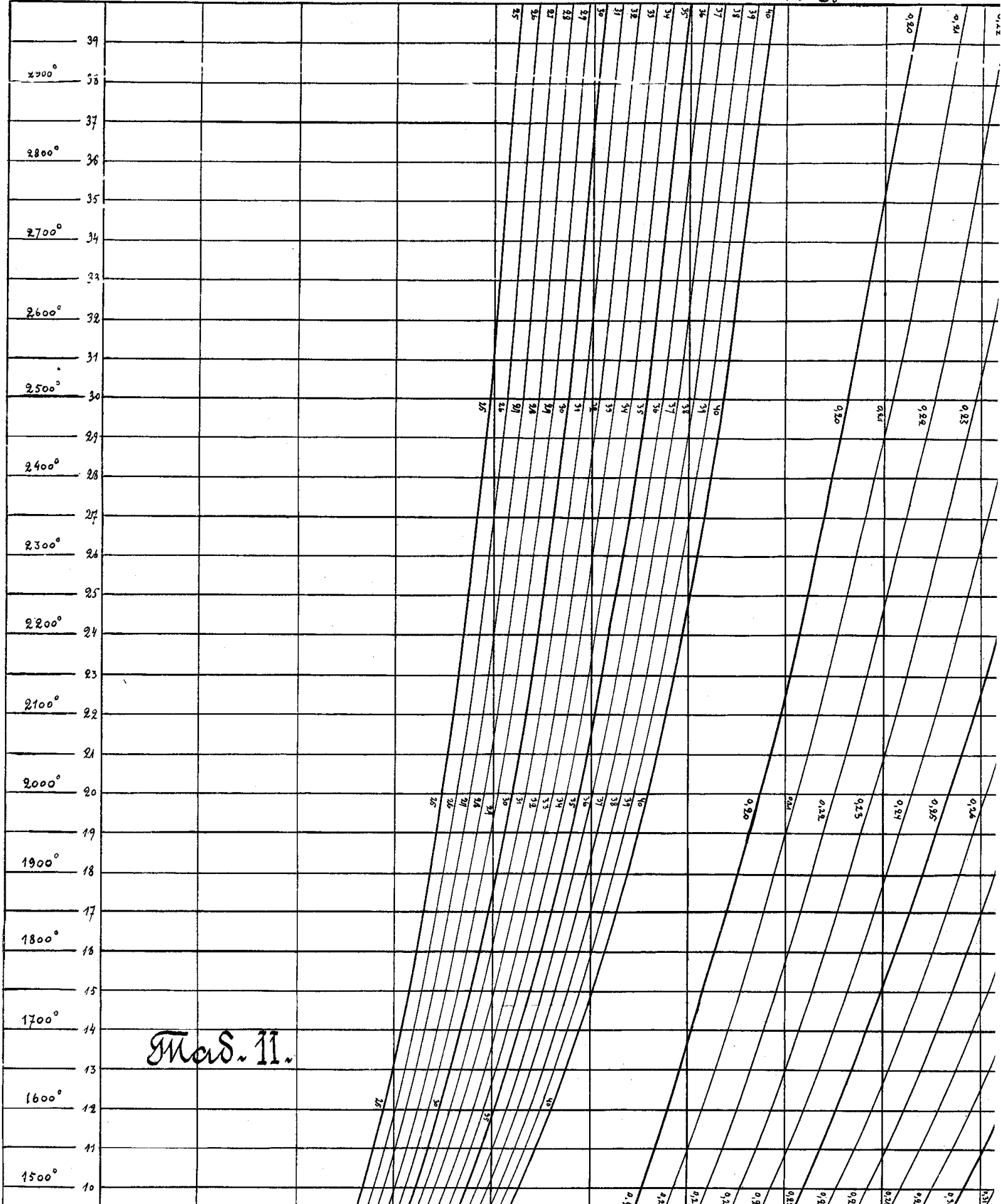
0,20

0,25

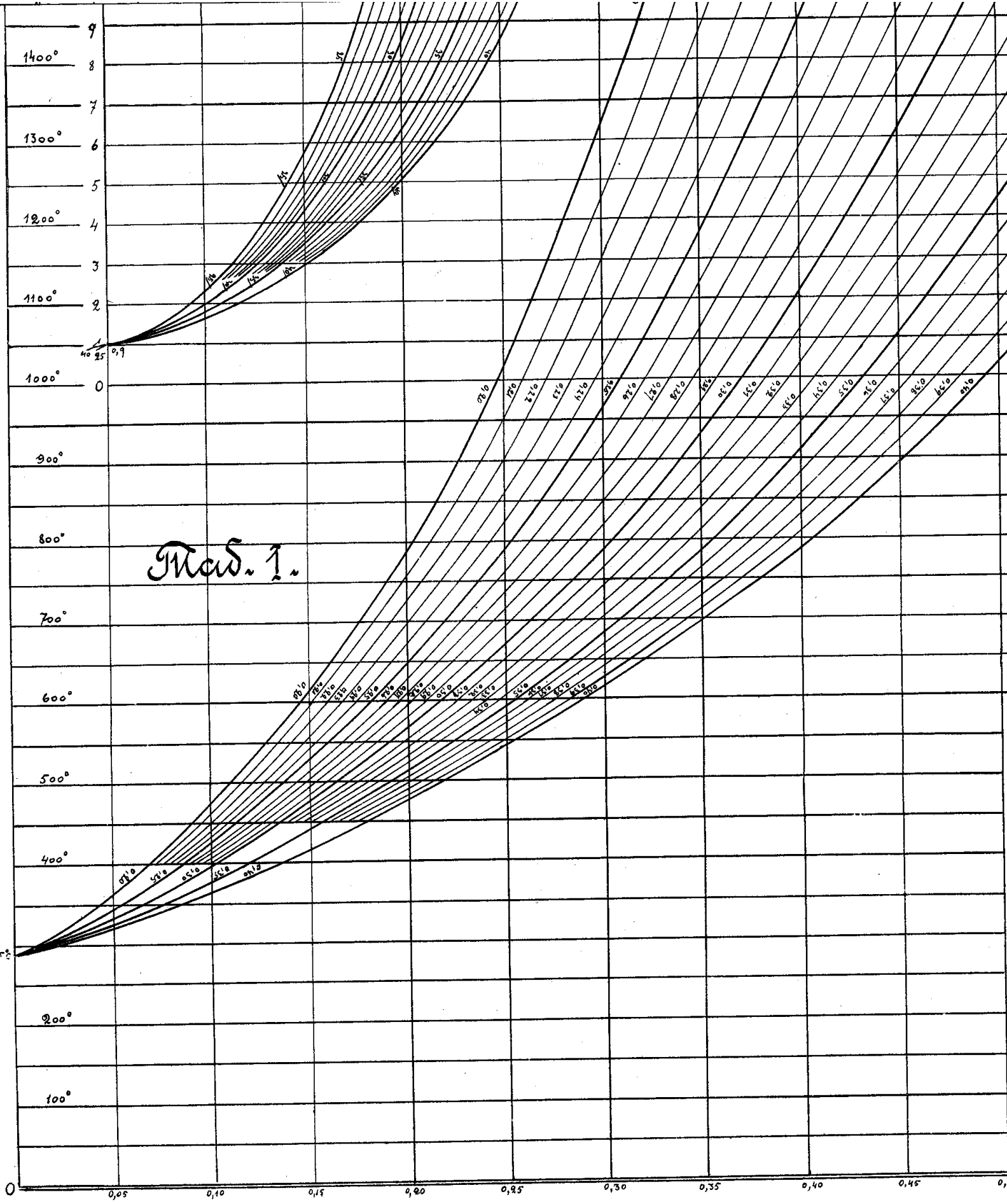
0,30

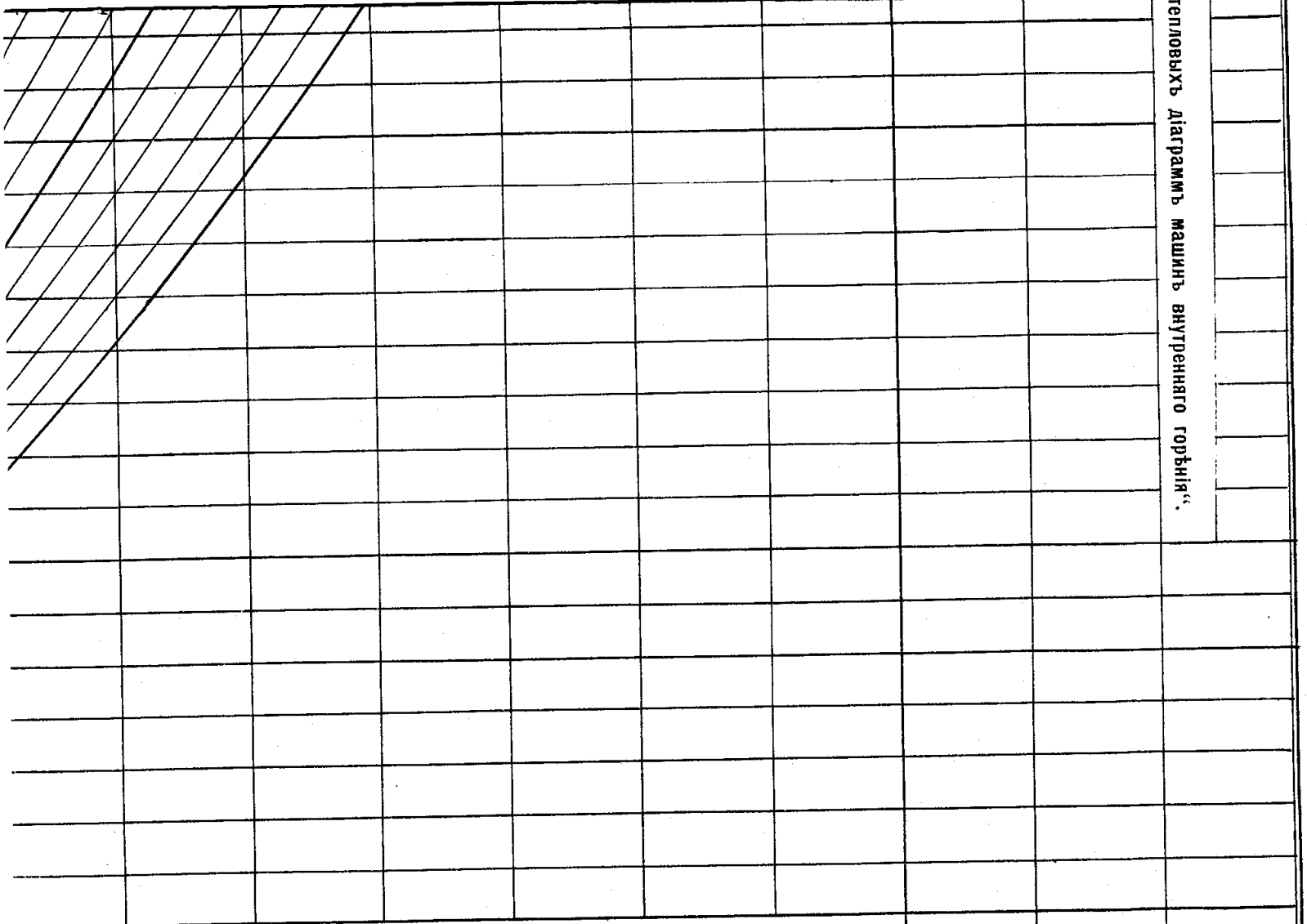
0,35

S_t



Mas. II.





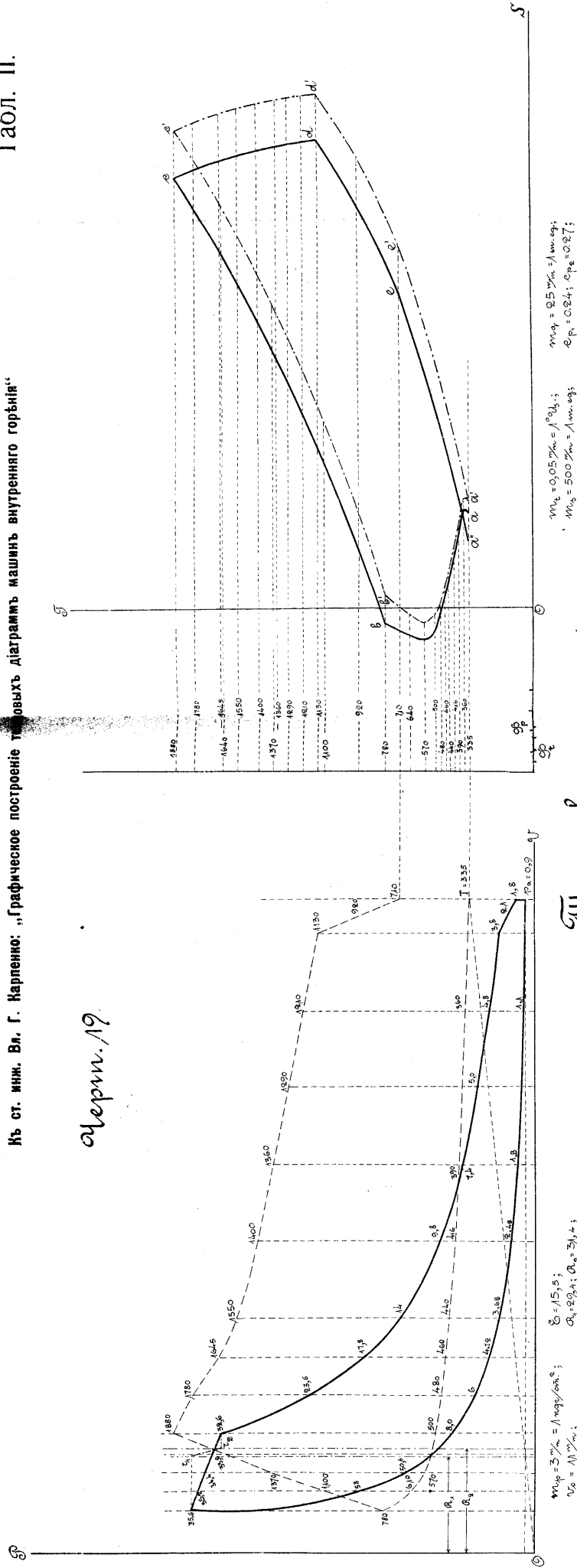
Таблицы логарифмических
мний

- Масштаб, диаметр 1 м.д. \approx 500 мм.
- " температура 1°C \approx $\frac{1}{5}$ мм.
- " давления 1 атм. \approx 10 мм.

Табл. I.

Къ ст. инж. Вл. Г. Карленко: „Графическое построение тепловых диаграмм машинъ внутреннего горѣнія“

черт. 19.



Штемова

и

индикаторная диаграмма гв. Дизеля.