

## СОДЕРЖАНИЕ.

Предварительная замѣчанія . . . . .	1
Общий ходъ расчета . . . . .	5
Оцѣнка элементовъ расчета . . . . .	11
Частные случаи расчета . . . . .	15
Примѣры расчета . . . . .	18
Графический расчетъ рабочаго процесса . . . . .	22
Заключеніе . . . . .	25

## Тепловой расчетъ рабочаго процесса.

*Проф. В. Гриневецкій.*

**Предварительная замѣчанія.** Тепловой расчетъ позволяетъ найти наибольшее давление рабочаго процесса, среднее индикаторное давление, видъ индикаторной діаграммы, расходъ топлива и расходъ тепла на силочась или экономичность процесса. Этаъ расчетъ даетъ взаимную связь всѣхъ факторовъ рабочаго процесса съ достаточной наглядностью и полнотой. Для расчета требуется заданіе нѣкоторыхъ основныхъ элементовъ рабочаго процесса и оцѣнка другихъ его элементовъ. Степень точности оцѣнки послѣднихъ элементовъ можетъ быть признана практически удовлетворительной, благодаря пополненію необходимыхъ физическихъ данныхъ новѣйшими изслѣдованіями<sup>1)</sup>.

Важнѣйшей частью расчета является расчетъ процесса сгоранія, относительно котораго полезно сдѣлать нѣкоторыя предварительныя замѣчанія. Сгораніе представляетъ термодинамически необратимый процессъ, который, собственно, въ расчетѣ не разсматривается. Расчетъ имѣеть дѣло съ рабочей смѣсью — воздухомъ и топливомъ предъ началомъ сгоранія и съ сгорѣвшими газами — послѣ его окончанія. Тепло, выдѣленное при химическихъ реакціяхъ сгоранія, разсматривается какъ сообщенное газамъ извнѣ. Задачей расчета является определеніе состоянія сгорѣвшихъ газовъ по окончаніи сгоранія. Это состояніе зависитъ отъ состоянія и состава рабочей смѣси, отъ состава и теплоемкости сгорѣвшихъ газовъ, отъ измѣненія числа газовыхъ молекулъ при сгораніи, отъ количества выдѣленного при сгораніи тепла и отъ характера самаго процесса сгоранія.

Составъ рабочей смѣси и сгорѣвшихъ газовъ удобно выражать въ килограммъ-молекулахъ (kgmol), бера за единицу число kg, рав-

1) Гюльднеръ относится весьма скептически къ тепловому расчету, см. стр. 183, съ чѣмъ, однако, нельзя согласиться безъ оговорокъ. Для ходовыхъ типовъ газовыхъ двигателей можно было бы ограничиться расчетомъ по рабочему воздуху и по нормальной діаграммѣ, какъ предлагается Гюльднеръ. Въ случаѣ отклоненій рабочаго процесса отъ нормальной діаграммы тепловой расчетъ необходимъ, ибо безъ него нельзя оцѣнить сколько-нибудь точно наибольшаго давленія въ процессѣ. Вмѣстѣ съ тѣмъ безъ теплового расчета не получается достаточной ясности въ количественныхъ представленияхъ о связи всѣхъ факторовъ рабочаго процесса, что необходимо для основательнаго его проектированія. Замѣнить тепловой расчетъ въ этомъ отношеніи можетъ только наличность многочисленныхъ опытныхъ данныхъ по соотвѣтственному типу двигателя; но такія опытныя данные придаютъ полную надежность расчету и сами получаются въ немъ полное и весьма цѣнное освѣщеніе. Какъ видно будетъ изъ послѣдующаго изложенія и разобранныхъ въ концѣ примѣровъ, расчетъ легко привести стъ практическіи удовлетворительной точностью и притомъ довольно просто. Въ силу этихъ соображеній выполненіе тепловаго расчета слѣдуетъ признать всегда полезнымъ, а въ случаяхъ, отклоняющихся отъ нормальныхъ — необходимымъ.



ное молекулярному въсу газа. Такая единица заключаетъ въ себѣ, одинаковыя числа молекулъ для всѣхъ газовъ, а слѣдовательно, по закону Авогадро, представляеть одинаковыя объемы газовъ. Счетъ въ kgmol равносиленъ измѣренію объемами и очень практиченъ, давая простыя формулы и позволяя замѣнить простыми и легко запоминаемыми числами молекулярныхъ въсовъ выраженія удѣльныхъ въсовъ. Теплоемкости и постоянныя въ характеристическихъ уравненіяхъ получаются при этомъ для всѣхъ двухатомныхъ газовъ, приближающихся къ совершеннымъ, одно числовое значеніе.

Газообразное топливо беремъ въ количествѣ 1 kgmol, а жидкое—въ количествѣ 1 kg. Горючія части жидкаго топлива, выражаемыя въсовыми долями, переводимъ въ kgmol (или kg-атомы для углерода), чтобы прямо найти число kgmol сгорѣвшихъ газовъ. По числу kgmol горючаго и реакціямъ сгоранія, находимъ необходимое для сгоранія число kgmol кислорода, а дѣля послѣднее на 0,21, находимъ число kgmol теоретически необходимаго воздуха  $L_0$ .

Дѣйствительное количество рабочаго воздуха обозначимъ:  $L$ —въ kgmol на 1 kgmol газообразнаго топлива;  $L'$ —въ kg на 1 kg жидкаго топлива;

дѣйствительное количество рабочаго воздуха на 1 kg жидкаго топлива въ kgmol будеть  $L = \frac{L'}{28,89}$ , где 28,89—въсь 1 kgmol воздуха. Имѣемъ:

$$\frac{L}{L_0} = \frac{L'/28,89}{L_0} = \alpha \quad (1)$$

гдѣ  $\alpha$ —относительное количество рабочаго воздуха. По дѣйствительному количеству рабочаго воздуха находится общее число газовыхъ kgmol рабочей смѣси; для газообразнаго топлива это число будетъ:  $1 + L$ , а для жидкаго:  $x + \frac{L'}{28,89}$ , где  $x$ —число kgmol испарившейся части топлива. При вспрыскиваніи топлива предъ началомъ сгоранія можно положить  $x=0$ ; вообще же  $x$ —очень небольшая дробь, пренебрегая которой будемъ считать для жидкаго топлива общее число kgmol рабочей смѣси  $\frac{L'}{28,89}$ .

Кромъ свѣжей рабочей смѣси, въ цилиндрѣ двигателя находится иѣкоторое количество остаточныхъ газовъ отъ предыдущаго рабочаго процесса. Назовемъ остаточнымъ коэффициентомъ  $\gamma$  отношеніе чисель kgmol остаточныхъ газовъ и рабочей смѣси или отношеніе ихъ объемовъ при равныхъ давленіяхъ и температурахъ. Подсчетъ коэффициента  $\gamma$  будетъ указанъ далѣе; пока замѣтимъ, что въ четырехтактныхъ двигателяхъ  $\gamma$  зависитъ главнымъ образомъ отъ степени сжатія, въ двухтактныхъ же зависитъ отъ полноты продувки, и отчетливой продувкой можно довести  $\gamma$  до нуля. Общее число газовыхъ kgmol въ цилиндрѣ предъ началомъ сгоранія выразится такъ:

$$(1 + L)(1 + \gamma) \text{—для газообразнаго топлива} \quad (2)$$

$$\frac{L'}{28,89}(1 + \gamma) \text{—для жидкаго топлива} \quad (2 \text{ bis})$$

Такимъ образомъ, заданіемъ  $L$  ( $L'$ ) или заданіемъ  $\alpha$ , а также оцѣнкой  $\gamma$  опредѣляется количество газовъ предъ сгораніемъ, а по нему и по реакціямъ сгоранія находится количество и составъ сгорѣвшихъ газовъ.

Теплоемкость газовъ по величинѣ и по характеру возрастанія съ температурой различна для разныхъ газовъ. Въ этомъ отношеніи въ рабочей смѣси и сгорѣвшихъ газахъ можно различать 3 главныя части: простые газы (двухатомные,  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $H_2$ ,  $CO$ , воздухъ); углекислоту ( $CO_2$ ); водяные пары ( $H_2O$ );

числа kgmol этихъ трехъ частей сгорѣвшихъ газовъ, полученныхъ отъ 1 gkmol или 1 kg топлива, обозначимъ сответственно чрезъ  $M$ ,  $M'$  и  $M''$ .

, одинаковыя числа  
дро, представляеть  
зреню объемами и  
простыми и легко  
дѣльныхъ вѣсовъ.  
хъ получаютъ при  
вершенныи, одно

идкое—въ количе-  
ными долями, пере-  
найти число kgmol  
горанія, находимъ  
днее на 0,21, наход-  
о з д у х а —  $L_0$ .  
уха обозначимъ:

лива въ kgmol бу-

(1)

уха. По дѣйстви-  
о газовыхъ kgmol  
 $1 + L$ , а для жид-  
нива. При вспры-  
0; вообще же  $x$  —  
и жидкаго топлива

одится нѣкоторое  
процесса. Назо-  
нь kgmol остаточ-  
и равныхъ давле-  
лань далѣе; пока  
звынъ образомъ  
продувки, и отчет-  
ихъ kgmol въ ци-

(2)

(2 bis)

цѣнкой у опредѣ-  
акціямъ сгоранія  
зрастанія съ тем-  
ъ рабочей смѣси

ыхъ отъ 1 gkmol

Возрастаніе теплоемкости газовъ съ температурой можно считать, по крайней мѣрѣ для высокихъ температуръ, твердо установленнымъ какъ прямымъ, такъ и косвенными способами определенія теплоемкостей<sup>2)</sup>. Функциональная зависимость теплоемкости газовъ отъ температуры пока еще не можетъ считаться твердо установленной. Препятствуютъ: пробѣль въ области изслѣдованныхъ температуръ—среднихъ и низкихъ, съ одной стороны, и высокихъ—съ другой, различія въ методахъ изслѣдований въ этихъ областяхъ и недостаточная многочисленность опытовъ. Обычно принимается наиболѣе простая—линейная зависимость теплоемкости отъ температуры, въ то же время наиболѣе согласующаяся съ результатами различныхъ опытовъ. Для теплового расчета рабочаго процесса, имѣющаго дѣло съ высокими температурами, линейная зависимость теплоемкости отъ температуры достаточно подтверждается изслѣдованіями Лангена. Въ расчетъ, въ виду перемѣнности теплоемкости, удобно вводить среднія теплоемкости, для измѣнений отъ  $0^{\circ}\text{abs}$  до данной температуры. По подсчетамъ Шребера<sup>3)</sup>, изъ опытовъ Лангена получаются слѣдующія выраженія для молекулярныхъ среднихъ теплоемкостей при постоянномъ объемѣ:

$$\left. \begin{array}{l} \text{для простыхъ газовъ: } c_v' = 4,625 + 0,00053 T \\ \text{для углекислоты: } c_v'' = 6,774 + 0,00189 T \\ \text{для водяного пара: } c_v''' = 6,855 + 0,00116 T \end{array} \right\} \quad (3)$$

Молекулярные среднія теплоемкости при постоянномъ давлениі найдутся изъ соотношенія:

$$c_p - c_v = AR_m, \text{ где } A = \frac{1}{428}, \text{ а } R_m \text{ для kgmol всѣхъ газовъ } \approx 846, \text{ откуда } c_p - c_v = 1,975 \text{ для kgmol. Имѣемъ:}$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{для простыхъ газовъ: } c_p' = 6,600 + 0,00053 T \\ \text{для углекислоты: } c_p'' = 8,749 + 0,00189 T \\ \text{для водяного пара: } c_p''' = 8,830 + 0,00116 T \end{array} \right\} \quad (3 \text{ bis})$$

По теплоемкостямъ составныхъ частей удобно выразить суммарную теплоемкость сгорѣвшихъ газовъ —  $c_{mv}$  или  $c_{mp}$ , относя ее некъ 1 kgmol, а ко всей массѣ газовъ, образовавшейся отъ сгоранія 1 kgmol или 1 kg топлива. Очевидно имѣемъ:

$$\left. \begin{array}{l} c_{mv} = M' \cdot c_v' + M'' \cdot c_v'' + M''' \cdot c_v''' \\ c_{mp} = M' \cdot c_p' + M'' \cdot c_p'' + M''' \cdot c_p''' \end{array} \right\} \quad (4 \text{ bis})$$

2) Обстоятельную сводку и критику всѣхъ современныхъ данныхъ по вопросу о теплоемкости газовъ можно найти въ работѣ Хабера—Наберг. Thermodynamik technischer Gasreaktionen. Утвержденія Флігнера и Цѣнеря, приводимыя Гюльднеромъ на стр. 129 и 130, потеряли свою убѣдительность послѣ изслѣдований Лангена, подтвердившихъ отчасти результаты опытовъ Мальяра и Лешателье.

3) Schreber. Zur Berechnung der Vorgänge in den Gasmotoren. Dinglers P. J., Band 318, Heft 28, 29. Шреберъ далъ критическую опись и болѣе точный подсчетъ результатовъ весьма обстоятельныхъ опытовъ Лангена (Langen. Untersuchungen über die Drücke, welche bei Explosionen von Wasserstoff und Kohlenoxyd in geschlossenen Gefässen auftreten. Mitteilungen über Forschungsarbeiten, V. d. I., Heft 8). Шреберъ нашелъ изъ данныхъ Лангена, что постоянные въ теплоемкостяхъ  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  надо считать больше, а приростъ теплоемкостей съ температурой—меньше, чѣмъ это вычислено Лангеномъ. Относя средніе теплоемкости къ  $0^{\circ}\text{abs}$ , Шреберъ даетъ выраженія ур. (3). Подставляя сюда  $t + 273$  вместо  $T$ , т. е. считая средніе теплоемкости отъ  $0^{\circ}\text{C}$ , получимъ: для простыхъ газовъ —  $c_v' = 4,914 + 0,00053t$ ; для углекислоты —  $c_v'' = 7,805 + 0,00189t$  и для водяныхъ паровъ —  $c_v''' = 7,491 + 0,00116t$ . Эти цифры интересно сравнить съ формулами Лангена, см. стр. 557. Какъ формулы Лангена, такъ и подавно формулы Шребера даютъ болѣе слабую зависимость теплоемкости отъ температуры, чѣмъ было принято Мальяръ и Лешателье, см. стр. 129. Такимъ образомъ, выводъ проф. Е. Мейера, сдѣянный изъ калориметрическаго изслѣдованія газового двигателя, см. примѣчаніе на стр. 130 о вѣроятной преувеличенности температурной зависимости теплоемкости по формуламъ Мальяра и Лешателье, находитъ себѣ прямое опытное подтвержденіе. Установленный Лангеномъ и исправленный Шреберемъ величины теплоемкостей газовъ находять себѣ хотя и косвенное, но вѣжкое подтвержденіе сопоставленіемъ ихъ съ постоянными газовыми реакцій. Это сопоставленіе сдѣлано въ названной въ примѣчаніи (2) работе Хабера.

Подставляя въ ур. (4) или (4 bis) числовыя значения  $M'$ ,  $M''$  и  $M'''$  и выражени¤ теплоемкостей изъ ур. (3) или (3 bis), приведемъ ур. (4) и (4 bis) къ виду:

$$c_{mo} \text{ или } c_{mp} = A + BT \quad (5)$$

гдѣ  $A$  и  $B$  — числовые коэффициенты, зависящіе отъ состава и теплоемкостей сгорѣвшихъ газовъ, которые легко вычислить для каждого даннаго случая по нѣ-которымъ общимъ приемамъ, указаннымъ ниже. Суммарная теплоемкость сгорѣвшихъ газовъ въ формѣ ур. (5) понадобится для подсчета конечной температуры сгоранія.

При сгораніи измѣняется, говоря вообще, число газовыхъ молекулъ, благодаря образованію трехатомныхъ  $CO_2$  и  $H_2O$ , а при жидкому топливѣ — также и благодаря переходу жидкости въ газообразную форму. Соответственно измѣненію общаго числа молекулъ измѣняется объемъ 1 kg сгорѣвшихъ газовъ и постоянная характеристического уравненія  $R$ , отнесенная къ 1 kg сгорѣвшихъ газовъ, которая понадобится для опредѣленія ихъ состоянія.

Назовемъ коэффициентомъ молекулярнаго измѣненія  $\beta$  отношеніе общаго числа газовыхъ молекулъ сгорѣвшихъ газовъ къ общему ихъ числу въ рабочей смѣси, а постоянную для первыхъ — чрезъ  $R_2$ , а для послѣдней чрезъ  $R_1$ ; тогда получимъ:

$$R_2 = \beta R_1 \quad (6)$$

Измѣненіе общаго числа газовыхъ молекулъ при сгораніи обозначимъ чрезъ  $\Delta M$ , причемъ знакъ и величина  $\Delta M$  опредѣляются характеромъ реакцій сгоранія. Находимъ на основаніи ур. (2) или (2 bis):

$$\beta = 1 + \frac{\Delta M}{(1 + L)(1 + \gamma)} \text{ для газообразнаго топлива} \quad (7)$$

$$\beta = 1 + \frac{\Delta M}{L' \cdot (1 + \gamma)} \text{ для жидкаго топлива} \quad (7 \text{ bis})$$

Тепло, выдѣленное при сгораніи рабочей смѣси, содержащей 1 kgmol или 1 kg топлива, обозначимъ чрезъ  $Q_1$ . Располагаемъ тепломъ будеть рабочая теплопроизводительность  $H_u$  1 kgmol или 1 kg топлива. Имѣемъ:

$$Q_1 = \zeta H_u \quad (8)$$

Здѣсь  $\zeta$  назовемъ коэффициентомъ выдѣленія тепла, причемъ очевидно,  $\zeta < 1$ , вслѣдствіе неполноты сгоранія, теплоотдачи стѣнкамъ цилиндра во время сгоранія, отчасти — догоранія и диссоціаціи газовъ.  $H_u$  для жидкаго топлива дается непосредственно, а для газообразнаго, составляющаго смѣсь горючихъ газовъ, находится какъ сумма произведеній молекулярныхъ теплопроизводительностей на соответственныя доли kgmol всѣхъ горючихъ газовъ.

Для упрощенія всѣхъ расчетовъ въ слѣдующей таблицѣ А приведены практически важнѣйшія реакціи сгоранія. Здѣсь составныя части взяты въ kgmol, причемъ обозначаются:

$m_b$  — число газовыхъ kgmol горючаго;

$m_o$  — число kgmol кислорода для сгоранія;

$m_k$  — число kgmol образовавшейся углекислоты;

$m_w$  — число kgmol образовавшагося водяного пара;

$\Delta m$  — измѣненіе общаго числа газовыхъ kgmol при сгораніи;

$H_{um}$  — рабочая теплопроизводительность 1 kgmol горючаго.

раженія

(5)

тей сго-  
и по нѣ-  
сгорѣв-  
ратуры, благо-  
дѣ и bla-  
mъненію  
тоянная  
которая $\beta$  отно-  
ситель-  
ному числу  
ре兹ъ  $R_t$ ;

(6)

ъ чрезъ  
горанія.

(7)

(7 bis)

mol или  
бочая  
ь:

(8)

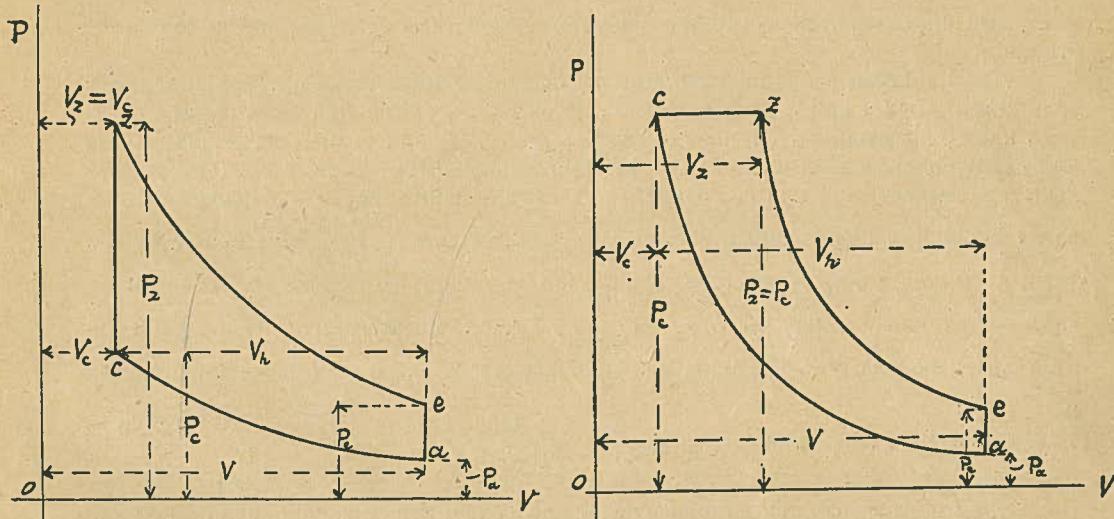
причемъ;  
илиндра  
аго топ-  
ль горю-  
онизводи-иведены  
ь kgmol,

Таблица А 4).

№№	Реакція сгоранія въ kgmol	$m_b$	$m_o$	$m_k$	$m_w$	$\Delta m$	$H_{um}$
1	$CO + \frac{1}{2} O_2 = CO_2$	1	$\frac{1}{2}$	1	0	$-1/2$	68090
2	$H_2 + \frac{1}{2} O_2 = H_2O$	1	$\frac{1}{2}$	0	1	$-1/2$	57670
3	$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$	1	2	1	2	0	190570
4	$C_2H_4 + 3O_2 = 2CO_2 + 2H_2O$	1	3	2	2	0	311990
5	$C_3H_8 + 4\frac{1}{2}O_2 = 3CO_2 + 3H_2O$	1	$4\frac{1}{2}$	3	3	$+1/2$	460990
6	$C_6H_6 + 7\frac{1}{2}O_2 = 6CO_2 + 3H_2O$	1	$7\frac{1}{2}$	6	3	$+1/2$	755750
7	$(C) + O_2 = CO_2$	0	1	1	0	0	97650
8	$(H_2) + \frac{1}{2}O_2 = H_2O$	0	$\frac{1}{2}$	0	1	$+1/2$	—

Эта таблица чрезвычайно упрощаетъ всѣ подсчеты, позволяя прямо находить  $L_o$ ,  $M$ ,  $M'$ ,  $M''$ ,  $\Delta M$ ,  $\beta$  и  $H_u$  по составу топлива.

**Общий ходъ расчета.** Въ расчетѣ надо выдѣлить 3 части: процессъ сжатія рабочей смѣси (или воздуха), процессъ сгоранія и процессъ расширѣнія сгорѣвшихъ газовъ. Фиг. 1 и 2 даютъ теоретическую индикаторную діаграмму рабочаго процесса для двигателей быстраго и постепенного сгоранія. Процессъ сжатія по кривымъ  $ac$  и процессъ расширѣнія по кривымъ  $ze$  предполагаются слѣдующими уравненіемъ  $pv^n = \text{Const}$ , т.-е. политропическими. Процессъ сгоранія предполагается



Фиг. 1.

Фиг. 2.

происходящимъ при постоянномъ объемѣ или при постоянномъ давленіи по прямымъ  $cz$ . Паденіе давленія при вытеканіи газовъ предполагается въ мертвой точкѣ по прямой  $ea$ . Выталкивающей и всасывающей ходы въ расчетѣ не входятъ. Эти предположенія охватываютъ дѣйствительный ходъ рабочаго процесса лишь приблизительно.

4) Измѣрія количества тѣлъ въ kgmol, можно, очевидно, брать какія<sup>1</sup> угодно дроби kgmol и нѣть оснований подбирать коэффициенты такъ, чтобы имѣть дѣло съ цѣлыми числами kgmol, какъ это принято въ химии для молекулъ. Въ скобкахъ поставлены:  $(C)$  — kg-атомъ углерода и  $(H_2)$  — kgmol водорода въ жидкомъ топливѣ; здесь  $m_b = 0$ . Измѣненіе числа kgmol находится изъ уравненія:  $\Delta m = (m_k + m_w) - (m_b + m_o)$ . Важнейшая реакція сгоранія — (1) и (2) даютъ убыль числа молекулъ при реакціи. Реакція (8) даетъ прибыль числа газовыхъ молекулъ, ибо водяные пары занимаютъ двойной объемъ по сравненію съ пошедшими на ихъ образо-

Обозначимъ <sup>5)</sup> чрезъ  $p$  давленіе газовъ въ at, чрезъ  $P$ —давленіе въ kg/qm, чрезъ  $v$ —удѣльный объемъ газовъ въ см<sup>3</sup>, а чрезъ  $V$ —общій объемъ въ см<sup>3</sup>, и чрезъ  $T$ —абсолютную температуру газовъ для слѣдующихъ моментовъ: начала сжатія рабочей смѣси (или воздуха) —  $p_a$ ,  $P_a$ ,  $v_a$ ,  $V_a$  и  $T_a$ ; конца сжатія (начала сгоранія) —  $p_c$ ,  $P_c$ ,  $v_c$ ,  $V_c$  и  $T_c$ ; конца сгоранія (начала расширенія) —  $p_s$ ,  $P_s$ ,  $v_s$ ,  $V_s$  и  $T_s$ ; конца расширенія —  $p_e$ ,  $P_e$ ,  $v_e$ ,  $V_e$  и  $T_e$ ; для рабочей смѣси (или воздуха) передъ цилиндромъ —  $p_o$ ,  $P_o$ ,  $v_o$  и  $T_o$ . Далѣе обозначимъ:

$$\varepsilon = \frac{V}{V_c} \text{ — степень сжатія;}$$

$$\delta = \frac{V}{V_s} \text{ — степень расширенія;}$$

$n_1$  — показатель политропы сжатія;

$n_2$  — показатель политропы расширенія.

При расчетѣ задаются:  $\varepsilon$ ,  $p_a$ , родъ и составъ топлива,  $L$  ( $L'$ ) или  $\alpha$ ; оцѣниваются:  $T_a$ ,  $n_1$ ,  $n_2$  и  $\zeta$ .

Для процесса сжатія имѣемъ изъ уравненія политропы соотношенія:

$$p_c = p_a \cdot \varepsilon^{n_1} \quad (9)$$

$$T_c = T_a \cdot \varepsilon^{n_1-1} = T_a \cdot \left( \frac{p_c}{p_a} \right)^{\frac{n_1-1}{n_1}} \quad (10)$$

которыми опредѣляется состояніе рабочей смѣси (или воздуха) предъ началомъ сгоранія.

Для процесса сгоранія находимъ помошью таблицы  $A$  по составу топлива и величинамъ  $L$  ( $L'$ ) или  $\alpha$  количества  $M'$ ,  $M''$  и  $M'''$ , а также  $\Delta M$ , какъ будетъ показано ниже для разныхъ случаевъ. Затѣмъ по ур. (4) или (4 bis) вычисляется  $c_{mv}$  или  $c_{mp}$  и подстановкой численныхъ значеній приводится къ виду ур. (5). Суммарная теплоемкость  $c_{mv}$  или  $c_{mp}$  относится къ сгорѣвшимъ газамъ, образовавшимся изъ 1 kg<sub>mol</sub> или 1 kg топлива, т.-е. къ  $(1 + L + \Delta M)$  или  $\left( \frac{L'}{28,89} + \Delta M \right)$  kg<sub>mol</sub>. Кромѣ того, въ цилиндрѣ имѣется еще добавочное количество тѣхъ же сгорѣвшихъ газовъ—остаточные газы  $(1 + L)\gamma$  или  $\frac{L'}{28,89}\gamma$  kg<sub>mol</sub>. Поэтому полная суммарная теплоемкость  $C_{mv}$  или  $C_{mp}$ , относящаяся къ общей массѣ газовъ, найдется умножениемъ  $c_{mv}$  или  $c_{mp}$  на отношенія:  $\frac{1 + L + \Delta M + (1 + L)\gamma}{1 + L + \Delta M}$  или  $\frac{\frac{L'}{28,89} + \Delta M + \frac{L'}{28,89}\gamma}{\frac{L'}{28,89} + \Delta M}$ .

Не трудно видѣть, что при помоши ур. (7) или (7 bis) эти отношенія преобразуются въ такое:  $1 + \frac{\gamma}{\beta - \gamma(1 - \beta)}$ , которое въ виду незначительности  $\gamma$  и близости  $\beta$  къ 1 можно замѣнить приближеннымъ болѣе простымъ отношеніемъ  $1 + \frac{\gamma}{\beta}$ . Отсюда имѣемъ для полной суммарной теплоемкости выраженіе:

$$C_{mv} \text{ или } C_{mp} = c_{mv} \cdot \left( 1 + \frac{\gamma}{\beta} \right) \text{ или } c_{mp} \cdot \left( 1 + \frac{\gamma}{\beta} \right) \quad (11)$$

валіе кислородомъ. Полную теплопроизводительность 1 kg водорода въ жидкому топливу Менделевъ опредѣливаетъ около 30000 cal; отсюда  $H_{um} = 2.30000 - 18.595 \sim 49300$  cal—эта цифра довольно гадательна, но въ расчетахъ она и не понадобится, ибо берется теплопроизводительность 1 kg жидкаго топлива, опредѣляемая калориметрически

<sup>5)</sup> Въ обозначеніяхъ будемъ слѣдовать принятымъ Гюльденеромъ символамъ, чтобы не нарушать единства обозначеній.

Выделение тепла при сгорании заменяется въ расчетѣ сообщеніемъ сгорѣвшимъ газамъ извѣтъ того же количества тепла  $Q_1$ .<sup>6)</sup> Измѣненіе состоянія сгорѣвшихъ газовъ связывается съ тепломъ  $Q_1$  слѣдующимъ разсужденіемъ. Сообщеніе тепла  $Q_1$  заменяетъ первоначальное состояніе газовъ при сохраненіи постоянного объема или постоянного давленія съ температуры  $T_o$  до температуры  $T_s$ . Очевидно, для обратного измѣненія сгорѣвшихъ газовъ отъ  $T_s$  до  $T_o$  при постоянномъ объемѣ или при постоянномъ давленіи отъ нихъ нужно отнять тепло  $Q_1$ . Послѣднее измѣненіе выразится уравненіемъ: —  $Q_1 = \left(1 + \frac{\gamma}{\beta}\right) \cdot (A + BT_o) T_o - \left(1 + \frac{\gamma}{\beta}\right) \cdot (A + BT_s) T_s$ ; замѣнняя адѣсь  $Q_1$  изъ ур. (8) и производя перестановку получимъ:

$$\zeta H_u + \left(1 + \frac{\gamma}{\beta}\right) \cdot (A + BT_o) T_o = \left(1 + \frac{\gamma}{\beta}\right) \cdot (A + BT_s) T_s \quad (12)$$

Изъ этого квадратного уравненія находится  $T_s$  общимъ пріемомъ рѣшенія или, что практически удобнѣе, путемъ подстановокъ пробныхъ значений  $T_s$  въ скобки и послѣдовательного опредѣленія  $T_s$  какъ изъ уравненія первой степени. Это ур. (12) является основнымъ для теплового расчета рабочаго процесса.

Пользуясь характеристическимъ уравненіемъ газовъ, имѣемъ для рабочей смѣси:  $P_o v_o = 10000 p_o v_o = R_1 T_o$ ;

а для сгорѣвшихъ газовъ, помня ур. (6), найдемъ:  $P_s v_s = 10000 p_s v_s = R_2 T_s = \beta R_1 T_o$

Отсюда найдемъ, для нижнее уравненіе на верхнее:  $\frac{p_s v_s}{\beta p_o v_o} = \frac{T_s}{T_o}$

Полагая  $v_s = v_o$  для сгорания при постоянномъ объемѣ, найдемъ:

$$p_s = \beta p_o \cdot \frac{T_s}{T_o}. \quad (13)$$

Полагая  $p_s = p_o$  для сгорания при постоянномъ давленіи, получимъ, замѣнняя  $\frac{v_s}{v_o}$

чрезъ  $\frac{V_s}{V_o}$ :

$$V_s = \beta V_o \cdot \frac{T_s}{T_o} \quad (13 \text{ bis})$$

По ур. (12) опредѣляется теоретическая конечная температура сгорания —  $T_s$ , а по ур. (13) или (13 bis) — теоретическое давленіе вспышки —  $p_s$  или теоретический конечный объемъ сгорания —  $V_s$ .

Для процесса расширения имѣемъ изъ уравненія политропы соотношенія:

$$p_e = \frac{p_s}{\delta^{n_2}} \quad (14)$$

$$T_e = \frac{T_s}{\delta^{n_2} - 1} \quad (15)$$

совершенно аналогичны ур. (9) и (10) для сжатія, при чмѣ въ двигатѣль быстраго сгоранія  $\delta = \epsilon$ , а въ двигатѣль постепенного сгоранія  $\delta < \epsilon$ , именно  $\delta = \epsilon \cdot \frac{V_e}{V_s}$ .

Ур. (9) — (15) опредѣляютъ теоретическую индикаторную діаграмму<sup>7)</sup> и позволяютъ подсчитать работу процесса и его экономичность. Обозначимъ:

6) Послѣдующее разсужденіе недостаточно строго. Получаемый на основаніи этого разсужденія результатъ совпадалъ бы съ истиннымъ при условіи одинаковости характеристическихъ постоянныхъ и теплоемкостей рабочей смѣси и сгорѣвшихъ газовъ, чего на дѣлѣ нѣтъ. Однако, величина ошибки вслѣдствіе несоблюдевія этого условія практически несущественна. Научно-строгое разсмотрѣніе процесса сгоранія съ точки зренія термодинамики дано Цейнеромъ. Z e i n e r g. Technische Thermodynamik. Band I, § 79 и 80). Изложеніе выводовъ Цейнера интересующіе ими найдутъ въ курсѣ термодинамики проф. Мерцалова.

7) Уравненія (9) — (15) представляютъ нѣкоторыя измѣненія по сравненію съ выведенными Гюльднеромъ. Для политропъ сжатія и расширения взяты разные показатели  $n_1$  и  $n_2$ , а въ ур. (12), (13) и (13 bis), касающіеся сгоранія, введены поправки. Ур. (58) и (62a) Гюльднера (стр. 154 и 155) соответствуютъ ур. (12), въ которомъ введена поправка на неполное выдѣленіе тепла и на возрастаніе теплоемкости съ температурой. Ур. (56) и (62) Гюльднера (стр. 154 и

$V_h$  — рабочий объем цилиндра (объем, описанный поршнем за 1 ходъ) въ см<sup>3</sup>;  
 $V_i$  — объем, описанный поршнемъ на 1 kgmol или 1 kg топлива, въ см<sup>3</sup>;  
 $p_i$  — теоретическое среднее индикаторное давление въ at;  
 $p_i'$  — исправленное среднее индикаторное давление въ at;  
 $\mu$  — поправочный коэффициентъ;  
 $\Delta p$  — средняя разность давлений выталкивания и всасывания;  
 $\eta_e$  — коэффициентъ подачи (отнесенный къ  $p_o$  и  $T_o$ );  
 $\eta_i$  — индикаторный коэффициентъ;  
 $\eta_m$  — механический коэффициентъ;  
 $\eta_{ho}$  — экономический коэффициентъ;  
 $C_i$  — расходъ газа на индикаторный силочасъ въ см<sup>3</sup> при 0°C и 760 mm. рт. ст.;  
 $C'_i$  — расходъ жидкаго топлива на индикаторный силочасъ въ kg;  
 $C_o$  — расходъ газа на эффективный силочасъ въ см<sup>3</sup> при 0°C и 760 mm. рт. ст.;  
 $C'_o$  — расходъ жидкаго топлива на эффективный силочасъ въ kg;  
 $Q_i$  — расходъ тепла на индикаторный силочасъ въ cal;  
 $Q_o$  — расходъ тепла на эффективный силочасъ въ cal.

Теоретическое среднее индикаторное давление найдемъ, подсчитывая работу политропическихъ измѣнений, а въ двигателяхъ постепенного сгорания—еще и работу сгорания при постоянномъ давлении. Алгебраическую сумму работъ надо раздѣлить на  $V_h = V - V_o = \frac{V_o}{\varepsilon - 1}$ , перевести давления въ at и отношения объемовъ замѣнить чрезъ  $\varepsilon$  и  $\delta$ . Тогда получимъ теоретическое среднее индикаторное давление. Для двигателя быстраго сгорания найдемъ:

$$p_i = \frac{p_c}{\varepsilon - 1} \left\{ \frac{p_z}{p_o} \cdot \frac{\frac{1}{n_2 - 1} - \frac{1}{n_1 - 1}}{\frac{n_2 - \frac{1}{\varepsilon^{n_2} - 1}}{n_2 - 1} - \frac{n_1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_1} - 1}}{n_1 - 1}} \right\} \quad (16)$$

Для двигателя постепенного сгорания найдемъ:

$$p_i = \frac{p_c}{\varepsilon - 1} \left\{ \frac{V_z}{V_o} \cdot \frac{\frac{1}{n_2 - \frac{1}{\delta^{n_2} - 1}} - \frac{1}{n_1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_1} - 1}}}{\frac{n_2 - \frac{1}{\delta^{n_2} - 1}}{n_2 - 1} - \frac{n_1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_1} - 1}}{n_1 - 1}} \right\} \quad (16 \text{ bis})$$

Непосредственное пользование ур. (16) или (16 bis) не вполнѣ удобно; его можно облегчить составлениемъ таблицъ или графическимъ изображеніемъ входящихъ въ ихъ составъ функций  $n_2$ ,  $n_1$ ,  $\varepsilon$  и  $\delta$ . Полученные изъ ур. (16) или (16 bis) значения  $p_i$  больше истинныхъ, вслѣдствіе замедленія сгорания и предваренія выпуска, а въ случаѣ четырехтактнаго процесса и вслѣдствіе сопротивленій выталкивающаго и всасывающаго ходовъ. Вводя соответственныя поправки найдемъ:

$$p_i' = \mu p_i - \Delta p \quad (17)$$

здѣсь  $\mu$  — поправочный коэффициентъ — обычно отъ 0,95 до 0,85, причемъ первое значение относится къ случаю весьма малаго замедленія сгорания по сравненію съ теоретическими, а второе — къ случаю сильнаго замедленія сгорания.  $\Delta p$  можно считать отъ 0,15 до 0,25 at, а для быстроходныхъ двигателей съ самодѣйствующимъ впускнымъ клапаномъ — до 0,35 at.

По найденному изъ ур. (17) исправленному среднему индикаторному давлению легко подсчитать экономичность рабочаго процесса и расходъ топлива на

155) соответствуютъ ур. (13) и (13 bis), въ которыхъ введены поправки на измѣненіе характеристической постоянной  $R$  въ процессѣ сгорания. Всѣхъ этихъ поправокъ достаточно, чтобы результатъ подсчетовъ по ур. (12) и (13) или (13 bis) былъ близокъ къ дѣйствительнымъ соотношеніямъ, опредѣляемымъ изъ дѣйствительныхъ индикаторныхъ диаграммъ. Примѣры въ концѣ статьи покажутъ приемы внесенія поправокъ и близость результатовъ вычисленій къ дѣйствительности. Между тѣмъ подсчетъ по ур. (56), (58), (62) и (62a) при условіи постоянной теплоемкости газовъ даетъ совершенно несообразные съ дѣйствительностью результаты, и къ этимъ то результатамъ относятся соображенія, развитыя Гюльденеромъ на 183 стр. и упомянутыя въ примѣткѣ (1).

ъ cbm;

силочасъ. Для этого найдемъ индикаторную работу 1 kgmol или 1 kg топлива въ силочасахъ:  $N'_i = \frac{10000 p'_i V_i}{270000} = \frac{p'_i V_i}{27}$ . Опредѣлимъ  $V_i$ , для чего сперва найдемъ объемъ 1 kgmol при  $p_o$  и  $T_o$ . Для воздуха объемъ 1 kgmol при  $0^\circ C$  и 760 mm рт. ст. будетъ  $\frac{28,89}{1,293} = 22,34$  cbm; таковъ же будетъ объемъ 1 kgmol и для прочихъ газовъ. Приведенный къ  $p_o$  и  $T_o$  объемъ газовой kgmol будетъ  $- 22,34 \cdot \frac{1,0334}{p_o} \cdot \frac{T_o}{273} = 0,0846 \cdot \frac{T_o}{p_o}$  cbm. Объемъ  $V_i$  получимъ, дѣля приведенный къ  $p_o$  и  $T_o$  объемъ рабочей смѣси, относящейся къ 1 kgmol или 1 kg топлива, на коэффиціентъ подачи  $\eta_e$ :

$$V_i = 0,0846 \frac{T_o}{p_o} \cdot \frac{(1+L)}{\eta_e} \text{ для } 1 \text{ kgmol газа.} \quad (18)$$

$$V_i = 0,0846 \frac{T_o}{p_o} \cdot \frac{L'}{28,89 \cancel{\eta_e}} \text{ для } 1 \text{ kg жидкаго топлива.} \quad (18 \text{ bis})$$

работу  
работу  
раздѣ-  
замѣ-  
вленіе.

Подставляя эти значения  $V_i$  въ выражение для  $N'_i$  и бера обратную величину  $\frac{1}{N'_i}$  получимъ расходъ топлива въ kgmol или въ kg на индикаторный силочасъ.

Для газа переводимъ этотъ расходъ въ cbm при  $0^\circ C$  и 760 mm рт. ст., умножая его на 22,34. Получимъ  $C_i$  и  $C'_i$ , а дѣля ихъ на  $\eta_m$  найдемъ  $C_e$  и  $C'_e$ :

$$\left. \begin{aligned} C_i &= 7130 \frac{p_o}{T_o} \cdot \frac{\eta_e}{p'_i(1+L)} \\ C_e &= 7130 \frac{p_o}{T_o} \cdot \frac{\eta_e}{\eta_m p'_i(1+L)} \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{въ cbm при } 0^\circ C \text{ и 760 mm} \\ \text{рт. ст., для газа.} \end{array} \quad (19)$$

$$\left. \begin{aligned} C'_i &= 9220 \frac{p_o}{T_o} \cdot \frac{\eta_e}{p'_i L'} \\ C'_e &= 9220 \frac{p_o}{T_o} \cdot \frac{\eta_e}{\eta_m p'_i L'} \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{въ kg, для жидкаго топлива.} \\ (19 \text{ bis}) \end{array}$$

Для принятаго Гюльденромъ нормальнааго состоянія газа  $-15^\circ C$  и 735,5 mm рт. ст. коэффиціентъ 7130 въ ур. (19) измѣнится въ  $7130 \cdot \frac{288}{273} \cdot \frac{760}{735,5} \sim 7500$ .

Умножая  $C_i$  или  $C_e$  на теплопроизводительность 1 cbm  $H_u = \frac{H_u}{22,34}$ , а  $C'_i$  или  $C'_e$  на теплопроизводительность 1 kg  $- H_u$ , найдемъ:

$$\left. \begin{aligned} Q_i &= 320 \frac{p_o}{T_o} \cdot \frac{\eta_e H_u}{p'_i(1+L)} \\ Q_e &= 320 \frac{p_o}{T_o} \cdot \frac{\eta_e H_u}{\eta_m p'_i(1+L)} \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{для газа.} \\ (20) \end{array}$$

$$\left. \begin{aligned} Q'_i &= 9220 \frac{p_o}{T_o} \cdot \frac{\eta_e H_u}{p'_i L'} \\ Q'_e &= 9220 \frac{p_o}{T_o} \cdot \frac{\eta_e H_u}{\eta_m p'_i L'} \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{для жидкаго топлива} \\ (20 \text{ bis}) \end{array}$$

Для опредѣленія  $\eta_i$  или  $\eta_e$ , характеризующихъ экономичность рабочаго процесса и экономичность машины, дѣлимъ термический эквивалентъ 1 силочаса  $\frac{270000}{428} = 631$  cal на  $Q_i$  или  $Q_e$ , найдемъ:

$$\left. \begin{aligned} \eta_i &= 1,975 \frac{T_o}{p_o} \cdot \frac{p'_i(1+L)}{\eta_e H_u} \\ \eta_e &= 1,975 \frac{T_o}{p_o} \cdot \frac{\eta_m p'_i(1+L)}{\eta_e H_u} \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{для газа} \\ (21) \end{array}$$

(16)  
можно  
ящихъ  
аченія  
уска, а  
киваю-

(17)

первое  
вненію.  
можно  
ствую-  
давле-  
ива на

харак-  
, чтобы  
имъ со-  
ѣры въ  
еній къ  
гоянной  
ы, и къ  
упомя-

$$\left. \begin{array}{l} \eta_t = 0,0684 \frac{T_o}{p_o} \cdot \frac{p_i' L'}{\eta_e H_u} \\ \eta_m = 0,0684 \frac{T_o}{p_o} \cdot \frac{\eta_m p_i' L'}{\eta_e H_u} \end{array} \right\} \text{для жидкого топлива} \quad (21 \text{ bis})$$

Ур. (19) — (21 bis) имѣютъ очень простую форму; въ нихъ  $L$  или  $L'$  задаются при расчетѣ;  $\eta_e$  и  $\eta_m$  оцѣниваются, а  $H_u$  опредѣляется родомъ и составомъ топлива. По вышеуказанному аналитическому способу или построениемъ исправленной индикаторной діаграммы опредѣляется  $p_i'$ . Тогда расходъ топлива и расходъ тепла на силочасъ или экономичность машины прямо вычисляются изъ ур. (19) — (21 bis). Другими словами, въ двигателе внутренняго сгоранія достаточно опредѣлить исправленное среднее индикаторное давленіе, чтобы по нему и по оцѣниваемымъ для его опредѣленія величинамъ непосредственно подсчитать расходъ топлива и расходъ тепла на силочасъ или найти экономичность рабочаго процесса. Въ непосредственной связи средняго индикаторнаго давленія съ расходомъ топлива и тепла или съ экономичностью рабочаго процесса заключается крупное преимущество расчета двигателя внутренняго сгоранія относительно расчета, напримѣръ, паровой машины.

Изъ ур. (19) — (21 bis) вытекаютъ непосредственно слѣдующія общія заключенія:

1) расходъ топлива и расходъ тепла на силочасъ стоять въ обратномъ отношеніи къ среднему индикаторному давленію и къ количеству рабочей смѣси на единицу топлива и въ прямомъ отношеніи къ коэффициенту подачи;

2) экономичность рабочаго процесса или экономичность машины стоять въ прямомъ отношеніи къ среднему индикаторному давленію и къ количеству рабочей смѣси на единицу топлива и въ обратномъ отношеніи къ коэффициенту подачи.

Изъ заключеній (1) и (2) можно сравнить работу двухъ двигателей, дѣйствующихъ одинаковымъ топливомъ:

3) въ двухъ двигателяхъ, дѣйствующихъ одинаковымъ топливомъ, при одинаковомъ количествѣ рабочей смѣси на единицу топлива и одинаковомъ коэффициентѣ подачи расходъ топлива и расходъ тепла на силочасъ стоять въ обратномъ отношеніи къ среднему индикаторному давленію, а экономичность рабочаго процесса и экономичность машины — въ прямомъ отношеніи къ нему же;

4) въ двухъ двигателяхъ, дѣйствующихъ одинаковымъ топливомъ, при одинаковомъ среднемъ индикаторномъ давленіи и одинаковомъ коэффициентѣ подачи расходъ топлива и расходъ тепла на силочасъ стоять въ обратномъ отношеніи къ количеству рабочей смѣси на единицу топлива, а экономичность рабочаго процесса и экономичность машины стоять въ прямомъ отношеніи къ ней же.

Заключенія (3) и (4) позволяютъ весьма удобно сравнивать экономичность разныхъ двигателей. Для оцѣнки вліянія на экономичность разныхъ способовъ регулированія можно вывести изъ заключеній (1) и (2) еще слѣдующія:

5) при регулированіи наполненіемъ, съ постоянствомъ количества рабочей смѣси на единицу топлива, расходъ топлива и расходъ тепла на силочасъ стоять въ обратномъ отношеніи къ среднимъ индикаторнымъ давленіямъ и въ прямомъ къ коэффициенту подачи; экономичность рабочаго процесса и экономичность машины стоять въ обратномъ отношеніи къ коэффициенту подачи и въ прямомъ отношеніи къ среднему индикаторному давленію;

6) при регулированіи составомъ, съ постоянствомъ коэффициента подачи, расходъ топлива и расходъ тепла на силочасахъ стоять въ обратномъ отношеніи къ среднему индикаторному давленію и къ количеству рабочей смѣси на единицу топлива; экономичность рабочаго процесса и экономичность машины стоять въ прямомъ отношеніи къ нему.

Заключенія (5) и (6) позволяютъ легко оцѣнивать экономичность способовъ регулированія наполненіемъ и составомъ рабочей силы, помошью измѣреній  $p_i'$  и оцѣнки  $\eta_e$  или количества рабочей смѣси. Для изслѣдованія смѣшанаго регулированія нужна одновременная оцѣнка  $\eta_e$  и количества рабочей смѣси.

Уст  
достаточн  
цесса и  
точностью  
нія прост  
Этими во  
Опы  
чета, обус  
практичес  
Для  
(стр. 152—  
Темы  
въсъ общ  
зовъ. Выр  
мошью ха  
ристичес  
давленія

Вооб  
меньше ко  
нность опр  
особенно в  
возможны  
Оста  
смѣсь, за  
линдръ п  
ра и  $T_a$   
ходимъ  
отношеніе

По у  
зависитъ  
у на  $p_i$ , и  
двигателя  
Поэтому в  
щественн  
небольшу  
ко й, напр  
чѣмъ пол  
ду вкой,  
Пока

Гюльденро  
гораздо м

8) Ос  
генъ тѣ  
тория дали  
устарѣлому

Установленная выше схема расчета отличается простотой: формулы даютъ достаточно наглядно вліяніе всѣхъ факторовъ на экономичность рабочаго процесса и указываютъ ихъ взаимную связь. Точность расчета обусловливается точностью оцѣнки  $\eta_e$ ,  $T_a$ ,  $\gamma$ ,  $n_1$ ,  $n_2$  и  $\zeta$ . Удобство вычислений зависитъ отъ приданія простой формы ур. (4) и (4 bis) для разныхъ родовъ и составовъ топлива. Этими вопросами теперь и займемся.

Оцѣнка элементовъ расчета представляетъ наиболѣе важную часть всего расчета, обусловливающую его точность. Здѣсь разсмотримъ вкратцѣ основанія и практическія даннныя для оцѣнки  $\eta_e$ ,  $T_a$ ,  $\gamma$ ,  $n_1$ ,  $n_2$  и  $\zeta$ .

Для оцѣнки коэффициента подачи  $\eta_e$  можно пользоваться данными Гюльднера. (стр. 152—153).

Температура  $T_a$  опредѣляется помошью уравненія:  $G_e = G_g + G_r$ , где  $G_e$ —вѣсъ общей массы газовъ,  $G_g$ —вѣсъ рабочей смѣси, а  $G_r$ —вѣсъ остаточныхъ газовъ. Выражая эти вѣса чрезъ объемы и удѣльные объемы, опредѣляемые посредствомъ характеристическихъ уравнений и пренебрегая неодинаковостью характеристическихъ постоянныхъ, найдемъ:  $\frac{V P_a}{T_a} = \eta_e \frac{V_h P_o}{T_o} + \frac{V_c P_r}{T_r}$ . Отсюда, переводя давленія въ at и замѣняя  $\frac{V}{V_o}$  чрезъ  $\varepsilon$  и  $\frac{V_h}{V_o}$  чрезъ  $\varepsilon-1$ , найдемъ:

$$T_a = T_o \cdot \frac{\varepsilon p_a}{\eta_e (\varepsilon-1) p_o + \frac{T_o}{T_r} p_r} \quad (22)$$

Вообще  $T_a$  получается тѣмъ меньше, чѣмъ больше степень сжатія  $\varepsilon$ , чѣмъ меньшее количество остаточныхъ газовъ и вліяніе ихъ высокой температуры. Точность опредѣленія  $T_a$  зависитъ отъ точности оцѣнки  $\eta_e$  и  $T_r$  и не можетъ быть особенно высокой. Однако, измѣненія  $T_a$  лишь слабо вліяютъ на  $p_s$  или  $V_s$ , поэтому возможныя ошибки въ оцѣнкѣ  $T_a$  несущественны для точности расчета.

Остаточный коэффициентъ  $\gamma$  опредѣляется слѣдующимъ путемъ. Рабочая смѣсь, занимающая при  $p_o$  и  $T_o$  объемъ  $V_h \eta_e = V \left(1 - \frac{1}{\varepsilon}\right) \eta_e$ , занимаетъ въ цилиндрѣ при  $p_a$  и  $T_a$  объемъ  $V_a = V \left(1 - \frac{1}{\varepsilon}\right) \eta_e \cdot \frac{p_o}{p_a} \cdot \frac{T_a}{T_o}$ ; остаточные газы при  $p_a$  и  $T_a$  занимаютъ въ цилиндрѣ дополнительный объемъ  $V - V_a$ . Отсюда находимъ  $\gamma = \frac{V - V_a}{V_a}$ ; подставляя сюда значение  $V_a$  и замѣняя въ послѣднемъ отношеніе  $\frac{T_a}{T_o}$  помошью ур. (22), послѣ преобразованій получимъ:

$$\gamma = \frac{1}{\eta_e (\varepsilon-1)} \cdot \frac{p_r}{p_o} \frac{T_o}{T_r} \quad (23)$$

По ур. (23) легко подсчитать  $\gamma$ , при чѣмъ точность опредѣленія  $\gamma$ , какъ и  $T_a$  зависитъ отъ точности оцѣнки  $\eta_e$  и  $T_r$ , и не можетъ быть особенно высокой. Вліяніе  $\gamma$  на  $p_s$  или  $V_s$ , а также на экономичность и расходъ топлива въ современныхъ двигателяхъ не особенно велико, вслѣдствіе незначительности самой величины  $\gamma$ . Поэтому возможныя ошибки въ опредѣленіи  $\gamma$  въ своемъ конечномъ вліяніи несущественны. При  $\varepsilon$  отъ 3,5 до 7  $\gamma$  колеблется отъ 0,28 до 0,08, т.-е. представляеть небольшую дробь. Въ четырехтактныхъ двигателяхъ съ частичною продувкой, напр. въ газовомъ двигателе Гюльднера, надо брать  $\gamma$  значительно меньше, чѣмъ получается изъ ур. (23). Въ двухтактныхъ двигателяхъ съ полной продувкой, напр. въ двигателяхъ Кертинга, Охельхѣйзера, надо положить  $\gamma = 0$ .

Показатели  $n_1$  и  $n_2$  можно оцѣнить значительно точнѣе, чѣмъ указывается Гюльднеромъ. Колебанія этихъ величинъ въ нормально работающихъ двигателяхъ гораздо менѣе указываемыхъ Гюльднеромъ предѣловъ<sup>8)</sup>.

<sup>8)</sup> Основательные данные для оцѣнки  $n_2$  получены Хербергомъ (H e r b e r g. Untersuchungen über die Exponenten der Ausdehnungslinie im Gasmotorendiagramme). Данные Slaby, которые дали поводъ Гюльднеру указать значения  $n_2$  до 1,50 и даже до 1,70, относятся къ устарѣлому двигателю съ очень малымъ сжатіемъ и малой удѣльной мощностью и никакого

Можно полагать  $n_1$  около 1,35 и  $n_2$  отъ 1,28 до 1,35, беря меньшія значенія для большихъ сжатій, а большія для малыхъ сжатій, малыхъ нагрузокъ и замедленного хода. Ошибки въ оцѣнкѣ  $n_1$  измѣняютъ  $p_o$ ,  $p_s$  и  $T_s$ , но практически возможныя ошибки вліяютъ незначительно. Ошибки въ оцѣнкѣ  $n_2$  отзываются только на формѣ линіи расширения и на величинѣ среднаго индикаторнаго давленія практически возможныя величины ошибокъ въ нормально работающихъ двигателяхъ даютъ не особенно сильное вліяніе на  $p_s$ .

Коэффиціентъ выдѣленія тепла  $\zeta$  можно оцѣнивать для разныхъ случаевъ отъ 0,75 до 0,92. Въ этомъ коэффиціентѣ обнаруживается вліяніе трехъ факторовъ, 1) неполноты сгоранія, 2) теплоотдача стѣнкамъ въ періодъ видимаго сгоранія, 3) диссоціація газовъ и догаранія.

Потерю тепла отъ неполноты сгоранія можно оцѣнить для нормально работающихъ двигателей отъ 0,03 до 0,15 располагаемаго тепла  $H_u$ , въ зависимости отъ нагрузки двигателя и состава рабочей смѣси <sup>9)</sup>. Большия значенія потери надо

отношенія къ современнымъ двигателямъ не имѣютъ. Результаты опытовъ различныхъ авторовъ, сопоставленные Хербергомъ въ начаѣ его работы, даютъ  $n_2$  отъ 1,26 до 1,43. Собственныя многочисленныя опыты Херберга надъ лабораторнымъ газовымъ двигателемъ Кертинга въ 8  $HP_e$  выяснили зависимость  $n_2$  отъ многихъ факторовъ. Изъ этихъ опытовъ слѣдуетъ, что наиболѣе сильна зависимость  $n_2$  отъ степени сжатія:

$$\text{при } p_o = 16 - 10 - 8 - 6 - 4 - 3 \text{ at.} \\ n_2 = 1,285 \ 1,295 \ 1,305 \ 1,335 \ 1,395 \ 1,430.$$

Для силоового и свѣтильного газа  $n_2$  мало разнятся, но для второго вообще получаются нѣсколько выше; для бензина  $n_2$  еще нѣсколько выше. Колебанія  $n_2$  въ зависимости отъ нагрузки и состава газа оказались довольно слабыми, для свѣтильного газа въ предѣлахъ отъ 1,28 до 1,33, и лишь при очень малой нагрузкѣ, близкой къ холостому ходу,  $n_2$  повышалось до 1,38. Колебанія  $n_2$  въ зависимости отъ числа оборотовъ оказались нѣсколько сильнѣе, въ предѣлахъ отъ 1,34 до 1,39 при измѣненіи числа оборотовъ отъ 230 до 160.

Было бы неосмотрительно полученные Хербергомъ для одного двигателя данные цѣликомъ распространять на всякие двигатели и всякия условія работы. Однако, данные Херберга обнаруживаютъ хорошую закономѣрность всѣхъ измѣненій  $n_2$ , притомъ вполнѣ совпадающую съ теоретическими выводами. Вмѣстѣ съ тѣмъ, они даютъ лишь небольшая колебанія  $n_2$  для разныхъ случаевъ. Къ этимъ даннымъ можно присоединить подсчеты  $n_2$ , приводимые Клеркомъ (D. Clegg. Internal-combustion motors. Proceedings Inst. Civil Engineers. Vol. CLVIII) и дающіе  $n_2$  въ предѣлахъ отъ 1,43 до 1,20, а также результаты нѣкоторыхъ другихъ изслѣдований. На основаіи всѣхъ опытныхъ данныхъ можно заключить, что для практическихъ употребительныхъ давленій  $p_o$  отъ 6 до 16 at  $n_2$  колеблется отъ 1,35 до 1,28, т.-е. близко къ 1,30 и притомъ измѣненія  $n_2$  имѣютъ достаточно закономѣрный характеръ.

Для освѣщенія закономѣрности измѣненій  $n_2$  поучительно сопоставленіе  $n_2$  съ показателями адіабаты, которые при перемѣнной теплопемкости не постоянны, но зависятъ отъ температуры, уменьшаясь съ возрастаніемъ  $p_o$  и  $T_s$ . Для адіабаты получаются при выраженияхъ теплопемкостей  $c_v = c + \delta T$  и  $c_p = c_v + AR = c_1 + \delta T$  слѣдующія уравненія:

$$c \ln \frac{T_2}{T_1} + AR \ln \frac{v_2}{v_1} + \delta (T_2 - T_1) = 0 \quad (a)$$

$$c \ln \frac{P_2}{P_1} + c_1 \ln \frac{v_2}{v_1} + \frac{\delta}{R} (P_2 v_2 - P_1 v_1) = 0 \quad (b)$$

гдѣ значки 1—относятся къ начальному, а 2—къ конечному состоянію. При  $\delta = 0$  эти уравненія принимаютъ обычную форму для  $c_v$  и  $c_p = \text{const}$ . Ур. (a) ясно показываетъ вліяніе  $\delta$  и  $T$  на теченіе адіабаты расширения; чѣмъ сильнѣе зависимость теплопемкости отъ температуры и чѣмъ выше начальная температура расширения, тѣмъ отложе опускается адіабата. Для условій, отвѣчающихъ линіи расширения въ двигателяхъ, адіабата имѣть показатель, измѣняющійся отъ 1,25 до 1,28, т.-е. гораздо менѣйшій, чѣмъ принимается для случая постоянной теплопемкости—1,41—1,38, смотря по составу смѣси. Отсюда слѣдуетъ, что показатели  $n_2$ , найденные Хербергомъ, указываютъ именно на отдачу тепла при расширении, и вопросъ о „догаранії“ можетъ не возбуждаться для объясненія опытныхъ величинъ  $n_2$ , хотя нѣкоторые, а между ними и такой авторитетный моторостроитель, какъ Клеркъ, продолжаютъ объяснять теченіе линіи расширения догараніемъ (см. D. Clegg Internal-combustion motors). Увеличеніе размѣровъ цилиндра должно приближать  $n_2$  къ показателю адіабаты, ослабляя вліяніе стѣнокъ. Поэтому распространеніе данныхъ Херберга относительно  $n_2$  на болѣе крупные двигатели надежно.

<sup>9)</sup> Потеря отъ неполноты сгоранія изучена экспериментально проф. Е. Майеромъ (Meyer. Untersuchungen am Gasmotor. Mitteilungen über Forschungsarbeiten, V. d. I. Heft 8.) Майеръ нашелъ эту потерю отъ 1,9 до 15,4% для свѣтильного газа въ разныхъ случаяхъ и отъ 2,9 до 13,1% для силоового газа (выключая изъ послѣдней серии опытовъ одинъ съ очень большой величиной потери).

брать для бѣдныхъ смѣсей. Для особенно бѣдныхъ смѣсей, получающихся для малыхъ нагрузокъ при регулированіи составомъ эта потеря можетъ еще увеличиться. Увеличеніе этой потери, и при томъ значительное, возможно для случаевъ неправильного образованія смѣси, при плохихъ регулирующихъ устройствахъ.

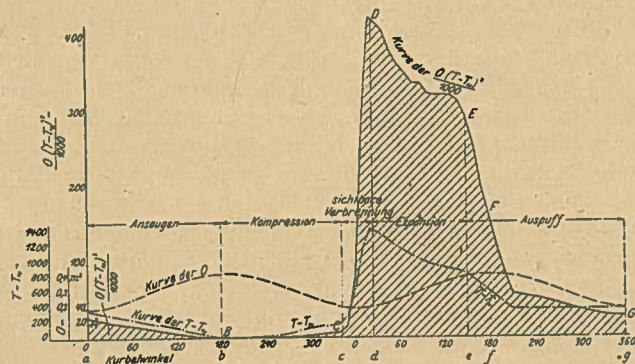
Потерю теплоотдачи стѣнкамъ въ периодъ видимаго сгоранія можно оцѣнить отъ 0,03 до 0,08 располагаемаго тепла  $H_u$ . Меньшія значенія слѣдуетъ брать для двигателей съ хорошими формами пространства сжатія и незначительной его поверхностью и для двигателей болѣе крупныхъ<sup>10)</sup>.

<sup>10)</sup> Потеря теплоотдачей изслѣдована проф. Е. Майеромъ въ работѣ, указанной въ примѣчаніи (9). Подсчеты теплоотдачи стѣнкамъ за разные периоды рабочаго процесса сдѣланы здѣсь въ предположеніи одинакового закона обмѣна тепла за всѣ периоды. Для сравнительно короткаго периода видимаго сгоранія теплоотдача подсчитана въ размѣрѣ 4,3—4,7% располагаемаго тепла, т.-е. является ничтожной, несмотря на малые размѣры экспериментальнаго двигателя, мощностью въ 8HP<sub>e</sub>. Съ увеличеніемъ размѣровъ двигателя эта ничтожная теплоотдача должна еще уменьшиться, ибо объемъ газа растутъ съ кубомъ линейного размѣра, отнимающія тепло поверхности—только съ квадратомъ его, а время видимаго сгоранія—растетъ медленнѣе, чѣмъ съ линейнымъ размѣромъ, благодаря повышению скорости поршня. Въ крупныхъ двигателяхъ относительная теплоотдача должна быть меньше чѣмъ въ мелкихъ. Довольно существенно вліяетъ на теплоотдачу и форма пространства сжатія. Наиболѣе благопріятной формой представляется простая цилиндрическая форма въ двигателяхъ Дизеля, Гульдмера или Охельхѣйзера; въ этихъ двигателяхъ величины теплоотдачи должны быть еще менѣе опредѣленныхъ Майеромъ.

Для подсчета теплоотдачи стѣнкамъ отъ газовъ во всѣ периоды рабочаго процесса Майеръ принимаетъ:

$$dq = c \cdot F \cdot \Delta T^n \cdot dt \quad (c)$$

въ этомъ уравненіи  $dq$  — теплоотдача за время  $dt$ ;  $F$  — поверхность стѣнокъ;  $\Delta T$  — разность температуръ газовъ и стѣнки,  $c$  — постоянный коэффициентъ. Извъ сравненія теплоотдачъ при высокой и низкой температурахъ сгоранія Майеръ нашелъ, что показатель  $n \sim 1,9$  и принялъ для надежности  $n = 2$ , т.-е. принялъ теплоотдачу пропорциональной квадрату разности температуръ. Считая  $t$  въ сек.,  $F$  въ см<sup>2</sup>, получаемъ  $c \sim 0,00004$  cal. (Майеръ даетъ для  $c$  значение въ 10 разъ больше: между тѣмъ, по его даннымъ для опыта 57 время сгоранія  $t = 0,033''$ ;  $F \sim 0,196$  см<sup>2</sup>;  $\Delta T^2$  среднее по времени для этого периода сгоранія  $\sim 94000$ ; отсюда  $q \sim 2,47$  cal., при принятомъ Майеромъ значеніи  $c = 0,00041$ ; тогда какъ въ результатѣ подсчета Майеръ даетъ  $q = 0,247$  cal.). Пользуясь ур. (c), можно подсчитывать теплоотдачу въ любой периодъ рабочаго процесса, при чѣмъ въ виду одновременной перемѣнности  $F$  и  $\Delta T$  по времени, проще вести подсчетъ графически, какъ дѣлаетъ Майеръ на фиг. 3.



Фиг. 3.

Зависимость теплоотдачи отъ квадрата разности температуръ, необычная для теплопередачи отъ газовъ, наводитъ на предположеніе, что въ периодѣ сгоранія доминируетъ не теплопередача, а лучеиспускание. Если это такъ, то теплоотдача въ периодѣ сгоранія должно еще сильнѣе зависѣть отъ температуры газовъ, чѣмъ принимаетъ Майеръ, и должна быть больше, чѣмъ получается по его расчетамъ. Зато для остальныхъ периодовъ зависимость теплоотдачи отъ  $\Delta T$  должна быть болѣе слабой, а величина теплоотдачи меньшей, чѣмъ получается по расчетамъ Майера. Совершенно надежно можно знать только общую теплоотдачу отъ газовъ стѣнкамъ—по теплу, уносимому охлаждающей водой. Въ раздѣленіи теплоотдачи на разные периоды остается известная гадательность.

Диссоциація газовъ и послѣдующее догараніе вліяютъ на коэффиціентъ  $\zeta$  нитожно. Нернстъ<sup>11)</sup> даетъ слѣдующія величины диссоциаціи  $H_2O$  и  $CO_2$  для различныхъ парціальныхъ давленій ихъ, считаемыхъ въ at, и для различныхъ абсолютныхъ температуръ.

Таблица В. Диссоциація водяного пара въ %.

$T$	10	1,0	0,1	0,01 at
1000	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$3,1 \cdot 10^{-5}$	$6,7 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$
1500	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{-2}$	$4,8 \cdot 10^{-2}$	0,11
2000	0,26	0,56	1,2	2,6
2500	1,6	3,4	7,2	14,7

Таблица С. Диссоциація углекислоты въ %.

$T$	10	1	0,1	0,01 at
1000	$9,8 \cdot 10^{-6}$	$2,1 \cdot 10^{-5}$	$4,5 \cdot 10^{-5}$	$9,8 \cdot 10^{-5}$
1500	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$4,0 \cdot 10^{-2}$	$8,6 \cdot 10^{-2}$	0,19
2000	0,74	1,6	3,5	7,3
2500	6,2	11,3	25,5	46,0

Изъ таблицъ В и С видно, что для  $T$  отъ 1500 до 2000° и для парціальныхъ давленій  $CO_2$  и  $H_2O$  отъ 3 до 1,5 at, обычныхъ для конца сгоранія въ двигателяхъ, диссоциація  $H_2O$ —менѣе 0,5% и диссоциація  $CO_2$ —менѣе 1,5% въ худшихъ случаяхъ. Эти величины настолько малы, что въ расчетъ ихъ не стоить вводить.

Кромѣ трехъ вышеразсмотрѣнныхъ факторовъ на коэффиціентъ  $\zeta$  вліяетъ въ двигателяхъ быстрого сгоранія еще одинъ—замедленіе сгоранія. Поправку на замедленіе сгоранія уменьшениемъ  $\zeta$  дѣлать было бы неудобно, во-первыхъ, въ силу гадательности и перемѣнности величины этой поправки, во-вторыхъ, въ силу необходимости вносить тогда въ линію расширенія обратную поправку. Поэтому  $p_s$  и  $T_s$  слѣдуетъ опредѣлять на основаніи вышеуказанныхъ данныхъ, не принимая во вниманіе замедленіе сгоранія, но разсматривать такъ опредѣленные величины  $p_s$  и  $T_s$  только какъ теоретическія. Для полученія исправленного давленія вспышки  $p_s$  надо брать его съ исправленной наклономъ линіи сгоранія и скругленіемъ верхняго угла индикаторной діаграммы. Поправки надо дѣлать, пользуясь образцами аналогичныхъ дѣйствительныхъ діаграммъ. По исправленному  $p_s'$  и соотвѣтственному  $V_s'$  помощью уравненія политропы расширенія легко подсчитать  $T_s'$ —исправленную конечную температуру сгоранія.

Не прибѣгая къ построению индикаторной діаграммы, слѣдуетъ вычислять исправленныя  $p_s'$  и  $T_s'$  изъ уравненія политропы расширенія, задаваясь объемомъ  $V_s' > V_c$ , соотвѣтственно предполагаемому замедленію сгоранія и наклону линіи впуска. На площадь діаграммы, на теченіе линіи расширенія, на расходъ топлива и

<sup>11)</sup> Z. d. V. d. I. 1905. Nernst. Physikalisch-chemische Betrachtungen über den Verbrennungsprozess in den Gasmotoren. Эти данные получены проф. Нернстомъ совмѣстно съ д-ромъ Вартенбергомъ, различными, взаимно контролирующими путьми и считаются Нернстомъ вполнѣ надежными. Съ установлениемъ этихъ данныхъ весь вопросъ объ диссоциаціи газовъ въ цилиндрѣ двигателя внутренняго сгоранія, игравшій ранѣе крупную роль въ разсмотрѣніяхъ рабочаго процесса, теряетъ всякое практическое значение и сходитъ со сцены.

эффективентъ  $\zeta$  и  $CO_2$  для различныхъ абсолют-

расходъ тепла, эта поправка имѣеть мало вліянія. Нѣкоторая гадательность этой поправки отражается преимущественно на возможныхъ ошибкахъ въ подсчетѣ  $p_s'$  и  $T_s'$ .

Таковы условія оцѣнки элементовъ расчета рабочаго процесса. Эти условія позволяютъ достигать практически достаточной точности всего расчета, какъ будеть видно изъ нижеприведенныхъ примѣровъ.

**Частные случаи расчета.** Разсмотримъ примѣненія общихъ формулъ къ различнымъ родамъ топлива и къ рабочимъ процессамъ двигателей быстрого и постепенного сгоранія. Сперва разсмотримъ примѣненіе къ двигателямъ быстрого сгоранія и къ важнѣйшему топливу—силовому газу. Составъ газа выражаемъ въ объемныхъ доляхъ, что равносильно счету въ kgmol. Обозначаютъ:

$CO$ — окись углерода;	въ доляхъ kgmol на 1 kgmol
$H_2$ — водородъ;	
$CH_4$ — метанъ;	
$CO_2$ — углекислота;	
$N_2$ — азотъ.	

По столбцу  $m_o$  таблицы  $A$  находимъ теоретически необходимое число kgmol кислорода  $- \frac{1}{2}(CO + H_2) + 2CH_4$ , а такъ какъ кислородъ составляетъ по объему 0,21 воздуха, то:

$$L_o = \frac{\frac{1}{2}(CO + H_2) + 2CH_4}{0,21} \quad (24)$$

На основаніи ур. (1) имѣемъ:

$$L = \frac{\alpha}{0,21} \left\{ \frac{1}{2}(CO + H_2) + 2CH_4 \right\} \quad (25)$$

$$\alpha = \frac{0,21L}{\frac{1}{2}(CO + H_2) + 2CH_4} \quad (26)$$

Изъ ур. (26) или (25) можно найти  $\alpha$ , если дано  $L$ , или наоборотъ.

По столбцамъ  $m_k$ ,  $m_w$  и  $M$  таблицы  $A$  получаемъ:

$$M'' = CO_2 + CO + CH_4 \quad (27)$$

$$M''' = H_2 + 2CH_4 \quad (28)$$

$$\Delta M = -\frac{1}{2}(CO + H_2) \quad (29)$$

Изъ соотношенія:  $M' + M'' + M''' = (1 + L) + \Delta M$  находимъ  $M'$  при помощи ур. (27), (28) и (29):

$$M' = (1 + L) - CO_2 - \frac{1}{2}(CO + H_2) - 3CH_4 \quad (30)$$

Подставляя значения  $M'$ ,  $M''$  и  $M'''$  изъ ур. (30), (27) и (28) въ ур. (4) и приводя всѣ члены относительно составныхъ частей газа, получимъ:

$$c_{mv} = (1 + L)c_v' + CO_2(c_v'' - c_v') + CO(c_v'' - \frac{1}{2}c_v') + H_2(c_v''' - \frac{1}{2}c_v') + CH_4(2c_v''' + c_v'' - 3c_v') \quad (31)$$

подставляя сюда числовыя значения  $c_v'$ ,  $c_v''$ ,  $c_v'''$  изъ ур. (3), получимъ окончательную формулу суммарной теплоемкости для рабочей смѣси на силовомъ газѣ:

$$c_{mv} = \left\{ 4,625(1 + L) + 2,15CO_2 - 0,16CO + 0,08H_2 + 6,61CH_4 \right\} + \\ + \left\{ 0,53(1 + L) + 1,36CO_2 + 1,09CO + 0,36H_2 + 2,63CH_4 \right\} \frac{7}{1000} \quad (32)$$

здѣсь  $c_{mv}$  представляетъ функцию действительного количества рабочаго воздуха и состава силового газа, а при данномъ составѣ легко приводится къ виду ур. (5).

Для теплопроизводительности 1 kgmol силового газа имѣемъ:

$$H_u = 68090 \cdot CO + 57670 \cdot H_2 + 190570 \cdot CH_4 \quad (33)$$

Изъ ур. (7) и (29) находится:

$$\beta = 1 - \frac{CO + H_2}{2(1 + L)(1 + \gamma)} \quad (34)$$

Въ ур. (32), (33) и (34) имѣются всѣ данные для расчета рабочаго процесса быстраго сгоранія при силовомъ газѣ по общимъ прѣемамъ.

Сдѣлаемъ измѣненія формулы для случаевъ доменнаго и свѣтильного газа.

Доменный газъ сверхъ частей, имѣющихъ въ силовомъ газѣ, содержить еще водяные пары, долю которыхъ въ kgmol обозначимъ чрезъ  $H_2O$ . Въ ур. (28) для  $M''$  войдетъ еще членъ  $+ H_2O$ , а въ ур. (30) для  $M'$  — членъ  $- H_2O$ . Соответственно этому въ ур. (31) войдетъ добавочный членъ  $+ H_2O (c_v''' - c_v')$ , а ур. (32) приметъ видъ:

$$c_{m_0} = \{4,625(1+L) + 2,15 CO_2 + 2,23 H_2O - 0,16 CO + 0,08 H_2 + 6,61 CH_4\} + \\ + \left\{0,53(1+L) + 1,36 CO_2 + 0,63 H_2O + 1,09 CO + 0,36 H_2 + 2,63 CH_4\right\} \frac{T}{1000} \quad (35)$$

Выраженія  $H_u$  и  $\beta$  сохранять видъ ур. (38) и (34).

Свѣтильный газъ сверхъ частей, имѣющихъ въ силовомъ газѣ, содержить еще тяжелые углеводороды состава  $C_n H_{2n}$ , преимущественно этиленъ  $C_2H_4$ , долю котораго въ kgmol обозначимъ чрезъ  $C_2H_4$ . Пользуясь таблицей  $A$ , найдемъ, что въ ур. (24) войдетъ въ числитель еще членъ  $+ 3 C_2H_4$ , который перейдетъ также въ ур. (25) и (26). Въ ур. (27) для  $M''$  и въ ур. (28) для  $M'''$  войдутъ еще члены  $+ 2 C_2H_4$ , а въ ур. (30) для  $M'$  войдетъ еще членъ  $- 4 C_2H_4$ . Соответственно этому въ ур. (31) войдетъ добавочный членъ:  $+ C_2H_4 (2c_v'' + 2c_v''' - 4c_v')$ , а ур. (32) приметъ видъ:

$$c_{m_0} = \{4,625(1+L) + 2,15 CO_2 - 0,16 CO + 0,08 H_2 + 6,61 CH_4 + 4,38 C_2H_4\} + \\ + \left\{0,53(1+L) + 1,36 CO_2 + 1,09 CO + 0,36 H_2 + 2,63 CH_4 + 3,99 C_2H_4\right\} \frac{T}{1000} \quad (36)$$

Въ ур. (33) для  $H_u$  войдетъ еще добавочный членъ  $+ 311990 C_2H_4$ , а ур. (34) для  $\beta$  сохранить свой видъ. При болѣе сложномъ составѣ свѣтильного газа ур. (36), (33) и (34) получать соответственныя дополненія, которыя нетрудно сдѣлать при помощи таблицы  $A$ .

Жидкое топливо (нефть, керосинъ, бензинъ, спиртъ и т. д.) или вспрыскиваніе воды въ рабочую смѣсь усложняетъ расчетъ рабочаго процесса двигателя быстраго сгоранія. Въ расчетъ надо брать 1 kg топлива, надо перевести  $C$  и  $H$  топлива въ kg—атомы и kgmol и опредѣлять  $M''$  и  $M'''$  по двумъ нижнимъ строкамъ таблицы  $A$ . Количество воздуха задается или вѣсомъ  $L'$  на 1 kg топлива или относительнымъ количествомъ  $\alpha$  и легко можетъ быть переведено въ kgmol. Испареніемъ нѣкоторой части топлива при подсчетѣ общей массы газовъ и коэффициента  $\beta$  можно пренебречь, какъ указано въ начальѣ статѣи.

Кислородъ топлива, представляющій иногда, напримѣръ въ спиртѣ, значительную часть топлива, надо считать соединеннымъ съ соответственной частью водорода въ конституціонную воду. Число kgmol конституціонной воды получается дѣленіемъ вѣсовой части кислорода въ 1 kg топлива на 16. На ряду съ конституціонной водой въ рабочей смѣси можетъ быть вода гигроскопическая, вспрынутая въ нее извѣнѣ или содержащаяся въ топливѣ, напримѣръ въ спиртѣ. Число kgmol гигроскопической воды найдется дѣленіемъ на 18 ея вѣсовой части, приходящейся на 1 kg топлива. Переведенная такимъ образомъ въ kgmol вода войдетъ въ выраженіе для  $c_{m_0}$  совершенно такъ же, какъ она введена для доменнаго газа.

Тепло парообразованія топлива или гигроскопической воды слѣдовало бы вычесть изъ  $H_u$ . Вслѣдствіе невозможности точно оцѣнить это тепло, можно, не дѣляя этой поправки, взамѣнъ того нѣсколько уменьшить коэффиціентъ  $\zeta$ .

На основаніи всѣхъ этихъ указаній весьма просто перестроить выведенныя раньше формулы для случая жидкаго топлива. Однако здѣсь дѣлать этого не будемъ, относя примѣненіе выводовъ къ практическимъ болѣе важному случаю сгоранія жидкаго топлива при постоянномъ давленіи.

Рассмотримъ приложеніе выводовъ къ расчету двигателя постепеннаго сгоранія при работе нефтью. Составъ нефти выражимъ въ вѣсовыхъ доляхъ.

$C$  — углеродъ  
 $H$  — водородъ  
 $O$  — кислородъ

} въ вѣсовыхъ доляхъ  
} на 1 kg топлива.

ског

Назъ у

(41) и

иначе

(4 bis)

или:

Подстѣ  
тельну

или:

духа и  
состав

боче

или

Въ двухъ нижнихъ строкахъ таблицы  $A$  по столбцу  $m_o$  находимъ теоретическое необходимое число kgmol кислорода  $- \left( \frac{C}{12} + \frac{H - 0/8}{4} \right)$  и далѣе:

$$L_o = \left( \frac{C}{12} + \frac{H - 0/8}{4} \right) \frac{1}{0,21} \quad (37)$$

$$L = \frac{\alpha}{0,21} \left( \frac{C}{12} + \frac{H - 0/8}{4} \right) = \frac{L'}{28,89} \quad (38)$$

$$\alpha = \frac{L'}{11,5 [C + 3 (H - 0/8)]} \quad (39)$$

Изъ ур. (39) или (38) находимъ  $\alpha$ , если дано  $L'$ , или наоборотъ.

По столбцамъ  $m_k$ ,  $m_{lo}$  и  $\Delta m$  таблицы  $A$  получаемъ:

$$M'' = \frac{C}{12} \quad (40)$$

$$M''' = \frac{H}{2} \quad (41)$$

$$\Delta M = + \frac{H}{4} \quad (42)$$

Изъ соотношения:  $M' + M'' + M''' = \frac{L'}{28,89} + \Delta M$  находимъ  $M'$  при помощи ур. (40), (41) и (42):

$$M' = \frac{L'}{28,89} - \left( \frac{C}{12} + \frac{H}{4} \right) \quad (43)$$

иначе помошью ур. (38) находимъ:

$$M' = \left[ \frac{\alpha}{0,21} - 1 \right] \left( \frac{C}{12} + \frac{H}{4} \right) - \frac{\alpha o}{1,68} \quad (43 \text{ bis})$$

Подставляя значения  $M'$ ,  $M''$  и  $M'''$  изъ ур. (43) или (43 bis), (40) и (41) въ ур. (4 bis) и приводя всѣ члены относительно составныхъ частей нефти, получимъ:

$$c_{mp} = \left\{ \frac{L'}{28,89} c_p' + C \left( \frac{c''_p - c'_p}{12} \right) + H \left( \frac{2c'''_p - c'_p}{4} \right) \right\} \quad (44)$$

или:

$$c_{mp} = \left\{ \left( \frac{\alpha}{0,21} - 1 \right) \frac{c'_p}{12} + \frac{c''_p}{12} \right\} C + \left\{ \left( \frac{\alpha}{0,21} - 1 \right) \frac{c'_p}{4} + \frac{c'''_p}{4} \right\} H - \frac{\alpha c'_p o}{1,68} \quad (44 \text{ bis})$$

Подставляя сюда числовыя значения  $c_p'$ ,  $c_p''$  и  $c_p'''$  изъ ур. (3 bis), получимъ окончательную формулу суммарной теплоемкости рабочей смѣси на нефти:

$$c_{mp} = \left\{ 0,229 L' + 1,179 C + 2,76 H \right\} + \left\{ 0,018 L' + 0,113 C + 0,150 H \right\} \frac{T}{1000} \quad (45)$$

или:

$$c_{mp} = \left\{ (2,62 \alpha + 0,179) C + (7,86 \alpha + 0,557) H - 3,93 \alpha \cdot o \right\} + \\ + \left\{ (0,213 \alpha + 0,113) C + (0,690 \alpha + 0,157) H - 0,320 \cdot o \right\} \frac{T}{1000} \quad (45 \text{ bis})$$

Здѣсь  $c_{mp}$  представляетъ функцию вѣсового дѣйствительного количества воздуха или относительного количества воздуха и состава топлива, а при данномъ составѣ легко приводится къ виду ур. (5).

Теплопроизводительность 1 kg топлива дается непосредственно въ формѣ рабочей теплопроизводительности.

Изъ ур. (7 bis) и (42) находимъ:

$$\beta = 1 + \frac{7,22 H}{L'(1 + \gamma)} \quad (40)$$

или

$$\beta = 1 + \frac{0,21}{\alpha} \cdot \frac{1}{\left( \frac{C}{3H} + 1 - \frac{o}{8H} \right) (1 + \gamma)} \quad (46 \text{ bis})$$

Рассмотримъ еще вліяніе вдуванія топлива добавочнымъ воздухомъ, по способу Дизеля на коэффициентъ  $\beta$ . Пусть добавочный воздухъ составляютъ долю  $\nu$  относительно общаго количества воздуха  $L'$ ; тогда въ цилиндрѣ предъ началомъ сгоранія находится  $\frac{L'}{28,89} (1 - \nu)$  kgmol, а послѣ сгоранія:  $\left( \frac{L'}{28,89} + \Delta M \right)$  kgmol. Отсюда, отбрасывая малыя величины, найдеть для  $\beta$  приближительное выражение:

$$\beta \sim 1 + \nu + \frac{7,22 H}{L'(1 + \nu)} \quad (47)$$

Коэффициентъ  $\nu$  можетъ быть приближительно опредѣленъ по размѣру воздушного насоса двигателя.

Формулы выведенныя для нефти годятся также для бензина, керосина и спирта.

Неполнота сгоранія въ сущности должна внести нѣкоторыя измѣненія въ выведенныя формулы. Однако, эти измѣненія будутъ довольно гадательны, ибо невозможно установить въ отдельности неполноту сгоранія всѣхъ соотавныхъ частей топлива. Вмѣсто этихъ измѣненій надо компенсировать ихъ вліяніе назначеніемъ соответственнаго коэффициента  $\zeta$ , что и указано въ предыдущемъ отдѣлѣ <sup>12)</sup>.

Теперь мы располагаемъ всѣми необходимыми данными для расчета рабочаго процесса двигателей быстрого и постепенного сгоранія. Примѣненіе этихъ данныхъ къ общимъ уравненіямъ расчета, развитымъ во второмъ отдѣлѣ, показемъ ниже на примѣрахъ.

Примѣры расчета помогутъ уяснить весь ходъ расчета, внесеніе поправокъ въ вычисленные результаты и разные случаи оцѣнки элементовъ расчета.

**Задача I.** Сдѣлать повѣрочный расчетъ рабочаго процесса экспериментальнаго двигателя въ опыте № 36а на силовомъ газѣ (M e u e g. Untersuchungen am Gasmotor).

Сперва найдемъ  $T_a$  и  $\gamma$ ; для даннаго опыта имѣемъ  $\varepsilon = 4,98$ ;  $\eta_e = 0,82$ ; оцѣниваемъ  $p_a = 0,9$  at;  $p_a = 1,03$  at;  $p_r = 1,05$  at;  $T_o = 290^\circ$ ;  $T_r = 800^\circ$ . Изъ ур. (22) имѣемъ:

$$T_a = 290 \cdot \frac{4,98 \cdot 0,9}{0,82 (4,98 - 1) 1,03 + \frac{290}{800} \cdot 1,05} = 290 \cdot \frac{4,48}{3,74} = 348^\circ$$

$$\text{Изъ ур. (23) имѣемъ: } \gamma = \frac{1}{0,82 (4,98 - 1)} \cdot \frac{1,05 \cdot 290}{1,03 \cdot 800} = 0,11.$$

Далѣе подсчитаемъ  $c_{mv}$ ,  $H_u$  и  $\beta$ . По анализу составъ силового газа слѣдующій:  $CO = 0,25$ ;  $H_2 = 0,13$ ;  $CH_4 = 0,01$ ;  $CO_2 = 0,06$ ;  $N_2 = 0,55$ . Изъ опыта найдено, что дѣйствительное количество воздуха составляетъ 1,235 см<sup>3</sup> на 1 см<sup>3</sup> газа, т.-е.  $L = 1,235$ . Отсюда по ур. (32) имѣемъ:  $c_{mv} = \{ 4,625 (1 + 1,235) + 0,165 \} + \{ 0,53 (1 + 1,235) + 0,43 \} \frac{T}{1000} = = 10,50 + 1,61 \frac{T}{1000}$ . По ур. (33) находимъ:  $H_u = 26425$  cal. Теплопроизводительность 1 см<sup>3</sup> газа при  $0^\circ C$  и 760 mm рт. ст.  $H'_u = \frac{26425}{22,34} = 1184$  cal—близко сходится съ опредѣ-

<sup>12)</sup> Поправки на неполноту сгоранія можно представить въ слѣдующемъ видѣ. Обозначая чрезъ  $y'$  долю несгорѣвшаго метана, чрезъ  $y''$ —несгорѣвшей окиси углерода, а чрезъ  $y'''$ —несгорѣшаго водорода, мы должны въ ур. (29), (30), (31), (32), (33) и (34) взять: вместо  $CH_4 - CH_4 (1 - y')$ , вместо  $CO - CO (1 - y'')$ , вместо  $H_2 - H_2 (1 - y''')$ . Въ случаѣ образования сажи при жидкому топливѣ, при чмъ ея доля относительно всего углерода будетъ  $y$ , надо взять во всѣхъ уравненіяхъ вместо  $\frac{C}{12} - \frac{C}{12} (1 - y)$ . На дѣлѣ лишь весьма тонкій анализъ продуктовъ сгоранія позволяетъ опредѣлить соответственныя доли несгорѣвшаго топлива, но и при этомъ раздѣльное опредѣлѣніе ихъ весьма затруднительно, почему довольноются опредѣлѣніемъ общей доли несгорѣвшаго углерода и несгорѣшаго водорода. Поэтому доли  $y$ ,  $y'$ ,  $y''$  и  $y'''$  могли бы быть оцѣнены только гадательно, что лишаетъ поправку практическаго значенія.

ленно:

(34) на

грузки  
теля п

= 7,86

ур. (10

0,85 .

или

22460 +

въ скоб

скобки

= 0,25 И  
дикатор  
нія найНаблю  
но тако  
V<sub>s</sub> можT<sub>s</sub>: lg

весъма

д.

d<sub>e</sub> = 23,4  
8,06

П.

Оцѣнива  
имѣемъ:  
p' = 4,91

ленной въ калориметрѣ Юнкерса теплопроизводительностью  $H_u' = 1168$  cal. По ур. (34) находимъ:  $\beta = 1 - \frac{0,25 + 0,13}{2(1 + 1,235)(1 + 0,11)} \sim 0,92$ .

Оцѣниваемъ:  $n_1 = 1,35$  — нормально;  $n_2 = 1,30$  — нормально для полной нагрузки на силовомъ газѣ при  $p_e \sim 8$  at;  $\xi = 0,85$  — нормально для небольшого двигателя при полной нагрузкѣ.

(47) Для процесса сжатія имѣемъ изъ (ур. (9)):  $\lg \frac{p_e}{p_a} = 1,35 \lg 4,98 = \lg 8,73$ ;  $p_e = 0,9 \cdot 8,73 = 7,86$  at — почти совпадаетъ съ наблюденной изъ опыта величиной  $p_e = 7,8$  at. Изъ ур. (10) находимъ:  $\lg \frac{T_e}{T_a} = 0,35 \lg 4,98 = \lg 1,75$ ;  $T_e = 348 \cdot 1,75 = 609^{\circ}$ .

Для процесса сгоранія изъ ур. (12) имѣемъ:

$$0,85 \cdot 26425 + \left(1 + \frac{0,11}{0,92}\right) \left(10,50 + 1,61 \cdot \frac{609}{1000}\right) 609 = \left(1 + \frac{0,11}{0,92}\right) \left(10,50 + 1,61 \cdot \frac{T_s}{1000}\right) T_s;$$

или

$$22460 + 1,12 \cdot 11,48 \cdot 609 = 1,12 \left(10,50 + 1,61 \cdot \frac{T_s}{1000}\right) T_s; \text{ или: } 30290 = \left(11,76 + 1,80 \cdot \frac{T_s}{1000}\right) T_s.$$

Это уравненіе удобно рѣшить послѣдовательными приближеніями; положимъ въ скобкахъ правой части  $T_s = 2000^{\circ}$ ; тогда  $T_s = \frac{30290}{11,76 + 1,80 \cdot \frac{2000}{1000}} = 1973^{\circ}$ ; подставивъ скобки  $T_s = 1973^{\circ}$ , найдемъ очень близкое къ настоящему значеніе:

$$T_s = \frac{30290}{11,76 + 1,80 \cdot \frac{1973}{1000}} \sim 1976^{\circ}.$$

По ур. (13) найдемъ:  $p_s = 0,92 \cdot 7,86 \cdot \frac{1976}{609} \sim 23,4$  at

Сюда надо внести поправку на замедленное сгораніе. Здѣсь  $V_s = \frac{V_h}{\varepsilon - 1} = 0,25 V_h$ . Можно положить  $V_s' - V_s = 0,07 V_h$  въ соотвѣтствіи съ аналогичными индикаторными діаграммами; тогда  $V_s' = 0,32 V_h$ . Изъ уравненія политропы расширѣнія найдемъ:

$$\lg \frac{p_s'}{p_s} = 1,30 \lg \frac{0,32}{0,25} = \lg 1,38; p_s' = \frac{23,4}{1,38} = 16,9 \text{ at.}$$

Наблюденная изъ опыта величина  $p_s' = 16,6$  at — почти совпадаетъ съ вычисленной, но такое близкое совпаденіе надо признать случайнымъ, ибо небольшое измѣненіе  $V_s'$  можетъ внести разницу  $p_s'$  въ 2—3 at. Изъ уравненія политропы имѣемъ для  $T_s'$ :  $\lg \frac{T_s'}{T_s} = 0,30 \lg \frac{0,32}{0,25} = \lg 1,08$ ;  $T_s' = \frac{1976}{1,08} \sim 1820^{\circ}$ , или  $t_s' \sim 1550^{\circ}\text{C}$  — представлять весьма вѣроятный результатъ.

Для процесса расширѣнія находимъ изъ ур. (14):  $\lg \frac{p_t}{p_s} = 1,30 \lg 4,98 = \lg 8,06$ ;  $d_t = \frac{23,4}{8,06} \sim 2,9$  at;  $\lg \frac{T_t}{T_s} = 0,30 \lg 4,98 = \lg 1,62$ ;  $T_t = \frac{1976}{1,62} = 1220^{\circ}$  или  $\sim 950^{\circ}\text{C}$ .

По ур. (16) опредѣляемъ:

$$p_t = \frac{7,86}{4,98 - 1} \left\{ \frac{23,4}{7,86} \cdot \frac{1 - \frac{1}{4,980,80}}{0,30} - \frac{1 - \frac{1}{4,980,85}}{0,35} \right\}$$

$$\text{или } p_t = \frac{7,86}{3,98} \left( \frac{2,34}{7,86} \cdot 1,28 - 1,22 \right) = 5,14 \text{ at.}$$

Оцѣниваемъ  $\mu = 0,87$  и беремъ  $\Delta p = 0,17$  at — согласно опыту, тогда изъ ур. (17) имѣемъ:  $p_t' = 0,87 \cdot 5,14 - 0,17 = 4,30$  at, очень близко къ наблюденной величинѣ  $p_t' = 4,31$  at.

Опредѣляемъ изъ ур. (19) расходъ газа:

$$C_i = 7130 \cdot \frac{1,03}{290} \cdot \frac{0,82}{4,30(1+1,235)} \sim 2,15 \text{ см.}$$

весьма близко къ наблюденному расходу 2,11 см. Изъ ур. (20) находимъ:  $Q_i \sim 2545$  cal—довольно близко къ опредѣленной изъ опыта величинѣ  $Q_i = 2470$  cal.

Въ общемъ расчетъ даетъ удовлетворительное согласованіе съ опытными данными при принятой оцѣнкѣ всѣхъ элементовъ, далекой отъ натяжекъ или искусственности.

**Задача II.** Расчитать рабочій процессъ [газового двигателя Гюльднера] номинально въ 100 к.с. при полной нагрузкѣ на силовомъ газѣ.

Положимъ  $p_c = 12$  at; тогда, оцѣнивъ  $\eta_1 = 1,35$  и  $p_a = 0,9$  at, найдемъ изъ ур. (9)  $\alpha = 6,82$ . Оцѣнимъ  $\eta_e = 0,9$  въ виду частичной продувки,  $p_e = 1,0$  at;  $p_r = 1,05$  at;  $T_o = 290^\circ$ ;  $T_r = 800^\circ$ .

Находимъ  $T_a$  и  $\gamma$ ; изъ ур. (22) имѣемъ  $T_a = 316^\circ$ ; изъ ур. (23) получимъ  $\gamma = 0,07$ . Вслѣдствіе частичной продувки двигателя примемъ  $\gamma = 0,04$ .

Далѣе подсчитаемъ  $c_{mo}$ ,  $H_u$  и  $\beta$ . Пусть составъ коксоваго силового газа будеть:  $H_2 = 0,070$ ;  $CH_4 = 0,020$ ;  $CO = 0,276$ ;  $CO_2 = 0,048$ ;  $N_2 = 0,586$ . Положимъ для полной нагрузки  $\alpha = 1,08$ , тогда изъ ур. (25) находимъ  $L = 1,10$ . Изъ ур. (32) найдемъ

$$c_{mo} = \left\{ 4,625(1+1,10) + 0,197 \right\} + \left\{ 0,53(1+1,10) + 0,44 \right\} \frac{T}{1000} = 9,90 + 1,55 \cdot \frac{T}{1000}. \text{ По ур.}$$

(34) находимъ  $H_u = 26640$  cal;  $H_u' = 1193$  cal/см.<sup>3</sup> По ур. (34) находимъ  $\beta = 0,92$ .

Оцѣниваемъ  $\eta_2 = 1,28$  и  $\zeta = 0,90$ , соотвѣтственно хорошимъ формамъ пространства сжатія и довольно крупному размѣру двигателя.

Для процесса сжатія ур. (10) находимъ  $T_s = 620^\circ$ . Для процесса сгоранія изъ ур. (12) имѣемъ:  $0,90 \cdot 26640 + \left( 1 + \frac{0,04}{0,92} \right) \left( 9,90 + 1,55 \cdot \frac{620}{1000} \right) \cdot 620 =$

$$\left( 1 + \frac{1,04}{0,92} \right) \left( 9,90 + 1,55 \cdot \frac{T_s}{1000} \right) T_s$$

или  $30980 = \left( 10,30 + 1,81 \cdot \frac{T_s}{1000} \right) T_s$ . Послѣдовательными приближеніями найдемъ  $T_s \sim 2230^\circ$ . Изъ ур. (13) находимъ  $p_s = 0,92 \cdot 12 \cdot \frac{2230}{620} \sim 40$  at.

Внося поправку на замедленіе сгоранія, беремъ  $V'_s - V_c = 0,03 V_h$ ;  $V_e = 0,172 V_h$ ; отсюда  $p_s' = \frac{40}{1,22} \sim 33$  at—довольно близко къ давленію вспышки на дѣйствительныхъ діаграммахъ двигателя Гюльднера при полной нагрузкѣ. Изъ уравненія политропы расширенія находимъ  $T_s' \sim 2120^\circ$  или  $t_s' \sim 1850^\circ C$ . Для процесса расширенія находимъ изъ ур. (14) и (15)  $p_e \sim 3,4$  at;  $T_e \sim 1315^\circ$  или  $t_e \sim 1040^\circ C$ .

По ур. (16) опредѣляемъ

$$p_t = \frac{12}{6,82 - 1} \left\{ \frac{40}{12} \cdot \frac{1 - \frac{1}{6,82^{0,28}}}{0,28} - \frac{1 - \frac{1}{6,82^{0,35}}}{0,35} \right\} = 7,5 \text{ at.}$$

Полагаемъ  $\mu = 0,95$  въ виду хорошихъ очертаній діаграммы и  $\Delta p = 0,15$  at; тогда изъ ур. (17)  $p_t' \sim 7,0$  at—нѣсколько ниже получаемаго въ двигателе Гюльднера на силовомъ газѣ при полной нагрузкѣ.

По ур. (19) и (20) находимъ:

$C_i = 7130 \cdot \frac{1,0}{290} \cdot \frac{0,90}{7,0 \cdot 2,1} \sim 1,48 \text{ см.}$  и  $Q_i \sim 1760$  cal. Пусть  $\eta_m \sim 0,85$ , тогда  $Q_e \sim 2075$  cal. Эти цифры довольно близко подходять къ получавшимся изъ опыта.

Для определенія размѣровъ двигателя предположимъ, что полная нагрузка = 125 к.с.; число оборотовъ  $n = 160$ ; а  $\frac{S}{D_l} = 1,47$ . Тогда найдемъ  $D = 47,2$  см;  $S \sim 69,5$  см—вполнѣ близко къ выполняемымъ дѣйствительно размѣрамъ— $D = 47,5$  см и  $S = 70$  см.

**Задача III.** Расчитать рабочий процесс двухтактного доменно-газового двигателя Охельхэйзера при полной нагрузке.

Положим  $p_0 = 11$  at. Оценим  $\eta_1 = 1,35$  — нормально и  $p_a = 1,0$  at — в виду повышения давления всасывания насосами при двухтактном процессе; по ур. (9) найдем  $\varepsilon = 5,90$ .

Оценим  $\eta_e = 1,05$ ;  $p_e = 1,05$  at и  $T_e = 310^\circ$ , в виду двухтактности рабочего процесса и полной продувки, причем  $p_e$  и  $T_e$  относятся к предварительно сжатой рабочей смеси в резервуаре; затемь возьмем, какъ обычно  $p_r = 1,05$  at и  $T_r = 700^\circ$ .

В ур. (22) в виду полной продувки надо положить соответствующий остаточный газамъ член  $\frac{T_0}{T_r} = 0$ ; находим  $T_a = 334^\circ$ . В виду полной продувки можно положить  $\gamma = 0$ .

Далѣе подсчитаем  $c_{mp}$ ,  $H_u$  и  $\beta$ . Пусть составъ доменного газа будетъ:  $H_2 = 0,030$ ;  $CH_4 = 0,005$ ;  $CO = 0,260$ ;  $H_2O = 0,050$ ;  $CO_2 = 0,095$ ;  $N_2 = 0,560$ . Находимъ по ур. (24)  $L_0 = 0,74$  и полагаем  $L = 1,10$ . Изъ ур. (35) найдемъ:

$$c_{mp} = \left\{ 4,625 (1 + 1,10) + 0,308 \right\} + \left\{ 0,53 (1 + 1,10) + 0,467 \right\} \frac{T}{1000} = 10,02 + 1,68 \cdot \frac{T}{1000}.$$

Изъ ур. (33) найдемъ  $H_u = 20385$  cal и  $H'_u = 910$  cal/cbm. Изъ ур. (34) найдемъ  $\beta \sim 0,93$ .

Оцениваемъ  $\eta_2 = 1,30$  и  $\zeta = 0,90$ , компенсируя въ  $\zeta$  значительную неполноту сгоранія доменныхъ газовъ очень малой теплоотдачей стѣнкамъ въ виду наивыгоднѣйшей формы пространства сжатія и крупныхъ размѣровъ двигателя.

Для процесса сжатія изъ ур. (10) находимъ  $T_e = 620^\circ$ . Для процесса сгоранія изъ ур. (21) имѣмъ:  $0,90 \cdot 20385 + 1 \cdot \left( 10,02 + 1,68 \cdot \frac{620}{1000} \right) 620 = 1 \cdot \left( 10,02 + 1,68 \cdot \frac{T_s}{1000} \right) T_s$  или:  $25190 = \left( 10,02 + 1,68 \cdot \frac{T_s}{1000} \right) T_s$ . Находимъ  $T_s \sim 1900^\circ$ . Изъ ур. (13) найдемъ  $p_s = 0,93 \cdot 11 \cdot \frac{1900}{620} \sim 31,3$  at.

Внося поправку на замедленное сгораніе, беремъ  $V'_s - V_s \sim 0,05 V_s$ ;  $V_s = 0,204 V_h$ ; отсюда  $p'_s = \frac{31,3}{1,33} \sim 23,5$  at — довольно хорошо согласуется съ обычнымъ. Находимъ изъ уравненія политропы расширения  $T'_s \sim 1780^\circ$  или  $t'_s \sim 1510^\circ C$ . Для процесса расширения находимъ изъ ур. (14) и (15)  $p_s \sim 3,0$  at и  $T_e \sim 1120^\circ$  или  $t_e \sim 850^\circ C$ .

По ур. (16) опредѣляемъ

$$p_t = \frac{11}{5,90 - 1} \left\{ \frac{1 - \frac{1}{5,90^{0,80}}}{0,30} - \frac{1 - \frac{1}{5,90^{0,35}}}{0,35} \right\} = 5,8 \text{ at.}$$

Полагаемъ  $\mu = 0,90$  въ виду значительного замедленія сгоранія и большого предваренія выпуска и при  $\Delta p = 0$ , получимъ изъ ур. (17):  $p_t' \sim 5,20$  at весьма близко къ получаемъ изъ опыта при полной нагрузкѣ.

Изъ ур. (19) и (20) найдемъ  $C_i \sim 2,09$  cbm и  $Q_i \sim 1900$  cal, причемъ расходъ тепла и расходъ топлива отнесены къ индикаторной работе цилиндра безъ вычета работы воздушного и газового насосовъ. Эти цифры довольно близки къ дѣствительнымъ.

**Задача IV.** Расчитать рабочий процесс двигателя Дизеля при полной нагрузкѣ на нефти.

Полагаемъ  $\varepsilon = 15,4$ . Оцениваемъ  $p_a = 0,87$  at, на 3% меньше истинного, принимая во вниманіе питаніе воздушного насоса изъ рабочаго цилиндра, уменьшающее сжатіе въ послѣднемъ. Затемъ оцениваемъ  $p_0 = 1,0$  at;  $p_r = 1,05$  at,  $T_0 = 290^\circ$  и  $T_r = 800^\circ$ .

Оцениваемъ  $\eta_e = 0,85$ . По ур. (22) находимъ  $T_a \sim 296^\circ$  — вѣроятно нѣсколько меньше истинного значения. По ур. (23) находимъ  $\gamma \sim 0,03$ .

Далѣе подсчитываемъ  $c_{mp}$  и  $\beta$ . Пусть составъ нефти будетъ:  $C = 0,86$ ;  $H = 0,13$

и  $\sigma = 0,01$  при  $H_u = 10000 \text{ cal/kg}$ . Полагаем  $L' = 25$ , что по ур. (39) дает  $\alpha \sim 1,74$ —нормально для полной нагрузки. Изъ ур. (45) находимъ:

$$c_{mp} = \left\{ 0,229 \cdot 25 + 0,513 \right\} + \left\{ 0,018 \cdot 25 + 0,12 \right\} \frac{T}{1000} = 6,24 + 0,57 \frac{T}{1000}.$$

Оцѣниваемъ  $\nu = 0,03$  и по ур. (47) находимъ  $\beta \sim 1,07$ .

Оцѣниваемъ  $n_1 = 1,35$  и  $n_2 = 1,35$ —соответственно меньшей зависимости теплоемкости рабочей смѣси отъ температуры, благодаря болѣе бѣдной смѣси чѣмъ въ газовомъ двигателе. Оцѣниваемъ  $\zeta = 0,92$ —соответственно весьма полному сгоранию и наивыгоднѣйшей формѣ пространства сжатія, характеризующимъ двигатель Дизеля.

Для процесса сжатія изъ ур. (9) находимъ  $p_e \sim 35 \text{ at}$ — вполнѣ подходящее значение, и  $T_e \sim 750^\circ$  или  $t_e \sim 480^\circ C$ .

Для процесса сгоранія изъ ур. (12) имѣмъ:

$$0,92 \cdot 10000 + \left( 1 + \frac{0,03}{1,07} \right) \left( 6,24 + 0,57 \cdot \frac{750}{1000} \right) 750 = \left( 1 + \frac{0,03}{1,07} \right) \left( 6,24 + 0,57 \cdot \frac{T_s}{1000} \right) T_s \\ \text{или } 14350 = \left( 6,43 + 0,59 \cdot \frac{T_s}{1000} \right) T_s.$$

Отсюда находимъ  $T_s \sim 1900^\circ$  или  $t_s \sim 1630^\circ C$ . Поправка на замедленное сгораніе, понижющее фактически  $T_s$ , значенія для расчета не имѣетъ. Эту поправку удобно сдѣлать лишь при построеніи индикаторной диаграммы соотвѣтственнымъ скругленіемъ угла между линіями сгоранія и расширениія. По ур. (13 bis) находимъ:

$$V_s = 1,07 V_e \cdot \frac{1900}{750} \sim 2,70 V_e$$

Отсюда находимъ  $\delta = \frac{\varepsilon V_s}{V_e} \sim 5,7$ . По ур. (14) и (15) находимъ для линіи расширения  $p_e \sim 3,3 \text{ at}$  и  $T_e \sim 1020^\circ$  или  $t_e \sim 850^\circ C$ —довольно подходящія значенія.

Изъ ур. (16 bis) опредѣляемъ

$$p_i = \frac{35}{15,4 - 1} \left\{ 2,7 \cdot \frac{\frac{1,35 - \frac{1}{5,7^{0,85}}}{0,35} - \frac{1}{15,4^{0,85}}}{0,35} \right\} = 8,4 \text{ at.}$$

Полагаемъ  $\mu = 0,88$  и  $\Delta p = 0,2 \text{ at}$ , тогда изъ ур. (17)  $p_i' \sim 7,2 \text{ at}$ —довольно близко къ дѣйствительному.

Изъ ур. (19 bis) и (20 bis) найдемъ:  $C_i' \sim 0,150 \text{ kg}$  и  $Q_i \sim 1500 \text{ cal}$ .—величины подходящія къ получаемымъ изъ опыта.

**Графический расчет рабочаго процесса.** Наравнѣ съ вышеизложеннымъ аналитическимъ способомъ расчетъ можетъ быть съ большимъ удобствомъ и наглядностью произведенъ графически. Нетрудно было бы дать чисто-графический способъ расчета, въ которомъ всѣ вычислениа замѣнены построеніями. Однако это не-практично, ибо нѣкоторыя построенія трудно выполнить съ требуемой точностью, а другія получаются не проще вычисленій. Практичнѣе сочетать графический способъ для болѣе сложныхъ и многократно повторяемыхъ частей расчета съ аналитическимъ подсчетомъ простѣйшихъ выражений.

Общий ходъ расчета при этомъ таковъ. Вычисляется  $T_a$ , коэффициенты  $\beta$  и  $\gamma$ , суммарная теплоемкость рабочей смѣси въ формѣ  $c_{mp} = A + BT$  и теплопроизводительность  $H_u$  по соотвѣтственнымъ уравненіямъ. Остальная часть расчета ведется графически.

На фиг. 4 (таблица D позади текста) справа строимъ ось—объемовъ  $OV$  и давленій  $Op$  для построенія индикаторной диаграммы. Выбираемъ:

масштабъ объемовъ  $V_e = u$ ;  
масштабъ давленій  $1 \text{ at} = m$ ;

Продолжаемъ ось  $OV$  влѣво отъ  $O$ —по  $OW$ , считая ее осью тепла, а ось  $Op$  считаемъ также осью температуръ. По оси  $OW$  отсчитываемъ суммарную теплоемкость

и выделяемое при сгорании тепло. По оси  $Op$  ( $OT$ ) отсчитываем абсолютную температуру.

Выбираемъ:

$$\text{масштабъ теплоемкости } 1 \text{ cal}/10^{\circ} C = w;$$

$$\text{масштабъ температуры } 10^{\circ} C = b;$$

$$\text{единицу построений } 1 = 1000^{\circ} C = 1000 b,$$

причёмъ въ масштабѣ этой единицы откладываемъ отрѣзки:  $Oj = Ok = \beta$ ;  $kk' = \gamma$ .

Проводя прямую  $ik$  и затѣмъ  $i'k'/ik$  находимъ отрѣзокъ  $i'i = \frac{\gamma}{\beta}$ .

Для построенія полной суммарной теплоемкости  $C_{mv}$  откладываемъ въ масштабѣ  $w$ :  $0d = A$  и  $dd' = 1000 B$ . Проводимъ прямые  $id$  и  $id'$  и затѣмъ  $i'C'/id$  и  $i''d''/id'$ , тогда находимъ  $0c' = \left(1 + \frac{\gamma}{\beta}\right)A$  и  $c'd'' = \left(1 + \frac{\gamma}{\beta}\right)1000 B$ . Точка  $c'$ —принадлежитъ линіи полной суммарной теплоемкости. Проводя изъ точекъ  $i$  и  $d''$  параллели осьмъ  $OT$  и  $OW$ , найдемъ въ точкѣ ихъ пересѣченія— $f$  другую точку линіи полной суммарной теплоемкости. Черезъ точки  $c'$  и  $f$  проводимъ прямую  $c'c''$ , представляющую линію полной суммарной теплоемкости, абсциссы которой въ масштабѣ  $w$  даютъ, очевидно, выражение  $\left(1 + \frac{\gamma}{\beta}\right)(A + BT) = C_{mv}$ . <sup>13)</sup>

Строимъ относительно осей  $OT$  и  $OW$ —кривую тепла, абсциссы которой представляютъ  $C_{mv}$ .  $T$ —тепло газовъ, считая отъ  $0^{\circ}$  abs.

Выбираемъ масштабъ тепла  $1 \text{ cal} = q = \frac{w}{1000}$ .

При такомъ масштабѣ для  $T = 1000^{\circ}$  отрѣзокъ  $C_{mv}$ .  $T$  совпадаетъ съ  $C_{mv}$ , т.-е. изображается отрѣзокъ  $fi$ . Строимъ кривую тепла, проектируя полную суммарную теплоемкость для каждой температуры на линію  $fi$ , проводя изъ центра  $O$  лучи чрезъ эти точки линіи  $fi$  до пересѣченія съ параллелями оси  $OW$ , проведенными на высотѣ  $T$ . Не трудно видѣть, что эти точки пересѣченія принадлежатъ кривой тепла.

Для любой температуры, напримѣръ  $T_c$ , имѣемъ:  $gO = g''x = g''x \cdot \frac{Ox}{Oj}$ ; но  $g''x = C_{mv} \cdot w$  для температуры  $T_c$ ;  $Ox = T_c \cdot b$ , а  $Oj = 1000 b$ ; отсюда  $g''x = C_{mv} \cdot T_c \cdot \frac{w}{1000} = C_{mv} \cdot T_c \cdot q$ , т.-е. представляетъ абсциссу кривой тепла. <sup>14)</sup>

Строимъ индикаторную и температурную діаграммы для двигателя быстраго сгоранія. Политропы строимъ по способу Брауэра (см. Гюльднеръ стр. 503) помощью вспомогательныхъ осей  $ON$ ,  $ON_1$  и  $ON_2$ . Сперва строимъ начало сжатія—точку  $a$  съ координатами  $V$  и  $p_a$ , а затѣмъ помощью вспомогательныхъ осей  $ON$  и  $ON_1$ —политропу сжатія  $ac$ . По этой линіи строимъ соответственную кривую температуръ при помощи уравненія:

$$pV = R_1'T \quad (48)$$

гдѣ  $V$ —объемъ газовъ, а  $R_1'$ —графически представлена постоянная, пропорциональная характеристической постоянной рабочей смѣси— $R_1$  и относящаяся къ общей массѣ, а не къ  $1 \text{ kg}$  газовъ. Отрѣзокъ, представляющій  $R_1'$ , находимъ, строя ур. (48) для точки  $a$ , для которой извѣстны  $p_a$ ,  $V$  и  $T_a$ . Проводя прямую  $aa''//0V$  и лучъ  $a_1O$  до пересѣченія съ  $aa''$ , найдемъ  $r_1O = R_1'$ , ибо  $r_1O = Oa_2 \cdot \frac{a''r_1}{a_2a_1} = \frac{V p_a}{T_a}$ . Затѣмъ проводимъ  $r_1O''//Op$  на разстояніи  $R_1'$  и повторяя указанное построеніе, найдемъ по точкамъ кривую температуръ  $a_1c_1$ .

По найденной изъ линіи  $a_1c_1$  температурѣ  $T_c$  получаемъ на кривой тепла

<sup>13)</sup> Если предположить, что теплоемкость находится не въ линейной, а иной зависимости отъ температуры, мы получимъ вместо прямой  $C'C''$  въкоторую иную линію полной суммарной теплоемкости.

<sup>14)</sup> Построеніе кривой тепла можно производить и иначе, см. Гріневецкій. Графический расчет парового котла. Извѣстія Механическаго Института И. М. Т. У. Выпускъ II.

абсциссу  $gO$ , представляющую членъ  $\left(1 + \frac{\gamma}{\beta}\right) (A + B T_c) T_c$  въ лѣвой части ур. (12). Къ  $gO$  прибавляемъ отрѣзокъ  $hg$ , представляющей  $\zeta H_u$  въ масштабѣ  $q$ ; тогда  $OH$  представляетъ всю лѣвую часть ур. (12), поэтому ордината  $hh''$  представляетъ  $T_c$ . Ур. (12) рѣшается, такимъ образомъ, графически очень удобно.

Далѣе находимъ  $p_s$ . Проводя  $\bar{r}_1$  и затѣмъ  $\bar{r}_2//\bar{r}_1$ , находимъ  $Or_2=Or_1 \cdot \beta = R'_2$ —постоянной для сгорѣвшихъ газовъ. Проводимъ  $r_3 z''//Op$  и построениемъ ур. (48) для  $p_s V_c = R'_2 T_s$ , какъ видно изъ фиг. 4, находимъ  $p_s$ .

Затѣмъ изъ точки  $z$  строимъ политропу расширения помошью вспомогательныхъ осей  $ON$  и  $ON_2$ , а по этой линіи—соответственную кривую температуръ  $x_{\alpha_1}$ .

Соответственno действительнымъ дiаграммамъ вносимъ поправки въ индикаторную и температурную дiаграммы, какъ показано на фиг. 4 <sup>18)</sup>. Индикаторная и температурная дiаграммы даютъ давления и температуры (абсолютныe отъ оси  $OV$  и отъ  $0^{\circ}C$ —отъ оси  $OO'$ ) для любого момента сжимающаго и рабочаго ходовъ.

Планиметрированиемъ теоретической и исправленной индикаторныхъ диаграммъ находимъ среднія ординаты  $h_m$  и  $h'_m$  обѣихъ, а по масштабу  $m$  получаемъ  $p_t = \frac{h_m}{m}$  и  $p_t' = \frac{h'_m}{m} - \Delta p$ . Изъ ур. (19)–(21 bis) вычисляемъ обычнымъ путемъ расходъ топлива, расходъ тепла и экономичность.

Этимъ расчетъ заканчивается. Настоящій способъ имѣть практическія преимущества предъ аналитическимъ—нѣкоторое упрощеніе и гораздо большую наглядность результатовъ, благодаря построению индикаторной и температурной диаграммъ.

Для иллюстрации примѣненія способа разсмотримъ примѣръ.

**Задача V.** Расчитать графически рабочий процесс доменно-газового четырехтактного двигателя при полной нагрузкѣ.

Фиг. 4 представляет этот расчет, при чем клише уменьшено линейно до  $\frac{2}{3}$  оригинальной диаграммы.

Полагаем  $\varepsilon = 6,5$  и оценим:  $\eta_e = 0,88$ ;  $p_a = 0,9$  at;  $p_o = 1,08$  at;  $p_r = 1,08$  at  $T_o = 290^\circ$  и  $T_r = 700^\circ$ .

Состав газа берем такой же, какъ въ задачѣ III. Полагаемъ  $L = 1,0$  —  
меньше чѣмъ въ двухтактномъ двигателе соотвѣтственно разжиженію смѣси оста-  
точными газами. Находимъ  $c_{m_0} = 9,56 + 1,63 \cdot \frac{T}{1000}$  и  $H_u = 20385$ . По ур. (34) вычис-  
ляемъ  $\beta \sim 0,93$ .

Располагая всѣми этими данными, приступаемъ къ графическому расчету. Удобство построеній довольно сильно зависитъ отъ выбора практическихъ масштабовъ всѣхъ величинъ. Въ оригиналлйной дiаграммѣ взять масштабы:

$$V_c = u = 20 \text{ mm};$$

$$1 \text{ at} = m = 5 \text{ mm};$$

$$1 \text{ cal}/10^{\circ}C = w = 5 \text{ mm};$$

$$10^{\circ}C = b = \frac{1}{20} \text{ mm.}$$

Отсюда получается  $1 \text{ cal} = q = \frac{1}{200} \text{ mm}; V = 6,5; V_0 = 130 \text{ mm}; A = 9,56 \cdot 5 = 47,8 \text{ mm};$  и  $1000 B = 1,63 \cdot 5 = 8,15 \text{ mm}.$

Строимъ вышеуказанными способами линію полной суммарной теплоемкости и кривую тепла.

Для построения индикаторной диаграммы проводимъ вспомогательныя оси при чмъ въ уравненіяхъ:  $(1 + \operatorname{tg}\varphi_1) = (1 + \operatorname{tg}\varphi)^{n_1}$  и  $(1 + \operatorname{tg}\varphi_2) = (1 + \operatorname{tg}\varphi)^{n_2}$  полагаемъ  $\operatorname{tg}\varphi = 0,25$ . Оцѣнивая  $n_1 = 1,35$  и  $n_2 = 1,80$  по таблицѣ 139 (Гюльденръ, стр. 503)

<sup>15)</sup> Эти поправки на линии  $c_1 z'_1$  несолько неточны, ибо построены по постоянной  $R'_2$ , тогда как на длине для линии  $c_1 z_1$  постоянная изменяется постепенно от  $R'_1$  до  $R'_2$ ; неточность эта практически ничтожна.

ввой части ур. (12).  
асштабъ  $q$ ; тогда  $On$   
представляетъ  $T_s$ .

мъ  $Or_2 = Or_1 \cdot \beta = R'_2$ —  
остроенiemъ ур. (48)

ощью вспомогатель-  
о температуръ  $z_1\theta_1$ .  
поправки въ инди-  
4 <sup>18)</sup>). Индикаторная  
бсолютная отъ оси  
рабочаго ходовъ.  
ндикаторныхъ діа-  
табу  $t$  получаемъ;  
инымъ путемъ рас-

практическія пре-  
раздо большую на-  
и температурной

ръ.  
о-газового четырех-  
меньшено линейно  
.03 at;  $p_r = 1,08$  at;  
 $= 0,09$ .

полагаемъ  $L = 1,0$ —  
женію смѣси оста-  
По ур. (34) вычис-  
лическому расчету-  
тическихъ масшта-  
бы:

56 . 5 = 47,8 mm; и  
ной теплоемкости  
могательная оси.  
—  $\operatorname{tg}\varphi$ )<sup>18)</sup> полагаемъ  
льднеръ, стр. 503)

по постоянной  $R'_2$ ,  
въ  $R'_1$  до  $R'_2$ ; неточ-

найдемъ  $\operatorname{tg}\varphi_1 = 0,352$  и  $\operatorname{tg}\varphi_2 = 0,337$  <sup>18)</sup>; по этимъ тангенсамъ строимъ оси  $ON$ ,  $ON_1$  и  $ON_2$ . Строимъ по масштабамъ  $t$  и  $b$  точки  $a$  и  $a_1$ . Изъ точки  $a$  строимъ политропу сжатія  $ao$  и находимъ  $p_o \sim 11,20$  at (вычисленiemъ получается  $p_o = 11,25$  at). Затѣмъ строимъ отрѣзокъ  $R_1'$  и съ его помощью—кривую температуръ  $a_1c_1$ , находя на ней  $T_o \sim 620^{\circ}$  (вычисленiemъ получается  $T_o = 618^{\circ}$ ).

По  $T_o$  помощью кривой тепла находимъ точку  $g$ . Оцѣниваемъ  $\zeta = 0,85$ , менѣе чѣмъ въ двигателѣ Охельхѣйзера соотвѣтственно менѣе благопріятной формѣ про странства сжатія. Откладывая по оси  $ow$  отъ  $g$  отрѣзокъ  $gh = \frac{0,85 \cdot 20385}{200} = 86,7$  mm, находимъ точку  $h$ , а по ней получимъ  $hh'' = T_s \sim 1780^{\circ}$ .

Строимъ  $R_2'$  по  $R_1'$  и проводя линію  $Oz_1$  до пересѣченія съ  $r_2 z''$ , получаемъ  $z''r_2 = p_s$ , ибо  $z''r_2 = z_1 s$ .  $\frac{Or_2}{Os} = T_s \cdot \frac{R_2'}{V_s} = T_s$ , что по ур. (48) и даетъ  $z''r_2 = p_s = 30$  at. Далѣе строимъ политропу расширенія  $zo$ , а по ней—кривую температуръ— $z_1\theta_1$ . Находимъ  $p_s \sim 2,7$  at и  $T_s \sim 1030^{\circ}$ .

Вносимъ поправки въ индикаторную діаграмму, исправляя соотвѣтственно и температурную. Получаемъ  $p'_s \sim 22,5$  t—хорошо согласуется съ опытными данными и  $T'_s \sim 1600^{\circ}$  или  $t'_s \sim 1320^{\circ}C$ —значительно менѣе, чѣмъ получается обыкновенно изъ аналитического подсчета, ибо, какъ видно изъ діаграммъ, въ дѣйствительности  $p'_s$  не совпадаетъ съ  $T'_s$ .

Планиметрированиемъ діаграммъ находимъ  $h_m = 24,8$  mm и  $h'_m = 22,8$  mm. Отсюда получаемъ  $p_i = 4,96$  at а  $p'_i \sim 4,4$  at при  $\Delta p = 0,15$  at; и  $\mu = \frac{22,8}{24,8} = 0,92$ —довольно близко къ тому, какъ оно оцѣнивалось въ расчетахъ. Значеніе  $p'_i$ —довольно близко къ практическимъ, хотя въ хорошихъ двигателяхъ при большихъ  $z$  и значительно меньшемъ избыткѣ воздуха при наибольшей мощности получается  $p'_i$ ; до 5,5 и даже свыше 6 at.

По ур. (19) и (20) находимъ  $C_i = 2,34$  см<sup>3</sup> и  $Q_i \sim 2125$  cal, весьма близко къ практическимъ значеніямъ. Въ хорошихъ двигателяхъ получается  $Q_i$  нѣсколько менѣе за счетъ большихъ значеній  $\varepsilon$  и  $\zeta$ . По сравненію съ двигателемъ задачи III  $Q_i$  значительно выше, но въ томъ двигателѣ  $Q_i$  относится къ индикаторной работе рабочаго цилиндра, а не всей машины; послѣдняя работа составляетъ отъ 0,90 до 0,92 первой. Уменьшая  $Q_i$  задачи III въ этомъ отношеніи, получимъ величину весьма близкую къ настоящей,

Этотъ примѣръ показываетъ, что графический расчетъ обладаетъ достаточной точностью и производится весьма просто. Въ то же время результатъ его нагляднѣе, чѣмъ въ аналитическомъ расчетѣ, и позволяетъ скорѣе получать всевозможные дополнительные выводы.

**Заключение.** Для полноты и практической цѣнности расчета недостаточно ограничиваться расчетомъ при одной нагрузкѣ, нужно продѣлывать расчеты при нѣсколькихъ нагрузкахъ и при различныхъ измѣненіяхъ въ составѣ рабочей смѣси. Въ задачахъ I—V этого не сдѣлано, потому что цѣлью этихъ задачъ было лишь уясненіе метода и иллюстрація его приложимости къ разнымъ случаямъ.

Продѣланные примѣры касаются самыхъ разнообразныхъ по условіямъ рабочаго процесса двигателей. Во всѣхъ случаяхъ результаты расчета и данныхъ опыта довольно близки между собой. Такое согласованіе расчета и опыта достигается, конечно, за счетъ надлежащей оцѣнки всѣхъ элементовъ расчета. Самое согласованіе показываетъ, что способъ расчета обладаетъ достаточной гибкостью для того, чтобы охватывать весьма разнообразныя условія рабочаго процесса. Оцѣнка элементовъ расчета при наличии практическихъ данныхъ и нѣкоторымъ навыкамъ можетъ быть сдѣлана съ удовлетворительной степенью точности.

<sup>18)</sup> Точность построения политропъ по способу Брауэра существенно зависитъ отъ выбора  $\operatorname{tg}\varphi$ . Чѣмъ менѣе  $\operatorname{tg}\varphi$ , тѣмъ чаще получаются точки, но тѣмъ большие неточности ихъ построения, ибо каждая последующая точка строится по предидущей, всѣ ошибки построения которой отзываются на ней. Эдѣсь выбрана практически наиболѣе удобная величина  $\operatorname{tg}\varphi$ . Построеніе весьма облегчается при помощи угольника съ  $45^{\circ}$  углами.

При отсутствіи подходящихъ практическихъ данныхъ въ оцѣнкѣ элементовъ расчета возможны ошибки, отзывающіяся болѣе или менѣе на точности результатовъ.

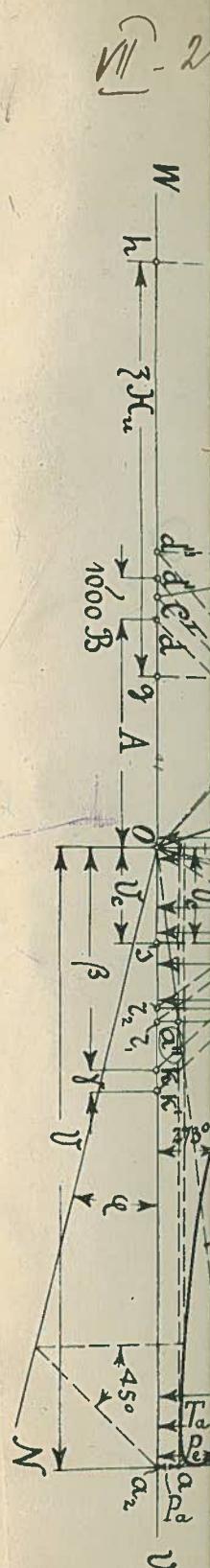
Для полной надежности расчета необходимо пополненіе опытныхъ данныхъ, при чмъ развитый адѣсъ способъ расчета указываетъ и направленія для изслѣдований.

Однимъ изъ важнѣйшихъ элементовъ расчета является коэффиціентъ подачи. Приводимыя Гюльднеромъ данные для коэффиціента подачи нельзя считать достаточно полными и вполнѣ надежными. Опытныя изслѣдованія въ этомъ направлениіи встрѣчаются съ трудностью измѣреній большихъ расходовъ газа, съ громоздкостью, дороговизной и неудобствомъ измѣрительныхъ приспособленій. Разработка динамическихъ способовъ измѣренія расходовъ газа и конструктированіе удобныхъ, по возможности регистрирующихъ приборовъ для этого измѣренія составляеть очередную задачу опытного изслѣдованія двигателей. Кромѣ научнаго значенія, эта задача имѣть и очень крупное практическое, ибо измѣреніе расхода газа въ крупныхъ двигателяхъ примѣняется пока чрезвычайно рѣдко, вслѣдствіе неимѣнія соответственныхъ измѣрительныхъ приспособленій. Определенія коэффиціента подачи желательны не только въ лабораторной обстановкѣ, но и въ практической, для самыхъ разнообразныхъ типовъ двигателей, не исключая и самыхъ крупныхъ.

Данныя по расходу топлива и действительныя индикаторные диаграммы составляютъ весьма важное подспорье расчета. Желательно значительно большее, чмъ до сихъ поръ, вниманіе къ получению индикаторныхъ диаграммъ при испытаніяхъ, къ построенію среднихъ индикаторныхъ диаграммъ опытныхъ и къ помѣщенію среднихъ и характерныхъ диаграммъ въ отчетахъ объ испытаніяхъ. Это желательно не только въ отношеніи чисто лабораторныхъ, но и практическихъ испытаній самыхъ разнообразныхъ двигателей. Такія данные позволяютъ точнѣе оцѣнивать показатели политропъ  $n_1$  и  $n_2$  и коэффиціентъ  $\mu$ , точнѣе дѣлать поправки на замедленное сгораніе. Вмѣстѣ съ тѣмъ эти данные позволяютъ посредствомъ расчета опредѣлять значения коэффиціента  $\zeta$  для разныхъ случаевъ. Очень желательно указаніе во всѣхъ отчетахъ объ испытаніяхъ степени сжатія  $\epsilon$  или относительной величины пространства сжатія  $\frac{1}{\epsilon - 1}$ .

Наконецъ, желательны изслѣдованія лабораторного характера по вопросамъ о неполнотѣ сгоранія и объ теплоотдаче за разные періоды рабочаго процесса, а также о догораніи. Изслѣдованія этого рода представляютъ весьма тонкія экспериментальныя задачи и почти не могутъ производиться въ лабораторії. Практическое значеніе подобныхъ изслѣдований, однако, довольно велико, независимо отъ ихъ цѣнности для расчета рабочаго процесса. Вопросы о неполнотѣ сгоранія и объ теплоотдаче стѣнкамъ представляются весьма важными для конструктора, которому ихъ приходится решать до сихъ поръ ощущью.

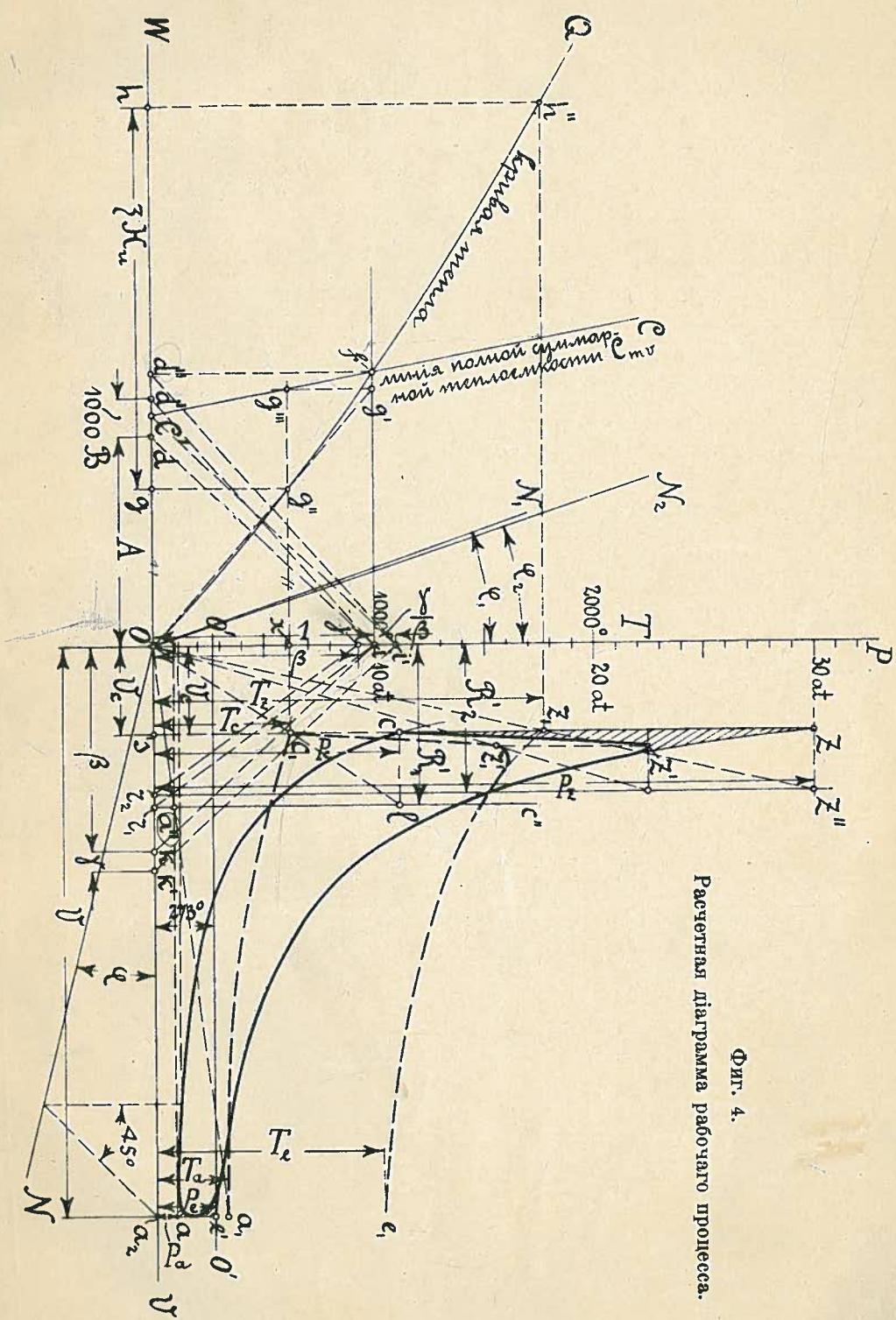
Здѣсь намѣчены обширныя области экспериментальнаго изслѣдованія, разработка которыхъ важна не только для расчета, но и для построенія и отчасти для примѣненія двигателей. Нельзя ожидать, чтобы современные пробѣлы въ этихъ областяхъ пополнились очень быстро. Однако ростъ практическаго значенія двигателей внутренняго сгоранія и интересъ къ нимъ въ техникѣ въ связи съ достаточно ясными представлениями задачъ изслѣдований позволяютъ надѣяться, что эти пробѣлы будутъ постепенно заполняться. Вмѣстѣ съ этимъ расчетъ и конструктированіе двигателей будутъ приобрѣтать подъ собой болѣе твердую научную почву.



21

W-2823.

### Таблица D.



## Расчетная диаграмма рабочего процесса.