

Вл. Г. Карпенко,
инженеръ-механикъ, лаборантъ Томскаго Технологическаго Института.

ПРЕДИСЛОВІЕ.
КЪ ВОПРОСУ

О ТРЕНІИ ПОРШНЯ.

Опытное изслѣдованіе тренія поршня, произведенное
въ Лабораторіи Тепловыхъ Машинъ Томскаго Технологическаго
Института Императора Николая II.

Съ 13 чертежами въ текстѣ и 4 діаграммами въ приложеніи.

ТОМСКЪ.

Типо-литографія Сибирскаго Товарищества Печатнаго Дѣла.

1913.

ПРЕДИСЛОВІЕ.

„... въ настоящее время нѣтъ возможности опредѣлить съ точностью величину силы тренія, которая разовьется въ томъ или другомъ случаѣ, если только не будутъ произведены нѣкоторыя предварительныя опыты“. Н. Петровъ. Треніе въ машинахъ. 1886 г. Стр. 430.

Опыты многочисленныхъ авторовъ, работавшихъ по изслѣдованію тренія смазанныхъ тѣлъ, не привели еще до сихъ поръ къ вполне опредѣленнымъ и точнымъ законамъ тренія. Причиною этому, несомнѣнно, является природа самаго явленія. Всякій, кто только сталкивался съ изслѣдованіемъ тренія смазанныхъ тѣлъ, знаетъ, какъ измѣнчива сила тренія отъ ничтожныхъ сравнительно измѣненій условій. Несомнѣнно, это и служитъ причиною того, что до сихъ поръ многіе авторы не могутъ сойтись во взглядахъ о вліяніи на треніе того или иного фактора, и до сихъ поръ этотъ вопросъ рѣшается опытнымъ путемъ даже въ такихъ случаяхъ, какъ треніе въ цапфахъ, которое много разъ изслѣдовалось разными лицами.

Производя въ Лабораторіи Тепловыхъ Машинъ Томскаго Технологическаго Института опыты по изслѣдованію работы машины завода „Отто-Дейцъ“, автору между прочимъ пришлось столкнуться съ вопросомъ о величинѣ тренія поршня этой машины. Рѣшеніе вопроса на основаніи тѣхъ данныхъ, которыя имѣются относительно тренія въ цапфахъ, оказалось невозможнымъ, поэтому пришлось приступить къ спеціальному изслѣдованію тренія поршня у названной машины. Опыты съ этой машиной дали столь интересные результаты, что побудили автора приступить къ дальнѣйшему изслѣдованію тренія поршня у другихъ машинъ лабораторіи. Тема сдѣлалась шире. Потребовалось всестороннее освѣщеніе вопроса, а потому пришлось коснуться вообще тренія смазанныхъ тѣлъ. Пришлось координировать вопросъ по отношенію къ опытамъ по изслѣдованію тренія различныхъ авторовъ. Все это сильно увеличило количество матеріала; работа сдѣлалась интересной какъ самостоятельная тема; это и побудило автора напечатать весь опытный матеріалъ и результаты опытовъ въ видѣ вопроса о треніи поршня.

Предлагая настоящую работу вниманію читающей публики, авторъ считаетъ необходимымъ указать на нѣкоторыя ея особенности.

Величина силы тренія поршня не можетъ быть измѣрена какими либо приборами непосредственно, поэтому при изслѣдованіи приходится опредѣлять не силу тренія, а ея функцію—работу тренія. Но работа тренія также не можетъ быть измѣрена; она можетъ быть только вычислена на основаніи ряда наблюденій; ошибки же отдѣльныхъ наблюденій, измѣреній и вычисленій накапливаются въ конечномъ выводѣ и понижаютъ точность результатовъ. Въ этомъ заключается большое отличие нашихъ опытовъ отъ опытовъ, которые были поставлены для изслѣдованія тренія въ цапфахъ, и въ которыхъ непосредственно измѣрялась сила тренія.

Авторъ держится того мнѣнія, что даже при сравнительно большихъ ошибкахъ въ отдѣльныхъ наблюденіяхъ и вычисленіяхъ, результаты изслѣдованія можно считать достигающими своей цѣли, если только удастся указать всѣ ошибки и вычислить вѣроятную ихъ величину. На основаніи этихъ соображеній авторъ обращалъ особенное вниманіе на критическое отношеніе ко всѣму опытному матеріалу, на вычисленіе среднихъ ошибокъ и всему этому посвящаетъ отдѣльную главу. Но разобраться въ такомъ сложномъ вопросѣ, какъ треніе поршня, происходящемъ при наличіи самыхъ разнообразныхъ, главнымъ образомъ температурныхъ, условій, крайне трудно; поэтому авторъ предвидитъ, съ своей стороны возможныя ошибки въ оцѣнкѣ того или иного явленія; а потому считаетъ, что дальнѣйшая критика, подтвержденная въ нѣкоторыхъ случаяхъ опытными данными со стороны интересующихся лицъ, весьма желательна въ интересахъ затронутого вопроса. Въ настоящее же время авторъ сочтетъ себя удовлетвореннымъ, если ему удалось своей работой дать методы теоретическаго и практическаго изслѣдованія тренія поршня въ каждомъ отдѣльномъ случаѣ.

Заканчивая предисловіе, авторъ не можетъ не выразить своей глубокой признательности профессорамъ В. Л. Малѣеву и Б. П. Вейнбергу за тѣ совѣты и указанія, которые они сдѣлали автору во время производствъ опытовъ и во время обработки матеріала. Авторъ приноситъ также свою благодарность всѣмъ тѣмъ лицамъ, которыя такъ или иначе содѣйствовали выполненію работы, а также механику лабораторіи А. Я. Ткаченко, не мало потрудившемуся по перестановкѣ и разборкѣ машинъ.

Томскъ. Мартъ 1913 г.

Вл. Г. Карпенко.

ОГЛАВЛЕНІЕ.

Предисловіе	Стр. I
-----------------------	--------

ВВЕДЕНІЕ.

1. Методы изслѣдованія тренія поршня	1
2. Калориметрический методъ	2
3. Механический методъ	4

Глава I.

О внутреннемъ треніи смазки.

1. Сила внутренняго тренія. Коэффициентъ внутренняго тренія. Угловая скорость сдвиганія	5
2. Критическая скорость движенія жидкости.	5
3. Измѣненіе коэффициента внутренняго тренія отъ температуры	6
4. Удѣльная вязкость по Энглеру	8
5. Данныя нашихъ изслѣдованій вязкости смазокъ	8

О треніи смазанныхъ тѣлъ.

6. Сила сопротивленія трущихся поверхностей	12
7. Коэффициентъ тренія	13
8. Различіе между коэффициентами тренія смазанныхъ и не смазанныхъ тѣлъ	13
9. Непригодность коэффициента тренія для характеристики тренія поршня.	14
10. Удѣльное сопротивленіе тренія	15
11. Зависимость удѣльнаго сопротивленія тренія отъ угловой скорости φ	16

Глава II.

Постановка и производство опытовъ.

1. Описание машины завода „Отто-Дейцъ“	21
2. Удельное давление отъ всѣса поршня и отъ силы нажатія колець. Нормальныя давленія	22
3. Описание компрессора завода „Руд. Мейера“	23
4. Удельное давление отъ всѣса поршня и отъ силы нажатія колець	24
5. Описание машины „Горнсби Акройдъ“	24
6. Удельное давление отъ всѣса поршня и отъ силы нажатія колець.	25
7. Мѣняющіеся факторы при изслѣдованіи тренія поршня	25
8. Продолжительность опытовъ	25
9. Производство наблюдений	26
10. Образецъ записи наблюдений	27
11. Механическій методъ. Производство наблюдений и продолжительность опытовъ.	27
12. Переменные факторы	28
13. Работа вращенія маховика, вала и распредѣлительнаго механизма	29

Глава III.

Обработка и критика опытнаго матеріала.

1. Опредѣленіе работы тренія поршня по калориметрическому методу. Средняя ошибка опредѣленія	31
2. Дѣйствительное отклоненіе результатовъ отъ средней величины работы тренія. Причины, обуславливающія отклоненія	32
3. Вліяніе переменной температуры, смазывающаго слоя на отклоненія	33
4. Вліяніе внутренняго теплообмѣна на результаты калориметрическихъ опытовъ	34
5. Вліяніе внѣшняго теплообмѣна на результаты калориметрическихъ опытовъ	37
6. Вліяніе тепла сжатія на результаты калориметрическихъ опытовъ	41
7. Вліяніе высокихъ температуръ на треніе поршня	45
8. Дополнительный опытъ къ калориметрическимъ опытамъ для выясненія вліянія высокихъ температуръ на треніе поршня	47
9. Механическій методъ изслѣдованія тренія поршня	49
10. Средняя ошибка при опредѣленіи эффективной мощности	50
11. Средняя ошибка при опредѣленіи индикаторной мощности	51

12. Средняя ошибка при определении индикаторной работы машины в качествѣ насоса (засасывающей и выталкивающей ходы) . . .	51
13. Средняя ошибка при определении работы вращения маховика, вала и распределительнаго механизма	51
14. Средняя ошибка определения трения поршня	54
15. Указание къ таблицѣ X.	55
16. Указание къ таблицѣ XI.	56
17. Трение въ шатунномъ механизмѣ	57
18. Обзоръ калориметрическихъ опытовъ	58

Глава IV.

Результаты опытовъ.

1. Вліяніе давленія на трение поршня	61
2. Вліяніе на трение поршневыхъ колець	62
3. Вліяніе величины поверхности трения на величину силы трения .	64
4. Вліяніе скорости на трение поршня	64
5. Вліяніе вязкости смазки на трение поршня	68
6. Вліяніе температуры на трение поршня	70
7. Работа трения поршня у машины «Отто-Дейцль»	71
8. Практическіе выводы изъ результатовъ опытовъ	72
9. Формула приблизительнаго вычисленія работы трения поршня . .	76
10. Заключение	77

ВВЕДЕНИЕ.

Методы изслѣдованія тренія поршня.

1. Въ настоящее время нѣтъ специальныхъ работъ по изслѣдованію тренія поршня, поэтому этотъ вопросъ остается до сихъ поръ совершенно не изученнымъ, а между тѣмъ рѣшеніе его является насущнымъ не только въ лабораторной практикѣ, но и вообще въ техникѣ. Причиной такого положенія вопроса являются тѣ затрудненія, которыя сопряжены съ постановкою опытовъ по изслѣдованію тренія поршня. Главное затрудненіе заключается въ томъ, что величину тренія поршня невозможно измѣрить во время опытовъ какими-либо приборами ни въ видѣ силы тренія, ни въ видѣ работы тренія. Приходится подходить къ опредѣленію тренія издалека, что сопряжено съ цѣлымъ рядомъ затрудненій и возможныхъ ошибокъ. Несомнѣнно также, что причиной того, что треніе поршня до сихъ поръ не изучено, является затрудненіе въ постройкѣ такой испытательной машины, которая дала бы возможность изслѣдовать треніе въ условіяхъ, возможно близкихъ къ дѣйствительнымъ условіямъ работы поршня. Между тѣмъ условія, въ которыхъ приходится работать поршню, весьма разнообразны. У тепловыхъ машинъ внутри цилиндра происходитъ горѣніе, а поверхность цилиндра охлаждается водою различной температуры; у паровыхъ машинъ происходитъ въ цилиндрѣ конденсація пара и перемѣшиваніе воды со смазкою, причемъ цилиндры нѣкоторыхъ машинъ обогрѣваются паромъ; въ водяныхъ насосахъ цилиндръ заполненъ водою, а въ компрессорахъ происходитъ циркуляція воздуха.

Все это указываетъ на то, что вопросъ о треніи поршня не можетъ быть рѣшенъ въ общемъ видѣ. Рѣшеніе же частныхъ случаевъ требуетъ указанія методовъ изслѣдованія наиболѣе простыхъ и точныхъ, при томъ такихъ, которыми можно было бы воспользоваться или непосредственно при испытаніи машины или въ видѣ добавочныхъ опытовъ.

При своемъ изслѣдованіи тренія поршня у машинъ лабораторіи, мы пользовались двумя методами; калориметрическимъ и методомъ, примененнымъ проф. В. Л. Малѣевымъ при изслѣдованіи работы двухтактной машины¹⁾. Въ дальнѣйшемъ изложеніи работы мы этотъ методъ будемъ называть для простоты механическимъ.

¹⁾ В. Л. Малѣевъ. „Опытное изслѣдованіе работы двухтактной машины“. 1912 г. Стр. 83.

2. Калориметрической методъ примененъ авторомъ впервые. Идея его взята на основаніи тѣхъ тепловыхъ изслѣдованій, которымъ подвергаются машины внутренняго горѣнія. Какъ извѣстно, при изслѣдованіи этихъ машинъ составляется тепловой балансъ, въ которомъ балансируется тепло, сообщенное машинѣ, со всѣми статьями расхода его. Этотъ балансъ можно представить въ видѣ уравненія

$$U = U_i + U_b + U_{np} - U_n + U_n, \quad (1)$$

гдѣ U —тепло, сообщенное машинѣ, U_i —тепло, соответствующее индикаторной работѣ, U_b —тепло, унесенное охлаждающей водой, U_{np} —тепло, унесенное продуктами горѣнія, U_n —тепло, соответствующее работѣ тренія поршня, U_n —тепло, соответствующее невязкѣ и цѣлому ряду величинъ потерь тепла, которыя бываетъ трудно опредѣлить съ достаточной точностью, напр., потери отъ неполноты горѣнія, отъ лучеиспусканія и проч.

Изъ уравненія (1) мы видимъ, что всѣ величины правой части равенства имѣютъ знакъ плюсъ, кромѣ величины тепла тренія поршня, которая вошла въ равенство со знакомъ минусъ. Введена эта величина со знакомъ минусъ на основаніи слѣдующихъ соображеній. Индикаторную работу составляютъ эффективная работа и всѣ потери, которыя происходятъ отъ тренія поршня, шатуннаго механизма и вала. Иначе индикаторную работу мы не можемъ опредѣлить, между тѣмъ, тепло, которое разовьется отъ тренія поршня, уносится охлаждающей водой и входитъ въ величину U_b . Слѣдовательно, вставляя въ уравненіе (1) величины U_i и U_b , мы тѣмъ самымъ два раза вводимъ въ уравненіе (1) величину работы тренія поршня со знакомъ плюсъ; поэтому для составленія правильнаго теплового баланса, мы должны ввести величину U_n со знакомъ минусъ.

Работа тренія поршня, какъ это мы увидимъ дальше, въ неблагоприятныхъ случаяхъ можетъ доходить до 25% отъ индикаторной мощности машины, а потому пренебречь ею при составленіи теплового баланса невозможно.

Калориметрической методъ основанъ на отводѣ тепла тренія охлаждающей водой. Постановка опыта заключается въ томъ, что приводятъ испытуемую машину въ дѣйствіе отъ внѣшняго источника энергіи, а черезъ рубашку пропускаютъ воду. Какъ только температура охлаждающей воды сдѣлается постоянной, то начинаютъ наблюденія; записываютъ температуру входящей и выходящей воды черезъ опредѣленные промежутки времени и расходъ воды. Количество отведеннаго тепла можно вычислить по уравненію

$$U_n = (t_1 - t_2)w, \quad (2)$$

гдѣ t_1 и t_2 температура входящей и выходящей изъ рубашки цилиндра воды, а w —количество воды въ единицу времени.

По количеству тепла U_n можно опредѣлить работу тренія поршня, на основаніи уравненія

$$R_n = \frac{U_n}{632,3}, \quad (3)$$

гдѣ величина 632,3 есть тепловой эквивалентъ одной лошадиной силы въ часъ.

Калориметрический методъ связанъ съ ошибками вслѣдствіе теплообмѣна съ воздухомъ помѣщенія, поэтому этотъ методъ даетъ хорошіе результаты при низкихъ температурныхъ условіяхъ опыта; но какъ только температура отходящей воды становится выше температуры помѣщенія, то потери тепла вслѣдствіе лучеиспусканія начинаютъ увеличиваться и становятся замѣтными при температурѣ 50°—55° Ц.

Вопросъ о треніи при высокихъ температурахъ приходится рѣшать инымъ путемъ. Изъ ряда калориметрическихъ опытовъ при низкой температурѣ можно съ достаточной точностью опредѣлить работу тренія поршня и параллельно съ тѣмъ расходъ энергіи по распредѣлительной доскѣ. Разность между этими величинами представляетъ потери энергіи въ проводахъ, въ реостатѣ, въ электродвигателѣ, въ ременной передачѣ и такъ до самаго поршня. Если послѣ этого поставить опыты съ высокой температурой цилиндра и отмѣтить энергію для приведенія машины въ движеніе, то можно будетъ опредѣлить треніе поршня простымъ расчетомъ по уравненію

$$R_n = E - r \quad (4)$$

гдѣ E энергія по распредѣлительной доскѣ въ лошадиныхъ силахъ, а r потери при передачѣ энергіи къ поршню.

Въ своихъ опытахъ мы поступили такъ. Сначала пустили машину работать на свѣтельномъ газѣ, и, когда цилиндръ прогрѣлся до наивысшей температуры, какую только можно встрѣтить въ практикѣ, перевели ее на внѣшнюю энергію. Переходъ этотъ можно было сдѣлать очень легко, потому что во время работы на свѣтельномъ газѣ машина въ холостую вертѣла электродвигатель, слѣдовательно, стоило только прекратить доступъ газа и включить въ цѣпь электродвигатель, какъ передача энергіи начинала происходить въ обратномъ порядкѣ. Машина послѣ этого начинала остывать подѣ влияніемъ охлаждающей воды, и треніе поршня, вслѣдствіе увеличенія вязкости масла, увеличиваться.

Запись энергіи по распредѣлительной доскѣ дала намъ законъ измѣненія тренія, а вычисленіе по уравненію (4) дало величины тренія при различныхъ температурахъ цилиндра.

Какъ показалъ опытъ, съ этимъ методомъ можно очень близко подойти къ истиннымъ величинамъ работы тренія поршня при высокихъ температурахъ.

3. Механический метод определения трения поршня основан на следующих выводах. Какъ известно, работа трения движущихся частей въ машинахъ двигателяхъ можетъ быть вычислена по уравненію

$$R = N_i - N_e, \quad (5)$$

гдѣ N_i —индикаторная работа и N_e —дѣйствительная работа; для машинъ внутреннего горѣнія это уравненіе напишется такъ

$$R = N_i - N_i' - N_e, \quad (5a)$$

куда входитъ еще величина индикаторной работы насоса N_i' .

Въ работу сопротивленій R входитъ работа вращенія маховиковъ, кривошипнаго вала и распредѣлительнаго механизма, работа трения поршня и работа трения въ крейцкопфномъ болтѣ и головкѣ шатуна. Изъ этой работы сопротивленій возможно выдѣлить работу вращенія маховиковъ, кривошипнаго вала и распредѣлительнаго механизма R_k , если эту работу опредѣлить дополнительными опытами. Разность $R - R_k$ будетъ представлять работу трения поршня и работу трения шатуннаго механизма $R_{тр}$.

Итакъ, порядокъ изслѣдованія трения поршня по механическому методу будетъ такой.

Предварительно опредѣляется работа вращенія маховиковъ, кривошипнаго вала и распредѣлительнаго механизма при различныхъ числахъ оборотовъ. Для этого разъединяютъ колѣно вала съ шатуномъ и вращаютъ маховики съ помощью ременной передачи отъ электромотора. По распредѣлительной доскѣ опредѣляютъ электрическую энергію, вычитаютъ изъ послѣдней потери въ электромоторѣ и ременной передачѣ и опредѣляютъ такимъ образомъ работу вращенія маховиковъ. Для того, чтобы удобнѣе было пользоваться результатами изслѣдованія работы вращенія маховиковъ, эти результаты представляютъ на діаграммѣ въ видѣ кривой, при чемъ по оси абсциссъ наносятъ числа оборотовъ, а по оси ординатъ работу. Съ помощью этой діаграммы мы можемъ вычислить работу трения поршня для любого опыта съ машиной.

Мы здѣсь не будемъ останавливаться на разсмотрѣніи точности того и другого метода, все это будетъ видно изъ дальнѣйшаго обзора нашихъ опытовъ въ III главѣ, здѣсь мы лишь скажемъ, что каждый изъ этихъ методовъ имѣетъ свои преимущества и недостатки; поэтому мы думаемъ, что во всякомъ опытномъ изслѣдованіи трения поршня параллельное проведеніе опытовъ по двумъ методамъ можетъ послужить только къ лучшему выясненію вопроса.

Глава I.

О внутреннем трении смазки.

1. Относительно каждой смазки в технике даются три указания: о температурѣ вспышки, о вязкости и объ удѣльномъ вѣсѣ. При изслѣдованіи тренія смазанныхъ тѣлъ самое существенное значеніе имѣетъ вязкость, такъ какъ по вязкости мы можемъ судить о величинѣ коэффициента внутренняго тренія, отъ котораго зависятъ какъ сила, такъ и работа тренія.

Силою внутренняго тренія считаютъ то сопротивленіе, которое оказываетъ жидкость, когда различные ея слои сдвигаются относительно другъ друга съ постоянною скоростью. Сила эта будетъ пропорціональна поверхности слоя Q , разности скоростей двухъ слоевъ $v_1 - v_2$ и обратно пропорціональна разстоянію l этихъ слоевъ другъ отъ друга. Зависимость эта представится уравненіемъ

$$F = \mu Q \frac{v_1 - v_2}{l}; \quad (6)$$

гдѣ μ коэффициентъ пропорціональности, выражающій силу тренія при Q , $v_1 - v_2$ и l равныхъ единицѣ и носящій названіе коэффициента внутренняго тренія. Какъ только начинается перемѣщеніе слоевъ, такъ начинается и увеличеніе угла сдвига съ опредѣленною угловою скоростью.

Съ переходомъ предѣла упругости нарушается связь между частицами: онѣ начинаютъ перемѣщаться относительно другъ друга, а тѣла въ это время расслабляются или релаксировать. Слѣдовательно, вслѣдствіе релаксаціи сила внутренняго сопротивленія тѣла будетъ убывать. При постоянной же внѣшней силѣ должна рости угловая скорость, но это будетъ происходить только до извѣстнаго предѣла, такъ какъ по уравненію (6) сила внутренняго сопротивленія растеть съ увеличеніемъ угловой скорости, а, слѣдовательно, убываніе силы сопротивленія вслѣдствіе релаксаціи и увеличеніе ея съ приращеніемъ угловой скорости должны въ извѣстный моментъ уравновѣситься, и тогда опредѣленной угловой скорости будетъ отвѣчать опредѣленная сила сопротивленія или сила внутренняго тренія, и, обратно, всякой силѣ сопротивленія будетъ отвѣчать опредѣленная угловая скорость точно такъ же, какъ при упругой деформаціи опредѣленной силѣ отвѣчаетъ опредѣленный уголъ сдвига. И такъ, мы можемъ уравненіе (6) представить въ видѣ уравненія (7)

$$F = \mu Q \varphi, \quad (7)$$

гдѣ φ угловая скорость.

2. Въ настоящее время изучено движеніе жидкостей въ трубкахъ. При этомъ обнаружено, что явленіе сдвига можно наблюдать только до

извѣснаго предѣла скорости. Начиная съ извѣстной скорости въ слоѣ появляются вихревыя движенія частицъ, которыя создаютъ совершенно инныя зависимости величины силы внутренняго тренія отъ скорости. Скорость, при которой начинаются вихревыя движенія частицъ, называется критическою скоростью, которая тѣмъ больше, чѣмъ больше вязкость вещества и чѣмъ меньше радіусъ трубки¹⁾.

До критической скорости жидкости подчиняются закону Пуазеля (*Poiseuille*), (1842) выраженному уравненіемъ

$$Q = \frac{\pi P R^4}{8 \mu L} t, \quad (8)$$

гдѣ Q —количество вытекшей жидкости, P —давленіе, L —длина трубки, R —радіусъ трубки, t —время и μ коэффициентъ внутренняго тренія. При скоростяхъ большихъ критической законъ истеченія жидкости иной; по опытамъ *Osborne Reynolds*'а и по послѣднимъ опытамъ *E. Bosc* и *D. Bauert*'а²⁾ слѣдуетъ, что для различныхъ тѣлъ законъ истеченія различенъ и что съ переходомъ критической скорости вязкость не для всѣхъ тѣлъ увеличивается.

По мнѣнію Б. П. Вейнберга, высказанному мнѣ лично, явленіе критической скорости должно существовать и во всякомъ слоѣ жидкости, при чемъ критическая скорость будетъ тѣмъ больше, чѣмъ больше вязкость вещества, и чѣмъ больше толщина слоя. Зависимость между силою тренія и скоростью до критической скорости по мнѣнію Б. П. Вейнберга можно выразить уравненіемъ.

$$F = k_1 v, \quad (9)$$

гдѣ k_1 —коэффициентъ пропорціональности. Во время переходнаго состоянія, когда начинаются вихревыя движенія, уравненіемъ

$$F = k_1 v + k_2 v^2, \quad (10)$$

при скоростяхъ выше критической скорости

$$F = k_2 v^2. \quad (11)$$

Этимъ мнѣніемъ примиряется существовавшее прежде разногласіе между физиками, изъ которыхъ одни придерживались мнѣнія Ньютона, выраженнаго уравненіемъ (9), а другіе мнѣнія Куломба, выраженнаго уравненіемъ (10). Для насъ же имѣетъ значеніе уравненіе (9), потому что вязкость смазочныхъ маселъ и очень малая толщина слоя даютъ основанія предполагать, что въ нашихъ опытахъ изслѣдованія работы тренія поршня мы имѣемъ дѣло съ скоростями гораздо ниже критической скорости.

3. Для опредѣленія коэффициента внутренняго тренія тѣлъ пользуются различными способами деформаций тѣла, при которыхъ форма измѣняется съ постоянною скоростью. Для болѣе вязкихъ тѣлъ упо-

1) Б. П. Вейнбергъ. „Общій курсъ физики“ 1908 г., стр. 339.

2) E. Bosc u. D. Bauert, Physik, Zeitschr. 1911. S. 126.

требляють сдвиганіе, продавливаніе черезъ трубку и проч.¹⁾; для жидкихъ тѣлъ пропусканіе ихъ черезъ трубки различнаго діаметра. Методовъ сравнительно много, но результаты, полученные до сихъ поръ, нельзя признать совершенно точными, а потому обычно указываютъ лишь порядокъ величинъ значенія коэффиціентовъ внутренняго тренія μ . Съ этой стороны для насъ интересны опыты проф. Н. Петрова надъ растительными и минеральными маслами, опубликованные еще въ 1885 году въ „Извѣст. Петерб. Технол. Инст.“.

Для опредѣленія коэффиціента внутренняго тренія Н. Петровъ бралъ стеклянныя трубки очень малаго діаметра, такъ какъ вежь опыты при коростяхъ ниже критической. Для точности опытовъ требовалась большая точность опредѣленія размѣровъ трубокъ и совершенно одинаковый внутренній діаметръ трубокъ по всей ихъ длинѣ.

Все это, конечно, не могло быть достигнуто съ абсолютной точностью, а потому при малыхъ діаметрахъ трубокъ (приблизительно отъ 2,5 до 0,5 мм.), вліяніе этихъ ошибокъ, по нашему мнѣнію, должно быть таково, что величины коэффиціентовъ тренія по опредѣленіямъ проф. Петрова имѣютъ значенія только какъ показатели порядка этихъ величинъ. Изъ слѣдующей таблицы, составленной по даннымъ опытовъ проф. Петрова²⁾, мы можемъ видѣть, какое громадное значеніе имѣетъ измѣненіе температуры на величину коэффиціента внутренняго тренія смазки. Пользуясь методомъ графическаго интерполированія, мы на основаніи графическихъ таблицъ проф. Петрова вычислили измѣненіе въ процентахъ коэффиціента внутренняго тренія при повышеніи температуры отъ 20° и 40° Ц. на одинъ градусъ.

Таблица I.

Название маселъ.	Коэффиц. внутр. тренія.		Измѣнія въ % на 1° Ц.		Удѣльный вѣсъ.
	при 20° Ц.	при 40° Ц.	при 20° Ц.	при 40° Ц.	
Растительныя масла:					
Спермацетовое	0,0036	0,0018	4,4	2,8	—
Оливковое	0,0086	0,0036	4,3	3,3	—
Суръпное	0,0094	0,0041	4,3	3,4	—
Минеральныя масла:					
Прозрачныя:					
Олеонафтъ № 3	0,0113	0,0040	4,5	3,0	0,900
Паровозное завода Ропса	0,0184	0,0054	6,5	3,7	0,903
Бакуинъ, машинное	0,0205	0,0064	7,3	6,7	0,902
Черныя:					
Завода Ропса	0,0305	0,0090	6,7	5,6	0,910
Бакинскаго Нефт. О-ва	0,0840	0,0200	10,0	5,0	0,917

1) Опыты проф. Б. П. Вейнберга „Къ изученію тѣлъ съ большими значеніями коэффиціента внутренняго тренія“.

2) Н. Петровъ. „Описаніе и результаты опытовъ надъ треніемъ жидкостей и машинъ“. С.-Петербургъ, 1886.

Коэффициентъ внутренняго тренія выраженъ въ этой таблицѣ въ миллиграммахъ на 1 мм² въ 1 сек.

Изъ таблицы видно, что измѣненія коэффициента внутренняго тренія различны для различныхъ маселъ и различныхъ температуръ. Чѣмъ большею вязкостью отличается масло, тѣмъ сильнѣе измѣняется съ температурою и коэффициентъ внутренняго тренія. Насколько можетъ вліять измѣненіе температуры на коэффициентъ внутренняго тренія тѣль, то это можно видѣть изъ опытовъ проф. Б. П. Вейнберга¹⁾. Онъ нашелъ, что для вара при 20° Ц. измѣненіе это выражается при повыше- нии на 1° въ 38%, а при 40°Ц.—въ 23%, для асфальта при 20°Ц.—въ 44%, а при 40°Ц.—въ 30%.

Интересныя данныя опытовъ проф. Н. Петрова надъ опредѣленіемъ коэффициента внутренняго тренія маселъ не могутъ быть использованы въ нашихъ цѣляхъ, потому что они относятся къ тѣмъ сортамъ смазки, которыхъ въ нашемъ распоряженіи не было. Съ другой стороны, нужно вообще отмѣтить, что нельзя составить для пракческаго пользова- нія общихъ таблицъ коэффициентовъ внутренняго тренія различныхъ смазокъ, въ особенности минеральныхъ, такъ какъ всѣ эти масла не обладаютъ большею устойчивостью своихъ свойствъ. Это и побудило насъ прибѣгнуть къ самостоятельному изслѣдованію свойствъ смазоч- ныхъ матеріаловъ, употребляемыхъ нами при работѣ съ машинами.

4. Если мы теперь обратимся къ уравненію Пуазеля (8), то изъ него можемъ видѣть, что время необходимое для протеканія жидкости черезъ одну и ту же трубку, при какой-либо температурѣ, прямо про- порціоноально коэффициенту внутренняго тренія, а, слѣдовательно, мы можемъ написать

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2}. \quad (12)$$

Эта пропорціональность даетъ намъ возможность судить о коэф- фициентѣ внутренняго тренія даннаго масла по той вязкости, которая обычно указывается въ техникѣ по Энглеру. Методъ опре- дѣленія вязкости сводится къ опредѣленію времени протеканія смазки по трубкѣ въ вискозиметрѣ Энглера. Найденное время, отнесен- ное ко времени протеканія въ томъ же аппаратѣ воды, даетъ удѣльную вязкость.

5. Нами составлена таблица II, представляющая измѣненіе вяз- кости смазки отъ температуры. Таблица имѣетъ данныя для трехъ смазокъ: для смѣси цилиндроваго масла № 1 съ машиннымъ масломъ № 6 въ объемномъ отношеніи 1 : 1, для одного машиннаго масла № 6 и для вазелиноваго масла. Первая смѣсь употреблялась нами для смазыва-

1) Б. П. Вейнбергъ. „Вліяніе температуры на внутреннее треніе вара и асфальта“.

нія цилиндровъ двигателей внутренняго горѣнія, вторая для смазыванія цилиндровъ компрессора.

Таблица II.

Темпер. °Ц.	Смѣсь.			Машинное масло.			Вазелиновое масло.				
	Продолж. истеч.		Удѣльн. вязкость.	Темпер. °Ц.	Продолж. истеч.		Удѣльн. вязк. стѣ.	Темпер. °Ц.	Продолж. истеч.		Удѣльн. вязкость.
	Мин.	Сек.			Мин.	Сек.			Мин.	Сек.	
20°	50	—	130,4	20°	14	28,6	37,75	20°	—	52,7	2,29
29°	20	18	53,0	27°	11	—	28,70	30°	—	43,2	1,88
35°	12	15	32,0	33°	7	19	18,65	35°	—	39,0	1,70
42°	8	13	21,4	47°	3	12,5	7,94	43°	—	35,2	1,53
52°	4	49,4	12,6	53°	2	17	5,96	54°	—	32,4	1,41
60°	2	52,4	7,5	66°	1	23,4	3,62	63°	—	30,0	1,30
67°	2	05,8	5,5	81°	—	56	2,43	68°	—	29,2	1,27
77°	1	35,6	4,16	89°	—	48	2,09	82°	—	27,4	1,19
83°	1	13,6	3,20	108°	—	36,6	1,59	105°	—	26,0	1,13
93°	1	2,6	2,71	120°	—	33	1,44	124°	—	25,4	1,10
106°	—	52,4	2,28	149°	—	28	1,22	—	—	—	—
103°	—	39,6	1,72	—	—	—	—	—	—	—	—
140°	—	33,3	1,45	—	—	—	—	—	—	—	—

Опредѣленіе вязкости производилось вискозиметромъ Энглера, при чемъ время опредѣлялось для 100 куб. сант. смазки. Для пользованія графическимъ интерполированіемъ по этой таблицѣ составлена діаграмма 1 (черт. 1). Въ этой діаграммѣ по оси абсциссъ отложена температура, а по оси ординатъ удѣльная вязкость отъ 0 до 150 и отъ 0 до 30. Числа внѣ сѣтки обозначаютъ удѣльный вѣсъ.

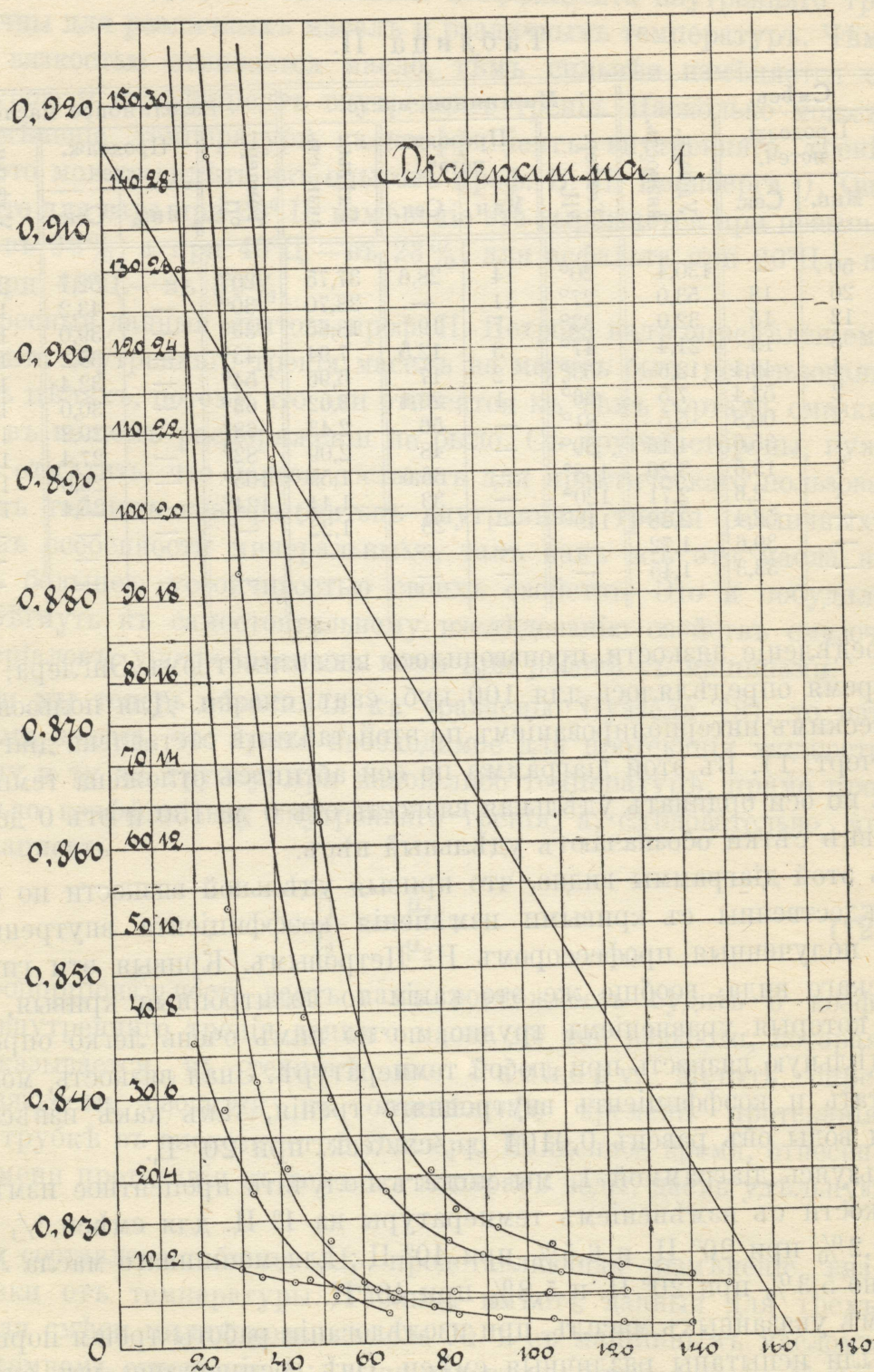
Изъ этой діаграммы видно, что кривыя удѣльной вязкости по формѣ тождественны съ кривыми измѣненія коэффициента внутренняго тренія, полученныя профессоромъ Н. Петровымъ. Кривыя эти гиперболическаго вида; вообще же это какія то политропныя кривыя, выразить которыя уравненіемъ трудно, но по нимъ очень легко опредѣлить удѣльную вязкость при любой температурѣ. Зная вязкость, можно подсчитать и коэффициентъ внутренняго тренія, такъ какъ извѣстно, что для воды онъ равенъ 0,0104 гр./см./сек. при 20° Ц.

Пользуясь діаграммой 1, мы можемъ получить процентное измѣненіе вязкости съ измѣненіемъ температуры на 1° Ц. для смѣси $\frac{1}{1}$ оно равно 9,2% при 20° Ц. и 6,5% при 40° Ц.; для машиннаго масла № 6 оно равно 5,3% при 20° Ц. и 5,8% при 40° Ц.

Кромѣ указанныхъ маселъ, при изслѣдованіи работы тренія поршня нами были испытаны различныя смѣси. Онѣ составлялись изъ смѣси $\frac{1}{1}$ съ керосиномъ. Слѣдующая таблица III характеризуетъ эти смѣси по отношенію къ вязкости и удѣльному вѣсу при 20° Ц.

На основаніи этой таблицы составлена діаграмма № 2, гдѣ по оси абсциссъ отложена вязкость, а по оси ординатъ удѣльный вѣсъ. Эта діаграмма интересна въ томъ отношеніи, что она совершенно тождествен-

на съ діаграммой зависимости между удѣльнымъ вѣсомъ и вязкостью для смѣси $\frac{1}{1}$ при различныхъ температурахъ. Последнюю кривую



Черт. 1.

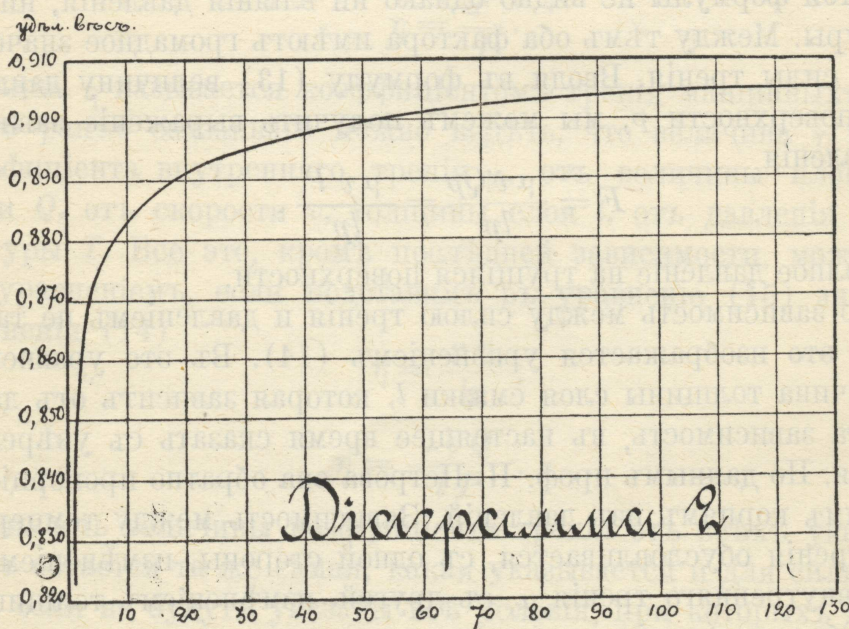
можно построить, пользуясь діаграммой № 1, гдѣ измѣненіе удѣльнаго вѣса съ температурой представлено наклонной линіей. Обѣ указан- ные кривыя совпадаютъ другъ съ другомъ всѣми точками. Это даетъ

намъ основаніе заключать, что примѣсь керосина къ смѣси $\frac{1}{1}$ цилиндроваго и машиннаго маселъ оказываетъ на данныя свойства смазки то же вліяніе, какое оказываетъ на смѣсь повышение температуры. Это

Таблица III.

№ № смѣси.	Время въ сек.	Удѣльная вязкость	Удѣльный вѣсъ.
1	41,0	1,78	0,853
2	79,0	3,40	0,870
3	98,0	4,20	0,873
4	111,1	4,83	0,874
5	153,0	6,65	0,876
6	161,0	7,00	0,879
7	181,1	7,87	0,882
8	232,3	10,11	0,885
9	274,0	11,90	0,887
10	418,3	18,20	0,890
11	1072,8	46,70	0,899
12	3000,0	130,40	0,905

же подмѣтилъ и проф. Н. Петровъ. Онъ говоритъ, что примѣсь солароваго масла къ черному вагонному уменьшаетъ внутренне треніе такъ



Черт. 2.

же, какъ и нагрѣваніе, при чемъ прибавленіе $n\%$ солароваго масла равносильно приблизительно n° нагрѣванія. Дѣйствіе керосина такое же, какъ и солароваго масла, но взятаго въ вдвое меньшемъ количествѣ, чѣмъ послѣднее ¹⁾.

¹⁾ Н. Петровъ. *ibid.* Стр. 171.

Указанныя смѣси имѣли для насъ значеніе только при изслѣдованіи вліянія вязкости смазки на величину работы тренія. Какъ смазочный матеріаль для цилиндровъ машины внутренняго горѣнія эти смѣси не имѣютъ значенія, такъ какъ керосинъ легко испаряется и выгораетъ, поэтому при составленіи смѣсей съ керосиномъ мы не интересовались процентнымъ соотношеніемъ составныхъ частей, какъ неимѣющихъ никакого практическаго значенія.

О треніи смазанныхъ тѣлъ.

6. Самымъ важнымъ вопросомъ при изслѣдованіи тренія машинныхъ частей есть вопросъ о величинѣ сопротивленія, которое оказываютъ трущіяся части. Пока между ними находится слой смазки, достаточный для того, чтобы изолировать другъ отъ друга металлическія поверхности, мы имѣемъ дѣло съ силою внутренняго тренія въ слой масла. Величина этой силы выразится по формулѣ (6) предыдущей главы въ видѣ уравненія.

$$F = \mu Q \frac{v}{l}, \quad (13)$$

гдѣ v —относительная скорость трущихся частей, l —толщина смазки.

Изъ этой формулы не видно однако ни вліянія давленія, ни вліянія температуры. Между тѣмъ оба фактора имѣютъ громадное значеніе для величины силы тренія. Вводя въ формулу (13) величину давленія на единицу поверхности p , мы можемъ получить выраженіе зависимости F отъ давленія

$$F = \frac{\mu v Q p}{l p} = \frac{\mu v P}{l p}, \quad (14)$$

гдѣ P —полное давленіе на трущіяся поверхности.

Однако зависимость между силою тренія и давленіемъ не такъ проста, какъ это изображается уравненіемъ (14). Въ это уравненіе входитъ величина толщины слоя смазки l , которая зависитъ отъ давленія. Какова эта зависимость, въ настоящее время сказать съ увѣренностью еще нельзя. По даннымъ проф. Н. Петрова она обратно пропорціональна квадратнымъ корнямъ изъ давленій. Зависимость между температурою и силою тренія обусловливается, съ одной стороны, измѣненіемъ коэффициента внутренняго тренія μ , съ другой, измѣненіемъ толщины слоя смазки. Объ измѣненіи μ съ температурою мы знаемъ уже изъ § 3; объ измѣненіи же толщины слоя смазки мы можемъ говорить только предположительно, что, чѣмъ болѣе густа смазка тѣмъ труднѣе она должна выдавливаться изъ промежутка между твердыми тѣлами. Чѣмъ выше температура, тѣмъ жиже смазка, и тѣмъ тоньше смазывающій слой. Опыты и вычисленія проф. Н. Петрова идутъ въ разрѣзъ этому представленію¹⁾. Объясненіе этому проф. Н.

1) Н. Петровъ. *ibid.* 92.

Петровъ находитъ въ измѣненіи кривизны трущихся поверхностей. Какъ бы тамъ ни было, но вліяніе измѣненія температуры на толщину слоя смазки несомнѣнно; а потому вліяніе измѣненія температуры на силу тренія крайне сложно и установить его пока можно только опытнымъ путемъ въ каждомъ отдѣльномъ случаѣ.

Разсматривая уравненіе (14), мы приходимъ къ заключенію, что входящія въ составъ его величины μ и l являются какими то функціями P и T . На основаніи гидродинамической теоріи тренія смазанныхъ тѣлъ толщина слоя масла зависитъ одновременно отъ силъ внутренняго тренія и отъ капиллярныхъ свойствъ масла. Если мы къ этому прибавимъ указаніе, что толщина слоя зависитъ отъ кривизны и отъ свойствъ поверхности твердыхъ тѣлъ, отъ способа смазки, то ясно станетъ неопредѣленность величины l . Къ тому же величина l въ практикѣ не можетъ быть измѣрена, такъ какъ она по вычисленіямъ проф. Н. Петрова при давленіи въ 1 атм. и скорости въ 1 м. въ сек. выражается для цапфъ величиною въ 0,03—0,04 мм.

7. Итакъ, формула (14) для вычисленія силы сопротивленія F , вслѣдствіе неопредѣленности величинъ входящихъ въ правую часть равенства, непригодна. Поэтому величину F въ опытахъ опредѣляютъ непосредственно измѣреніемъ, для характеристики же тренія пользуются отношеніемъ силы сопротивленія тренія къ полному давленію

$$\eta = \frac{F}{P}. \quad (15)$$

Величина η называется коэффициентомъ тренія машинныхъ частей. Изъ всего ранѣе сказаннаго можно видѣть, что величина η зависитъ отъ коэффициента внутренняго тренія μ , отъ величины площади поверхности Q , отъ скорости v , толщины слоя l , отъ давленія P и отъ температуры T . Все это, кромѣ послѣдней зависимости, можно представить уравненіемъ, если подставимъ въ уравненіе (15) значеніе F изъ уравненія (14)

$$\eta = \frac{\mu v}{l p}; \quad (16)$$

или

$$\eta = \frac{\mu v Q}{l P}. \quad (17)$$

Зависимость величины коэффициента тренія отъ всѣхъ указанныхъ факторовъ остается та же самая, какая указывается и для силы тренія. Поэтому, если не будутъ указаны всѣ условія, при которыхъ получена величина коэффициента тренія, то она не имѣетъ никакого практическаго значенія.

8. Понятіе о коэффициентѣ тренія создано въ то время, когда изслѣдовалось треніе для покоя и для скольженія тѣлъ совершенно сухихъ. Тамъ величина коэффициента тренія для всякаго матеріала вполне опредѣленная, потому что она не зависитъ ни отъ давленія, ни отъ площади поверхности, ни отъ скорости, ни отъ температуры (Сои-

lomb). Тамъ коэффициентъ тренія является характеристикой даннаго матеріала по отношенію къ тренію. Но треніе скольженія совершенно сухихъ тѣлъ на практикѣ встрѣчается сравнительно рѣдко, напримеръ, при торможеніи, въ точильномъ и шлифовальномъ дѣлѣ, поэтому извѣстныя таблицы коэффициентовъ тренія, составленныя по Ренни и по Морену даютъ величины коэффициентовъ тренія тѣлъ смазанныхъ, но потомъ вытертыхъ такъ, чтобы не было слоя смазки между трущимися поверхностями (!?). Но это уже сразу рѣзко мѣняетъ дѣло, коэффициентъ тренія оказывается зависящимъ отъ давленія, поэтому въ упомянутыхъ таблицахъ имѣются коэффициенты для различныхъ давленій, при чемъ въ справочныхъ книгахъ (*Hütte*), хотя очень глухо, но прибавлено, что величина сопротивленія тренія зависитъ также отъ скорости движенія и отъ температуры. Ясно, что какъ только появилась смазка между трущимися поверхностями, коэффициентъ тренія теряетъ свою опредѣленность, онъ перестаетъ быть характеристикой тренія данныхъ матеріаловъ. Всякая величина коэффициента тренія смазанныхъ тѣлъ, взятая въ отдѣльности, безъ указанія цѣлаго ряда условій, при которыхъ она получена, не имѣетъ никакого значенія. Но въ рядѣ другихъ величинъ коэффициентовъ тренія, она получаетъ значеніе промежуточнаго члена и можетъ служить только указаніемъ того направленія, какое принимаетъ сила тренія подъ вліяніемъ измѣненія того или иного фактора.

Несмотря на такую неопредѣленность, величина коэффициента тренія, несомнѣнно, всегда будетъ интересовать техниковъ, такъ какъ въ практикѣ знаніе соотношенія силъ, дѣйствующихъ на тѣла, и силъ сопротивленія тренія имѣетъ первенствующее значеніе. Кромѣ знанія потерь, связанныхъ съ треніемъ, необходимо бываетъ знать допустимую нагрузку на поверхность трущихся тѣлъ, такъ какъ тѣ разрушенія, которыя вызываются вслѣдствіе чрезмѣрнаго увеличенія коэффициента тренія, могутъ быть значительными. Важно бываетъ поэтому знать то давленіе на единицу поверхности, при которомъ начинаетъ выдавливать-ся смазка, и происходитъ соприкасаніе твердыхъ тѣлъ. Конечно, на это можетъ указать только цѣлый рядъ величинъ коэффициентовъ тренія, но здѣсь важно отмѣтить то, что подъ извѣстнымъ давленіемъ происходитъ соприкосновеніе твердыхъ тѣлъ, и что начало этого соприкосновенія всегда необходимо знать. Съ другой стороны, вліяніе давленія на коэффициентъ тренія при большихъ нагрузкахъ велико сравнительно съ вліяніемъ другихъ величинъ, входящихъ въ формулу (16), т. е. F всегда гораздо меньше P .

9. Какъ только мы перейдемъ къ малымъ давленіямъ при большой вязкости смазывающаго слоя, роли величинъ, входящихъ въ формулу (16), мѣняются, и самая величина коэффициента тренія теряетъ практическій смыслъ, что наглядно видно при вычисленіи коэффициентовъ тренія по уравненіямъ (16) и (17) для поршневыхъ машинъ. Давле-

нїе на поверхность цилиндра въ нихъ слагается изъ давленія поршневыхъ колець и вѣса поршня. Нажимное давленіе колець, встрѣчающееся въ практикѣ, рѣдко превосходитъ 0,5 кгр./см.²; что касается давленія отъ вѣса поршня, то оно колеблется отъ 0,7 кгр./см.² для поршней, охлаждаемыхъ водою, и 0,05 кгр./см.² для поршней, не охлаждаемыхъ водою. Во многихъ случаяхъ при сквозномъ штокѣ вѣсъ поршня, по крайней мѣрѣ, теоретически, совершенно отпадаетъ, такъ какъ давленіе отъ вѣса передается на сальники. Въ случаяхъ же, когда кольца сняты при сквозномъ штокѣ, то давленіе на стѣнки цилиндра будетъ равно нулю; а такъ какъ при этомъ сопротивление тренія вслѣдствіе вязкости смазки не равно нулю, то коэффициентъ тренія по формуламъ (16) и (17) получаетъ безконечно большую величину¹⁾. Такъ какъ колебанія давленія отъ вѣса поршня на стѣнки цилиндра происходятъ въ предѣлахъ отъ 1 кгр. до 0, то ясно, что соотвѣтственно и коэффициенты тренія должны колебаться отъ нѣкоторой очень малой величины (меньше единицы) до безконечно большой. Самыя ничтожныя ошибки въ опредѣленіи давленія на поверхность влекутъ за собой большія измѣненія коэффициента тренія.

10. Все сказанное побуждаетъ насъ отказаться при нашихъ опытахъ отъ вычисленія коэффициента тренія и пользоваться для характеристики каждаго опыта силою сопротивления тренія

$$F = \frac{A_R}{v} \quad (18)$$

и удѣльнымъ сопротивленіемъ тренія.

$$f = \frac{F}{Q}, \quad (19)$$

гдѣ A_R —работа тренія, v —средняя скорость поршня, Q —поверхность поршня.

Несомнѣнно, что всѣ свойства, присущія коэффициенту тренія, также относятся къ удѣльному сопротивленію тренія. По измѣненію этой величины всегда можно судить о вліяніи всѣхъ тѣхъ факторовъ, которые вліяютъ и на коэффициентъ тренія. Подставляя въ уравненіе (19) значеніе F изъ уравненія (13), мы получимъ

$$f = \frac{\mu v}{l}. \quad (20)$$

Это уравненіе намъ показываетъ, что удѣльное сопротивление зависитъ отъ давленія постольку, поскольку отъ него измѣняется только толщина слоя, такъ какъ коэффициентъ внутренняго тренія по гипотезѣ Ньютона отъ давленія не зависитъ. Что касается вліянія температуры на удѣльное сопротивление, то оно таково же, какъ и на коэффициентъ тренія, такъ какъ f и η одинаково зависятъ отъ μ и l . (Сравн. форм. 16 съ 20-ой).

¹⁾ Сравн. съ выводами О. Lasche. Z. d. V. d. J. 1902 S. 1935.

Преимуществами же употребленія удѣльнаго сопротивленія для характеристики тренія поршней машинъ нужно считать независимость этой величины отъ площади поверхности и малую зависимость отъ давленія. Удѣльное сопротивленіе тренія даетъ возможность судить о треніи машинъ, независимо отъ ихъ величинъ, и, наоборотъ, по ихъ величинѣ судить о потеряхъ, связанныхъ съ треніемъ поршней.

Если мы предположимъ, что сила тренія поршней обусловливается внутреннимъ треніемъ смазки, то удѣльное сопротивленіе тренія можно представить на основаніи уравненія (7) такъ

$$f = \mu \varphi, \quad (21)$$

т. е. удѣльное сопротивленіе тренія прямо пропорціонально коэффициенту внутренняго тренія μ и угловой скорости сдвиганія φ .

11. На основаніи высказанной нами въ § 1 гипотезы, что между силою сдвиганія и угловою скоростью всегда сохраняется опредѣленная зависимость, мы приходимъ къ заключенію, что при треніи смазанныхъ тѣлъ величина удѣльнаго сопротивленія не должна зависеть отъ относительной скорости движущихся частей, потому что съ увеличеніемъ этой скорости растетъ и толщина смазывающаго слоя, слѣдовательно, угловая скорость остается постоянною.

Но это положеніе требуетъ еще опытнаго подтвержденія, потому что указанія различныхъ авторовъ, настолько противорѣчивы по вопросу о вліяніи скорости на величину внутренняго тренія, что сдѣлать какой-либо общій выводъ затруднительно. Тѣмъ не менѣе, указанная проф. Б. П. Вейнбергомъ общность формулъ сдвига при упругой деформаци и во время сдвиганія слоя смазки, а такъ же принятое нами положеніе о постоянствѣ между силою и угловою скоростью, даютъ возможность до нѣкоторой степени освѣтить явленія тренія смазанныхъ тѣлъ.

О зависимости толщины слоя отъ скорости движущихся частей зналъ еще Гирнъ; но въ этомъ отношеніи интересны данныя проф. Н. Петрова, который, какъ извѣстно, опредѣлялъ въ своихъ опытахъ величину

$$\varepsilon + \frac{\mu}{\lambda} + \frac{\mu}{\lambda_1},$$

гдѣ ε —толщина слоя, λ и λ_1 коэффициенты тренія смазывающей жидкости съ мателлическими поверхностями. По вычисленіямъ проф. Петрова второй и третій члены этого выраженія настолько малы сравнительно съ ε , что ими въ нѣкоторыхъ случаяхъ можно пренебречь. Говоря о вліяніи скорости на указан. величину $\varepsilon + \frac{\mu}{\lambda} + \frac{\mu}{\lambda_1}$ въ опытахъ съ машиною Клейнъ, Шанцлинъ и Беккеръ, проф. Петровъ приводитъ для сравненія опыты съ сурѣпнымъ и съ свѣтлымъ минеральнымъ масломъ¹⁾, при чемъ коэффициентъ внутренняго тренія онъ указываетъ для сурѣпнаго масла 0,00270, а для минеральнаго 0,00263. Эти величи-

1) Н. Петровъ. *ibid.* 308.

ны μ не могли, конечно, оказать вліянія на величину $\varepsilon + \frac{\mu}{\lambda} + \frac{\mu}{\lambda_1}$, а между тѣмъ послѣдняя въ сравниваемыхъ опытахъ получилась различною. Единственною причиною этой разницы является скорость. Мы вычислили отношенія величинъ $\varepsilon + \frac{\mu}{\lambda} + \frac{\mu}{\lambda_1}$ и скорости и нашли, что первыя относятся какъ 1 : 0,846, вторыя какъ 1 : 0,892. Сравненіе опытовъ съ сурфѣннымъ масломъ и съ смѣсью сурфѣннаго съ минеральнымъ даетъ отношеніе скоростей 1 : 0,845, а отношеніе $\varepsilon + \frac{\mu}{\lambda} + \frac{\mu}{\lambda_1}$ 1 : 0,849.

При большихъ давленіяхъ пропорціональность измѣненія не сохраняется, не сохраняется она и при малыхъ скоростяхъ, но здѣсь мы, повидимому, имѣемъ дѣло съ соприкосновеніемъ металловъ между собой.

На основаніи опытовъ съ вагонною осью проф. Н. Петровъ составилъ таблицу LXXIX¹⁾, которую мы здѣсь и воспроизводимъ въ видѣ таблицы IV, но съ прибавленіемъ графы для силы тренія, которая настъ также интересуется.

Таблица IV.

Сила тренія F .	Скорость v .	Температура трущихся частей.	$\varepsilon + \frac{\mu}{\lambda} + \frac{\mu}{\lambda_1}$	Температура трущихся частей.	$\varepsilon + \frac{\mu}{\lambda} + \frac{\mu}{\lambda_1}$	Примѣчанія.
6,73	236	12,5	0,00226	12,2	0,00275	} Масло сурфѣнное.
6,67	415	13,6	483	13,4	538	
6,87	239	13,5	179	13,0	198	} Смѣсь № 69.
6,87	418	13,0	381	12,4	417	
9,58	235	12,7	380	12,4	450	} Свѣтлое минеральн. масло № 71.
10,30	415	13,3	816	14,1	777	
10,20	227	13,6	329	12,7	408	} Темное минеральн. масло № 70.
10,20	410	13,7	636	12,7	831	

Данныя таблицы ясно показываютъ, что съ увеличеніемъ скорости толщина слоя растеть; при чемъ замѣчается нѣкоторая пропорціональность въ измѣненіяхъ этихъ величинъ.

На основаніи указанныхъ опытовъ проф. Петровъ даетъ для приближительныхъ расчетовъ формулу²⁾

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + 0,000001 (v - v_0).$$

которую можно представить въ видѣ

$$\frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{v - v_0} = 0,000001;$$

т. е. получается обратная величина нашей угловой скорости, которую проф. Петровъ принялъ одинаковою для всѣхъ испытанныхъ имъ смазокъ.

1) Н. Петровъ. *ibid.* 366.

2) Н. Петровъ. *ibid.* 386.

Для того, чтобы сохранялась при трении смазанныхъ тѣлъ определенная угловая скорость, необходимо, чтобы толщина смазки могла увеличиваться подѣ дѣйствіемъ гидродинамическаго напора жидкости. Это условіе мы и имѣемъ въ опытахъ проф. Петрова, потому что въ машинѣ Клейнъ, Шанцлинъ и Беккеръ вкладыши подшипника могли раздвигаться подѣ давленіемъ смазки безъ добавочнаго увеличенія давленія; а въ опытахъ съ вагонною осью толщина смазки могла увеличиваться вслѣдствіе особенностей вообще вагонныхъ буксъ. Въ тѣхъ же случаяхъ, когда толщина смазки не можетъ увеличиваться, напр., въ случаѣ вращенія шипа въ неразъемномъ цилиндрѣ, то тамъ мы должны обнаружить измѣненіе силы внутренняго тренія пропорціо-нально относительной скорости, какъ это слѣдуетъ по уравненію (13). Въ тѣхъ же случаяхъ, когда смазка можетъ увеличиваться, но съ добавочнымъ увеличеніемъ давленія, то мы будемъ имѣть промежуточное явленіе. Къ подобнымъ опытамъ мы должны будемъ отнести опыты *Stribeck'a*, *Lasche*, *Dettmar'a* и *Heimann'a*, у которыхъ вкладыши испытуемыхъ подшипниковъ или прижаты другъ къ другу болтами подшипника, или представляютъ неразъемную втулку. *Stribeck* и *Lasche* на основаніи своихъ опытовъ держатся того мнѣнія, что съ увеличеніемъ скорости коэффициентъ тренія вначалѣ падаетъ (*Stribeck*) и послѣ нѣкотораго минимума повышается, но гораздо медленнѣе чѣмъ увеличивается скорость; при скоростяхъ же выше 10 м./сек. коэффициентъ тренія не увеличивается со скоростью (*Lasche*).

Начальное паденіе величины коэффициента тренія проф. *Stribeck* объясняетъ тѣмъ, что вслѣдствіе увеличенія слоя смазки соприкасаніе металлическихъ частей постепенно уменьшается; но потомъ, послѣ нѣкотораго минимума, онъ начинаетъ быстро расти (при малыхъ давленіяхъ пропорціонально скорости) вслѣдствіе того, что остается постоянно толщина смазки. Но эта пропорціональность наблюдается только на небольшомъ участкѣ измѣненія скорости, дальнѣйшее измѣненіе коэффициента тренія идетъ гораздо слабѣе, чѣмъ въ то же время измѣняется скорость. Это проф. *Stribeck* объясняетъ нѣкоторымъ дальнѣйшимъ увеличеніемъ толщины слоя. Будучи согласны съ объясненіями проф. *Stribeck'a* относительно паденія коэффициента тренія до извѣстнаго минимума, намъ кажется непонятнымъ дальнѣйшее явленіе прекращенія измѣненія толщины слоя, а затѣмъ вновь увеличеніе его съ увеличеніемъ скорости. Намъ кажется, увеличеніе толщины слоя должно продолжаться все время, пока происходитъ увеличеніе скорости; но какъ только будетъ заполненъ зазоръ между цапфой и вкладышами подшипника, то вслѣдствіе наростанія слоя будетъ увеличиваться и зазоръ, но постольку, поскольку это позволяетъ конструкція подшипника. Ясно, что въ это время къ принятой нагрузкѣ на подшипникъ прибавляется давленіе сопротивленія болтовъ подшипника. Поэтому коэффициентъ тренія, вычисленный по формулѣ (15),

въ дѣйствительности не отвѣчаетъ тому давленію, какое существуетъ на поверхности трущихся тѣлъ. Это и служитъ причиною кажущагося увеличенія коэффициента тренія послѣ нѣкотораго минимума въ опытахъ проф. *Stribeck*'а и др. Каковъ законъ измѣненія давленія съ увеличеніемъ скорости, мы не знаемъ, но несомнѣнно, что толщина слоя все-таки продолжаетъ увеличиваться, насколько это позволяетъ увеличеніе зазора между цапфою и вкладышами подшипника подъ давленіемъ жидкости.

Выше сказаннымъ объясняется и то явленіе, что увеличеніе коэффициента тренія послѣ минимума для малыхъ нагрузокъ значительнѣе, чѣмъ для большихъ. Въ самомъ дѣлѣ, наростаніе толщины слоя при малыхъ нагрузкахъ идетъ быстрѣе, быстрѣе она достигаетъ величины зазора, и быстрѣе потомъ начинаетъ увеличиваться добавочное давленіе; но кромѣ того, относительное вліяніе этого добавочнаго давленія при меньшихъ нагрузкахъ значительнѣе на коэффициентъ тренія, чѣмъ при большихъ.

Понятнымъ намъ становится также и то, что опредѣленной нагрузкѣ отвѣчаетъ опредѣленная скорость, при которой коэффициентъ тренія принимаетъ свое минимальное значеніе. Чѣмъ больше давленіе на трущіяся поверхности, тѣмъ меньше слой смазки при одной и той же скорости, тѣмъ больше, слѣдовательно, и угловая скорость $\varphi = \frac{v_1 - v_2}{l}$.

Слѣдовательно, чѣмъ больше будетъ нагрузка, тѣмъ при большей относительной скорости достигнетъ толщина слоя величины зазора. Такимъ образомъ, величина зазора опредѣляетъ, съ одной стороны, минимумъ коэффициента тренія, съ другой, ту скорость, при которой этотъ минимумъ получается.

То, что у cadaго подшипника имѣется свой минимумъ коэффициента тренія, подтверждается опытами проф. *Stribeck*'а съ подшипниками Селерса и Магнолія.

О вліяніи величины зазора на величину тренія мы можемъ судить по опытамъ *O. Lasche*. Изъ его пространственной діаграммы ¹⁾ мы можемъ видѣть, что сила тренія падаетъ съ увеличеніемъ зазора. То же самое мы можемъ видѣть изъ діаграммы *Heimann*'а ²⁾, гдѣ ординаты кривыхъ измѣненія тренія для зазоровъ въ 0,05 мм. и 0,12 мм. отличаются другъ отъ друга почти вдвое. *G. Dettmar* на основаніи своихъ изслѣдованій ³⁾ приходитъ къ выводу, что коэффициентъ тренія мѣняется пропорціонально корню квадратному изъ скорости v . Между тѣмъ какъ *Heimann* говоритъ, что x въ выраженіи

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{v_1^x}{v_2^x}$$

1) *O. Lasche*. Z. d. V. d. I. 1902. S. 1935.

2) *H. Heimann*. Z. d. V. d. I. 1905. S. 1165.

3) *G. Dettmar*. E. T. Z. 1899. S. 381.

колеблется въ опытахъ *Dettmar*'а съ цѣльнымъ бронзовымъ вкладышемъ отъ 0,385 до 0,620 и только средняя величина изъ всѣхъ опытовъ ($x=0,51$) подтверждаетъ выводъ самого *Dettmar*'а. Что касается различныхъ авторовъ, то величина x колеблется еще сильнѣе, такъ у *Lasche* $x=0,30$, а у *Morra* и *Mantel* $x=0,66$. *Lasche* даже приходитъ къ выводу, что коэффициентъ тренія не зависитъ отъ скорости начиная съ 10 м./сек., т. е. при большихъ скоростяхъ x у него обращается въ нуль. Въ послѣднемъ случаѣ надо предполагать или постоянство угловой скорости, или повышение температуры слоя смазки при большихъ скоростяхъ, что вѣроятнѣе всего и было, такъ какъ *Lasche* производилъ опытъ съ цѣльнымъ вкладышемъ. Намъ кажется, что вообще у всѣхъ упомянутыхъ авторовъ температура смазки нѣсколько увеличивалась съ увеличеніемъ скорости, что служило причиною уменьшенія величины тренія.

На этомъ мы и ограничимся своими ссылками на авторовъ, такъ или иначе подтверждающихъ нашу мысль относительно угловой скорости φ , потому что данный вопросъ не является основной темой нашей работы и необходимъ намъ постольку, поскольку въ дальнѣйшемъ объясняетъ результаты нашихъ опытовъ.

Г л а в а П.

Постановка и производство опытовъ.

1. Трение поршня было изслѣдовано нами у трехъ машинъ: у газовой машины завода „Отто Дейцъ“, у компрессора завода „Руд. Мейера“ и у керосинового двигателя завода „Горнсби-Акройдъ“.

Газовая машина была выполнена въ Германіи по особому заказу завѣдующаго лабораторіей тепловыхъ машинъ Томскаго Технологическаго Института проф. В. Л. Малѣева. Главная особенность этой машины та, что она можетъ идти на любомъ топливѣ, какъ газообразномъ, такъ и жидкомъ; кромѣ того, въ этой машинѣ возможно измѣнять камеру сжатія, число оборотовъ и измѣрять температуру стѣнокъ цилиндра. Измѣненіе числа оборотовъ достигается съ помощью регулятора, для чего необходимо только перемѣнить регуляторныя пружины. Регуляторъ во время работы съ измѣненіемъ числа оборотовъ переставляетъ точку опоры рычага распредѣленія отчего мѣняется высота подъема клапана, а, слѣдовательно, мѣняется количество заряда. Для того, чтобы можно было измѣрять температуру стѣнокъ цилиндра, въ нихъ высверлены черезъ рубашку гнѣзда для термометровъ. Глубина каждаго гнѣзда такова, что нижняя поверхность термометровъ отстоитъ отъ внутренней, рабочей поверхности цилиндра на 4,5 мм. На дно гнѣздъ наливалось масло и въ него погружался шарикъ термометра. Гнѣзда расположены на верхней поверхности цилиндра въ такомъ порядкѣ, что одно изъ нихъ находится возлѣ камеры воспламененія, другое посрединѣ цилиндра, а третье въ концѣ рабочаго хода поршня. Сдѣлано это было съ тою цѣлю, чтобы можно было судить о температурѣ стѣнокъ вдоль цилиндра во время работы машины. Чтобы судить о температурѣ стѣнокъ цилиндра, конечно, недостаточно этихъ трехъ точекъ, потому что температура стѣнокъ такъ же сильно мѣняется отъ нижней части цилиндра, гдѣ вступаетъ охлаждающая вода, до верхней, гдѣ вода выходитъ изъ рубашки; но устройство гнѣздъ для термометровъ въ нижней части цилиндра невозможно вслѣдствіе конструктивныхъ особенностей машины.

Въ остальномъ эта машина представляетъ обычный типъ газовой машины завода „Отто-Дейцъ“. Она четырехтактная, простого дѣйствія, рассчитана на 10 л. с. при 200 оборотахъ въ минуту. Охлажденіе цилиндра и камеры сжатія производится въ отдѣльности. Цилиндръ открытъ съ одной стороны и въ него входитъ поршень въ видѣ длиннаго ныряла.

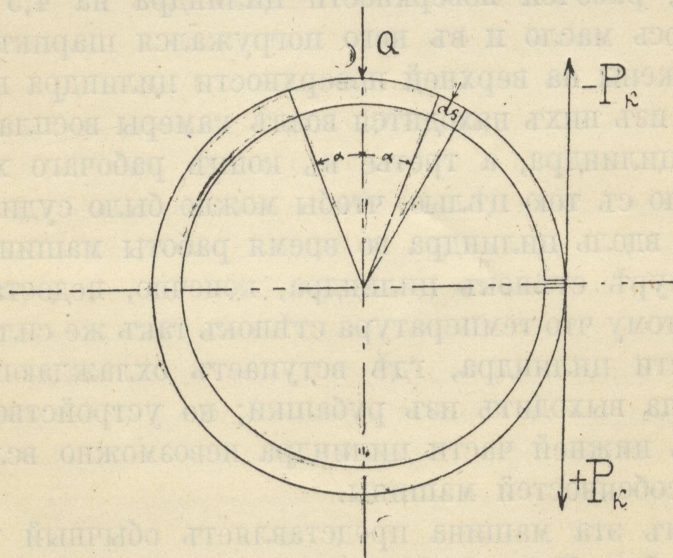
Главные размѣры машины слѣдующіе: діаметръ цилиндра $D_c = 219,96$ мм., при чемъ средняя ошибка арифметической середины $\pm 0,0047$ мм., діаметръ поршня $D_n = 219,67$ мм. при средней ошибкѣ $\pm 0,030$ мм., зазоръ между поверхностями цилиндра и поршня $\delta = \frac{219,96 - 219,67}{2} = \frac{0,29}{2} = 0,145$ мм., средняя ошибка въ опредѣленіи δ равна $\pm \sqrt{0,0047^2 + 0,03^2} = \pm 0,0304$ мм. или 21,0% отъ величины зазора. Ходъ поршня $H = 321$ мм. Длина поршня 440 мм., боковая его поверхность 3040 см., вѣсъ поршня вмѣстѣ съ крейцкопфной головой шатуна 63,8 кгр.

2. Удѣльное давленіе отъ вѣса поршня мы вычисляли на горизонтальную проекцію цилиндра по выраженію

$$p_n = \frac{P_n}{(H - nh) D} = \frac{63,8}{(44 - 5,1,2)22} = 0,076 \text{ к.р./см.}^2$$

Въ этомъ выраженіи n — число поршневыхъ колець, а h — высота кольца. Удѣльное давленіе отъ колець мы принимали одинаковымъ по всей окружности, хотя дѣйствительное распредѣленіе должно быть иное, такъ какъ толщина колець по окружности измѣняется. Въ виду того, что намъ необходимо знать только среднее давленіе, то допущеніе равномернаго распредѣленія давленія не нарушаетъ правильности нашихъ дальнѣйшихъ выводовъ.

Силу нажатія колець мы опредѣляли слѣдующимъ образомъ: охватывали кольцо индикаторнымъ шнуромъ и стягивали его до діаметра поршня, при чемъ верхній конецъ шнура у насъ былъ укрѣпленъ, а къ нижнему подвѣшивались гири, черт. 3. Положимъ, что удѣльное



Черт. 3.

давленіе у насъ p_1 , тогда давленіе на бесконечно малую дугу ds будетъ равно $dshp_1$, а слагающая этого давленія, параллельная равнодѣляющей уголъ 2α , будетъ равна

$$dshp_1 \cos \alpha = rhp_1 \cos \alpha d\alpha.$$

Слѣдовательно, равнодѣйствующая Q всѣхъ давленій на половину кольца будетъ равна

$$Q = 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} r h p_1 \cos \alpha \, d\alpha = 2 r h p_1.$$

Такъ какъ Q можно замѣнить въ стыкѣ кольца силою вдвое меньшею, то

$$Q = 2 P_k;$$

слѣдовательно,

$$p_1 = \frac{P_k}{r h}. \quad (22)$$

Изъ опыта, какъ среднюю величину, P_k мы нашли равнымъ 6,2 кгр., слѣдовательно, $p_1 = 0,47$ кгр./см.². Суммарное давленіе всѣхъ колець равняется 195 кгр., т. е. почти въ три раза превосходитъ вѣсъ поршня.

Кромѣ этихъ давленій, на стѣнки цилиндра передаются нормальныя давленія. Эти давленія вызываюся, во-первыхъ, ускоряющими и замедляющими силами, которые достигаютъ своего максимума въ крайнихъ положеніяхъ поршня и выражаются въ нашей машинѣ при 200 оборотахъ въ 376 кгр. и въ 532 кгр., и, во-вторыхъ, давленіями сжатія и разрѣженія, которыя въ крайнихъ положеніяхъ поршня доходятъ въ нашихъ опытахъ 213 кгр. и 124 кгр. Силы инерціи движущихся частей противоположны по дѣйствию сжатію и разрѣженію, а потому послѣ вычитанія сила, дѣйствующая по направленію къ валу, будетъ равна 252 кгр., а въ обратномъ направленіи равна 319 кгр. Нормальная составляющая сила, какъ извѣстно, зависитъ отъ угла наклона шатуна къ оси цилиндра; она увеличивается съ увеличеніемъ угла и уменьшается съ уменьшеніемъ угла; слѣдовательно, она должна увеличиваться къ срединѣ хода поршня и обращаться въ нуль въ крайнихъ его положеніяхъ. Такъ какъ въ срединѣ хода силы инерціи мѣняють свой знакъ и обращаются въ нуль, то нормальныя силы не велики и по вычислениямъ въ нашихъ опытахъ колеблются отъ +31 кгр. до—28 кгр. на всю поверхность поршня. Отрицательныя силы разгружаютъ поршень, а положительныя прибавляются къ его вѣсу. Такъ какъ дѣйствіе этихъ силъ переменнo и такъ какъ оно не велико, то мы ими пренебрегли во всѣхъ дальнѣйшихъ выводахъ.

3. Компрессоръ завода „Руд.-Мейеръ“ имѣетъ два цилиндра: высокаго и низкаго давленія. Распредѣленіе у цилиндра низкаго давленія принудительное, а у высокаго—автоматическое. Оба цилиндра двойного дѣйствія, охлаждаются водой, проходящей черезъ рубашку, имѣють сквозной штокъ, благодаря чему поршень находился въ подвѣшенномъ состояніи. Послѣднее обстоятельство составляло особый интересъ для нашей работы. Особенности этого компрессора заключаются въ томъ, что у него можно принудительное клапанное распредѣленіе замѣнить золотниковымъ и, кромѣ того, можно измѣнять вредное пространство въ цилиндрѣ низкаго давленія.

Размѣры цилиндровъ и поршней слѣдующіе. Диаметръ цилиндра низкаго давленія $D'_c=200,53$ мм., при этомъ средняя ошибка ариѳметической середины $\pm 0,011$ мм.; диаметръ поршня $D'_n=200,29$ мм., средняя ошибка ариѳметич. сред. $\pm 0,013$ мм.; зазоръ между поверхностями цилиндра и поршня

$$\delta' = \frac{200,53 - 200,29}{2} = \frac{0,24}{2} = 0,12 \text{ мм.},$$

средняя ошибка для δ' равна $\pm 0,017$, что въ % составляетъ $\pm 14,2\%$ отъ δ' ; длина поршня 224,5 мм., ходъ поршня 250 мм., боковая поверхность 1414 см.². Диаметръ цилиндра высокаго давленія $D''_c=100,05$ мм., средняя ошибка $\pm 0,018$ мм.; диаметръ поршня $D''_n=99,77$ мм., средняя ошибка $\pm 0,013$ мм.; зазоръ между поверхностями цилиндра и поршня

$$\delta'' = \frac{100,05 - 99,76}{2} = \frac{0,29}{2} = 0,145 \text{ мм.},$$

при этомъ средняя ошибка $\pm 0,022$ мм., что въ % составляетъ $\pm 15\%$ отъ δ'' ; длина поршня 160 мм., ходъ поршня 250 мм., боковая поверхность 503 см.².

4. Удѣльное давленіе отъ вѣса поршня мы не можемъ вычислить, такъ какъ при сквозномъ штокѣ теоретически оно равно нулю, вѣсъ же поршня воспринимается сальниками.

Кольца обоихъ цилиндровъ не самопружиняція, а съ радіальными спиральными пружинами, поэтому нажатіе колець мы опредѣляли двумя способами: 1) стягиваніемъ кольца индикаторнымъ шнуромъ и 2) опредѣленіемъ упругости каждой отдѣльной спиральной пружины. Для колець большого цилиндра мы получили по первому способу $P_k=6,5$ кгр., что даетъ по форм. (22) $p'_1=0,812$ кгр./см.²; по второму способу мы получили упругость каждой отдѣльной пружины такую: № 1—6 кгр., № 2—5 кгр., № 3—6 кгр., № 4—6 кгр., № 5—5 кгр., № 6—5,5 кгр., № 7—5 кгр., № 8—6,5 кгр., № 9—5 кгр., № 10—2 кгр., № 11—7 кгр., № 12—7 кгр., № 12—3,5 кгр., № 14—7 кгр., № 15—3,5 кгр., № 16—1 кгр., суммарное давленіе 81 кгр., если мы распредѣлимъ это давленіе на площадь нажатія колець, то получимъ $p'_1=0,803$ кгр./см.². Какъ въ первомъ, такъ и во второмъ случаѣ сжиманіе колець доводилось приблизительно до діаметра поршня, отсюда ясно становится, что точность опредѣленіе упругости пружинъ и колець не могла быть большею, что видно также и изъ приведенныхъ выше данныхъ. Точно такимъ же путемъ мы нашли, что для пружинъ малаго цилиндра удѣльное давленіе $p''_1=1,19$ кгр./см.² и суммарное давленіе равнымъ 60 кгр. Что касается нормальныхъ давленій, то они здѣсь на поршень не передаются, такъ какъ машина имѣетъ ползунъ.

5. Двигатель „Горнсби-Акройдъ“ построенъ для работы на керосинѣ или нефти, мощность при 200 оборотахъ $N_e=25$ д. л. с.; онъ четырехтактный, простого дѣйствія, а потому одна сторона цилиндра открыта. Рисунокъ этой машины мы здѣсь не приводимъ; желающіе же познакомиться съ этой машиной могутъ найти описаніе на стр. 112 у Гюльдера „Двигатели внутренняго сгорания“ 1907 г. Въ отношеніи изслѣ-

дованія тренія поршня эта машина интересна съ той стороны, что поршень и цилиндръ у ней приработались и, какъ покажутъ приведенныя ниже измѣренія, сильно износились. Нужно отмѣтить, что эта машина была приобрѣтена вначалѣ въ эксплуатаціонныхъ цѣляхъ и нѣсколько лѣтъ, пока не была оборудована электрическая станція, работала для освѣщенія, впоследствии же была перенесена въ лабораторію тепловыхъ машинъ для студенческихъ работъ.

Главные размѣры машины слѣдующіе: діаметръ цилиндра $D = 342,68$ мм., средняя ошибка ариѳметич. середины $\pm 0,06$ мм., діаметръ поршня $D_n = 342,00$ мм., средняя ошибка $\pm 0,22$ мм., зазоръ $\delta = \frac{342,68 - 342,00}{2} = 0,34$ мм., средняя ошибка $\pm 0,12$ мм., что составляетъ $\pm 35\%$ отъ δ . Такая большая неточность въ опредѣленіи δ объясняется тѣмъ, что величины діаметровъ поршня и цилиндра взяты по всей длинѣ того и другого, а потому представляютъ нѣкоторую среднюю величину нѣсколькихъ діаметровъ. Такъ какъ эта машина сильно изношена, то разность діаметровъ поршня въ одномъ и другомъ концѣ его равна $342,70 - 341,00 = 1,70$ мм. Длина поршня 507 мм., полная поверхность поршня 5460 см.², вѣсъ поршня вмѣстѣ съ крейцкопфной головкой шатуна 124,5 кгр.

6. Удѣльное давленіе отъ вѣса поршня $p_n = 0,082$ кгр./см.². На поршнѣ имѣется 4 кольца, высота каждаго кольца 16,1 мм., нажимная поверхность всѣхъ колець 693,5 см.². Удѣльное давленіе отъ колець по форм. (22) равно $p_1 = 0,544$ кгр./см.²; слѣдовательно, полное давленіе отъ колець 377 кгр.

7. Со всѣми указанными машинами нами были произведены изслѣдованія тренія поршня калориметрическимъ способомъ. Какъ уже указывалось выше (Введ. § 2) способъ этотъ заключается въ томъ, что черезъ рубашку машины пропускается вода, которая отнимаетъ отъ стѣнокъ цилиндра тепло, полученное отъ тренія поршня.

При производствѣ отдѣльныхъ серій опытовъ нами мѣнялись слѣдующія факторы:

- 1) Измѣнялись числа оборотовъ машины, а слѣдовательно, и средняя скорость поршня, къ которой мы и относили данныя опытовъ;
- 2) измѣнялась смазка тѣмъ, что брался различный смазочный матеріаль, и тѣмъ, что къ обычной смазкѣ прибавлялся керосинъ;
- 3) измѣнялось количество смазки;
- 4) измѣнялась температура трущихся поверхностей, что регулировалось количествомъ пропускаемой воды; и, наконецъ,
- 5) опыты ставились съ поршневыми кольцами и безъ поршневыхъ колець.

8. Продолжительность наблюденія въ каждомъ опытѣ была не велика отъ 15 до 25 минутъ и обуславливалась тѣмъ, какъ протекалъ опытъ за время наблюденія. Если температура входящей и выходящей

воды въ это время не мѣнялась болѣе, чѣмъ на $0,2^\circ$, то продолжительность опыта ограничивали 15 минутами. Колебанія въ $0,2^\circ$ мы допускали въ виду того, что даже при хорошо установившихся опытахъ эти колебанія замѣтны, и объясняются тѣмъ, что изъ рубашки цилиндра вода поступаетъ отдѣльными струйками различной температуры. Отсюда слѣдуетъ, что подготовительный періодъ наблюденія можетъ быть очень продолжителенъ и зависитъ отъ многихъ причинъ. Напримѣръ, отъ величины работы тренія, такъ какъ при маломъ треніи медленно прогревается вся машина до постоянной температуры. Въ среднемъ можно считать подготовительный періодъ около 2 часовъ, но автору удавалось иногда произвести наблюденія черезъ часъ послѣ измѣненія условій, но иногда же для постановки опыта требовалось 5 часовъ подготовительной работы.

9. Всѣ наблюденія производилъ авторъ самъ; при этомъ приходилось наблюдать: 1) температуру входящей и выходящей воды, 2) температуру стѣнокъ цилиндра, 3) расходъ воды отвѣшиваніемъ на вѣсахъ, 4) число оборотовъ по якорному или другому какому-либо счетчику и 5) силу тока и его напряженіе по распредѣлительной доскѣ.

Температура входящей и выходящей воды измѣрялась термометрами, дѣленія которыхъ равняются $0,1^\circ$; при отсчетахъ можно было на глазъ опредѣлить сотыя доли градуса съ возможной ошибкой $\pm 0,02^\circ$. За каждый опытъ дѣлалось 4 наблюденія температуры, черезъ каждыя 5 минутъ. Въ это же время отсчитывалась и температура стѣнокъ цилиндра съ возможной ошибкой $\pm 0,1^\circ$. Большая точность здѣсь не нужна, такъ какъ по этой температурѣ мы можемъ судить только приблизительно о температурѣ стѣнокъ.

Расходъ воды опредѣлялся взвѣшиваніемъ, черезъ каждыя пять минутъ, при этомъ большія расходы взвѣшивались на десятичныхъ вѣсахъ, имѣющихъ дѣленія, равныя 0,05 кгр., а малыя на простыхъ вѣсахъ, гдѣ точность могла быть достигнута $\pm 0,5$ гр. Вода, поступающая изъ рубашки цилиндра, собиралась въ бакъ или ведро. Надъ бакомъ помѣщается воронка, черезъ которую до начала опыта вода стекаетъ въ отводной колодезь. Въ моментъ начала опыта воронка отстранялась и вода поступала въ бакъ; черезъ пять минутъ воронка подставлялась; все это можно было продѣлать быстро, чѣмъ достигалась точность забора воды. Когда же расходъ воды былъ малъ, то вода собиралась въ ведро.

Здѣсь необходимо отмѣтить, что для точности постановки калориметрическихъ опытовъ крайне важно, чтобы расходъ воды былъ постояненъ во время опыта. Важность этого можно видѣть изъ того, что съ увеличеніемъ расхода начинаетъ падать температура отходящей воды и температура стѣнокъ цилиндра, слѣдовательно, съ увеличеніемъ расхода будетъ унесено не только тепло тренія за наблюдаемое время, но и тепло, заключающееся въ массѣ стѣнокъ. При уменьшеніи расхода во-

ды происходитъ обратное. При постановкѣ опытовъ на машинѣ „Отто-Дейцъ“ мы пользовались водою изъ общей сѣти Института, въ которой давленіе часто мѣнялось, что заставляло насъ иногда тратить лишнее время на подготовку опытовъ. Приходилось пользоваться для постановки опытовъ только вечернимъ временемъ, когда расходъ воды по отвѣтвленіямъ магистрали или совершенно прекращался или былъ очень малъ, а потому давленіе въ это время было постоянно. Это обстоятельство побудило приступить къ постройкѣ отдѣльнаго для лабораторіи водонапорнаго бака, что послужило причиной того, что постановка опытовъ съ компрессоромъ и машиною „Горнсби-Акройджъ“ задержалась на два мѣсяца.

Число оборотовъ опредѣлялось счетчиками. У машины „Отто-Дейцъ“ поставленъ якорный счетчикъ, при чемъ движеніе передается отъ распределительнаго вала, слѣдовательно, счетчикъ показывалъ вдвое меньшее число оборотовъ. У компрессора и у машины „Горнсби-Акройджъ“ въ торецъ кривошипнаго вала былъ укрѣпленъ ручной счетчикъ.

10. Образецъ записи представляетъ слѣдующая таблица.

23/vш12.

Опытъ I.

Время.	Якорн. счетчикъ.	Раз-ность.	Температура воды		Время.	Вѣсъ воды.	Раз-ность.	Вольт.	Амп.	Примѣчанія.
			t вх.	t вых.						
6.11	58135	302	12,3	19,2	6.14	0	29,5	229	21,5	B=756.
6.16	58437		12,3	19,2	6.24	29,5		228	21,5	t=18,5.
6.21	58740		12,3	19,2	6.25	29,5	29,6	238	21,5	Масло.
6.26	59043		12,3	19,4	6.35	56,1		228	22,0	См. 1/л.
6.31	59345		12,3	19,4	—	—	—	227	22,0	За 1 ч. 30,4 гр.
—	—	302,5	12,3	19,3	—	—	29,55	228	21,7	—

Чтобы уменьшить потери отъ лучеиспусканія, вся внѣшняя поверхность цилиндра у машины „Отто-Дейцъ“ была обложена войлокомъ и въ открытый конецъ поршня былъ вставленъ дискъ изъ жести съ узкимъ прорѣзомъ для шатуна.

Масло у этой машины подавалось особымъ насосикомъ, приводимымъ въ движеніе отъ распределительнаго вала. У компрессора и машины „Горнсби-Акройджъ“ масло поступало самотекомъ на трущіяся поверхности.

11. Механическій методъ. Какъ указывалось выше методъ этотъ состоитъ въ томъ, что опредѣляютъ индикаторную и тормазную работу машины, опредѣляютъ разность между этими работами, опредѣляютъ вращенія маховиковъ и кривошипнаго вала и по всѣмъ этимъ величинамъ судятъ о работѣ тренія поршня. Все сказанное можно выразить уравненіемъ

$$R_n = N_i - N'_i - N_e - R_{np}, \quad (23)$$

гдѣ $R_{вр}$ —работа вращенія маховиковъ, а остальные величины указаны въ введеніи, (ур-ніе 5 а).

Для полученія всѣхъ величинъ, входящихъ въ уравненіе (23), были поставлены нѣсколько серій опытовъ, результатомъ которыхъ являются таблицы X и XI. (См. ниже. Гл. III).

Всѣ опыты таблицъ X и XI были произведены авторомъ со студентами. Эти опыты были поставлены не для опредѣленія тренія горшня, а для изученія вопросовъ, касающихся работы газовой машины, какъ таковой. При постановкѣ этихъ опытовъ работали двѣ группы студентовъ старшихъ семестровъ, при чемъ каждая группа имѣла самостоятельную тему и выполняла ее какъ дипломную работу. Авторъ принималъ участіе во всѣхъ этихъ работахъ не только какъ организаторъ, но и какъ участникъ наблюдений.

По окончаніи всѣхъ опытовъ обработку матеріала студенты производили самостоятельно, параллельно имъ авторъ также произвелъ обработку матеріала, которая и вошла въ данное сочиненіе.

Продолжительность опытовъ была 25 минутъ, при чемъ каждый опытъ имѣлъ себѣ контрольный опытъ. Наблюденія производились только послѣ того, какъ наступало вполнѣ установившееся состояніе.

При всѣхъ опытахъ участвовало 5 лицъ: 1-е лицо снимало индикаторныя діаграммы и отсчитывало число оборотовъ, 2-е лицо производило отсчеты по газовымъ и воздушнымъ часамъ, 3-е лицо записывало температуру воды, входящей и выходящей изъ головы и рубашки цилиндра, а также и температуру отходящихъ газовъ, 4-е лицо отвѣшивало черезъ каждыя пять минутъ отходящую воду изъ головы и изъ рубашки цилиндра, и, наконецъ, 5-е лицо производило газовый анализъ отходящихъ продуктовъ горѣнія.

Всѣ отсчеты производились черезъ пять минутъ, такъ что за каждый опытъ получалось шесть наблюдений.

Индикаторныя діаграммы снимались индикаторомъ „Майгакъ“, при чемъ пружины брались въ 2 мм.—1 атм. и въ 30 мм.—1 атм. Сперва снималась сильной пружиной діаграмма рабочего процесса, затѣмъ слабой пружиной діаграмма засасывающаго и выталкивающаго хода.

Эффективная мощность опредѣлялась саморегулирующимся тормазомъ, съ конструкціей котораго желающіе могутъ познакомиться по сочиненію А. Грамберга¹⁾. Нагрузка, отнесенная къ одному обороту машины, во всѣхъ спытахъ оставалась постоянною.

12. Переменными факторами при постановкѣ всѣхъ этихъ опытовъ являются: 1) число оборотовъ, 2) степень сжатія, 3) температура охлаждающей воды, 4) моментъ зажиганія смѣси электрической искрой и 5) составъ смѣси (отношеніе газа къ воздуху).

¹⁾ А. Грамбергъ. „Техническія измѣренія при и слѣдованіи машинъ“. 1907. СПб. стр. 144.

Для насъ, при изслѣдованіи тренія поршня, важны два фактора: число оборотовъ и температура охлаждающей воды.

Измѣненіе числа оборотовъ машины достигалось перемѣной регуляторныхъ пружинъ, при чемъ въ распоряженіи имѣлись пружины на 200, 175, 150 и 125 оборотовъ.

Что касается температуры отходящей, охлаждающей воды, то она регулировалась расходомъ воды около трехъ точекъ 20° , 40° и 60° Ц. Въ виду трудности установить точно эти температуры, пришлось довольствоваться нѣкоторымъ приближеніемъ, что видно изъ табл. X. При постановкѣ всѣхъ этихъ опытовъ пользовались водой изъ общей сѣти Института, въ которой давленіе все время мѣнялось, а потому мѣнялась и температура отходящей воды, что является недостаткомъ опытовъ.

Вліяніе другихъ перемѣнныхъ факторовъ на треніе поршня не замѣтно и если оно было, то, повидимому, было ничтожно.

13. Работу вращения маховика, кривошипнаго вала и всего распределительнаго механизма опредѣляли такимъ образомъ: отцѣпляли шатунъ съ поршнемъ отъ колѣна вала и приводили маховикъ и валъ во вращеніе. По количеству затраченной электрической энергіи судили о работѣ вращения R_p указанныхъ выше частей машины.

Вся постановка опыта и весь расчетъ велся на слѣдующихъ основаніяхъ.

Какъ извѣстно, всѣ электрическія потери можно разбить на двѣ категоріи: однѣ изъ нихъ (собственно электрическія) легко вычисляются, такъ какъ они представляютъ потери на нагрѣваніе обмотки якоря и индукторовъ и потери въ контактѣ щетокъ, другія трудно вычисляются и опредѣляются только путемъ измѣренія, къ этой категоріи относятся потери механическія, потери отъ гистерезиса и токовъ Фуко. При постановкѣ опытовъ съ шунтовымъ электродвигателемъ удобнѣе всего регулировать число оборотовъ сопротивленіемъ въ цѣпи якоря, не трогая совершенно шунтового реостата, тогда сила тока въ якорѣ будетъ мѣняться, а въ индукторахъ оставаться постоянной. Если мы пренебрежемъ потерями въ контактѣ щетокъ, какъ величиной сравнительно малой, то при подсчетѣ собственно электрическихъ потерь нужно будетъ принять только потери на нагрѣваніе обмотки якоря. Какъ извѣстно, эти потери представляются произведеніемъ $i^2 r$, гдѣ i —сила тока, а r —сопротивленіе въ якорѣ, равное у насъ 0,225 ома. Если мы опредѣлимъ при холостомъ ходѣ для цѣлаго ряда чиселъ оборотовъ электрическую энергію W_2 и потерю на нагрѣваніе обмотки якоря $i_2^2 r$, то разность $W_2 - i_2^2 r$ представитъ потери второй категоріи, т. е. потери механическія, на гистерезисъ и токи Фуко. Если такимъ же образомъ опредѣлимъ электрическую энергію W_1 , которая необходима для вращения электродвигателя, маховика, вала и распределительнаго механизма, а также потери на нагрѣваніе якоря $i_1^2 r$, то разность $W_1 - i_1^2 r$ будетъ представлять,

съ одной стороны, потери второй категоріи въ самомъ электродвигателѣ, съ другой стороны, потери въ ременной передачѣ и работу вращения $R_{вр}$ всѣхъ выше указанныхъ частей испытуемой машины.

Изъ всего сказаннаго слѣдуетъ, что для опредѣленія вращения маховика, вала и распредѣлительнаго механизма $R_{вр}$ можно написать слѣдующее уравненіе

$$R_{вр} = \eta_p \frac{(W_1 - i_1^2 r) - (W_2 - i_2^2 r)}{736}, \quad (24)$$

гдѣ η_p —коэффициентъ ременной передачи. Но эта формула вполнѣ удовлетворительна только до тѣхъ поръ, пока i_1 и i_2 не сильно отличаются, если же разница будетъ велика, то велика будетъ и разница для потерь отъ гистерезиса и токовъ Фуко, тогда какъ уравненіе (24) выведено въ предположеніи, что эти потери остаются постоянными. Уравненіе (24) даетъ возможность для любого числа оборотовъ опредѣлить работу вращения $R_{вр}$, но въ виду того, что данныя въ это уравненіе приходится получать изъ двухъ различныхъ опытовъ (при холостомъ ходѣ и нагруженномъ), то для вычисленія $R_{вр}$ приходится прибѣгать къ графическому интерполированію, именно, приходится сперва построить кривую $W_2 - i_2^2 r$ и по ней уже подыскивать соотвѣтствующія значенія величины $W_2 - i_2^2 r$ въ уравненіи (24).

При постановкѣ опытовъ необходимо поставить вольтметръ для опредѣленія напряженія на зажимахъ машины и амперметръ для опредѣленія силы тока въ якорѣ. Важно имѣть какъ можно болѣе точные приборы, такъ какъ отъ неточности этихъ приборовъ въ значительной степени зависитъ возможная ошибка опыта.

Итакъ, опредѣленіе $R_{вр}$ приводится къ постановкѣ двухъ опытовъ: 1) опредѣленія работы вращения электродвигателя въ холостую и 2) опредѣленія работы вращения электродвигателя, маховика, вала и распредѣлительнаго механизма машины. Производство опытовъ крайне просто, но какъ мы увидимъ въ слѣдующей главѣ, требуетъ особой тщательности наблюденій для уменьшенія среднихъ ошибокъ въ результатахъ опытовъ.

Г л а в а ІІІ.

Обработка и критика опытного матеріала.

Прежде чѣмъ приступить къ выводамъ мы считаемъ необходимымъ дать критическій обзоръ всему опытному матеріалу. Для того, чтобы составить представленіе о возможныхъ ошибкахъ въ результатахъ нашихъ опытовъ, происходящихъ отъ неточности наблюдений и подъ влияніемъ побочныхъ причинъ, мы считаемъ необходимымъ, во-первыхъ, примѣненіе къ вычисленіямъ теорій ошибокъ, и, во-вторыхъ, постановку добавочныхъ опытовъ для выясненія вліянія постороннихъ факторовъ¹⁾.

1. При постановкѣ калориметрическихъ опытовъ наиболѣе важнымъ является точное знаніе тепла, унесеннаго охлаждающей водой, которое согласно уравненію (2) выражается равенствомъ

$$U_n = (t_1 - t_2) w.$$

Возможная ошибка при опредѣленіе расхода воды слагается изъ ошибки отсчета момента начала и конца опыта и ошибки при взвѣшиваніи. Ошибка во времени возможна не болѣе одной секунды въ началѣ и въ концѣ забора воды за 5 мин., что составляетъ по $\pm 0,33\%$ за отсчетъ, а вѣроятная ошибка обоихъ отсчетовъ $\pm 0,33\sqrt{2}=0,46\%$. При взвѣшиваніи на десятичныхъ вѣсахъ возможна ошибка въ $\pm 0,05$ кгр., а на простыхъ $\pm 0,05$ гр.; эти ошибки должны быть отнесены не къ пятиминутному расходу, а ко всему расходу за 15 минутъ опыта, который при большихъ расходахъ колебался отъ 25 кгр. до 70 кгр., а при малыхъ расходахъ отъ 6 кгр. до 20 кгр.. Слѣдовательно, при взвѣшиваніи на десятичныхъ вѣсахъ ошибка у насъ колебалась отъ $\pm 0,07\%$ до $0,20\%$, а возможная ошибка двухъ взвѣшиваній $\pm 0,20\sqrt{2}=\pm 0,28\%$; при взвѣшиваніи на простыхъ вѣсахъ ошибку приходится отнести къ 6 кгр., такъ какъ ведро больше не вмѣщало воды, при этомъ возможная ошибка двухъ взвѣшиваній равна $\pm 0,01\%$. Средняя ошибка для величины w будетъ въ первомъ случаѣ $n=0,46+0,28=\pm 0,74\%$, а во второмъ $n=0,46+0,01=0,47\%$.

¹⁾ При вычисленіи среднихъ ошибокъ мы въ дальнѣйшемъ указываемъ, какъ ихъ абсолютную величину (m), такъ и относительную (n). Мы здѣсь не приводимъ формулъ для вычисленія среднихъ ошибокъ, потому что всякій, читающій нашу работу, можетъ легко найти ихъ во всякомъ курсѣ теоріи вѣроятностей. Въ нашемъ пользованіи былъ „Курсъ теоріи вѣроятностей“ Н. Авринскаго. 1904. Въ этой книгѣ необходимыя формулы собраны на стр. 84, 98 и 99.

Среднія ошибки ариѳметическихъ срединъ для температуръ t_1 и t_2 мы вычислили для опытовъ съ наименьшими t_1 и t_2 , такъ какъ для этихъ опытовъ ошибки эти будутъ наибольшими, въ виду того, что мы не допускали колебанія температуръ больше $0,2^\circ$. Для опыта № 64 для t_1 средняя ошибка $n=0,55\%$, для t_2 средняя ошибка $n=0,84\%$. Такимъ образомъ средняя суммарная ошибка для (t_1-t_2)

$$n = \sqrt{0,55^2 + 0,84^2} = 1\%.$$

Возможная ошибка для U_n будетъ $n=1,0+0,74=\pm 1,74$ и $\pm 1,47\%$.

2. Если мы теперь обратимся къ результатамъ опытовъ (см. въ прил. диагр. №№ 3, 4 и 5), то увидимъ, что ошибки въ дѣйствительности превосходятъ вычисленные, такъ, напримѣръ, опытъ № 4 даетъ отклоненіе въ $10,9\%$ (маш. „Отто-Дейцъ“), опытъ № 89 даетъ отклоненіе въ $9,4\%$ (машина Горнсби-Акройдъ). Если мы все отклоненія отнесемъ къ среднимъ линіямъ, которыя вычислены по среднему удѣльному давленію, то мы получимъ наши отклоненія въ процентахъ. Среднее ариѳметическое этихъ величинъ даетъ среднее процентное отклоненіе. Мы получимъ для опытовъ серіи № 1 отклоненіе $\pm 3,25\%$, для № 6 отклоненіе $\pm 3,69\%$, для № 13 отклоненіе $\pm 2,93\%$, для № 15 отклоненіе $\pm 3,69\%$, для № 16 отклоненіе $\pm 3,79\%$, для № 17 отклоненіе $\pm 3,45$, для № 14 отклоненіе $\pm 5,61\%$, и т. д. Мы привели здѣсь серіи опытовъ, относящіяся къ испытанію тренія у машинъ „Отто-Дейцъ“ и „Горнсби-Акройдъ“, у которыхъ конструкція поршней одного типа. Наибольшее среднее отклоненіе имѣетъ серія № 14, а наименьшее имѣетъ серія № 13. Обѣ эти серіи опытовъ относятся къ поршню машины „Горнсби-Акройдъ“, при работѣ съ кольцами, но при различной смазкѣ: въ первой серіи была густая смазка—смѣсь $1/1$, во второй серіи—машинное масло. Получается выводъ, что смазка вліяетъ на точность опытовъ. Столь непонятная подъ первымъ впечатлѣніемъ зависимость была нами подмѣчена еще при постановкѣ опытовъ и объясняется она тѣмъ, что температура смазывающаго слоя во всѣхъ этихъ опытахъ была различная и вліяніе этой температуры значительнѣе при смѣси $1/1$, чѣмъ при машинномъ маслѣ.

Между тѣмъ невозможно достигнуть того, чтобы при постановкѣ двухъ опытовъ температура смазки была совершенно одинаковая. Это обстоятельство усложняется еще тѣмъ, что мы не можемъ достигнуть одинаковой температуры не только въ отдѣльныхъ опытахъ, но и въ различныхъ частяхъ цилиндра. Температура мѣняется отъ нижней части цилиндра до верхней, она мѣняется еще и вдоль оси цилиндра, на что указываетъ температура стѣнокъ (см. табл. VI, столб. 10, 11 и 12). Такое различіе температуры стѣнокъ объясняется неравномѣрнымъ движеніемъ поршня въ цилиндрѣ и неодинаковымъ движеніемъ охлаждающей воды въ отдѣльныхъ частяхъ рубашки цилиндра. Разница температурныхъ условій отдѣльныхъ опытовъ объясняется различной

величиною работы тренія поршня, такъ какъ скорость въ указанныхъ опытахъ мѣнялась. Все это создаетъ такую комбинацію температурныхъ условий, что невозможно ожидать, чтобы она повторилась въ двухъ какихъ либо опытахъ.

3. Для выясненія вліянія температуры смазывающаго слоя на треніе поршня нами были поставлены спеціальныя опыты, но о нихъ мы будемъ говорить ниже, здѣсь же укажемъ каково это вліяніе въ разсматриваемыхъ опытахъ.

Чтобы освѣтить яснѣе поставленный вопросъ, мы рассмотримъ его теоретически и на основаніи опытовъ.

Обратимся къ вычисленію. Въ столбцѣ 13 (табл. VI) вычислена средняя температура стѣнокъ цилиндра. Вычисленія эти были произведены при слѣдующихъ предположеніяхъ: во-первыхъ, предполагали, что какъ температура стѣнокъ, такъ и температура воды измѣняется снизу вверхъ по діаметру линейно, и что средняя температура стѣнокъ настолько градусовъ меньше t_2 , насколько меньше средняя температура воды $t_{\text{вых}}$. Несомнѣнно, что дѣйствительное распрежденіе температуры воды и стѣнокъ иное, и что средняя температура отклоняется отъ вычисленной нами, но чтобы имѣть, хотя какія нибудь, указанія относительно среднихъ температурныхъ условий того или иного опыта, мы рѣшили произвести вычисленія средней температуры стѣнокъ, которыя и собраны нами въ столбцѣ 13 (табл. VI). По этой средней температурѣ была найдена соотвѣтствующая вязкость изъ діаграммы № I, въ предположеніи, что температура смазки мало отличается отъ температуры стѣнокъ. Такимъ способомъ былъ полученъ весь столбецъ 18 (табл. VI). Если мы теперь сравнимъ измѣненіе вязкости отъ температуры у опытовъ серіи № 1 съ измѣненіемъ у опытовъ серіи № 6, то ясно увидимъ, какое должно было бы имѣть вліяніе свойство смазки на величину отклоненія работы тренія отъ нѣкоторой средней величины. Далѣе, мы можемъ видѣть, что съ температурой величина тренія должна была бы измѣниться для нѣкоторыхъ опытовъ вдвое, на примѣръ, въ опытахъ № 7 и № 10. Вообще на основаніи приведенныхъ теоретическихъ соображеній мы должны были бы придти къ заключенію, что непостоянство температуры смазывающаго слоя должно разрушить всякую возможность судить о треніи на основаніи опытовъ.

Обратимся къ опытамъ. На основаніи уравненій (18) и (19) нами вычисленъ столбецъ 22 (табл. VI), содержащій величины удѣльнаго сопротивленія f . Эта величина f не зависитъ ни отъ скорости v ни отъ величины поверхности Q , а зависитъ отъ коэффициента внутренняго тренія μ и угловой скорости ϕ . (ур-іе 21). Слѣдовательно, при постоянной угловой скорости ϕ , величина f во всѣхъ опытахъ серіи № 1 должна была быть пропорціональной вязкости, чего въ дѣйствительности нѣтъ. Это можно объяснить только тѣмъ, что такого измѣненія вязкости, какое получилось у насъ для разсматриваемыхъ опытовъ,

на основаніи приведенныхъ соображеній, вѣроятно, не было; прежде всего потому что температура смазки выше температуры стѣнокъ, а при болѣе высокихъ температурахъ вязкость не такъ сильно мѣняется, какъ при низкихъ, (см. диаграмму 1), съ другой стороны, и самъ расчетъ средней температуры, какъ мы видѣли выше, покоится на нѣкоторыхъ допущеніяхъ. Но нельзя также предположить и постоянство вязкости, потому что всѣ температурныя указанія, какъ то, температура входящей и выходящей воды, температура отдѣльныхъ частей стѣнокъ были въ этихъ опытахъ различныя, а, слѣдовательно, была различною и вязкость. Такъ какъ изъ опытовъ наблюдается нѣкоторое постоянство удѣльнаго сопротивленія, то мы должны были бы предположить на основаніи уравненія (21), что ϕ мѣняется обратно пропорціонально вязкости, хотя въ дѣйствительности такой строгой зависимости не существуетъ. Слѣдовательно, съ увеличеніемъ температуры слоя уменьшается вязкость, но за то увеличивается угловая скорость ϕ . Какова зависимость угловой скорости отъ вязкости и температуры, мы не можемъ выразить формулой, но что эта зависимость существуетъ, то это подтверждаютъ опыты таблицъ VI и VII.

На основаніи всего сказаннаго мы можемъ сдѣлать заключеніе, что во всѣхъ указанныхъ опытахъ температура смазывающаго слоя не имѣла большого вліянія на работу тренія поршня, такъ какъ колебанія ея не могли быть значительными въ отдѣльныхъ опытахъ, и такъ какъ вліяніе это происходило черезъ посредство цѣлаго ряда явленій, другъ другу противоположныхъ.

4. Кромѣ вліянія температуры смазывающаго слоя, на результаты калориметрическихъ опытовъ оказываютъ вліяніе еще два фактора, теплообмѣнъ¹⁾ съ окружающимъ воздухомъ и сжатіе воздуха въ закрытой части цилиндра.

Обмѣнъ тепла съ воздухомъ можетъ происходить какъ черезъ внѣшнюю поверхность, такъ и черезъ внутреннюю поверхность цилиндра, если одна сторона цилиндра будетъ открыта, какъ это мы имѣемъ у машинъ „Отто-Дейцъ“ и „Горнсби-Акройде“. Въ этихъ машинахъ воздухъ все время слѣдуетъ за поршнемъ и омываетъ всю ту трущуюся поверхность, которую удаляющійся поршень обнажаетъ. Если стѣнки цилиндра имѣютъ температуру выше окружающаго воздуха, то происходитъ потеря тепла тренія, если ниже, то обратно—часть тепла, поглощеннаго водой, будетъ принадлежать окружающему воздуху.

Сдѣлаемъ приблизительный расчетъ теплообмѣна въ нашихъ опытахъ черезъ внутреннюю поверхность цилиндра.

Для вычисленія примемъ общепризнанную формулу

$$U = \alpha q z (t_{cp} - t), \quad (25)$$

1) Вслѣдствіе того, что у входящей воды температура была ниже, а у выходящей выше температуры помещенія, то въ нашихъ опытахъ происходили одновременно потеря и поглощеніе тепла, поэтому мы обозначаемъ эти два явленія общимъ именемъ „теплообмѣномъ“.

гдѣ α коэффициентъ теплопередачи въ т. ед./м², q поверхность въ м², z время въ часахъ, t_{cp} температура излучающей поверхности, которою у насъ является средняя температура стѣнокъ (столб. 13 табл. VI), t температура помѣщенія.

Коэффициентъ теплопередачи вычисляется по формулѣ¹⁾

$$\alpha = 2 + 10\sqrt{w}, \quad (26)$$

гдѣ w выражается въ метрахъ въ секунду и въ нашемъ случаѣ будетъ равняться скорости поршня (столб. 15 табл. VI).

Подсчитаемъ теплообмѣнъ для опыта № 7, внутренняя температура стѣнокъ котораго наиболѣе отличается отъ температуры помѣщенія.

Коэффициентъ теплопередачи будетъ $\alpha = 2 + 10\sqrt{2,46} = 17,75$ т. ед./м². Поверхность, омываемая внѣшнимъ воздухомъ, $q = \pi DH = 3,15 \cdot 22,0 \cdot 32,1 = 2226$ см.² или 0,2226 м², что составляетъ 42,3% отъ всей трущейся поверхности цилиндра, такъ какъ послѣдняя равна

$$Q = \pi D(L + H) = 3,14 \cdot 22,0(32,1 + 44,0) = 5260 \text{ см.}^2.$$

Время z мы можемъ взять какое угодно, но такъ какъ всѣ расчеты мы приводимъ къ 1 часу, то у насъ здѣсь z получается равнымъ 30 м.; получается это слѣдующимъ образомъ: поршень поочередно то открываетъ, то закрываетъ часть трущейся поверхности цилиндра, а потому есть точки этой поверхности (крайнія), которыя закрываются только на одно мгновеніе, или открываются только на одно мгновеніе. Ясно, что (если не считаться съ конечной длиной шатуна) сумма времени, въ теченіе котораго омывается воздухомъ поверхность, будетъ равняться всегда половинѣ того времени, за которое мы желаемъ вычислить теплообмѣнъ. Слѣдовательно, для опыта № 7 теплообмѣнъ черезъ внутреннюю поверхность за 1 часъ равняется

$$U = 17,75 \cdot 0,2226 \cdot 0,5(28,5 - 21) = 15 \text{ т. ед.}$$

За этотъ опытъ водой унесено было 2280 т. ед., поэтому въ процентномъ отношеніи потери черезъ теплообмѣнъ равны $\frac{15 \cdot 100}{2280 + 15} = 0,65\%$ отъ величины тренія поршня. Въ этомъ расчетѣ наибольшую ошибку мы могли сдѣлать при вычисленіи средней температуры стѣнокъ. Вѣроятно также, что температура смазывающаго слоя была выше температуры стѣнокъ, но мы не можемъ предположить, чтобы эта разница была велика, имѣя въ виду хорошую теплопроводность чугуна и то, что температура стѣнокъ измѣрялась на разстояніи 4,5 мм. отъ внутренней поверхности цилиндра.

Для того, чтобы подтвердить наши вычисленія и показать, что обмѣнъ тепла черезъ лучеиспусканіе внутри цилиндра ничтоженъ, мы рѣшили сткрыть люкъ въ камеру сжатія у машины „Горнсеби-Акройдъ“

1) Hütte, 19 Aufl. 1905, I. S. 281.

и тѣмъ получить теплообмѣнъ съ другой стороны цилиндра. Какъ мы увидимъ ниже, при этомъ уничтожается также нагрѣваніе стѣнокъ цилиндра теплою сжатія.

У машины „Горнсби-Акройдъ“ трущаяся поверхность цилиндра равна $1,07 \text{ м}^2$; поверхность, омываемая воздухомъ съ открытаго конца цилиндра, равна $0,524 \text{ м}^2$, что составляетъ 48% всей поверхности. Если мы откроемъ люкъ, то поверхность омываемая воздухомъ сдѣлается вдвое больше и будетъ равна 96% всей поверхности. Опыты серіи № 16 были поставлены съ закрытымъ люкомъ, при чемъ потери тепла черезъ лучеиспусканіе для опыта № 96 равны 53,5 калоріямъ или 2,11% отъ тепла работы тренія; опыты серіи № 17 были поставлены съ открытымъ люкомъ, поэтому потери тепла въ нихъ должны были увеличиться; согласно предыдущему расчету потери эти для опыта № 104 должны равняться 107 кал. или 3,96% отъ тепла работы тренія. Эти расчеты мы произвели, принимая разность температуръ воздуха и поверхности равною 10° , относительно чего мы не имѣемъ никакихъ фактическихъ указаній, кромѣ аналогичныхъ опытовъ съ машиною „Отто-Дейцъ“, гдѣ эта разность была $7,5^\circ \text{ Ц}$. Слѣдовательно, открывая люкъ, мы должны ожидать пониженіе количества тепла, уносимаго водою, во-первыхъ, потому что увеличиваемъ поверхность охлажденія для воздуха и, во-вторыхъ, потому что устраняемъ переходъ тепла сжатія въ охлаждающую воду.

Если мы обратимся къ опытамъ, то увидимъ, что удѣльное сопротивленіе тренія получается одно и то же, какъ для серіи № 16, такъ и для серіи № 17. Удѣльное сопротивленіе тренія f опытовъ серіи № 16 колеблется¹⁾ отъ 0,0144 до 0,0160, при среднемъ ариѳметическомъ $f=0,0153$, у опытовъ серіи № 17 колеблется отъ 0,0143 до 0,0158 при среднемъ ариѳметическомъ $f=0,0153$. На діаграммѣ № 4 линия $c-c'$ является средней линіей, указывающей измѣненіе работы тренія, какъ для опытовъ серіи № 16, такъ и для опытовъ серіи № 17. Изъ этой діаграммы мы можемъ видѣть, какъ отклоняются отдѣльные опыты той и другой серіи отъ средней линіи. Выше мы уже сказали, что среднее ариѳметическое отклоненіе для опытовъ серіи № 16 равно $\pm 3,79\%$, для опытовъ серіи № 17 равно $\pm 3,45\%$. Вообще мы можемъ сказать, что какъ та, такъ и другая серія опытовъ ни чѣмъ существеннымъ не отличаются другъ отъ друга: точность у нихъ одинаковая, результаты опытовъ совершенно одинаковые.

Это нѣсколько неожиданный результатъ, и поэтому здѣсь необходимо дать этому явленію объясненія. Объясненіе прежде всего находится въ разницѣ коэффиціентовъ теплопередачи отъ стѣнокъ воздуха и отъ стѣнокъ водѣ; отношеніе этихъ коэффиціентовъ можетъ колебаться отъ 25 до 100 въ зависимости отъ скорости движенія воды. Слѣ-

¹⁾ См. столб. 13 табл. VII.

довательно, одно это обстоятельство обуславливаетъ относительно малую теплопередачу въ воздухъ сравнительно съ количествомъ тепла, уносимаго водою. Далѣе объясненіе этому мы находимъ также и въ слѣдующемъ. Частицы воздуха, несясь вдоль смазанной поверхности цилиндра, отнимаютъ тепло только отъ тончайшаго слоя смазки, а оставшая толща слоя, вслѣдствіе очень малой теплопроводности масла, не отдаетъ тепло тренія воздуху; между тѣмъ, тоже тепло, вслѣдствіе энергичнаго перемѣшиванія частицъ масла во всемъ смазывающемъ слое во время процесса тренія, легко передается металлическимъ стѣнкамъ цилиндра. Если мы, при всемъ сказаномъ выше, обратимъ также вниманіе на распредѣленіе времени, въ теченіе котораго происходитъ теплопередача воздуху и стѣнкамъ, то намъ понятнымъ станутъ малыя потери въ воздухъ. Мы уже говорили выше, что время для теплообмѣна распредѣляется весьма различно для отдѣльныхъ частей поверхности цилиндра. Края поверхности почти все время открыты дѣйствию воздуха и только на мгновеніе закрываются поршнемъ, внутреннія же части цилиндра, наоборотъ, открываются имъ только на одно мгновеніе. Слѣдовательно, мы можемъ сдѣлать заключеніе, что тепло тренія на краяхъ цилиндра должно почти цѣликомъ отниматься воздухомъ, внутри же цилиндра эта теплопередача должна доходить до нуля; но, такъ какъ на краяхъ цилиндра треніе возникаетъ только на одно мгновеніе, то и тепла тамъ развивается безконечно малое количество. Тепла развивается больше всего тамъ, гдѣ большее время совершается процессъ тренія, но тамъ и меньшее время для теплообмѣна. Съ другой стороны, тепла водою отводится больше всего съ тѣхъ частей поверхности, гдѣ частицы смазки большее время находятся въ подвижномъ состояніи, т. е. со внутреннихъ частей цилиндра.

Все сказанное объясняетъ намъ совпаденіе результатовъ опытовъ серіи № 16 съ результатами опытовъ серіи № 17, и мы поэтому склонны думать, что дѣйствительный внутренний теплообмѣнъ меньше, чѣмъ дали намъ вычисленія по форм. 25. Эти вычисленія сдѣланы въ предположеніи, что температура внутреннихъ стѣнокъ вдоль цилиндра одинаковая и вся на 10° выше температуры воздуха, при чемъ коэффициентъ теплопередачи приняли такой, какой онъ для чугуна, не смазаннаго масломъ.

5. Перейдемъ теперь къ вопросу о теплообмѣнѣ черезъ вѣшнія стѣнки цилиндра.

Для уменьшенія теплообмѣна черезъ вѣшнія стѣнки машина „Отто-Дейцъ“ была обложена войлокомъ, насколько возможно лучше, но теплопередача могла все-таки происходить черезъ выступающія части машины, какъ-то, черезъ распредѣлительныя органы, черезъ станину и т. под. Эта теплопередача при опытахъ съ низкою среднею температурою сколько нибудь замѣтно не могла происходить, потому что во время такихъ опытовъ указанныя части машины имѣли температуру помещенія. Для опредѣленія температуры этихъ частей, мы привязывали къ

нимъ термометръ, обложенный съ внѣшней стороны ватой. Въ опытахъ съ высокою температурою эта теплопередача могла происходить, но объ этой серіи опытовъ мы скажемъ ниже.

Машина „Горнсби-Акройдъ“ не была обложена войлокомъ, потому что не предполагалось ставить опытовъ съ высокою температурою, а для низкой считалось достаточнымъ поддерживать среднюю температуру воды равною температурѣ помещенія. Если мы сравнимъ температуру помещенія, столб. 3, табл. VII, со среднею температурою воды при опытахъ съ машиною „Горнсби-Акройдъ“, столб. 6, то увидимъ, что разница между этими температурами очень небольшая, наибольшая же она получилась въ опытахъ №№ 84, 88 и 103, гдѣ она равнялась $2,25^{\circ}$, $2,90^{\circ}$ и $2,25^{\circ}$ Ц., при чемъ, за немногими исключеніями, температура помещенія была выше средней температуры воды. Слѣдовательно, мы должны ожидать въ этихъ опытахъ передачу воздухомъ тепла машинѣ. Здѣсь очень трудно сдѣлать подсчетъ съ удовлетворительной точностью, но, съ рискомъ сдѣлать ошибку въ 40—50%, можно подсчитать¹⁾. Внѣшняя поверхность водяной рубашки этой машины равна $1,4$ м², скорость движенія окружающаго воздуха 2 мт. въ сек.²⁾ разность температуры $2,9^{\circ}$ Ц. При этихъ условіяхъ получается, что водою было унесено внѣшняго тепла 65 калорій или 2,4 %. Это maximum ошибки, который мы можемъ ожидать, потому что мы взяли опытъ съ самой большой разностью температуры. Эта ошибка не можетъ ариѳметически суммироваться съ ошибкой отъ внутренней теплопередачи, такъ какъ эти ошибки въ нашихъ опытахъ были взаимно противоположны.

Гораздо хуже обстоитъ дѣло съ поверхностнымъ теплообмѣномъ у компрессора. Дѣло заключается въ томъ, что теплообмѣнъ черезъ внѣшнюю поверхность не зависитъ отъ тренія, а потому теплообмѣнъ можетъ оставаться одинаковымъ какъ при большихъ, такъ и при малыхъ работахъ тренія. Въ компрессорѣ мы и имѣемъ случай: большую внѣшнюю теплопередачу и очень малое треніе поршня.

У малаго цилиндра трущаяся поверхность 1290 см², внѣшняя поверхность 6300 см², отношеніе поверхностей 1:4,9; у большого цилиндра трущаяся поверхность 2950 см², внѣшняя поверхность 9400 см², отношеніе поверхностей 1:3,2. Внѣшняя поверхность нами подсчитана приблизительно по чертежу, не принимая во вниманіе увеличеніе поверхности отъ выступающихъ деталей, которыхъ у большого цилиндра особенно много, вслѣдствіе того, что у него имѣются два различныхъ распределенія (золотниковое и клапанное), кронштейны для распределительнаго вала и проч. Этотъ приблизительный расчетъ указываетъ какое невыгодное отношеніе площадей внутренней и внѣшней существуетъ у компрессора.

1) В. Л. Малґевъ. „Опытное изслѣдованіе работы двухтактной машины“. Стр. 125.

2) Ibid. Стр. 123.

Если мы подсчитаемъ по форм. 25 теплообмѣнъ для опыта № 67 (бол. ц.), то получимъ, что водою унесено 175,5 калорій тепла вѣшняго воздуха. Наряду съ этимъ были поставлены опыты для выясненія теплопередачи отъ вѣшняго воздуха охлаждающей водѣ. Для этого воду пропускали черезъ рубашку цилиндра въ теченіе 15 минутъ и записывали температуру входящей и выходящей воды. Результаты опытовъ собраны въ таблицѣ V.

Таблица V.

№ № опы- товъ.	Температура помѣщ. t	Средняя температура воды t_{cp}	Разность $t - t_{cp}$	Расходъ воды въ кгр. въ 1 часъ.	оличество тепла т. ед.
1	26,50	15,20	11,30	52,2	202,0
2	25,00	12,10	12,90	55,8	220,6
3	23,00	12,00	11,00	51,9	206,4
4	22,00	10,45	11,55	118,4	249,0
5	21,00	12,25	8,75	57,0	191,0
6	20,50	14,40	6,10	52,5	176,2
7	20,00	10,00	10,00	162,4	272,2

Изъ этой таблицы ясно видно, что количество тепла, уносимаго водою, находится въ зависимости отъ количества воды, проходящей черезъ рубашку цилиндра, и отъ разности температуръ воздуха и стѣнокъ. Вывести эту зависимость на основаніи нашихъ опытовъ трудно; вообще изслѣдовать этотъ процессъ въ нашей обстановкѣ трудно, но можно указать нѣкоторую приближенную величину для учета теплообмѣна въ нашихъ опытахъ съ треніемъ поршня. Во всѣхъ нашихъ опытахъ серіи № 10 мы приняли теплопередачу одну и ту же, именно 205 калорій, потому что разность температуръ для нихъ колебалась въ предѣлахъ 1° Ц. Величину теплопередачи мы взяли изъ табл. V, какъ среднюю арифметическую величину данныхъ опытовъ 1, 2, 3 и 5. Результаты опытовъ 4, 6 и 7 мы отбросили въ виду слѣдующихъ соображеній: въ опытахъ 4 и 7 расходъ воды сильно превышаетъ расходъ опытовъ серіи № 10, въ которыхъ онъ колебался отъ 50,0 до 50,5 кгр. въ часъ, опытъ № 6 имѣетъ малую разность температуръ $t - t_{cp} = 6,1^\circ$ Ц. Результаты опыта (205 кал.) расходятся съ результатами расчета (175,5 кал.), но это всегда возможно вслѣдствіе малой точности опредѣленія скорости движенія окружающаго воздуха и опредѣленія поверхности цилиндра, величины которыхъ входятъ въ расчетную форм. 25. Если мы величину 205 кал. отнесемъ къ количеству тепла, унесенному въ опытахъ № 64 и № 68, то получимъ теплообмѣнъ въ процентахъ равнымъ 50,7% и 64,4%!

Если мы по предыдущему подсчитаемъ по форм. 25 теплообмѣнъ черезъ поверхность малаго цилиндра, то получимъ его равнымъ 91,3 калоріи. Наряду съ этимъ былъ поставленъ опытъ. Черезъ рубашку малаго цилиндра пропускалась вода въ теченіи 15 минутъ съ температурою

въ среднемъ $12,0^{\circ}$ Ц.; проходя черезъ рубашку, она нагрѣвалась до $15,4^{\circ}$. Воды прошло за это время 6,95 кгр. Температура помещенія была $24,5^{\circ}$ Ц., а средняя температура воды $13,7^{\circ}$ Ц. Слѣдовательно, охлаждающей водой унесено въ 1 часъ тепла внѣшняго воздуха 94,5 калорій. Черезъ 20 минутъ, не мѣняя совершенно условий, опытъ былъ повторенъ и результаты получились тождественные. Результаты опыта съ результатами расчета очень близки. Если мы эти 94,5 калорій отнесемъ къ количеству тепла, унесенному охлаждающей водой въ опытъ № 62, то получимъ теплообмѣнъ въ процентахъ равнымъ 56 %!

Для опытовъ серій №№ 9 и 10 всѣ величины столбца 7 получены, какъ разность тепла, унесеннаго водою и тепла, опредѣленнаго указаннымъ выше опытнымъ путемъ. Эту величину U мы и считали тѣмъ тепломъ, которое получалось отъ тренія поршня. По этой величинѣ мы опредѣляли работу тренія и всѣ остальные величины табл. VII. Какова же погрѣшность этихъ опытовъ и вычислений? Если на этотъ вопросъ смотрѣть со стороны погрѣшности производившихся наблюдений и измѣреній во время опытовъ, то погрѣшность эту можно было бы считать незначительною; при чемъ наибольшую погрѣшность для калориметрическихъ опытовъ можно ожидать равною $\pm 1,47$ %. Съ такою же погрѣшностью произведены и вспомогательныя опыты, а потому величины U , табл. VII, полученные какъ разность величинъ двухъ опытовъ, имѣютъ среднюю ошибку, равную корню квадратному изъ суммы квадратовъ ошибокъ обоихъ опытовъ. Слѣдовательно, средняя ошибка, съ которою опредѣлится U , будетъ равна $\pm 2,08$ %. Если мы обратимся къ диаграммѣ № 5, то увидимъ, что отклоненія опытовъ серіи № 10-й не превосходятъ этой ошибки, опыты серіи № 9 отклоняются, но незначительно. Но, если мы обратимъ вниманіе на то, что величина теплообмѣна у насъ принята во всѣхъ опытахъ одинаковая, при томъ равная средней арифметической изъ величинъ, полученныхъ при не тождественныхъ и не одинаковыхъ условіяхъ (см. табл. V), то ясно станетъ, что опредѣленіе работы тренія поршня у компрессора не можетъ считаться удовлетворительнымъ. Если же точки у насъ и расположились вдоль прямой линіи, то это нужно отнести не къ тому обстоятельству, что средняя величина теплообмѣна опредѣлена вѣрно, а къ тому, что она, повидимому, во всѣхъ опытахъ серіи № 9 и № 10 была постоянною. Дѣйствительно, какую бы величину теплообмѣна мы ни взяли, мы этимъ только можемъ измѣнить положеніе прямой или кривой въ координатахъ, но не ея наклонъ или форму.

Чтобы это подтвердить, нами была поставлена серія опытовъ № 12. Въ этихъ опытахъ, какъ и во всѣхъ послѣдовавшихъ потомъ опытахъ съ машиною „Горнсби-Акройды“, мы стали подогревать охлаждающую воду въ подводящей трубѣ особою горѣлкою¹⁾, при чемъ температуру входящей воды старались получить такую, чтобы средняя ея температу-

¹⁾ Подробное описаніе см. В. Л. Малѣевъ, „Опытное изслѣдованіе двѣхтактной машины“. Стр. 91.

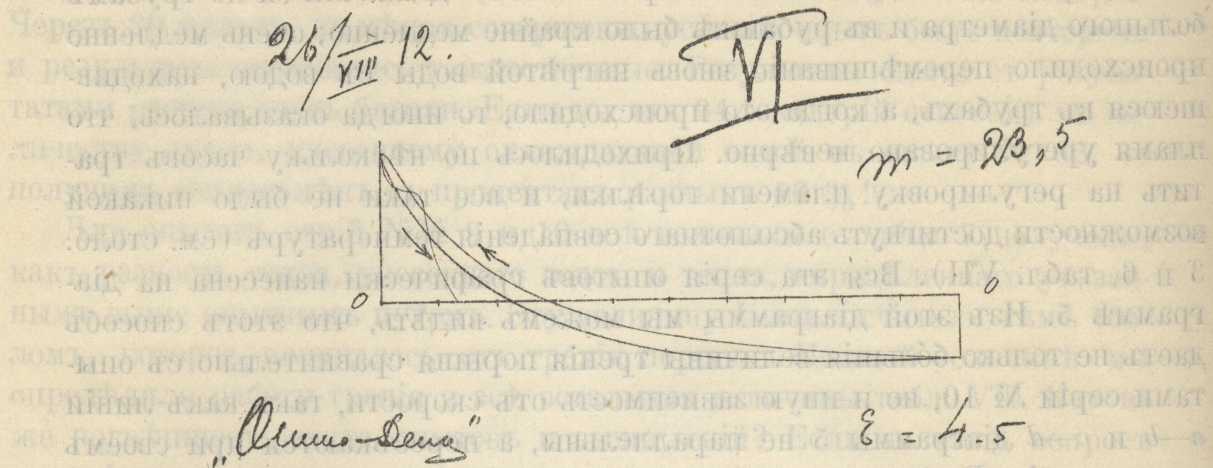
ра въ рубашкѣ была приблизительно равна температурѣ помѣщенія. Постановка этихъ опытовъ оказалась очень трудной, она требовала много времени, вниманія и терпѣнія. Все это обусловливалось тѣмъ, что при маломъ расходѣ воды (60—70 кгр. въ часъ) движенія ея по трубамъ большого діаметра и въ рубашкѣ было крайне медленно; очень медленно происходило перемѣшиваніе вновь нагрѣтой воды съ водою, находившеюся въ трубахъ, а когда это происходило, то иногда оказывалось, что пламя урегулировано невѣрно. Приходилось по нѣсколькимъ часамъ тратить на регулировку пламени горѣлки, и все таки не было никакой возможности достигнуть абсолютнаго совпаденія температуръ (см. столб. 3 и 6, табл. VII). Вся эта серія опытовъ графически нанесена на діаграммѣ 5. Изъ этой діаграммы мы можемъ видѣть, что этотъ способъ даетъ не только большія величины тренія поршня сравнительно съ опытами серіи № 10, но и иную зависимость отъ скорости, такъ какъ линіи $a-b$ и $c-d$ діаграммы 5 не параллельны, а пересѣкаются при своемъ продолженіи. Разница при скорости въ 1 м./сек. получилась равною 19 кал., а при скорости 1,5 м./сек. 76 кал. Такъ какъ зависимость тренія отъ скорости оставалась одна и та же, то разница въ результатахъ можетъ быть отнесена къ ошибкѣ въ опредѣленіи теплообмѣна по табл. V. На основаніи этого мы можемъ сдѣлать слѣдующія заключенія: во-первыхъ, величина теплообмѣна по табл. V нами опредѣлена преувеличенною, въ среднемъ калорій на 45, во-вторыхъ, теплообмѣнъ не оставался постояннымъ въ опытахъ №№ 64—68, а падалъ съ уменьшеніемъ числа оборотовъ. Паденіе теплообмѣна можно объяснить только тѣмъ, что съ уменьшеніемъ числа оборотовъ уменьшается скорость движенія воздуха, вызываемаго движущимися частями машины.

Что касается теплообмѣна черезъ внутреннія стѣнки цилиндра и вліянія тепла сжатія на величину ошибокъ калориметрическихъ опытовъ, то всѣ эти причины были устранены у компрессора тѣмъ, что оба вредныхъ пространства были соединены черезъ золотниковую коробку.

6. При постановкѣ калориметрическихъ опытовъ на машинахъ „Отто-Дейцъ“ и „Горнсби-Акройджъ“, камеры сжатія были закрыты такъ, чтобы черезъ нихъ не циркулировалъ воздухъ. Для этого разъединяли клапана отъ распредѣлительнаго вала, а клапанныя тарелки прижимались къ сѣдлу клапана упругостью пружинъ; если пружина оказывалась недостаточно упругою, какъ напр., оказалась у машины „Горнсби-Акройджъ“, то клапанъ притягивался къ сѣдлу за шпindelъ обыкновенными ручными тисками.

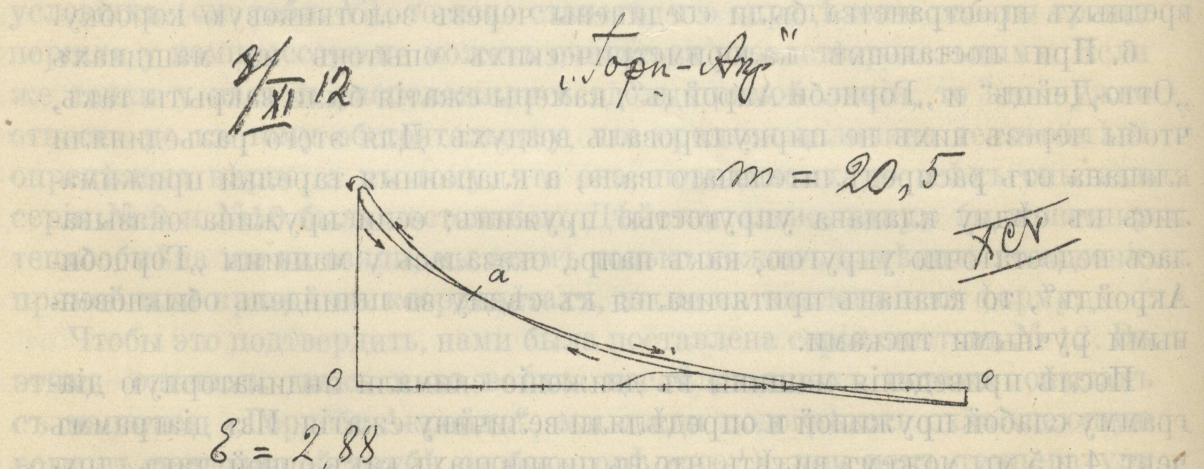
Послѣ приведенія машины въ движеніе снимали индикаторную діаграмму слабой пружиной и опредѣляли величину сжатія. Изъ діаграммъ черт. 4 и 5 мы можемъ видѣть, что въ цилиндрахъ какъ одной, такъ другой машины происходило то сжатіе, то разрѣженіе воздуха. Разность давленій по діаграммамъ получается для машины „Отто-Дейцъ“ равною 0,97 атм., а для машины „Горнсби-Акройджъ“ равною 1,17 атм. Конечное

давление сжатия по диаграммам мы имѣемъ для машины „Отто-Дейцъ“ $p_c = 1,72$ абс. атм., для машины „Горнсби-Акройдъ“ $p_c = 2,12$ абс. атм.; при адиабатическомъ сжатии и при тѣхъ же начальныхъ давленіяхъ мы



Черт. 4.

имѣли бы конечное давление сжатия для первой машины $p_c = 6,0$ абс. атм., для второй машины $p_c = 4,22$ абс. атм.; при изотермическомъ сжатии для первой машины $p_c = 3,26$ абс. атм., для второй машины $p_c = 2,74$ абс. атм. Каковъ законъ сжатия и расширения, мы не можемъ видѣть изъ нашихъ диаграммъ, потому что форма кривыхъ искажалась пропусканіемъ воздуха клапанами. Но мы можемъ видѣть, что поглощеніе тепла стѣнками во время сжатия и отдача ими тепла во время расширения мало различаются другъ отъ друга, такъ какъ иначе эти линіи не лежали бы близко одна около другой. Отсюда мы дѣлаемъ заключеніе, что въ теплообмѣнѣ участвуетъ только поверхностный слой стѣнокъ, который очень быстро нагревается и быстро охлаждается. Это мы можемъ видѣть и на диаграммѣ ХСV (черт. 5) машины „Горнсби-Акройдъ“. На этой диа-



Черт. 5.

граммѣ стрѣлками показаны линіи сжатия и расширения, которыя въ точкѣ a пересѣкаются. Мы можемъ видѣть, что отъ точки a линія рас-

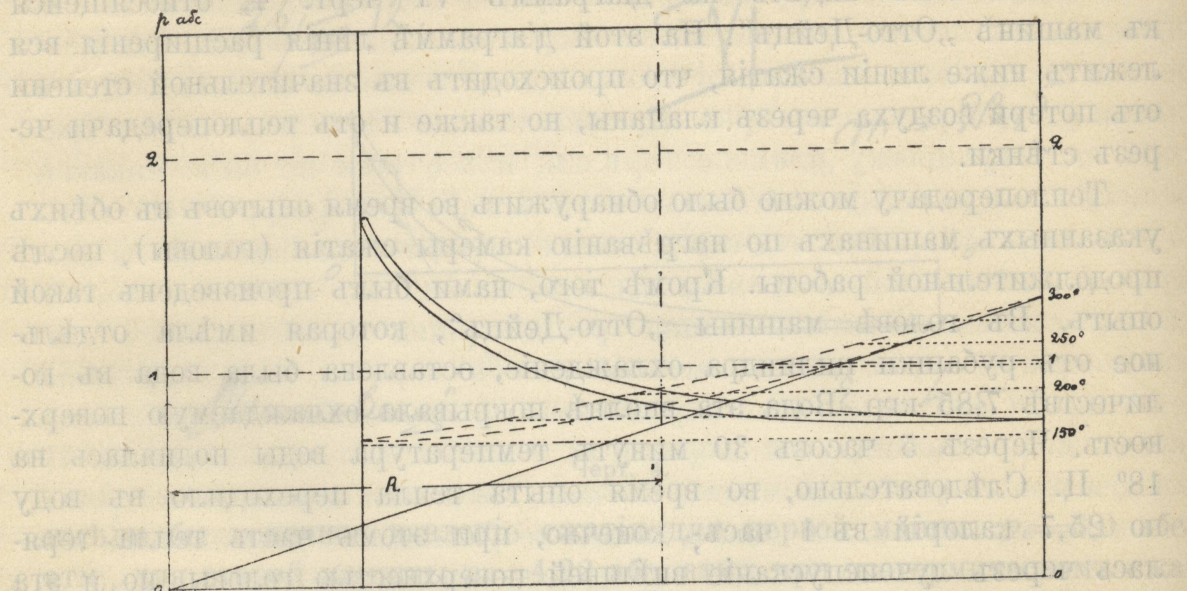
ширення лежить вище лінії сжатія, это можно объяснить только тѣмъ, что въ это время идетъ энергично отдача тепла стѣнками. Если бы этого не было, то лінія расширения легла бы ниже лінії сжатія вслѣдствіе того, что часть сжатого воздуха была пропущена клапанами. Последнее явленіе можемъ видѣть на діаграммѣ VI черт. 4, относящейся къ машинѣ „Отто-Дейцъ“. На этой діаграммѣ лінія расширения вся лежитъ ниже лінії сжатія, что происходитъ въ значительной степени отъ потери воздуха черезъ клапаны, но также и отъ теплопередачи черезъ стѣнки.

Теплопередачу можно было обнаружить во время опытовъ въ обѣихъ указанныхъ машинахъ по нагрѣванію камеры сжатія (головы), послѣ продолжительной работы. Кромѣ того, нами былъ произведенъ такой опытъ. Въ головѣ машины „Отто-Дейцъ“, которая имѣла отдѣльное отъ рубашки цилиндра охлажденіе, оставлена была вода въ количествѣ 7,85 кгр. Вода эта вполне покрывала охлаждаемую поверхность. Черезъ 5 часовъ 30 минутъ температура воды поднялась на 18° Ц. Слѣдовательно, во время опыта тепла переходило въ воду по 25,7 калорій въ 1 часъ; конечно, при этомъ часть тепла терялась черезъ лучеиспусканіе внѣшней поверхностью головы, но и эта часть тепла не могла быть велика, потому что температура головы была не высока по сравненію съ окружающимъ воздухомъ (отъ 18° до 36° Ц.). Вообще проводимость стѣнокъ могла оказать вліяніе на площадь діаграммы, какъ мы сказали выше, только частью. Большая же часть этой діаграммы получилась какъ работа засасывающаго и выталкивающаго хода поршня. Во время опытовъ невозможно было достигнуть того, чтобы клапаны машинъ не пропускали воздухъ; при этомъ оказалось, что у машины „Отто-Дейцъ“ они пропускаютъ въ большей степени, чѣмъ у машины „Горнсби-Акройдъ“. Последнее можно видѣть, во-первыхъ, по индикаторнымъ діаграммамъ, во-вторыхъ, по кривымъ температуръ, построеннымъ нами по извѣстному графическому способу ¹⁾ черт. 6 и 7. Такъ какъ лінії сжатія и расширения пересѣкаютъ атмосферную лінію на разстояніи другъ отъ друга въ 5,5 % отъ всего хода поршня, то мы считаемъ, что приблизительно въ такомъ же процентномъ отношеніи къ объему описываемому поршнемъ пропускается воздухъ клапанами. Бóльшее разрѣженіе у машины „Отто-Дейцъ“ можно объяснить тѣмъ, что во время сжатія у нея легче выдавливался воздухъ черезъ клапаны, чѣмъ у машины „Горнсби-Акройдъ“. Если мы обратимъ вниманіе на кривыя температуръ, черт. 6 и 7, то увидимъ, что во время сжатія происходило сильное паденіе температуръ у обѣихъ машинъ, при чемъ у первой машины это паденіе температуры выразилось въ 150° Ц., а у второй въ 75° Ц.; такъ какъ мы принимали начальную температуру равной $+30^{\circ}$ Ц., то получается, что въ концѣ сжатія температура была

¹⁾ В. Г. Карпенко. „Графическое построение тепловыхъ діаграммъ машинъ внутренняго горѣнія“.

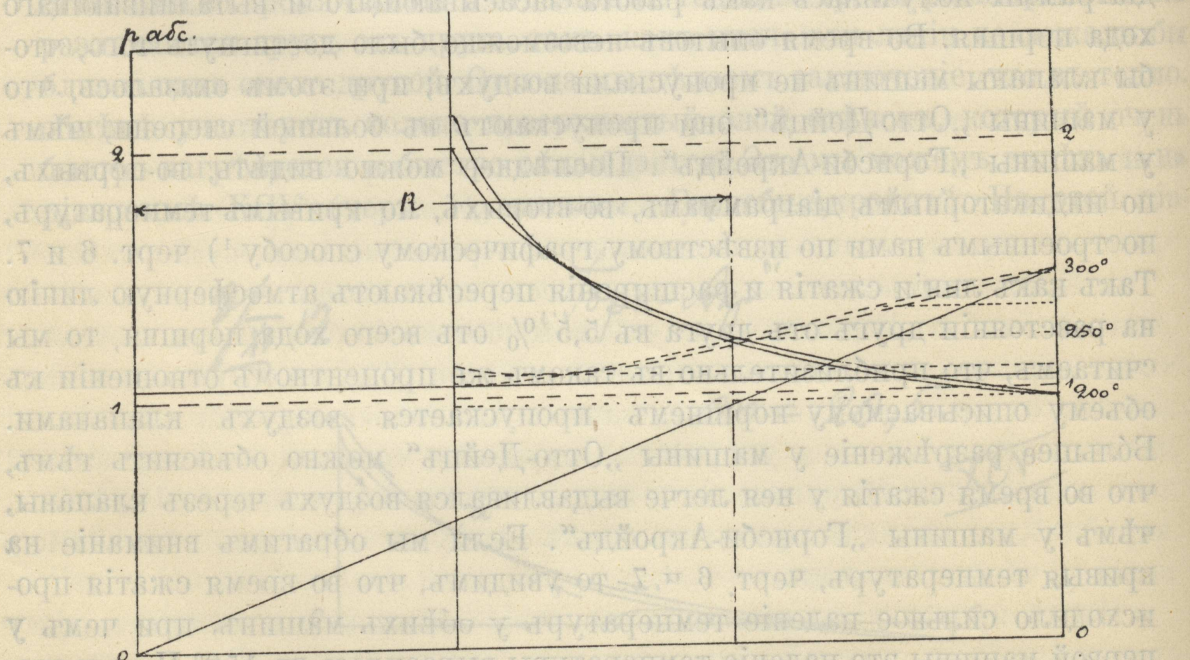
у первой машины—120°, у второй—45° Ц. Этого, конечно, не могло быть; получились же такие результаты только вследствие того, что кривая температурь строится въ предположеніи вѣсового постоянства сжимаемаго газа по уравненію

$$Pv = RT,$$



Черт. 6.

тогда какъ этого постоянства не было, разъ только клапаны пропускали. Теперь мы можемъ сдѣлать заключеніе: такъ какъ кривыя температурь, построенныя по нашимъ индикаторнымъ діаграммамъ, даютъ сильное



Черт. 7.

паденіе температурь во время сжатія, чего не должно быть, то, слѣдовательно, въ нашихъ опытахъ часть сжимаемаго воздуха терялась, а потомъ вновь засасывалась во время разрѣженія.

Это положеніе лишаетъ насъ возможности вычислить конечную температуру сжатія по извѣстнымъ формуламъ, такъ какъ кривыя діаграммъ черт. 4 и 5 не могутъ дать понятія о показателѣ политропъ.

Для того, чтобы изслѣдовать вліяніе тепла сжатія на результаты калориметрическихъ опытовъ, мы открыли люкъ въ камеру сжатія и произвели опыты, которые послужили также для выясненія вліянія внутренняго теплообмѣна. Какъ мы видѣли выше, результаты этихъ опытовъ получились совершенно тождественными съ результатами опытовъ при закрытомъ люкѣ. Это даетъ намъ основаніе высказать слѣдующія положенія:

а) теплота сжатія не можетъ вліять на результаты калориметрическихъ опытовъ замѣтнымъ образомъ, если сжатіе не превосходитъ одной атмосферы;

в) теплообмѣнъ черезъ внутреннюю поверхность происходитъ, но въ процентномъ отношеніи онъ не великъ.

7. Выясненіе вліянія высокихъ температуръ на треніе поршня несомнѣнно очень важно, потому что обычныя условія работы поршня у тепловыхъ машинъ сопровождается высокой внутренней температурой.

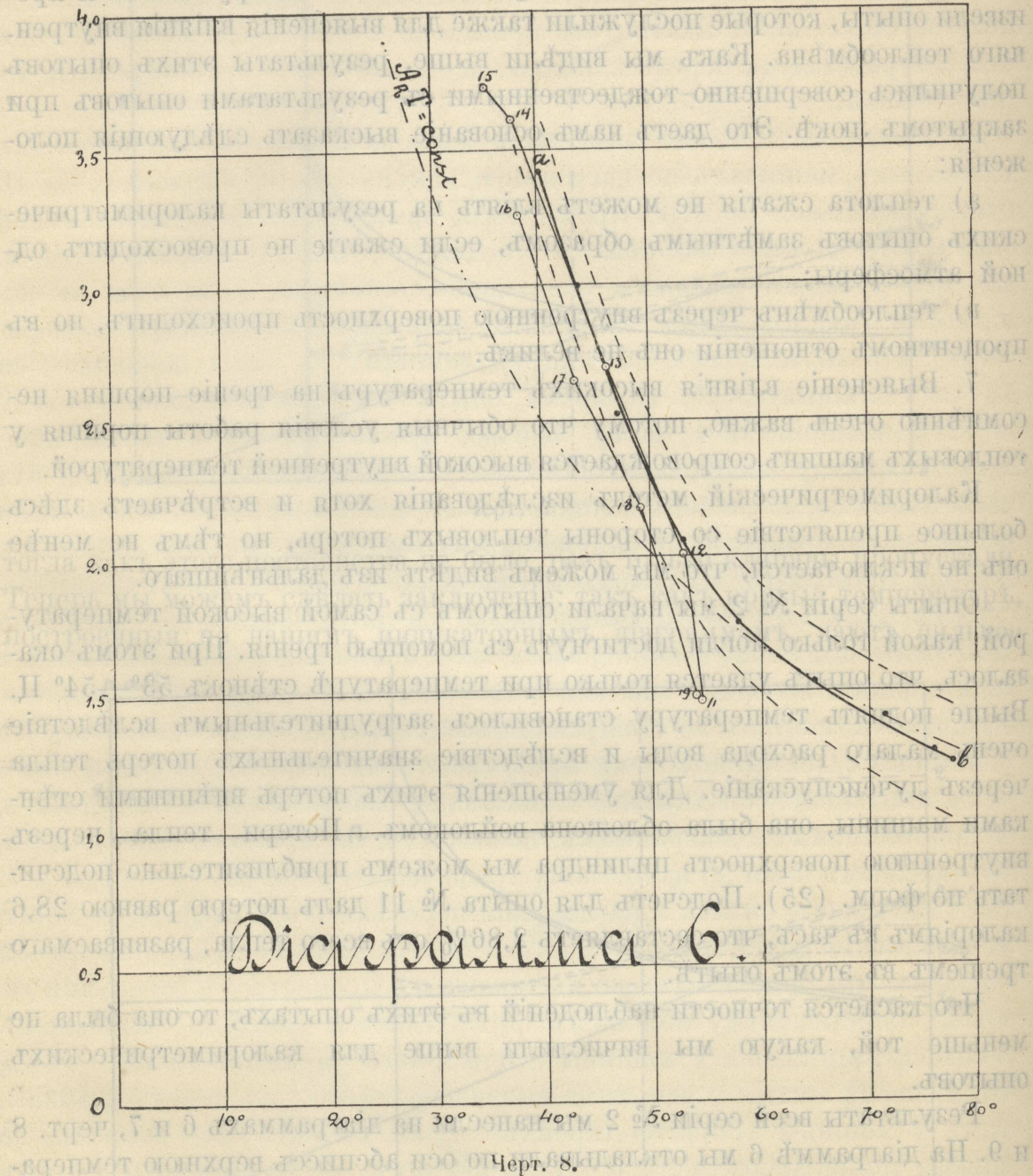
Калориметрической методъ изслѣдованія хотя и встрѣчаетъ здѣсь большее препятствіе со стороны тепловыхъ потерь, но тѣмъ не менѣе онъ не исключается, что мы можемъ видѣть изъ дальнѣйшаго.

Опыты серіи № 2 мы начали опытомъ съ самой высокой температурой, какой только могли достигнуть съ помощью тренія. При этомъ оказалось, что опытъ удастся только при температурѣ стѣнокъ 53° — 54° Ц. Выше поднять температуру становилось затруднительнымъ вслѣдствіе очень малаго расхода воды и вслѣдствіе значительныхъ потерь тепла черезъ лучеиспусканіе. Для уменьшенія этихъ потерь внѣшними стѣнками машины, она была обложена войлокомъ. Потери тепла черезъ внутреннюю поверхность цилиндра мы можемъ приблизительно подсчитать по форм. (25). Подсчетъ для опыта № 11 далъ потерю равною 28,6 калоріямъ въ часъ, что составляетъ 2,86% отъ всего тепла, развиваемаго треніемъ въ этомъ опытѣ.

Что касается точности наблюденій въ этихъ опытахъ, то она была не меньше той, какую мы вычислили выше для калориметрическихъ опытовъ.

Результаты всей серіи № 2 мы нанесли на діаграммахъ 6 и 7, черт. 8 и 9. На діаграммѣ 6 мы откладывали по оси абсциссъ верхнюю температуру стѣнокъ по среднему термометру, а на діаграммѣ 7 по той же оси откладывали среднюю температуру стѣнокъ (Ст. 13 табл. VI). Первый способъ нанесенія температуръ имѣетъ то преимущество, что приходится въ этомъ случаѣ оперировать съ величинами реальными, взятыми изъ опыта, тогда какъ среднія температуры столбца 13 вычислены при извѣстныхъ допущеніяхъ и за большую ихъ точность нельзя поручиться. Но съ другой стороны, верхняя температура стѣнокъ не можетъ

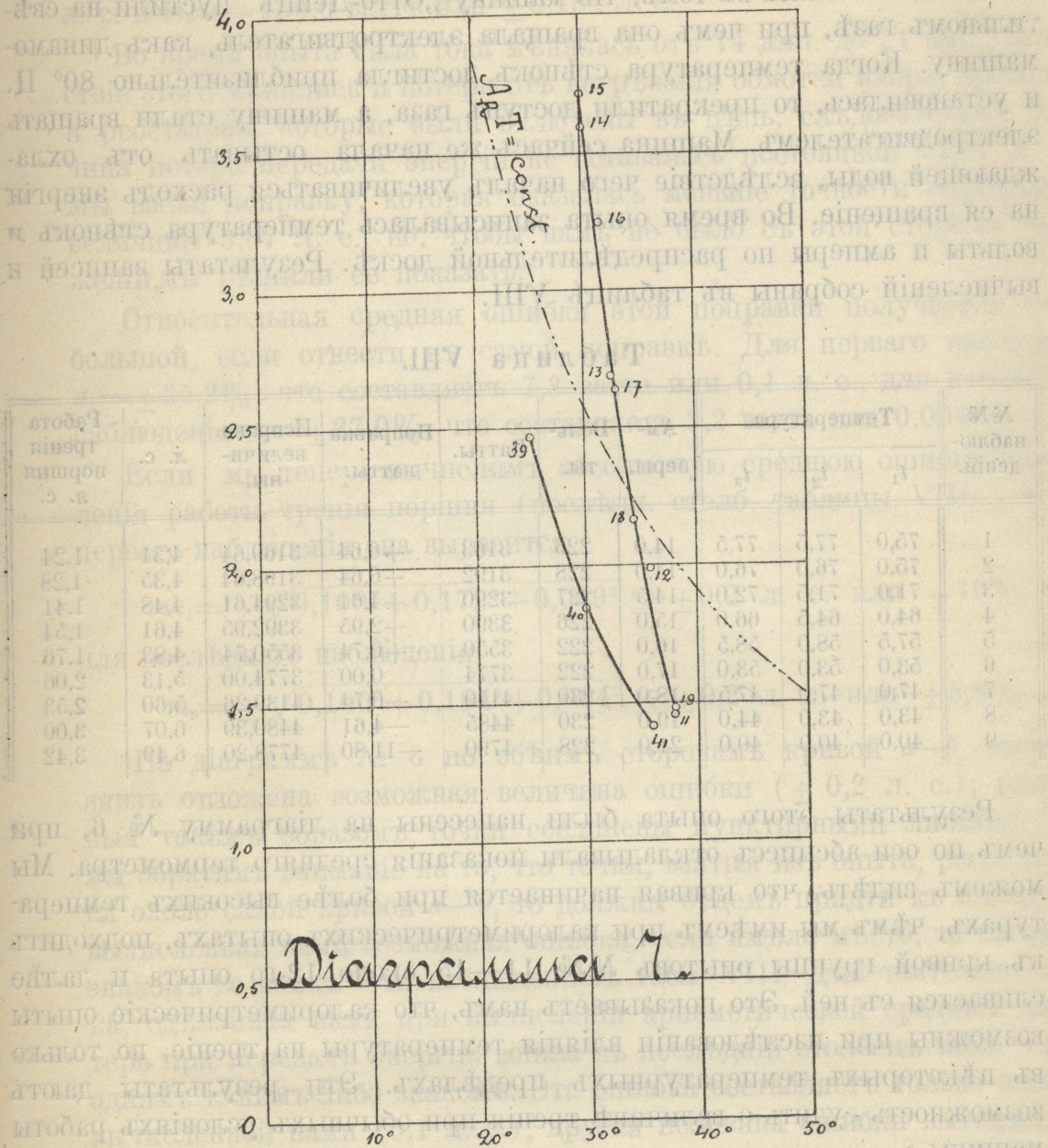
вполнѣ характеризовать температурныя условія опыта, потому что эти условія зависятъ отъ температуры входящей воды, отъ скорости ея движенія въ рубашкѣ и т. п., поэтому намъ кажется, что среднія температуры лучше характеризуютъ опытъ съ температурной стороны.



Дисперсия 6.

Группу опытовъ №№ 11—15 мы начали съ высшей температуры и постепенно переходили къ низшей температурѣ. Всѣ точки на діагр. 6, относящіяся этимъ опытамъ, соединены прямыми линиями, такъ же соединены между собою прямыми линиями опыты №№ 16—19, которые были начаты съ низшей температуры. Последніе опыты легли ниже опытовъ №№ 11—15, хотя опытъ съ высшей температурой № 19 почти сов-

падаетъ съ опытомъ № 11. Трудно найти объясненіе этому; возможно даже, что это зависитъ отъ способа нанесенія точекъ, тѣмъ болѣе, что на діаграммѣ № 7 эти точки расположились по одной кривой линіи.



Черт. 9.

8. Чтобы выяснитъ вліяніе болѣе высокихъ температуръ, нами былъ поставленъ особый опытъ, который только отчасти опирается на калориметрическіе опыты. Изъ послѣднихъ мы опредѣлили работу передачи энергіи отъ распредѣлительной доски до поршня. Для этого мы воспользовались опытами №№ 12—18. Въ этихъ опытахъ мы записали расходъ энергіи на распредѣлительной доскѣ, а отводомъ тепла изъ рубашки цилиндра опредѣлили количество энергіи, ушедшей на треніе поршня. Разность между этими величинами есть энергія, ушедшая на треніе въ

цапфахъ, на потери въ ременной передачѣ, на потери въ проводахъ и въ электродвигателѣ; при этихъ опытахъ сопротивление реостатами, конечно, не мѣнялось.

Опытъ состоялъ въ томъ, что машину „Отто-Дейцъ“ пустили на свѣильномъ газѣ, при чемъ она вращала электродвигатель, какъ динамомашину. Когда температура стѣнокъ достигла приблизительно 80° Ц. и установилась, то прекратили доступъ газа, а машину стали вращать электродвигателемъ. Машина сейчасъ же начала остывать отъ охлаждающей воды, вслѣдствіе чего началъ увеличиваться расходъ энергіи на ея вращеніе. Во время опыта записывалась температура стѣнокъ л вольты и амперы по распределительной доскѣ. Результаты записей и вычисленій собраны въ таблицѣ VIII.

Таблица VIII.

№№ наблюдений.	Температура.			Амперы.	Вольты.	Ватты.	Поправка ватты.	Исправл. величины.	л. с.	Работа тренія поршня л. с.
	t_1	t_2	t_3							
1	75,0	77,5	77,5	14,0	226	3163	+6,64	3169,64	4,31	1,24
2	75,0	76,0	76,0	14,0	228	3192	+6,64	3198,64	4,35	1,28
3	71,0	71,5	72,0	14,5	227	3290	+4,61	3294,61	4,48	1,41
4	64,0	64,5	66,0	15,0	226	3390	+2,95	3392,95	4,61	1,54
5	57,5	58,0	58,5	16,0	222	3550	+0,74	3550,74	4,83	1,76
6	53,0	53,0	53,0	17,0	222	3774	0,00	3774,00	5,13	2,06
7	47,0	47,0	47,5	18,0	230	4140	-0,74	4139,26	5,60	2,53
8	43,0	43,0	44,0	19,0	230	4485	-4,61	4480,39	6,07	3,00
9	40,0	40,0	40,0	21,0	228	4790	-11,80	4778,20	6,49	3,42

Результаты этого опыта были нанесены на діаграмму № 6, при чемъ по оси абсциссъ откладывали показанія средняго термометра. Мы можемъ видѣть, что кривая начинается при болѣе высокихъ температурахъ, чѣмъ мы имѣемъ при калориметрическихъ опытахъ, подходитъ къ кривой группы опытовъ №№ 11—15 около 12-го опыта и далѣе сливается съ ней. Это показываетъ намъ, что калориметрическіе опыты возможны при изслѣдованіи вліянія температуры на треніе, но только въ нѣкоторыхъ температурныхъ предѣлахъ. Эти результаты даютъ возможность судить о величинѣ тренія при обычныхъ условіяхъ работы машины.

Посмотримъ, съ какою точностью опредѣлена послѣдняя кривая, или какова точность всѣхъ данныхъ послѣдняго столбца табл. VIII.

Вычисленіе ошибки мы произвели для перваго и послѣдняго наблюденья, дающихъ наибольшее и наименьшее треніе поршня.

Арифметическая середина для величины потерь при передачѣ энергіи равна 3,07 л. с., при чемъ средняя ошибка $m = \pm 0,1$ л. с. Возможная ошибка при отчетахъ по амперметру $\pm 0,5$ амп., слѣдовательно, для наблюденья № 1 $n = \pm 3,57\%$, а для наблюденья № 9 $n = \pm 2,38\%$; возможная ошибка при отчетахъ по вольтметру ± 1 вольтъ, что состав-

ляетъ для обоихъ наблюдений $\pm 0,44\%$; средняя ошибка величины $W=ei$ для наблюдения № 1 $n_1=\pm 4\%$, для наблюдения № 9 $n_9=\pm 2,8\%$, или соответственно для того и другого $m_1=\pm 126,5$ ваттъ или $\pm 0,172$ л. с. и $m_9=\pm 136,0$ ваттъ или $\pm 0,184$ л. с.

Во время опыта сила тока мѣнялась отъ 14 амп. до 21 амп., вслѣдствіе этого мѣнялись и потери отъ нагрѣванія обмотки якоря, проводовъ и реостатовъ, которые были включены въ цѣпь, слѣдовательно, величина потерь передачи энергіи не оставалась постоянной (3,07 л. с.). Мы ввели поправку, которая оказалась меньше точности опредѣленія величины 3,07 л. с., но, чтобы намъ не было съ этой стороны возраженій, мы рѣшили ее показать.

Относительная средняя ошибка этой поправки получается очень большой, если отнести къ самой поправкѣ. Для перваго наблюдения $n_1=\pm 35,2\%$, что составляетъ 7,3 ватта или 0,1 л. с., для послѣдняго наблюдения $n_9=\pm 27,0\%$, что составляетъ 3,2 ватта или 0,004 л. с.

Если мы теперь вычислимъ абсолютную среднюю ошибку опредѣленія работы тренія поршня (послѣдн. столб. таблицы VIII), то для перваго наблюдения она выразится

$$m_1=\pm \sqrt{0,100^2+0,172^2+0,099^2} \cong \pm 0,2 \text{ л. с. или } \pm 16\%,$$

для послѣдняго наблюдения

$$m_9=\pm \sqrt{0,100^2+0,184^2+0,004^2} \cong \pm 0,2 \text{ л. с. или } \pm 5,8\%.$$

На діаграммѣ № 6 по обѣимъ сторонамъ кривой $a-b$, вверхъ и внизъ отложена возможная величина ошибки ($\pm 0,2$ л. с.); полученные такимъ образомъ точки соединены пунктирными линиями. Если мы обратимъ вниманіе на то, что точки, взятые изъ опыта, располагаются около самой кривой $a-b$, то должны будемъ придти къ выводу, что вычисленная нами возможная ошибка, если имѣла мѣсто, то съ однимъ знакомъ во всѣхъ 9-ти наблюденияхъ табл. VIII. Дѣйствительно, ошибка, сдѣланная нами при вычисленіи арифметической середины для потерь при передачѣ энергіи, вошла въ послѣдній столбецъ табл. VIII съ однимъ какимъ-либо знакомъ. Эта ошибка составляетъ только половину вычисленной нами (0,1 л. с.), другая половина ошибки вытекаетъ изъ неточности отсчетовъ по амперметру и вольтметру, но, благодаря тому, что эти отсчеты производились только въ тотъ моментъ, когда стрѣлка амперметра указывала вполнѣ опредѣленную величину, результаты отсчетовъ получились лучше, чѣмъ мы ожидали. Мы склонны думать поэтому, что фактически мы могли сдѣлать при полученіи кривой ошибку не болѣе 0,1 л. с.

9. Всѣ разсмотрѣнные до сихъ поръ опыты для опредѣленія вліянія высокихъ температуръ на треніе поршня не даютъ еще намъ права дѣлать тѣ или иныя заключенія о треніи, происходящемъ во время процесса горѣнія, потому что въ это время внутри цилиндра возникаетъ

температура въ 1800° — 2000°C . Чтобы имѣть возможность судить объ этомъ, мы поставили рядъ опытовъ по механическому методу. О постановкѣ этихъ опытовъ мы говорили въ предыдущемъ параграфѣ, теперь посмотримъ, насколько близко мы подошли въ этихъ опытахъ къ истинной величинѣ тренія.

Результаты этихъ опытовъ собраны у насъ въ таблицахъ X и XI. Въ таблицѣ X собраны всѣ опыты, относящіяся къ изслѣдованію вліянія охлаждающей воды на работу машины. Въ этихъ опытахъ число оборотовъ и нагрузку машины не мѣняли. Въ таблицѣ XI собраны опыты, поставленные для выясненія вліянія числа оборотовъ на работу машины; здѣсь температура охлаждающей воды поддерживалась одинаковой. Постоянство указанныхъ факторовъ имѣетъ относительное значеніе. Особенно же трудно было получить во всѣхъ опытахъ табл. XI одинаковую среднюю температуру охлаждающей воды. Непостоянство указанныхъ факторовъ вліяетъ на результаты выводовъ, но указать это вліяніе и вытекающую отсюда ошибку съ помощью вычисленій невозможно, объ этомъ можно судить по результатамъ опытовъ, по тѣмъ отклоненіямъ отъ средней величины, которыя замѣчаются для отдѣльныхъ опытовъ. Но, чтобы судить о томъ, въ какой мѣрѣ возможно данное отклоненіе отъ не постоянства указанныхъ факторовъ и въ какой мѣрѣ отъ точности наблюдений и расчета, мы вычислили среднюю возможную ошибку въ опредѣленіи работы тренія поршня, на вычисленіи этой ошибки мы теперь и остановимся.

10. При пользованіи саморегулирующимся тормазомъ¹⁾ величина груза подвѣшеннаго къ тормазу не можетъ измѣняться, а потому величина эффективной работы N_e можетъ вычисляться по уравненію

$$N_e = An, \text{ гдѣ } A = \frac{2\pi RG}{60.75}$$

Вѣсь G , выражающій нагрузку, состоитъ изъ двухъ величинъ: изъ вѣса груза G_1 и равнодѣйствующей вѣса тормазы G_2 . Вѣсь $G_1 = 17,235$ кгр. былъ опредѣленъ съ возможной ошибкой $\pm 0,5$ гр., вѣсь $G_2 = 10,6$ кгр. опредѣленъ съ возможной ошибкой ± 20 гр., слѣдовательно, средняя ошибка въ опредѣл. нагрузки тормазы $m = \pm \sqrt{20^2 + 0,5^2} = \pm 20$ гр. или относительная ошибка $n = \pm 0,072\%$. При опредѣленіи радіуса тормазы возможна ошибка въ ± 1 мм. или $\pm 0,082\%$. Средняя относительная ошибка при вычисленіи A складывается изъ относительныхъ ошибокъ всѣхъ измѣреній плюсъ возможная ошибка на счетной линейкѣ $\pm 0,02\%$. Итакъ, мы имѣемъ $A = 0,048$ съ относительной ошибкой $n = 0,174\%$ ²⁾. Возможная ошибка при нахожденіи числа оборотовъ n зависитъ отъ времени, если мы примемъ ошибку въ отсчетахъ времени

1) Грамбергъ. „Технич. Измѣрен.“ Стр. 144.

2) Здѣсь надо различать n , обозначающее относительную ошибку, отъ n —числа оборотовъ машины.

въ ± 1 сек., то это составит $\pm 0,067\%$, а для двухъ наблюдений $\pm 0,067\sqrt{2} = \pm 0,095\%$. Средняя относительная ошибка при определении эффективной мощности будетъ равна $\pm 0,27\%$.

11. Индикаторная работа вычислялась нами по уравненію

$$N_1 = B p_1 n,$$

гдѣ $B = \frac{\pi D^2 H}{4.60.75}$, ошибка этого числового коэффициента равняется суммѣ ошибокъ D^2 и H плюсъ возможная ошибка на счетной линейкѣ, что у насъ составляетъ $2.0,14 + 0,16 + 0,02 = \pm 0,46\%$. Что касается возможной ошибки при опредѣл. p_1 , то согласно указаніямъ проф. Мейера ¹⁾ и проф. Малѣева ²⁾ мы ее считаемъ $\pm 2\%$. Возможная средняя ошибка при опредѣленіи n у насъ вычислена $\pm 0,095\%$.

Такимъ образомъ средняя ошибка при вычисленіи N_1 равна $n = 0,46 + 2,0 + 0,095 = \pm 2,56\%$.

12. Индикаторная работа засасывающаго и выталкивающаго ходовъ или работа машины въ качествѣ насоса N_1' , опредѣлялась по тому же уравненію, по какому вычислялась положительная работа, поэтому среднія ошибки числового множителя B и числа оборотовъ n остаются тѣми же. Что касается p_1' , то оно опредѣлялось съ большой возможной ошибкой. Главнымъ образомъ это зависило отъ величины площади индикаторной діаграммы, которая въ свою очередь зависила отъ величины разрѣженія засасывающаго хода. Дѣло въ томъ, что въ машинѣ „Отто-Дейцъ“ регулировка количественная, слѣдовательно, регуляторъ этой машины, измѣняя подъемъ клапана, измѣняетъ величину засасываемаго заряда. Для отдѣльныхъ опытовъ площадь индикаторной діаграммы мѣняется въ два, три раза, что касается діаграммы одного и того же опыта, то колебанія эти доходятъ до $\pm 10\%$. Если примемъ возможную ошибку планиметрированія $\pm 0,2\%$ ³⁾, ошибку въ опредѣленіи длины діаграммы $\pm 0,16\%$ и среднюю ошибку масштаба пружины $\pm 0,55\%$, то возможная ошибка при опредѣленіи p_1' равна

$$n = 10,0 + 0,2 + 0,16 + 0,55 \approx \pm 11\%.$$

Средняя ошибка при опредѣленіи работы насоса

$$n = 11 + 0,46 + 0,095 \approx \pm 11,6\%.$$

Если эту ошибку отнести къ работѣ цилиндра N_1 , отъ которой N_1' составляетъ 0,1, то эта ошибка составитъ $\pm 1,16\%$.

13. Теперь посмотримъ, съ какою среднею ошибкой опредѣлена у насъ работа вращенія маховика, вала и распределительнаго механизма.

Расчетъ мы произведемъ для нѣкотораго средняго числа оборотовъ, для большаго же числа оборотовъ относительная точность, конечно,

¹⁾ Z. V. d. J. 1901. S. 1348.

²⁾ В. Малѣевъ. „Опытное изслѣдованіе двухтактныхъ машинъ“. Стр. 106.

³⁾ Грамбергъ. „Техническое измѣреніе“. Стр. 37.

будетъ увеличиваться, а для меньшаго уменьшаться. Возьмемъ наблюдение № 9 для холостого хода изъ таблицы IX. Для вычисления $W_2 - i_2^2 r$ (см. ур-ніе 24) необходимо знать сопротивление обмотки якоря r ; эта величина r нами была опредѣлена съ средней относительной ошибкой $\pm 1,76\%$ и равняется 0,225 ома. Показаніе приборовъ было 6,4 амп. и 173 вольта. Такъ какъ точность этихъ приборовъ ± 1 вольтъ и $\pm 0,1$ амп., то возможная относительная ошибка отсчета силы тока будетъ равна $n = \pm \frac{0,1 \cdot 100}{6,4} = 1,56\%$, а возможная относительная ошибка отсчета напряженія $n = \pm \frac{1 \cdot 100}{173} = 0,578\%$; средняя относительная и абсолютная ошибки вычисления $W_2 = ie$ будутъ равны $n = 1,56 + 0,578 = \pm 2,138\%$ или $m = \pm 23,66$ ватта; средняя ошибка вычисления $i^2 r$ равна $n = 2 \cdot 1,56 + 1,76 = \pm 4,88\%$ или $\pm 0,45$ ватта; средняя ошибка вычисления $W_2 - i^2 r$ будетъ равна $m = \pm \sqrt{23,66^2 + 0,45^2} = \pm 23,7$ ватта $n = 2,17\%$.

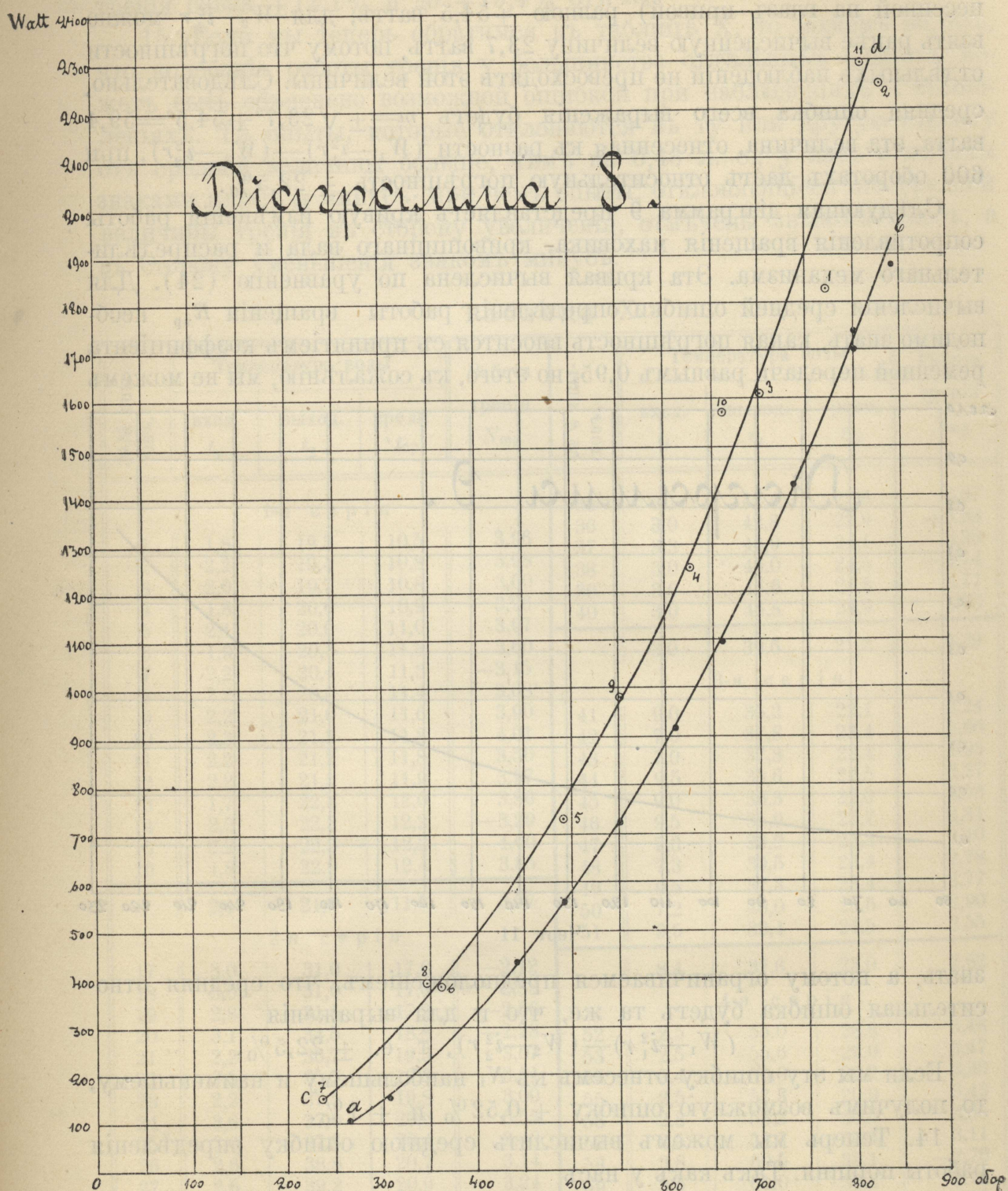
Таблица IX.

Холостой ходъ электродвигателя.							Нагруженный ходъ электродвигателя.							
№№ наблюдений.	Число оборот. n	Сила тока амп.	Напряж. вольт.	Энергія ватта.	Потери $i^2 r$.	Разность.	№№ наблюдений.	Число оборот. n_1	Число оборот. n_2	Сила тока амп.	Напряж. вольт.	Энергія ватта.	Потери $i^2 r$.	Разность.
1	840	8,2	231	1895	21,3	1873,7	1	769	203	9,0	205	1845	18,2	1827,0
2	800	8,0	220	1760	20,2	1739,8	2	830	219	10,0	227	2270	22,5	2247,5
3	735	7,2	199	1434	11,7	1422,3	3	698	184	8,8	185	1628	17,4	1610,6
4	612	5,9	157	926	7,8	918,2	4	626	165	7,9	160	1265	14,0	1251,0
5	550	5,3	138	732	6,3	725,7	5	489	129	6,4	116	742	9,2	733,0
6	440	4,3	103	443	4,2	438,8	6	360	95	5,4	73	394	6,6	387,5
7	305	3,2	50	160	2,3	157,7	7	220	58	5,0	25	125	5,6	125,0
8	800	7,8	220	1715	13,7	1701,3	8	345	91	6,0	67	402	8,1	394,0
9	660	6,4	173	1107	9,2	1097,8	9	550	145	7,2	138	994	11,5	983,0
10	490	4,7	120	564	5,0	559,0	10	656	173	8,8	181	1592	17,4	1575,0
11	250	2,8	34	96	1,8	94,2	11	808	213	10,5	221	2320	24,8	2295,0

Изъ діаграммы № 8, черт. 10, видимъ, что всѣ точки, полученныя путемъ наблюденія, отстоятъ отъ средней кривой $a-b$ меньше, чѣмъ на 23,7 ватта, т. е. наблюденія были сдѣланы удовлетворительно.

Если мы подсчитаемъ среднія ошибки вычисления $W_1 - i_1^2 r$ (см. ур-ніе 24) для наблюденія № 4 при нагруженномъ ходѣ (табл. IX), то получимъ $m = \pm 20,9$ ваттъ и $n = \pm 1,88\%$. Просматривая расположеніе точекъ относительно кривой $c-d$ (діагр. 8), мы можемъ видѣть, что точки при малыхъ скоростяхъ лежатъ не далѣе 20 ваттъ, при большихъ же скоростяхъ наблюдаются сильныя отклоненія отъ кривой. Такъ на примѣръ, наблюдение № 2 отклоняется на 4%, наблюдение № 1 на 9,8% и наблюдение № 10 на 9,5%. Такая неудовлетворительность наблюдений объясняется тѣмъ, что напряженіе электрической сѣти, отъ которой мы брали токъ, во время опыта нѣсколько колебалось, слѣдствіемъ чего происходило то увеличеніе, то уменьшеніе числа оборотовъ;

слѣдовательно, происходило, то поглощеніе живой силы маховикомъ, то отдача имъ живой силы. Это можно было замѣтить и во время наблюде- нія, такъ какъ стрѣлка амперметра совершала колебанія. Чѣмъ больше

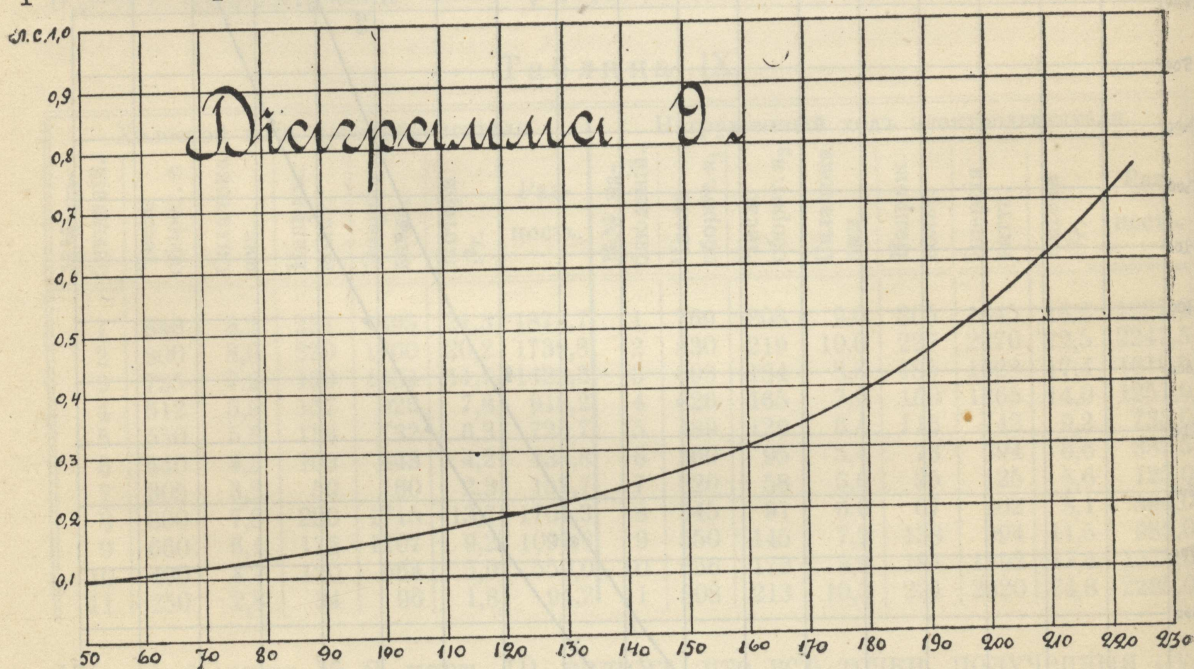


Черт. 10.

были числа оборотовъ машины, тѣмъ труднѣе становилось отсчитать силу тока, и приходилось брать нѣкоторое среднее значеніе, около кото- раго колебалась стрѣлка амперметра.

При опредѣленіи средней ошибки выраженія $(W_1 - i_2^2 r) - (W_2 - i_2^2 r)$ приходится величину погрѣшности для $W_1 - i_1^2 r$ брать изъ діаграммы 8, какъ среднюю арифметическую всѣхъ погрѣшностей (отклоненій отъ нанесенной на глазъ кривой) равною $\pm 54,5$ ваттъ, для $W_2 - i_2^2 r$ можно взять ранѣе вычисленную величину 23,7 ваттъ, потому что погрѣшности отдѣльныхъ наблюденій не превосходятъ этой величины. Слѣдовательно, средняя ошибка всего выраженія будетъ $m = \pm \sqrt{23,7^2 + 54,5^2} = 59,4$ ватта, эта величина, отнесенная къ разности $(W_1 - i_1^2 r) - (W_2 - i_2^2 r)$, при 600 оборотахъ даетъ относительную погрѣшность $\pm 22,5\%$.

Слѣдующая діаграмма 9 представляетъ кривую измѣненія работы сопротивленія вращенія маховика, кривошипнаго вала и распредѣлительнаго механизма. Эта кривая вычислена по уравненію (24). Для вычисленія средней ошибки опредѣленія работы вращенія $R_{вр}$ необходимо знать, какая погрѣшность вносится съ принятіемъ коэффициента ременной передачи равнымъ 0,95, но этого, къ сожалѣнію, мы не можемъ



знать, а потому ограничиваемся предположеніемъ, что средняя относительная ошибка будетъ та же, что и для выраженія

$$(W_1 - i_1^2 r) - (W_2 - i_2^2 r), \text{ т. е. } \pm 22,5\%.$$

Если мы эту ошибку отнесемъ къ N_1 наибольшему и наименьшему, то получимъ возможную ошибку $\pm 0,52\%$ и $\pm 1\%$.

14. Теперь мы можемъ вычислить среднюю ошибку опредѣленія работы поршня. Такъ какъ у насъ

$$R_n = N_1 + N_1' - N_c - R_{вр},$$

то возможная средняя ошибка въ опредѣленіи R_n представится

$$n = \pm \sqrt{2,56^2 + 1,15^2 + 0,27^2 + 1,00^2} \cong \pm 3,0\%$$

отъ индикаторной работы машины N_1 . Такъ какъ эта индикаторная ра-

бота колебалась для всѣхъ опытовъ таблицы X отъ 14,0 л. с. до 15,4 л. с., то абсолютную среднюю ошибку мы можемъ считать равною 0,46 л. с. Следовательно, относительная средняя ошибка при опредѣленіи работы тренія равна $\pm 12,1\%$ и до $\pm 15,4\%$ отъ R_n .

15. Если мы теперь обратимся къ таблицѣ X, то можемъ видѣть, что колебаніе работы тренія у большинства отдѣльныхъ опытовъ можетъ быть объяснено возможной ошибкой при наблюденіяхъ и вычисленіяхъ. Тѣ опыты, которые отклоняются въ ту или другую сторону отъ средней величины больше, чѣмъ на 0,46 л. с., у насъ отмѣчены знаками плюсъ и минусъ; при чемъ опыты, отклоняющіеся отъ средней величины тренія въ сторону увеличенія, отмѣчены знакомъ плюсъ, а въ сторону уменьшенія знакомъ минусъ.

Таблица X.

№.№ опы- товъ.	Температура воды			Работа трения $N_{тр}$	№.№ опы- товъ.	Температура воды			Работа трения $N_{тр}$
	вход. t_1	выход. t_2	средн. $t_{ср}$			вход. t_1	выход. t_2	средн. $t_{ср}$	
1-я серия					35	3,1	42,4	22,8	3,67
1	1,8	19,3	10,5	3,96	36	3,0	42,8	22,9	+3,93
2	2,2	19,4	10,8	3,98	37	3,3	44,9	24,1	3,28
3	2,0	19,7	10,8	3,60	38	3,0	46,0	24,5	-2,74
4	1,8	20,0	10,9	3,96	39	3,0	46,6	24,8	3,77
5	2,1	20,0	11,0	3,97	40	3,0	46,8	24,9	3,30
6	1,9	20,7	11,3	3,60		3,0	39,5	21,2	3,29
7	2,2	20,4	11,3	-3,15	3-я серия				
8	2,2	20,5	11,4	3,68	41	9,0	35,2	22,1	2,24
9	2,2	21,0	11,6	3,90	42	7,0	37,8	22,4	2,60
10	2,3	21,3	11,8	4,01	43	7,0	37,8	22,4	2,93
11	2,2	21,3	11,8	3,50	44	9,5	35,6	22,5	2,27
12	2,2	21,5	11,9	3,97	45	9,0	36,3	22,6	2,53
13	1,7	22,3	12,0	3,86	46	9,5	35,9	22,7	2,81
14	2,2	22,3	12,2	-3,29	47	7,3	39,0	23,2	2,40
15	2,2	22,3	12,2	4,00	48	7,3	39,5	23,4	2,78
16	1,8	22,9	12,4	3,85	49	9,5	37,3	23,4	2,77
	2,1	21,0	11,5	3,77	50	7,2	40,0	23,6	2,90
2-я серия					51	9,5	39,4	24,5	2,55
17	3,0	31,0	17,0	-2,12		8,4	37,6	23,0	2,62
18	3,0	31,0	17,0	2,83	4-я серия				
19	2,8	31,5	17,2	-2,66	52	2,5	55,0	28,8	3,48
20	3,1	34,5	18,8	-2,28	53	2,5	55,6	29,0	3,47
21	2,2	36,7	19,3	3,07	54	2,4	56,0	29,2	3,36
22	3,5	35,7	19,6	3,61	55	2,5	57,3	29,9	3,43
23	2,2	37,5	19,8	3,00	56	2,8	58,2	30,5	3,35
24	3,0	37,0	20,0	3,55	57	2,5	58,7	30,6	3,11
25	3,0	37,8	20,4	3,40	58	3,8	60,5	32,1	-2,76
26	2,6	38,8	20,7	3,14	59	3,5	61,0	32,2	3,10
27	2,6	39,2	20,9	3,24	60	2,7	63,0	32,8	3,32
28	3,7	38,3	21,0	3,71	61	2,7	63,0	32,8	3,28
29	2,7	40,3	21,5	+3,87	62	3,7	62,2	33,0	3,31
30	3,0	40,7	21,8	-2,60	63	3,3	63,3	33,5	3,58
31	3,2	40,9	22,0	2,97	64	2,5	65,6	34,0	3,17
32	3,1	41,3	22,2	-2,68					
33	2,8	42,0	22,4	3,25					
34	3,2	42,0	22,6	2,80		2,9	60,0	31,4	3,30

Всѣ опыты таблицы X разбиты у насъ на 4 серіи въ зависимости отъ температуры охлаждающей воды. Мы можемъ видѣть, что эта температура охлаждающей воды внутри каждой серіи опытовъ была не постоянной. Вліяніе на треніе этого измѣненія температуры трудно подмѣтить вслѣдствіе малой точности опытовъ, но если мы вычислимъ среднія величины тренія для каждой серіи, то вліяніе температуры воды на треніе обнаруживается.

Среднія ошибки въ опредѣленіи ариѳметическихъ срединъ у насъ получились слѣдующія: величина 3,77 л. с. опредѣлена съ средней ошибкой $m = \pm 0,07$ л. с., величина 3,29 л. с. съ средней ошибкой $m = \pm 0,10$ л. с., величина 2,65 л. с. съ средней ошибкой $m = \pm 0,06$ л. с. и, наконецъ, величина 3,30 л. с. съ средней ошибкой $m = \pm 0,06$ л. с. Всѣ величины ошибокъ значительно меньше той разности, которая получилась между средними величинами тренія отдѣльныхъ серій. Это даетъ намъ основаніе считать эту разность происходящей отъ температурныхъ условій опытовъ.

16. Въ таблицѣ XI собраны опыты, поставленные для изслѣдованія вліянія числа оборотовъ на работу машины „Отто-Дейцъ“. Мы

Таблица XI.

№№ опытовъ.	Число оборотовъ.	Работа тренія.	№№ опытовъ.	Число оборотовъ.	Работа тренія.	№№ опытовъ.	Число оборотовъ.	Работа тренія.
1-я серія			20	152,0	1,90	41	176,0	2,00
			21	152,0	2,00	42	176,0	2,00
1	122,8	1,69	22	152,4	1,92	173,1		2,41
2	126,0	1,83	23	152,4	1,94	4-я серія		
3	126,8	1,54	24	152,7	1,89			
4	127,2	1,94	151,0		1,95	43	192,8	2,77
5	127,5	1,48	3-я серія			44	193,2	2,55
6	127,6	1,94	25	169,5	2,41	45	195,7	—2,24
2-я серія			26	170,8	2,56	46	196,0	2,53
			27	171,1	2,35	47	196,5	2,90
7	146,7	2,06	28	171,2	+2,93	48	196,5	2,81
8	148,8	1,84	29	171,4	2,65	49	196,8	2,27
9	148,8	1,97	30	171,7	2,60	50	197,6	2,78
10	150,2	1,98	31	171,8	2,17	51	197,6	2,93
11	150,3	1,78	32	172,0	+2,96	52	198,0	2,40
12	150,8	2,06	33	173,2	—1,78	53	198,0	2,98
13	151,2	1,94	34	173,8	2,05	54	198,4	2,60
14	151,3	2,14	35	174,0	2,57	55	198,3	3,71
15	151,5	1,91	36	174,0	2,71	56	199,2	3,61
16	151,6	1,74	37	174,2	2,43	57	200,0	—2,12
17	151,6	2,34	38	174,6	2,33	58	200,0	2,66
18	151,8	1,92	39	174,6	2,46	59	200,0	2,28
19	152,0	1,79	40	175,5	2,44	60	201,0	2,83
							197,6	2,72

воспользовались этими опытами для изслѣдованія вліянія скорости на треніе поршня. Всѣ опыты разбиты на серіи соотвѣтственно различнымъ числамъ оборотовъ. Внутри каждой серіи числа оборотовъ от-

дѣльныхъ опытовъ колебались отъ измѣненія условій работы машины въ предѣлахъ 5—6 оборотовъ. Въ своихъ выводахъ среднихъ величинъ работы тренія мы не считаемся съ этимъ вліяніемъ колебанія чиселъ оборотовъ и предполагаемъ внутри каждой серіи опытовъ постоянство условій. Если же постоянства въ дѣйствительности не было, то все же эти переменные факторы не оказывали вліянія больше возможной ошибки (0,46 л. с.) отъ измѣреній, наблюденій и вычисленій¹⁾. Среднія ошибки мы вычисляли на общихъ основаніяхъ. Вычисления дали такіе результаты: для ариѳметич. середины 1,74 л. с. средняя ошибка $m = \pm 0,08$ л. с., для ариѳм. середины 1,95 л. с. средняя ошибка $m = \pm 0,03$ л. с., для ариѳм. середины 2,41 л. с. средняя ошибка $m = \pm 0,07$ л. с., для ариѳм. сред. 2,72 л. с. средн. ошибка $m = \pm 0,07$ л. с.. Нами вычислены еще среднія ариѳметическія величины для чиселъ оборотовъ, но среднія ошибки этихъ величинъ намъ мало интересны, а потому мы ихъ и не указываемъ.

17. Мы должны еще указать на одну погрѣшность, которая заключается въ опредѣленіи тренія поршня по указанному способу. Это—трение въ цапфѣ кривошипа и въ крейцкопфной головкѣ шатуна. Точно это трение можно указать только опытнымъ путемъ, поэтому мы въ таблицы для тренія внесли числа, содержащія не только трение поршня, но и трение въ шатунномъ механизмѣ. Во всякомъ случаѣ, это трение не значительно и не можетъ сколько нибудь замѣтно измѣнить результаты нашихъ опытовъ. Дѣйствительно, мы можемъ видѣть, что работа вращенія маховика, вала и распредѣлительнаго механизма составляетъ 0,5 л. с. при 200 об. Такъ какъ площадь цапфы колѣна равна $\frac{1}{5}$ поверхности подшипниковъ, то мы можемъ ожидать, что и работа тренія въ цапфѣ будетъ равняться приблизительно одной пятой работы вращенія вала, т. е. 0,1 л. с.. Эта величина не можетъ измѣнить разности среднихъ величинъ табл. X, потому что во всѣ эти величины она входитъ одинаковою и съ однимъ и тѣмъ же знакомъ плюсъ. Въ среднія величины таблицы XI она входитъ различною, но повліяетъ на отношеніе этихъ величинъ она не можетъ замѣтнымъ образомъ, потому что подчиняется почти той же зависимости отъ числа оборотовъ, какой подчиняется и работа тренія поршня.

18. Въ заключеніе этой главы сдѣлаемъ бѣглый обзоръ опытному матеріалу въ таблицахъ VI и VII. Мы здѣсь укажемъ на нѣкоторыя подробности относительно этихъ таблицъ, о которыхъ не пришлось намъ сказать выше.

Въ первой серіи опытовъ таблицы VI заключается матеріалъ надъ изслѣдованіемъ вліянія скорости на величину тренія при смазкѣ смѣсью машиннаго масла № 6 съ цилиндрическимъ № 1. Въ столбцахъ 17—20 собраны свѣдѣнія о свойствахъ смазки и о ея количествѣ. Въ столб-

1) Опыты, отклоняющіеся болѣе чѣмъ на 0,46 л. с., мы отмѣтили по предыдущему знаками плюсъ и минусъ

цѣ 18 указана вязкость во время опыта; величина эта получалась на основаніи средней температуры стѣнокъ (столб. 13) и большою точностью не отличается, потому что средняя температура стѣнокъ определена не точно; введенъ этотъ столбецъ съ цѣлью показать, хотя бы приблизительно, что мы можемъ ожидать въ отношеніи измѣненія вязкости отъ температуры. Въ столбцѣ 21 и 22 указываются величины полного сопротивленія и удѣльнаго сопротивленія. Полное сопротивленіе вычислено на основаніи данныхъ столбцовъ 8 и 15 по форм. $F = \frac{A_R}{v_m}$; удѣльное сопротивленіе f получено отъ дѣленія полного сопротивленія на одну и ту же величину полной боковой поверхности поршня (3040 см².), поэтому эта величина f все время остается пропорціональной F , пока мы имѣемъ дѣло съ одной и той же машиной. Въ столбцѣ 16 работа тренія приведена къ одной и той же скорости или къ одному и тому же числу оборотовъ (220 обор.). Поправка вводилась на основаніи предположенія, что работа тренія пропорціональна скорости. Какъ увидимъ дальше, это наше предположеніе совершенно справедливо.

Вторая серія содержитъ опыты, относящіеся къ изслѣдованію вліянія температурныхъ измѣненій на треніе поршня. Смазка оставалась та же, что и въ первой серіи.

Третья серія небольшая (№№ 20—23) поставлена была съ цѣлью выяснитъ вліяніе количества смазки. Эти опыты имѣютъ смыслъ только для данной машины и при низкой температурѣ тренія. Дѣло заключается въ томъ, что у машины „Отто-Дейцъ“ смазка подается, приблизительно въ средину цилиндра, подъ давленіемъ особымъ насосомъ, поэтому можетъ получиться избытокъ смазки, который выдавливается изъ зазора между трущимися поверхностями, накопляется на краяхъ поршня и увеличиваетъ не только сопротивленіе движенію, но и внутреннее треніе въ слоѣ смазки. При смазкахъ съ малою удѣльною вязкостью этотъ избытокъ не оказываетъ замѣтнаго вліянія, при вязкихъ же смазкахъ и низкихъ температурахъ вліяніе это замѣтно. Что касается другихъ машинъ, „Горнсби-Акройдъ“ и компрессора, то тамъ вліяніе количества смазки вообще мало замѣтно, потому что у этихъ машинъ масло подавалось самотекомъ или разностью давленій атмосфернаго и разрѣженія въ цилиндрѣ. У машины „Горнсби-Акройдъ“ смазка поступала изъ масленки по гуттаперчевой трубкѣ въ отверстіе, сдѣланное на открытомъ краю цилиндра. Если мы обратимся къ опытамъ, то увидимъ, что наименьшее треніе получается для обильной керосиновой смазки (опытъ 22), но этотъ опытъ нужно отнести къ слѣдующей серіи № 4, гдѣ изслѣдовалось вліяніе вязкости, въ эту же серію онъ попалъ при постановкѣ опытовъ ввиду необходимости освободить цилиндръ отъ накопившагося большого избытка смазки отъ предыдущаго опыта. Слѣдующій опытъ № 23 былъ проведенъ при наименьшемъ ко-

личестѣ смазки, и треніе въ немъ получилось значительно меньше ($f=0,0262$), чѣмъ въ опытахъ № 6 ($f=0,0364$), № 20 ($f=0,0406$) и № 21 ($f=0,0440$). Такой благоприятный результатъ опыта № 23 мы склонны объяснить вліяніемъ предыдущаго опыта, именно, вліяніемъ керосина, который примѣшался къ смазкѣ отъ предыдущаго опыта и нѣсколько уменьшилъ ея вязкость. Несомнѣнно все-таки, что вліяніе количества смазки есть, а потому мы всѣ опыты съ болѣею вязкостью маселъ вели съ одинаковымъ расходомъ масла въ 1 часъ.

Серія 4-я была поставлена для изслѣдованія вліянія вязкости смазки на величину тренія поршня. Первоначально у автора съ этими опытами была связана и другая мысль, а именно, обнаружить вліяніе температуры на треніе. Предполагалась составить рядъ смѣсей съ керосиномъ (см. объ этомъ I главу) и получить такимъ образомъ смазку различной вязкости; по этой вязкости изъ діаграммы № 1 найти тѣ температурныя условія, при которыхъ обычная смазка (смѣсь маш. масл. съ вискозиномъ) имѣетъ ту же вязкость. Предполагалось, слѣдовательно, при низкихъ температурахъ опытовъ создать въ машинѣ условія тренія, отвѣчающія высокимъ температурамъ. Практически это осуществить не удалось, потому что вязкость маселъ подвергалась дальнѣйшему измѣненію во время опыта въ зависимости отъ его температурныхъ условій, поэтому пришлось отыскивать по діаграммѣ № 1 температуру, считаясь не съ тою вязкостью, какая опредѣлена при 20° Ц, а съ предполагаемой вязкостью при средней температурѣ стѣнокъ (столб. 18). Этотъ методъ не могъ дать удовлетворительныхъ результатовъ, поэтому оставалось рассматривать эти опыты только по отношенію къ вязкости смазки.

Серія 5-я поставлена для выясненія вліянія измѣненія температуры при смазкѣ машиннымъ масломъ. Результаты опытовъ нанесены на діаграммѣ № 7 (кривая $c-d$).

Серія 6-я поставлена для опредѣленія вліянія скорости на величину тренія при смазкѣ машиннымъ масломъ. Результаты опытовъ нанесены на діаграммѣ № 3.

Серіи 7-я и 8-я поставлены для опредѣленія тренія безъ поршневыхъ колець. Чтобы показать, что поршневые кольца не оказываютъ вліянія на законъ измѣненія тренія со скоростью, нами были поставлены опыты при различныхъ числахъ оборотовъ. Результаты этихъ опытовъ нанесены на діаграммѣ № 3.

Въ таблицѣ VII собраны опыты по изслѣдованію тренія поршней у компрессора и машины „Горнсби-Акройдъ“. Въ виду того, что число оборотовъ оказываетъ большое вліяніе на величину работы тренія, мы для лучшей характеристики тренія поршня не ограничивались одною опредѣленною скоростью, а измѣняли ее въ возможныхъ предѣлахъ для каждой машины.

Вслѣдствіе того, что у этихъ машинъ нельзя было измѣрять температуру стѣнокъ цилиндра, въ таблицѣ VII отсутствуютъ соотвѣтствующіе столбцы данныхъ. Для того, чтобы судить о температурныхъ условіяхъ опыта, мы ввели столбецъ 6-ой средней температуры воды. Въ этой таблицѣ отсутствуютъ у насъ свѣдѣнія о свойствахъ смазки; это отсутствіе объясняется тѣмъ, что при постановкѣ всѣхъ опытовъ таблицы VII употреблялось только два вида смазки, смѣсь машиннаго масла № 6 въ половинномъ количествѣ съ цилиндрическимъ № 1 и одно машинное масло № 6. Свойства той и другой смазки оставались постоянными, и ихъ можно видѣть на таблицѣ VI.

Серіи № № 9, 10, 11 и 12 относятся къ опытамъ съ компрессоромъ. Во всѣхъ опытахъ этихъ серій мѣнялись числа оборотовъ. Всѣ опыты ставились при низкой температурѣ, при чемъ въ первыхъ двухъ серіяхъ входящая вода не подогревалась. Смазкой во всѣхъ опытахъ было машинное масло. Поршневые кольца были сняты только въ серіи № 11. Въ этой серіи пришлось ограничиться только тремя опытами въ виду затруднительности ихъ постановки. Всѣ результаты этихъ опытовъ съ компрессоромъ собраны на діаграммѣ № 5.

Серіи № № 13, 14, 15 и 16 и 17 относятся къ опытамъ съ машиною „Горнесби-Акройдъ“. Во всѣхъ опытахъ этихъ серій мѣнялось число оборотовъ. Двѣ первыя серіи были произведены съ поршневыми кольцами, остальные производились безъ колець. Машинное масло было употреблено въ серіяхъ №№ 13 и 15, въ серіяхъ же №№ 14, 16 и 17 употреблялась смѣсь. Въ серіи № 17 задняя полость была сообщена люкомъ съ воздухомъ, въ остальныхъ серіяхъ люкъ былъ закрытъ, при чемъ объемъ камеры сжатія былъ равенъ 23780 см.³. Всѣ результаты этихъ опытовъ собраны на діаграммѣ № 4.

ГЛАВА IV.

Результаты опытовъ.

На основаніи всего опытнаго матеріала, разсмотрѣннаго въ предыдущей главѣ, мы въ этой главѣ сдѣлаемъ соотвѣтствующіе выводы.

1. Когда мы говорили о треніи смазанныхъ тѣлъ, то установили, что работа тренія зависитъ отъ давленія, отъ величины поверхности, отъ скорости движенія, отъ температуры смазывающаго слоя, отъ внутреннихъ свойствъ смазки и отъ величины зазора между трущимися поверхностями. Для того, чтобы выяснитъ вліяніе того или иного изъ указанныхъ факторовъ, необходимо обставить опытъ такъ, чтобы при одномъ измѣняющемся факторѣ остальные оставались постоянными. При изслѣдованіи тренія поршня мы сталкивались съ двумя затрудненіями, во-первыхъ, не всѣ факторы мы можемъ мѣнять по произволу, во-вторыхъ, не всѣ факторы можемъ сдѣлать постоянными. Вопросъ о треніи поршня находится по отношенію къ изслѣдованію въ наихудшемъ положеніи, вслѣдствіе большихъ техническихъ затрудненій измѣненія нѣкоторыхъ факторовъ и условій опыта; напр., измѣнять давленіе на единицу поверхности мы не можемъ въ одной и той же машинѣ сколько нибудь замѣтно для измѣненія величины тренія; можно получить различное давленіе, только переходя отъ одной машины къ другой; такимъ же путемъ мы можемъ достигнуть и измѣненія величины трущейся поверхности и измѣненія величины зазора; но переходъ отъ одной машины къ другой связанъ съ измѣненіемъ нѣкоторыхъ другихъ факторовъ, вліяющихъ на треніе, на примѣръ, съ измѣненіемъ качества обработки поверхностей. Съ другой стороны, нельзя достигнуть постоянства такихъ факторовъ, какъ температурныя условія опыта. Вслѣдствіе такихъ затрудненій, опытное изслѣдованіе тренія поршня не даетъ возможности изслѣдовать вопросъ со всѣхъ сторонъ. Но рѣшеніе вопроса о треніи поршня, въ узко-спеціальному смыслѣ, не требуетъ всесторонняго отвѣта; такъ, на примѣръ, вопросъ объ удѣльномъ давленіи для тренія поршня не имѣетъ значенія, потому что возможныя колебанія давленія для различныхъ поршней не велики, и вліяніе его на треніе ничтожно.

Удѣльное давленіе отъ вѣса поршня въ нашихъ опытахъ мѣнялось отъ 0 у компрессора до 0,076 кгр./см.² у машины „Отто-Дейцъ“ и до 0,082 кгр./см.² у машины „Горнсби-Акройдъ“. Сравнимыми являются

только двѣ послѣднія машины, потому что конструкціи поршней у нихъ одинаковыя, но при той разницѣ удѣльнаго давленія, какая существуетъ для этихъ машинъ, о вліяніи давленія говорить не приходится. Слѣдовательно, на основаніи своихъ опытовъ мы не можемъ вывести заключенія относительно вліянія давленія на треніе поэтому ограничимся здѣсь сводкой взглядовъ различныхъ авторовъ, по этому вопросу.

По мнѣнію *Hirn*'а (1854 г.) и Н. Петрова (1886 г.) сила тренія хорошо смазанныхъ тѣлъ пропорціональна корнямъ квадратнымъ изъ давленій P ; по мнѣнію *Tower*'а (1885 г.) и *Dettmar*'а (1899 г.) коэффициентъ тренія обратно пропорціоналенъ удѣльнымъ давленіямъ p , а потому сила тренія не зависитъ отъ полнаго давленія. По мнѣнію позднѣйшихъ авторовъ *Striebeck*'а (1902 г.), *Lasche* (1902 г.), *Heimann*'а (1905 г.) и Пинегина (1911 г.) коэффициентъ тренія падаетъ до переходной нагрузки, а затѣмъ начинаетъ вновь расти, при чемъ законъ паденія въ каждомъ случаѣ можетъ быть различенъ. Такъ какъ переходная нагрузка лежитъ далеко за предѣлами возможныхъ давленій отъ вѣса поршня и отъ нажатія колець, то мы считаемъ, что возможное измѣненіе давленія не можетъ вызвать чрезмѣрнаго увеличенія тренія поршня и даже оказать существенное вліяніе.

2. Гораздо замѣтнѣе изъ опытовъ вліяніе поршневыхъ колець.

Въ слѣдующей таблицѣ XII показано, насколько уменьшилась работа тренія при одной и той же скорости ($v_m=2,5$ мт.) послѣ того, какъ снимались кольца съ поршня.

Таблица XII.

Машина.	Полное давленіе		Машинное масло		Смѣсь	
	отъ вѣса поршня и колець.	отъ вѣса поршня.	кольца надѣты.	кольца сняты.	кольца надѣты.	кольца сняты.
Отто-Лейпъ	258,8	63,8	3,20	2,31	3,78	2,70
Отношеніе	—	—	1,39	1	1,40	1
Горнсби-Акройль	701,5	124,5	3,38	1,84	4,70	2,78
Отношеніе	—	—	1,84	1	1,69	1

Величины работы тренія взяты въ эту таблицу изъ діаграммы № 3 и № 4. Для большей наглядности въ этой таблицѣ показано и отношеніе работъ тренія съ поршневыми кольцами и безъ нихъ. По этой таблицѣ мы можемъ судить о вліяніи поршневыхъ колець на треніе только для каждой машины въ отдѣльности; для того же, чтобы сдѣлать результаты опытовъ обѣихъ машинъ сравнимыми между собой, мы составили двѣ другія таблицы XIII и XIV.

Въ таблицахъ VI и VII у насъ имѣются два столбца (21 и 22 табл. VI и 13 и 14 табл. VII) гдѣ показаны сопротивленіе поршня движенію F и удѣльное сопротивленіе f , которое получалось отъ дѣленія первой величины на всю боковую поверхность поршня. Величины F не могутъ

сравниваться у различныхъ машинъ, потому что онъ относится къ различнымъ величинамъ поверхностей тренія, но также и f неудобно для сравненія въ томъ видѣ, въ какомъ мы его вычислили, потому что въ этомъ вычисленіи не принято во вниманіе отношеніе площадей колець и самага поршня. Для того, чтобы это учесть, приходится слѣдовать такому порядку: опредѣлить среднюю величину F_1 изъ опытовъ съ поршневыми кольцами и вычесть изъ нея среднюю величину F_2 , опредѣленную изъ опытовъ безъ поршневыхъ колець, тогда разность будетъ выражать величину сопротивленія тренія колець. Все это можно выразить уравненіемъ (27)

$$F_k = F_1 - F_2. \quad (27)$$

Въ такой расчетъ вносится предположеніе, что треніе самага поршня не мѣняется и стаетъ постояннымъ, какъ съ поршневыми кольцами, такъ и безъ нихъ, между тѣмъ слой смазки подъ вліяніемъ соскабливанія колець въ томъ и другомъ случаѣ будетъ различенъ, а слѣдовательно, будетъ различаться и треніе. Кромѣ того, при вычисленіи сопротивленія колець на результатъ вліяютъ, какъ средняя ошибка вычисленія F_1 , такъ и средняя ошибка вычисленія F_2 . Эти обстоятельства и побудили насъ отказаться отъ вычисленія по отдѣльности для каждаго опыта удѣльнаго сопротивленія тренія для колець и для поршня.

Въ слѣдующей таблицѣ у насъ собраны всѣ величины сопротивленія тренія и при нихъ указаны среднія ошибки.

Таблица XIII.

Машина.	С м ѣ с ь						М а ш и н н о е м а с л о					
	F_1 кгр.	$\pm m_1$ кгр.	F_2 кгр.	$\pm m_2$ кгр.	F_k к р.	$\pm m_k$ кгр.	F_1 кгр.	$\pm m_1$ кгр.	F_2 кгр.	$\pm m_2$ кгр.	F_k кгр.	$\pm m_k$ кгр.
Отто-Дейцъ . . .	113,64	4,80	81,30	6,03	32,34	7,77	94,53	5,77	69,9	6,31	24,63	8,54
Горнсби-Акройджъ	142,03	11,98	83,40	3,85	58,63	12,60	99,75	3,82	54,16	2,20	45,59	4,88

На основаніи этихъ данныхъ у насъ составлена слѣдующая таблица XIV, въ которой собраны удѣльные сопротивленія тренія. При вычисленіи удѣльн. сопротивленія тренія поршня безъ колець прини-

Таблица XIV.

Машина.	С м ѣ с ь				М а ш и н н о е м а с л о.			
	Удѣл. сопрот. поршня		Удѣл. сопрот. поршня		Удѣл. сопрот. поршня		Удѣл. сопрот. поршня	
	f	$\pm n\%$	f	$\pm n\%$	f	$\pm n\%$	f	$\pm n\%$
Отто-Дейцъ . . .	0,0309	7,4	0,0780	24,6	0,0265	9,0	0,0600	34,6
Горнсби-Акройджъ	0,0175	4,6	0,0846	21,5	0,0114	5,9	0,0658	10,6

малась въ расчетъ его боковая поверхность за вычетомъ площади выточекъ для колець. Въ этой же таблицѣ показаны среднія ошибки въ опредѣленіи f , отнесенныя къ самимъ этимъ величинамъ.

Точность опредѣленія удѣльнаго сопротивленія не велика, но особенно она неудовлетворительна для удѣльнаго сопротивленія колець. При сравненіи удѣльнаго сопротивленія поршня одной и другой машины мы можемъ констатировать, что оно меньше у машины „Горнсби-Акройджъ“ и больше у машины „Отто-Дейцъ“. Возможныя ошибки меньше разницы между удѣльными давленіями. Мы объясняемъ эту разницу двумя причинами, во-первыхъ, машина „Отто-Дейцъ“ новая, тогда какъ вторая много работала въ эксплуатационныхъ цѣляхъ, слѣдовательно, у нея поршень приработался къ цилиндру, во-вторыхъ, вследствие износа зазоръ у машины „Горнсби-Акройджъ“ сдѣлался настолько значительнымъ, что верхняя часть поверхности поршня въ треніи не участвуетъ, поэтому при вычлененіи удѣльнаго сопротивленія тренія нужно было бы брать въ расчетъ не всю боковую поверхность, а за вычетомъ нѣкоторой ея части. Къ сожалѣнію, по вполне понятнымъ причинамъ, мы этого сдѣлать не можемъ.

При сравненіи удѣльнаго сопротивленія колець наблюдается обратное. Удѣльное сопротивленіе колець у машины „Горнсби-Акройджъ“ больше, чѣмъ у первой машины. Чѣмъ это можно объяснить, мы затрудняемся сказать, объясняется ли это особенностями матеріала или возможной ошибкой въ опредѣленіи величины f , но, во всякомъ случаѣ не тою разницею въ удѣльномъ давленіи, которая обнаруживается отъ различія упругости колець.

Изъ всего изложеннаго мы можемъ заключить, что работа тренія колець составляетъ значительную часть работы тренія поршня; въ нашихъ опытахъ она доходитъ въ отдѣльныхъ случаяхъ до 45% (см. табл. XIII) отъ всего тренія поршня. Такое увеличеніе тренія отъ колець можно объяснить не столько ихъ нажимающимъ усиліемъ, сколько соскабливаніемъ ими смазывающаго слоя. Съ уменьшеніемъ толщины слоя увеличивается угловая скорость ϕ , а, слѣдовательно, растетъ и величина тренія.

3. Что касается вліянія величины поверхности на величину силы тренія, то и объ этомъ на основаніи своихъ опытовъ тоже ничего не можемъ сказать. Наши теоретическіе выводы и мнѣнія всѣхъ выше указанныхъ авторовъ (кромѣ *Hirn*'а) сходятся на одномъ заключеніи, что сила тренія пропорціональна тругейся поверхности.

4. Относительно вліянія скорости на треніе различные авторы приходятъ къ различнымъ выводамъ. *Hirn* и Петровъ считаютъ силу тренія машинныхъ частей пропорціональной скорости относительнаго движенія твердыхъ тѣлъ, *Tower* и *Dettmar* считаютъ ее пропорціональной корню квадратному изъ скорости, всѣ остальные авторы приходятъ къ выводу, что вначалѣ съ увеличеніемъ скорости сила тренія быстро падаетъ, потомъ начинаетъ расти приблизительно до 4 мт./сек., выше этой скорости сила тренія не увеличивается (*Lasche*)¹⁾.

1) Всѣ указанные авторы дѣлаютъ свои выводы го отношенію къ коэффициенту тренія, но такъ какъ сила тренія при постоянномъ давленіи пропорціонально коэффициенту тренія (ур-іе 15), то замѣна одного понятія другимъ не искажаетъ смысла.

Посмотримъ теперь какіе выводы мы можемъ сдѣлать на основаніи нашихъ опытовъ относительно вліянія скорости на треніє поршня. На діаграммахъ №№ 3, 4 и 5 (см. прилож. въ концѣ книги) мы по оси абсциссъ откладывали среднюю скорость поршня v_m . Средняя скорость поршня пропорціональна числу оборотовъ, какъ и окружная скорость у цапфъ, но явленія, происходящія въ томъ и другомъ случаѣ, различаются. Въ одномъ случаѣ сдвигъ слоя смазки происходитъ по одному только направленію, въ другомъ случаѣ сдвигъ мѣняетъ свое направленіе. Вѣроятно, послѣднее обстоятельство связано съ тратой энергіи. Движеніе поршня совершается то ускоренно, то замедленно, слѣдовательно, мы должны ожидать соотвѣтственныя перемѣщенія частицъ смазки подъ вліяніемъ ихъ живой силы. Такъ какъ за каждый оборотъ вала поршень два раза приходитъ въ мертвое положеніе, то, слѣдовательно, мы также имѣемъ дѣло съ треніемъ покоя. Насколько всѣ указанные факторы вліяютъ на величину тренія поршня, объ этомъ мы можемъ говорить только предположительно. Несомнѣнно, что объ однородности явленія тренія у цапфъ и поршней говорить не приходится, но несомнѣнно также и то, что тѣ законы тренія смазанныхъ тѣлъ, которые обнаруживаются въ цапфахъ, должны проявиться и въ треніи поршня.

Въ главѣ о треніи смазанныхъ тѣлъ мы говорили, что сила тренія не зависитъ отъ скорости относительнаго движенія, если величина зазора между трущимися тѣлами достаточна для того, чтобы слой смазки могъ увличиваться. Это положеніе дало намъ возможность предполагать, что и сила тренія поршня не должна измѣняться съ числомъ оборотовъ, такъ какъ величина зазора между цилиндромъ и поршнемъ достаточно велика (см. объ этомъ въ гл. II); но тогда, согласно уравненію (19), мы должны въ своихъ опытахъ получить работу тренія пропорціональной скорости v . Дѣйствительно, мы въ этомъ вполне можемъ убѣдиться на основаніи нашихъ опытовъ. Обратимся къ опытамъ таблицы XI. Если мы возьмемъ изъ этой таблицы отношеніе среднихъ величинъ чиселъ оборотовъ, то можемъ написать рядъ отношеній:

$$126,4 : 151,0 : 173,1 : 197,6 = 1 : 1,19 : 1,37 : 1,56.$$

Отношеніе же соотвѣтственныхъ величинъ тренія представится рядомъ:

$$1,74 : 1,95 : 2,41 : 2,72 = 1 : 1,12 : 1,38 : 1,56.$$

Сравненіе обоихъ рядовъ отношеній показываетъ почти полную пропорціональность между числами оборотовъ и работою тренія. Такой результатъ опытовъ могъ и не получиться подъ вліяніемъ возможной средней ошибки, но вліяніе это всетаки не настолько велико, чтобы скрыть совершенно пропорціональность. Если мы прибавимъ или убавимъ возможныя среднія ошибки въ опредѣленіи работы тренія, то получимъ слѣдующіе два ряда отношеній:

1) отъ прибавленія

$$1,82 : 1,98 : 2,48 : 2,79 = 1 : 1,09 : 1,36 : 1,53$$

2) отъ уменьшенія

$$1,66 : 1,92 : 2,34 : 2,65 = 1 : 1,16 : 1,41 : 1,60.$$

Сравнивая эти два ряда отношеній съ рядомъ, выражающимъ отношеніе чиселъ оборотовъ, мы можемъ видѣть, что они представляють большее отклоненіе отъ пропорціональности съ нимъ, чѣмъ рядъ, полученный прямо изъ опыта, но все таки пропорціональность видна. Въ рядѣ отношеній, полученныхъ изъ опыта, наибольшее отклоненіе отъ пропорціональности имѣетъ второй членъ ряда, но и онъ исправляется, если внести ошибку въ одинъ этотъ членъ.

Если мы обратимся къ діаграммамъ № 3 и № 4, то увидимъ, что зависимость работы тренія отъ скорости выражена у насъ прямыми линіями, проходящими черезъ начало координатъ. Каждая линія отвѣчаетъ опредѣленной серіи опытовъ. Какъ только нами была подмѣчена пропорціональность между работою тренія и скоростью, то мы вычислили на основаніи всѣхъ опытовъ серіи среднюю величину удѣльнаго сопротивленія и по ней уже опредѣлили направленіе прямой линіи. Отдѣльные опыты замѣтно отклоняются отъ прямыхъ линій, и эти отклоненія колеблются въ среднемъ около 3,5% для отдѣльныхъ серій. Такъ какъ эти отклоненія опытовъ отъ прямой происходятъ въ ту и другую сторону, то мы считаемъ возможнымъ выразить прямою линіей дѣйствительную зависимость между работою тренія и скоростью, которую аналитически можно представить такъ: $A_R = kv$. Если предположить, что сила тренія пропорціональна скорости (*Hirn, Петровъ*), то при постоянной толщинѣ слоя работа будетъ пропорціональна квадрату скорости, $A_R = kv^2$; если предположить силу тренія пропорціональной корню квадратному изъ скорости, то работа будетъ пропорціональна 1,5 степени скорости, $A_R = v^{1,5}$. На діаграммѣ № 3 мы построили пунктирныя кривыя, выражающія всѣ указанныя зависимости работы тренія отъ скорости, также построена кривая, выражающая зависимость

$A_R = \sqrt[1,5]{v}$. Изъ сравненія нашихъ результатовъ съ этими кривыми, мы ясно видимъ, что треніе поршня не подчиняется ни одной изъ выше указанныхъ зависимостей. Слѣдовательно, мы можемъ предположить, что работа тренія поршня измѣняется пропорціонально первой степени скорости, т. е. линейно, или же пропорціонально какой-либо степени очень близкой къ единицѣ (0,95—1,05). Такъ какъ съ помощью нашихъ калориметрическихъ опытовъ нельзя точнѣе указать эту зависимость, то вѣрнѣе всего будетъ выразить ее линейно, тѣмъ болѣе, что это вполне согласуется съ результатами опытовъ табл. XI.

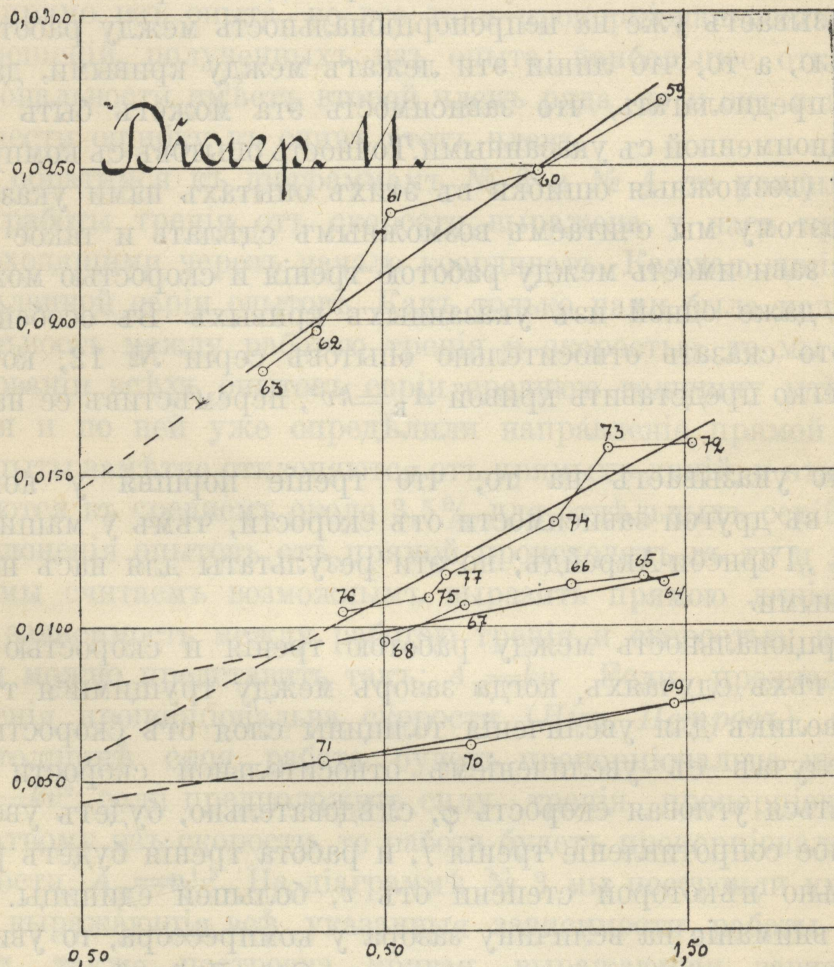
Если мы теперь обратимъ вниманіе на діаграмму № 5, на которой нанесены результаты опытовъ съ компрессоромъ, то тамъ зависимость

работы тренія отъ скорости иная. Хотя эту зависимость мы выразили прямыми линіями, но это мы сдѣлали только потому, что точность опытовъ не достаточна для того, чтобы можно было по нимъ судить о формѣ кривыхъ. Возможно, что зависимость эта не подчиняется закону прямой линіи, а есть какая-нибудь кривая, тѣмъ болѣе, что эти прямая линіи, во-первыхъ, не проходятъ черезъ начало координатъ, во-вторыхъ, лежатъ между кривыми, законъ измѣненія которыхъ выражается уравненіями $A_R = kv^2$ и $A_R = kv^{1.5}$. То, что линіи не проходятъ черезъ начало координатъ, показываетъ уже на непропорціональность между работою тренія и скоростью, а то, что линіи эти лежатъ между кривыми, даетъ намъ основаніе предполагать, что зависимость эта можетъ быть выражена кривою, одноименной съ указанными. Точность опытовъ съ компрессоромъ не велика (возможныя ошибки въ этихъ опытахъ нами указаны были выше), поэтому мы считаемъ возможнымъ сдѣлать и такое предположеніе, что зависимость между работою тренія и скоростью можетъ быть выражена даже одной изъ указанныхъ кривыхъ. Въ особенности мы можемъ это сказать относительно опытовъ серіи № 12, которые мы можемъ легко представить кривою $A_R = kv^2$, перемѣстивъ ее на чертежѣ вправо.

Все это указываетъ на то, что треніе поршня у компрессора находится въ другой зависимости отъ скорости, чѣмъ у машины „Отто-Дейцъ“ и „Горнсби-Акройды“; но эти результаты для насъ не явились неожиданными.

Пропорціональность между работою тренія и скоростью мы ожидаемъ въ тѣхъ случаяхъ, когда зазоръ между трущимися тѣлами достаточно великъ для увеличенія толщины слоя отъ скорости, въ противномъ случаѣ съ увеличеніемъ относительной скорости v будетъ увеличиваться угловая скорость φ , слѣдовательно, будетъ увеличиваться удѣльное сопротивленіе тренія f , и работа тренія будетъ расти пропорціонально нѣкоторой степени отъ v , большей единицы. Если мы обратимъ вниманіе на величину зазора у компрессора, то увидимъ, что онъ немногимъ меньше зазора машины „Отто-Дейцъ“, поэтому искать причину выше указанному явленію въ величинѣ зазора не приходится. Здѣсь мы причину находимъ въ другомъ обстоятельстве, которое сразу обратило наше вниманіе при осмотрѣ поршня. Оказалось, что одна сторона поршня была сильно стерта. Это указывало на то, что поршень не центрально ходитъ въ цилиндрѣ, а прижатъ однимъ бокомъ къ поверхности цилиндра. Это происходитъ отъ того, что крышки цилиндра плохо центрированы, вслѣдствіе чего ось сквозного штока не совпадаетъ съ осью цилиндра. Каково это нажимающее усиліе—трудно сказать, возможно, что оно и не такъ велико, потому что иначе обратило бы на себя вниманіе при постройкѣ компрессора, но несомнѣнно, величина зазора здѣсь мала и, кромѣ того, не можетъ увеличиваться подъ влияніемъ гидродинамическаго напора.

Слѣдовательно, въ компрессорѣ мы имѣемъ случай, когда толщина слоя или совершенно не мѣняется или мѣняется весьма мало. Результатомъ этого является увеличеніе угловой скорости φ и удѣльнаго сопротивленія f . На діаграммѣ № 11 (черт. 12) нанесены кривыя измѣненія f отъ скорости v . Изъ діаграммы трудно опредѣлить зависимость между f и v ; будутъ ли эти линіи прямыми или кривыми—неизвѣстно, повидимому, они не всѣ пройдутъ черезъ начало координатъ, если ихъ



Черт. 12.

представить въ видѣ прямыхъ линій. Для опытовъ серіи № 12, прямая линія проходитъ черезъ начало координатъ, т. е. зависимость между f и v такая, что $f = kv$, это мы и должны были ожидать, такъ какъ работа тренія для этихъ опытовъ пропорціональна квадрату скорости v , какъ это мы видѣли выше.

5. Для изслѣдованія вліянія вязкости смазки на треніе поршня нами были поставлены опыты серіи № 4.

Для того, чтобы яснѣе можно было видѣть зависимость тренія отъ вязкости, нами построена діаграмма № 10. (См. прилож. въ концѣ книги). На эту діаграмму мы наносили вязкость смазки не при 20°Ц., а ту, которая отвѣчаетъ средней температурѣ опыта, т. е. пользовались

вязкостью столбца 18 табл. VI. Насколько точно выражаетъ эта кривая указанную зависимость, мы объ этомъ не рѣшаемся что либо утвердительно говорить, но несомнѣнно одно, что пропорціональности между вязкостью и работою тренія нѣтъ, нѣтъ этой пропорціональности и относительно удѣльнаго сопротивленія тренія, что мы могли ожидать на основаніи уравненій (18) и (19).

Слѣдующая таблица XV наглядно показываетъ, насколько отклоняются отъ пропорціональности вязкость и удѣльное сопротивленіе.

Таблица XV.

№№ опытовъ.	Вязкость.	Удѣльное сопротивле- ніе.	№№ опытовъ.	Вязкость.	Удѣльное сопротивле- ніе.
22	1,00	1,53	31	25,43	2,07
24	1,56	1,08	32	50,90	2,79
25	4,24	1,00	33	8,06	1,83
26	4,81	1,18	34	6,84	1,90
27	4,47	1,86	35	5,17	1,83
28	30,00	2,48	36	3,41	1,66
29	4,78	1,69	37	2,81	1,44
30	13,16	1,87	38	2,01	1,15

Для большей наглядности мы выразили въ этой таблицѣ вязкость и удѣльное сопротивленіе f не ихъ величинами, а числами имъ пропорціональными, принявъ ихъ наименьшія значенія за единицу.

Мы видимъ изъ таблицы, что съ увеличеніемъ вязкости въ 5-ть 10-ть разъ, удѣльное сопротивленіе увеличивается въ два, три раза (опыты № 25, 31 и 32). Объясненіе этому мы находимъ въ томъ, что чѣмъ гуще будетъ смазка, тѣмъ толще будетъ смазавыющій слой, и тѣмъ меньше угловая скорость. Величина же удѣльнаго сопротивленія f по уровненію (21) выражается черезъ угловую скорость φ и коэффициентъ внутренняго тренія

$$f = \mu \varphi.$$

Съ увеличеніемъ вязкости, а, слѣдовательно, и коэффициента внутренняго тренія μ , уменьшается φ , если только мало измѣняется f . Если бы эти величины были обратно пропорціональны одна другой, то величина f оставалась бы постоянной для всякихъ смазокъ, но, такъ какъ этого нѣтъ, то мы заключаемъ, что толщина слоя, уменьшающая угловую скорость, обуславливается не только внутреннимъ сцѣпленемъ и треніемъ частицъ, но и другими внутренними свойствами масла. Здѣсь мы держимся того мнѣнія, что угловая скорость φ есть одна изъ характеристическихъ особенностей всякой смазки. Уменьшить величину φ искусственно нельзя, не мѣняя самой смазки, потому что для этого потребовалось бы при постоянной относительной скорости v увели-

чить толщину смазывающаго слоя, которая обусловливается только внутренними свойствами смазки. Зато мы всегда можемъ увеличить ϕ , уменьшая зазоръ между трущимися поверхностями.

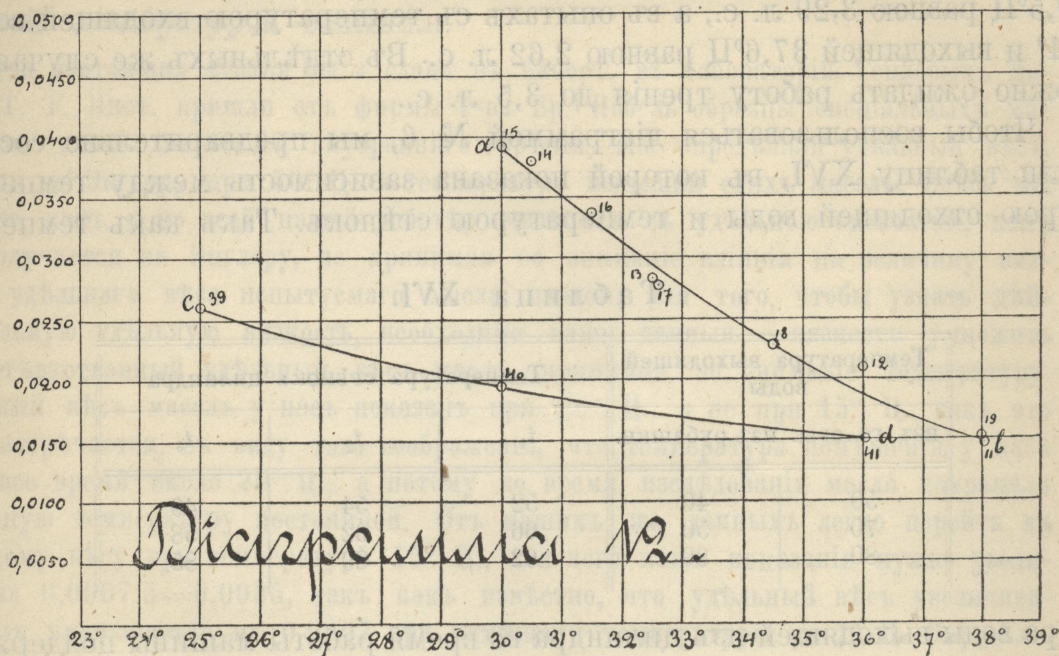
Если мы вернемся къ таблицѣ XV, то можемъ также видѣть, что съ уменьшеніемъ вязкости сравнительно съ опытомъ № 25, удѣльное сопротивленіе увеличивается въ опытахъ №№ 22, 24, 36, 37 и 38. Въ опытахъ 24 и 38 это увеличеніе можно отнести на счетъ неточности опредѣленія f , но въ остальныхъ опытахъ это увеличеніе несомнѣнно, и объясняется оно непосредственнымъ соприкасаніемъ металлическихъ частей, вслѣдствіе выдавливанія смазки. Подъ этимъ понятіемъ понимается такое уменьшеніе толщины слоя смазки, когда выступающія частицы одной поверхности въ большомъ числѣ непосредственно соприкасаются съ другой поверхностью. Чѣмъ тоньше будетъ становиться слой, тѣмъ больше число частицъ будетъ приходить въ соприкосаніе, и тѣмъ сильнѣе будетъ обнаруживаться свойство тренія твердыхъ тѣлъ, и увеличиваться удѣльное сопротивленіе.

6. Что касается вліянія температуры на треніе, то большинство авторовъ не указываетъ относительно этого никакой зависимости. Большинство изъ нихъ считаетъ эту зависимость сложною и имѣющую характеръ измѣненія вязкости, но *Dettmar* и *Tower* указываютъ зависимость, которую можно выразить такъ: $\eta T = \text{const.}$ Это дало *Dettmar*'у возможность вывести и такую зависимость: $p\eta T = \text{const.}$ Мы не согласны съ такою категоричностью вывода, но не отрицаемъ нѣкотораго основанія для такого взгляда.

Удѣльное сопротивленіе тренія f имѣетъ ту же зависимость отъ температуры, какую имѣетъ и коэффициентъ тренія, поэтому мы можемъ написать по аналогіи, что $fT = \text{const.}$ и также, слѣдовательно, $A_R T = \text{const.}$ Последнюю зависимость мы выразили кривыми на діаграммахъ № 6 и № 7. (Смотри выше). На діаграммѣ № 6 кривая $A_R T = \text{const.}$ въ нижней своей части почти совпадаетъ съ кривыми нашихъ опытовъ, но на діаграммѣ № 7 мы замѣчаемъ значительное отклоненіе, между тѣмъ разница въ этихъ діаграммахъ заключается только въ томъ, что на діаграммѣ № 6 по оси абсциссъ нанесена высшая температура стѣнокъ, а на діаграммѣ № 7 нанесена средняя температура стѣнокъ. Отсюда мы видимъ, что совпаденіе кривыхъ на діаграммѣ № 6 еще не является доказательствомъ положенія $A_R T = \text{const.}$, и что затрудненіе въ опредѣленіи средней температуры опыта лишаетъ насъ возможности провѣрить эту зависимость.

Просматривая результаты нашихъ калориметрическихъ опытовъ, мы приходимъ къ заключенію, что съ повышеніемъ температуры удѣльное сопротивленіе тренія и работа тренія падаютъ, но не такъ быстро, какъ измѣняется вязкость. Измѣненіе удѣльнаго сопротивленія различно для различныхъ смазокъ, какъ это мы можемъ видѣть изъ діаграммы № 12, (черт. 13), гдѣ кривая $a-b$ соотвѣтствуетъ опытамъ со

смазкою смѣсью $1/1$, а кривая $c-d$ соотвѣтствуетъ опытамъ со смазкою машиннымъ масломъ.



Черт. 13.

Изъ опытовъ таблицы X мы можемъ видѣть, что наибольшее треніе поршня машины „Отто-Дейцъ“ обнаруживается у опытовъ съ низкой средней температурой воды (1-я серія); при нормальномъ охлажденіи¹⁾ (2-я серія) и въ опытахъ съ высокой температурой (4-я серія) треніе въ обѣихъ серіяхъ остается одинаковымъ при одной и той же температурѣ входящей воды. Третья серія опытовъ имѣемъ тоже нормальное охлажденіе, но отличается отъ второй серіи температурой входящей воды. Эта разница оказываетъ сильное вліяніе на треніе. Средняя величина тренія третьей серіи на 0,67 л. с. меньше средней величины второй серіи. Вообще вліяніе охлажденія на треніе замѣтное и несомнѣнное. Это обстоятельство даетъ намъ важное указаніе на то, что температура процесса машинъ внутренняго горѣнія (1800—2000°Ц.), не имѣетъ исключительнаго вліянія на треніе поршня, и что, не смотря на такую температуру внутренняго процесса, вязкость смазки все таки сильно зависитъ отъ температуры стѣнокъ цилиндра. Мы держимся того мнѣнія, что поверхностный слой металлическихъ стѣнокъ цилиндра не подвергается сильно вліянію переменныхъ температуръ, вслѣдствіе плохой теплопроводности смазки, и температура ихъ держится на опредѣленной высотѣ въ зависимости отъ охлажденія цилиндра.

7. Что касается работы тренія поршня машины „Отто-Дейцъ“, то мы объ этомъ можемъ получить представленіе, какъ на основаніи діаграммы № 6, такъ и на основаніи таблицы X.

¹⁾ Нормальнымъ охлажденіемъ мы считаемъ принятое въ практикѣ охлажденіе цилиндра, при которомъ температура отходящей воды держится около 40° Ц.

Если мы обратимся къ таблицѣ X, то увидимъ, что работа тренія была въ опытахъ съ температурою входящей воды 3°Ц. и выходящей 39,5°Ц. равною 3,29 л. с., а въ опытахъ съ температурою входящей воды 8,4° и выходящей 37,6°Ц. равною 2,62 л. с.. Въ отдѣльныхъ же случаяхъ можно ожидать работу тренія до 3,5 л. с..

Чтобы воспользоваться діаграммой № 6, мы предварительно составили таблицу XVI, въ которой показана зависимость между температурою отходящей воды и температурою стѣнокъ. Такъ какъ темпера-

Таблица XVI.

Температура выходящей воды		Температура стѣнокъ цилиндра		
изъ головы.	изъ рубашки.	t_1	t_2	t_3
50	40	52	54	49
70	50	66	62	58
80	80	92	89	85

тура воды выходящей изъ цилиндра во время работы машины поддерживается около 40°, то на основаніи таблицы XVI мы можемъ считать среднюю высшую температуру стѣнокъ равною 52°Ц., которой по діаграммѣ 6 отвѣчаетъ работа тренія поршня 2,1 л. с. при температурѣ входящей воды 15°—16°Ц.

На основаніи всего сказаннаго мы можемъ сдѣлать заключеніе, что работа тренія поршня машины „Отто-Дейцъ“ колеблется въ зависимости отъ температуры охлаждающей воды и вообще отъ температурныхъ условій опыта отъ 2 л. с. до 3 л. с., а иногда и до 3,5 л. с.¹⁾

8. Однимъ изъ практическихъ выводовъ изъ результатовъ опытовъ надъ изслѣдованіемъ тренія поршня является указаніе относительно охлажденія машинъ внутренняго горѣнія. Въ виду того, что температура входящей воды сильно вліяетъ на треніе поршня, нужно избѣгать слишкомъ холодной воды. Лучшей температурой будетъ 15°—20°Ц, поэтому зимой воду слѣдуетъ подогревать до указанной температуры теплотой продуктовъ горѣнія или же примѣнять циркуляціонное охлажденіе²⁾. Слѣдуетъ также подводить воду не снизу цилиндра, а сверху, потому что тогда температура нижнихъ и верхнихъ слоевъ не будетъ такъ сильно различаться. Когда же вода подводится снизу, то получается рѣзкая разница температуръ смазки внизу и вверху цилиндра, а такъ какъ вязкость смазки съ пониженіемъ температуры очень быстро растетъ, гораздо быстрѣе, чѣмъ падаетъ температура, то низшіе холодные слои сильно увеличиваютъ треніе поршня.

¹⁾ Всѣ эти данныя относятся къ тренію поршня при смазкѣ смѣсью машиннаго масла съ цилиндрическимъ масломъ. Въ настоящее время мы перешли къ болѣе жидкимъ смазкамъ, а потому треніе поршня у этой машины сильно уменьшилось.

²⁾ Г. Гюльнеръ. *ibid.* Стр. 367.

Въ виду того, что вязкость болѣе рѣзко мѣняется съ температурою у густыхъ маселъ, то слѣдуетъ примѣнять смазку не вязкую, но съ высокой температурой вспышки.

Когда настоящая статья была сдана въ наборъ, въ Лабораторію Тепловыхъ Машинъ Т. Т. Инст. пришли отъ фирмы Т-ва Бр. Нобель образцы спеціальныхъ маселъ для смазки двигателей внутреннего горѣнія. Мы опредѣляли удѣльный вѣсъ, вязкость по Энглеру при 50° Ц. и температуру вспышки этихъ маселъ. Здѣсь мы такъ же, какъ и во всей нашей работѣ, считаемся съ удѣльною вязкостью, какъ она получается по Энглеру, не принимая во вниманіе вліянія на величину вязкости удѣльнаго вѣса испытываемаго масла, поэтому для того, чтобы узнать дѣйствительную удѣльную вязкость, необходимо наши данныя о вязкости умножить на соотвѣтственный удѣльный вѣсъ масла, принимая во вниманіе температуру. Удѣльный вѣсъ маселъ у насъ показанъ при 20° Ц., а не при 15° Ц., какъ это часто встрѣчается, въ виду того соображенія, что температура помѣшенія у насъ была все время около 20° Ц., а потому во время изслѣдованія масла сохраняли указанную температуру постоянной. Отъ нашихъ же данныхъ легко перейти къ удѣльному вѣсу при температурѣ 15° Ц., для чего наши показанія нужно увеличить на $0,0007.5=0,0035$, такъ какъ извѣстно, что удѣльный вѣсъ увеличивается или уменьшается на 0,0007 при измѣненіи температуры на 1° Ц. Опредѣленіе удѣльнаго вѣса производилось ареометромъ. Опредѣленіе температуры вспышки производилось въ открытомъ тиглѣ.

«*Моторное масло Т.*», для среднихъ и крупныхъ тепловыхъ двигателей и для разработанныхъ (на случай пропусканія поршнемъ газомъ изъ цилиндра). Удѣл. вѣсъ 0,905 при 20° Ц., вязкость 8,6, температура вспышки 215° Ц.

«*Моторное масло М.*», для среднихъ и крупныхъ нефтяныхъ (Дизель), керосиновыхъ и газогенераторныхъ двигателей. Удѣльный вѣсъ 0,902, вязкость 6,0, температура вспышки 200° Ц.

«*Моторное масло Л.*», для малосильныхъ тепловыхъ двигателей—(за исключеніемъ двигателя Дизеля). Удѣльный вѣсъ 0,895, вязкость 2,6, температура вспышки 180° Ц.

Кромѣ указанныхъ маселъ Т-во Бр. Нобель вырабатываетъ болѣе густыя масла для автомобильныхъ двигателей, которые имѣютъ сравнительно небольшую поверхность поршня и высокую температуру охлаждающей воды, а иногда охлаждаются воздухомъ.

«*Автомобильное масло Т.*». Удѣл. вѣсъ 0,912, вязкость 22,5 температура вспышки 265° Ц.

«*Автомобильное масло М.*». Удѣл. вѣсъ 0,910, вязкость 10,0, температура вспышки 225° Ц.

«*Автомобильное масло Л.*». Удѣл. вѣсъ 0,905, вязкость 8,0, температура вспышки 205° Ц.

Если мы указанные образцы сравнимъ въ отношеніи ихъ свойствъ съ распространенными минеральными маслами того же Т-ва, (см. табл. XVII), то мы можемъ видѣть, что «*Моторное масло Т.*» по вязкости близко подходитъ къ «*Машинному маслу № 8.*», но имѣетъ болѣе высокую температуру вспышки, «*Моторное масло М.*» по вязкости похоже на «*Машинное масло № 6.*», но также имѣетъ болѣе высокую температуру вспышки, «*Моторное масло Л.*» имѣетъ вязкость меньшую, чѣмъ существующія машинныя масла, но имѣетъ сравнительно высокую температуру вспышки. По цвѣту эти масла отличаются отъ машинныхъ маселъ болѣе темной окраской.

Таблица XVII.
Минеральные масла Т-ва Бр. Нобель *).

Название масла.	Удѣл. вѣсъ при 20° Ц.	Вязкость.	Температура вспышки.
Машинное масло № 4	0,897/0,902	4,0 при 50° Ц.	180°
„ „ № 6	0,902/0,906	6,0—7,0 „ „	190°
„ „ № 8	0,908	7,5—8,5 „ „	200°
„ „ № 10	0,910	10,0—11,0 „ „	210°
Цилиндровое масло № 2	0,910/0,916	1,5—2,5 „ 100° Ц.	220°
Вискозинъ № 3 или цилиндрическое масло № 1 **)	0,908/0,916	3,0—4,0 „ „	240°
Вискозинъ № 5	0,918	5,0—6,0 „ „	255°
„ № 7	0,922	7,0—8,0 „ „	300°
„ № 10	0,930	10,0 „ „	330°

Что касается автомобильныхъ смазокъ, то онѣ по своимъ свойствамъ подходятъ къ ряду вискозиновъ, а потому безъ нужды ими пользоваться для двигателей внутреннего горѣнія не слѣдуетъ. Только въ случаяхъ сильно изношенныхъ поршней или недостаточнаго охлаждения онѣ могутъ быть употреблены.

Почти одновременно съ образцами Т-ва Бр. Нобель были получены образцы маселъ Вакуумъ Ойлъ Компаніи но въ количествѣ 100 см³ каждый, что недостаточно при испытаніи маселъ на вязкость по Энглеру, такъ какъ для вискозиметра требуется не менѣе 240 см³. Вслѣдствіе недостаточнаго количества масла результаты опредѣленія вязкости получились у насъ нѣсколько неточными, и, какъ это слѣдуетъ на основаніи теоретическихъ соображеній, вязкость получилась большею, чѣмъ это слѣдуетъ по нормамъ Энглера. Результаты испытаній мы всетаки приводимъ въ слѣдующей таблицѣ, такъ какъ сравнительные опыты показали, что увеличеніе вязкости незначительно, такъ, напримѣръ, при испытаніи турбинныхъ маселъ Т-ва Бр. Нобель при 20° Ц. у насъ получилась вязкость «Турб. м. Л» при 100 см³, равную 12,8, а при 240 см³ равную 12,5, вязкость «Турб. м. М» при 100 см³ равную 22,5, а при 240 см³ равную 22,0.

Таблица XVIII.
Образцы маселъ Вакуумъ Ойлъ Компаніи.

Название мас е.	Удѣл. вѣсъ при 20° Ц.	Вязкость при 50° Ц.	Температура вспышки.
Гаргойль Мобиль Ойлъ А	0,904	6,5	210°
Гаргойль Мобиль Ойлъ В	0,887	22,0	270°
Гаргойль Мобиль Ойлъ Е	0,890	3,0	190°
Гаргойль маш. масл. Этна	0,895	21,0	200°
Гаргойль Газъ Энжинъ Ойлъ	0,867	2,7	190°
Гаргойль Энжинъ Ойлъ Нафта	0,902	5,0	210°
Гаргойль ДМ	0,896	5,3	185°
Гаргойль ОВ	0,896	5,3	185°
Гаргойль Е Н	0,897	6,5	205°

*) Таблица эта составлена на основаніи данныхъ самой фирмы.

***) Последнее названіе по старой номенклатурѣ въ практикѣ сохранилось до сихъ поръ, поэтому мы его и употребляли въ изложеніи нашей статьи.

Къ сожалѣнію, мы не имѣемъ указаній самой фирмы относительно того, въ какихъ цѣляхъ выработана ею тотъ или иной сортъ масла. Намъ извѣстно только, что «Гаргойль Мобиль Ойлъ А» рекомендуется фирмою для многоцилиндровыхъ газомоторовъ съ водянымъ охлажденіемъ, а также рекомендуется, какъ автомобильное масло; «Гаргойль Мобиль Ойлъ В», рекомендуется, какъ специальное масло для мотоциклетовъ и для машинъ съ водянымъ охлажденіемъ въ жаркое время года, напротивъ того, «Гаргойль Мобиль Ойлъ Е», рекомендуется для машинъ съ водянымъ охлажденіемъ въ зимнее время.

Что касается остальныхъ маселъ таблицы, то мы считаемъ ихъ все пригодными для двигателей внутреннего горѣнія. Все они могутъ быть употреблены для смазыванія цилиндра, но въ зависимости отъ рода охлажденія.

Свойства «*моторныхъ маселъ*» Т-ва Бр. Нобель, а также масла Вакуумъ Ойлъ Компани, показываютъ, что обѣ эти фирмы стоятъ на вѣрномъ пути въ выработкѣ специальныхъ смазокъ цилиндровъ двигателей внутреннего горѣнія. Наши изслѣдованія тренія поршня показываютъ, что моторныя масла должны имѣть небольшую удѣльную вязкость и по возможности высокую температуру вспышки, хотя автору извѣстенъ случай примѣненія мазута для смазыванія цилиндровъ газо-доменныхъ двигателей по 1000 л. с., тогда какъ извѣстно, что температура вспышки мазута не болѣе 140° Ц. Присланные образцы маселъ выгодно отличаются въ этомъ отношеніи, какъ отъ простыхъ машинныхъ маселъ, (по температурѣ вспышки), такъ и отъ ряда вискозиновъ (по вязкости). Вискозины не должны употребляться для смазыванія цилиндровъ двигателей внутреннего горѣнія, назначеніе же ихъ для перегрѣтаго пара. Автору извѣстенъ случай, когда 5-ти сильный керосиновый двигатель отказался совершенно идти зимою, пока примѣняли вискозиновую смазку при низкой температурѣ входящей воды. Двигатель сейчасъ же пошелъ, какъ только измѣнили указанные условія.

Заканчивая на этомъ свое дополненіе о свойствахъ маселъ фирмъ Т-ва Бр. Нобель и Вакуумъ Ойлъ Компани, мы не можемъ не выразить своего пожеланія, чтобы эти фирмы давали бы сами свѣдѣнія о вязкости, о температурѣ вспышки и объ удѣл. вѣсѣ. Въ виду громаднаго вліянія вязкости на треніе поршня машинъ внутреннего горѣнія желательно было бы даже, чтобы при каталогахъ и проспектахъ, разсылаемыхъ этими фирмами, помѣщались кривыя вязкости маселъ съ температурою. (См. діагр. 1). Мы думаемъ, что тогда каждый инженеръ, да и всякій практикъ легко ориентированъ въ выборѣ смазки въ зависимости отъ тѣхъ или иныхъ условій охлажденія.

Вторымъ практическимъ выводомъ является указаніе относительно величины зазора. Мы уже не разъ говорили выше, что зазоръ долженъ быть достаточнымъ для безпрепятственнаго увеличенія слоя смазки. Зазоръ въ испытанныхъ машинахъ мы нашли достаточнымъ, слѣдовательно, въ практикѣ указанное условіе выполняется, но упускаются изъ виду неправильности формъ. Вслѣдствіе этого въ отдѣльныхъ частяхъ цилиндра и поршня получается слишкомъ малый зазоръ, Нужно имѣть въ виду также неравномерное измѣненіе формъ поршня вслѣдствіе температурныхъ вліяній, а, слѣдовательно, уменьшеніе зазора и увеличеніе тренія. Вообще зазоръ долженъ быть предусмотрѣнъ и онъ долженъ быть тѣмъ больше, чѣмъ болѣе вязкая употребляется смазка. Особенно нужно быть внимательнымъ по отношенію къ зазору у машинъ со сквознымъ штокомъ, потому что малѣйшее несовпаденіе осей цилиндра и поршня вызываетъ сильное увеличеніе тренія. Въ такихъ

случаяхъ, какъ мы видѣли у компрессора, работа тренія увеличивается пропорціонально не первой, а второй степени скорости.

Наконецъ, третій практической выводъ—это указаніе относительно величины поверхности поршня. Она не должна быть слишкомъ большой, потому что работа тренія пропорціональна поверхности. Увеличивая поверхность поршня у тѣхъ машинъ, у которыхъ поршень служитъ ползуномъ, думаютъ этимъ уменьшить износъ цилиндра, какъ очень дорогой детали, но этимъ сильно увеличиваютъ треніе и понижаютъ механической коэффициентъ полезнаго дѣйствія машины. Износъ поршня отъ этого мало уменьшается, такъ какъ съ увеличеніемъ поверхности поршня увеличивается трущаяся поверхность, а, слѣдовательно, и увеличеніе износа. Увеличивая поверхность, думаютъ также достигнуть лучшей герметичности поршня по ободу¹⁾, но до извѣстнаго предѣла это лучше достигать увеличеніемъ числа колець. При расчетѣ выгодности того или другого увеличенія можно держаться такого указанія, что удѣльное сопротивленіе колець приблизительно въ четыре раза превосходитъ удѣльное сопротивленіе поршня.

Необходимо указать еще на одно практическое заключеніе. Наши опыты по изслѣдованію тренія поршня показали, что теплопроводность стѣнокъ цилиндра очень велика; настолько велика, что температура смазывающаго слоя зависитъ въ большей степени отъ охлаждающей воды, чѣмъ отъ температуры процесса; въ калориметрическихъ же опытахъ, несмотря на открытые оба конца цилиндра, тепло тренія уносится почти сполна водою при малой разности температуръ охлаждающей воды и смазки. Это даетъ намъ основаніе думать, что со стороны охлаждения нельзя ожидать препятствій къ увеличенію мощности двигателей внутренняго горѣнія, потому что всегда возможно соответственнымъ расходомъ воды и соответственнымъ выборамъ смазки достигнуть удовлетворительной работы машины.

9. Въ нѣкоторыхъ случаяхъ бываетъ необходимо опредѣлить работу тренія поршня той или иной машины, хотя и не особенно точно, но не производя предварительнаго опытнаго изслѣдованія. Въ виду этихъ соображеній мы рѣшаемся дать нѣкоторые опытные коэффициенты для приблизительнаго вычисленія работы тренія поршня машинъ внутренняго горѣнія, но предупреждаемъ, что подобный расчетъ можетъ дать ошибку въ 50%.

Расчетной формулой можетъ служить уравненіе

$$N_n = \frac{T_0(f_1 Q_1 + f_2 Q_2) v_m}{75 T}, \quad (28)$$

гдѣ f_1 и f_2 удѣльное сопротивленіе тренія для поверхности поршня и для колець, Q_1 и Q_2 боковая поверхность поршня и колець, T_0 средняя

¹⁾ Г. Гюльднеръ. Двигатели внутренняго сгорания. 1907, стр. 239.

температура, при которой определены у насъ f_1 и f_2 , T средняя температура изслѣдуемаго опыта и v_m —средняя скорость поршня.

На основаніи табл. XIV мы имѣемъ: для смазки вязкостью 130 при 20°Ц, удѣльное сопротивленіе для поверхности поршня новой машины $f_1=0,03$ кгр./см.², для поверхности поршня приработанной машины $f_1=0,018$ кгр./см.², для поверхности колець $f_2=0,08$ кгр./см.², для смазки вязкостью 38, удѣльное сопротивленіе для поверхности поршня новой машины $f_1=0,026$ кгр./см.², для поверхности поршня машины приработанной $f_1=0,011$ кгр./см.², для поверхности колець $f_2=0,06$ кгр./см.². Все это определено при средней температурѣ охлаждающей воды $T_0=18^\circ\text{Ц}$.

Приведемъ примѣры расчета для нашихъ испытанныхъ машинъ.

У машины „Отто-Дейцъ“ $Q_1=2625$ см², $Q_2=415$ см² средняя скорость $v_m=2,2$ м./сек.; температура входящей воды $t_{вх}=4^\circ\text{Ц}$, $t_{вых}=40^\circ\text{Ц}$, слѣдовательно, средняя температура $T=(40+4):2=22^\circ\text{Ц}$. Подставляя все это въ уравненіе (28), мы получимъ

$$N_n = \frac{18(0,03 \cdot 2625 + 0,08 \cdot 415)2,2}{75 \cdot 22} = 2,67 \text{ л. с.}$$

У машины „Горнсби-Акройды“ $Q_1=4760$ см², $Q_2=693$ см² средняя скорость $v_m=2,9$ м./сек., средняя температура охлаждающей воды 20°Ц. При всѣхъ этихъ данныхъ мы имѣемъ работу трения поршня по уровненію 28 $N_n=4,74$ л. с.

ЗАКЛЮЧЕНІЕ.

10. Сдѣлаемъ теперь сводку всѣхъ выводовъ на основаніи нашихъ опытовъ.

Данныя о треніи испытанныхъ машинъ.

1) Работа трения у машины „Отто-Дейцъ“ можетъ колебаться въ зависимости отъ температурныхъ условій опыта отъ 2-хъ до 3,5 л. с. при смазкѣ смѣсью машиннаго масла № 6 съ цилиндрическимъ № 1 въ половинномъ объемѣ; это составляетъ отъ 15% до 25% отъ индикаторной мощности машины и отъ 20% до 35% отъ полезной мощности.

2) Для машины „Горнсби-Акройды“ у насъ имѣются данныя опытовъ при низкихъ температурныхъ условіяхъ, поэтому сдѣлать указаніе о треніи поршня этой машины мы можемъ на основаніи сравненія съ предыдущей машиной. Мы думаемъ, что не сдѣлаемъ большой ошибки, если будемъ считать колебанія трения при той же смазкѣ отъ 4,5 л. с. до 6,5 л. с., что составитъ въ процентахъ колебаніе отъ 15% до 22% отъ индикаторной мощности.

3) Работа трения поршня большого цилиндра компрессора при смазкѣ машиннымъ масломъ № 6 равняется 0,32 л. с. при 150 оборотахъ, что составляетъ 4%—5% отъ индикаторной работы этого цилиндра. Такія сравнительно малыя съ предыдущими машинами потери на тре-

ніе объясняются: 1) меньшею вязкостью смазки, 2) сравнительно меньшею поверхностью поршня и 3) тѣмъ, что индикаторная работа компрессора относительно въ 4 раза больше, такъ какъ совершается за каждый ходъ поршня, тогда какъ въ предыдущихъ машинахъ въ 4 хода разъ.

Указанія для изслѣдованія тренія поршня.

I. При примѣненіи калориметрическаго метода изслѣдованія, главныя ошибки происходятъ не отъ измѣреній и наблюдений, а отъ вліянія различныхъ побочныхъ причинъ, поэтому при постановкѣ этихъ опытовъ должно быть соблюдено:

1) совершенно установившееся состояніе опыта, именно, когда въ теченіи 15—20 минутъ температура отходящей воды не поднимается и не опускается, а колеблется около нѣкоторой средней величины на $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$;

2) температура входящей воды должна быть постоянной;

3) средняя температура воды должна равняться температурѣ помещенія, хотя здѣсь возможно достигнуть только нѣкотораго приближенія;

4) расходъ воды долженъ быть строго постоянный;

5) не должно быть слишкомъ велико сжатіе воздуха въ цилиндрѣ; и

6) долженъ быть по возможности уменьшенъ и изученъ добавочными опытами теплосбмѣнъ съ воздухомъ помещенія.

Изслѣдованіе тренія при высокихъ температурахъ лучше всего производить съ помощью добавочнаго опыта, въ виду этого необходимо пользоваться возможно точными приборами на распредѣлительной доскѣ, какъ для опредѣленія расхода энергіи во время калориметрическихъ опытовъ, такъ и во время добавочнаго опыта.

II. При примѣненіи механическаго метода изслѣдованія главную ошибку вносятъ различныя измѣренія и наблюдения, поэтому при производствѣ этихъ опытовъ должно быть соблюдено:

1) все то, что требуется для точнаго опредѣленія индикаторныхъ работъ, какъ рабочаго цилиндра, такъ и насоса;

2) при опредѣленіи работы вращенія маховиковъ нужно пользоваться возможно точными приборами на распредѣлительной доскѣ;

3) необходимо, чтобы напряженіе сѣти, отъ которой берется токъ, не колебалось; для достиженія этого надо пользоваться аккумуляторными баттарейми.

Достоинства и недостатки того и другого метода.

Къ недостаткамъ калориметрическаго метода нужно отнести:

1) то, что онъ примѣнимъ только къ тѣмъ машинамъ, у которыхъ имѣется водяная рубашка;

2) то, что онъ даетъ вполне удовлетворительные результаты только при низкихъ температурныхъ условіяхъ, которыя сильно отличаются отъ обычныхъ условій работы машины;

3) то, что онъ можетъ внести большую ошибку въ результаты вслѣдствіе теплособмѣна въ тѣхъ машинахъ, у которыхъ внѣшняя поверхность велика, а работа тренія мала.

Недостатки эти восполняются такими достоинствами:

Во-первыхъ, методъ этотъ эластиченъ въ примѣненіи его къ изслѣдованію различныхъ вопросовъ тренія, напр., къ изслѣдованію вліянія скорости, различныхъ смазокъ какъ жидкихъ, такъ и густыхъ; что касается температурныхъ вліяній, то ихъ легко можно изслѣдовать съ помощью добавочнаго опыта;

во-вторыхъ, простъ по своей постановкѣ, вычисленіямъ результатовъ и не требуетъ добавочныхъ изслѣдованій, которыя вносятъ тѣ или инныя ошибки въ конечные итоги изслѣдованія.

Къ неостаткамъ механическаго метода нужно отнести:

1) то, что онъ не даетъ въ конечномъ итогѣ одну только величину тренія поршня, а даетъ сумму величинъ тренія поршня и тренія въ шатунномъ механизмѣ;

2) то, что методъ этотъ состоитъ изъ цѣлаго ряда наблюденій и отдѣльныхъ опытовъ, ошибки которыхъ, суммируясь, могутъ дать значительную величину погрѣшности въ конечномъ итогѣ (до 15%);

3) то, что этотъ методъ не эластиченъ въ примѣненіи къ изслѣдованію различныхъ вопросовъ тренія, потому что онъ связанъ съ постановкою опытовъ съ обычными условіями работы машины, которыя не допускаютъ измѣненія всѣхъ изслѣдуемыхъ факторовъ, напр. употребленіе жидкихъ и летучихъ смазокъ.

Къ несомнѣннымъ достоинствамъ нужно отнести:

1) то, что изслѣдованія производятся при тѣхъ условіяхъ тренія, при какихъ поршень обычно работаетъ;

2) то, что съ помощью этого метода можно вычислить треніе поршня для всякаго опыта съ машиною на основаніи данныхъ самаго опыта, а не пользоваться средними данными совершенно иного изслѣдованія;

3) то, что онъ примѣнимъ ко всякаго рода поршневымъ машинамъ.

О вліяніи тѣхъ или иныхъ факторовъ на треніе поршня.

1) Работа тренія поршня измѣняется пропорціонально числу оборотовъ или средней скорости поршня, слѣдовательно, удѣльное сопротивленіе тренія не зависитъ отъ относительной скорости v .

2) Удѣльное сопротивленіе тренія зависитъ отъ угловой скорости сдвиганія φ .

3) На треніе поршня вліяетъ величина зазора съ увеличеніемъ зазора треніе уменьшается.

4) Треніе увеличивается съ вязкостью смазки, но не пропорціонально, а въ меньшей степени.

5) Треніе уменьшается съ увеличеніемъ температуры смазки.

6) Трение поршня въ ббльшей степени зависитъ отъ температуры охлаждающей воды, чѣмъ отъ температуры внутренняго процесса.

7) Ббльшее вліяніе на трение оказываетъ температура не выходящей воды изъ цилиндра, а входящей.

8) Трение пропорціонально поверхности поршня.

9) Поршневые кольца увеличиваютъ работу трения поршня по двумъ причинамъ: во-первыхъ, тѣмъ что увеличиваютъ удѣльное сопротивление трения, во-вторыхъ, тѣмъ, что своими краями срѣзываютъ слой смазки и уменьшаютъ ея толщину.

Практическіе выводы.

Слѣдуетъ:

1) дѣлать достаточный зазоръ между поверхностями поршня и цилиндра,

2) дѣлать, какъ можно меньше, боковую поверхность поршня, конечно не въ ущербъ герметичности,

Для машинъ внутренняго горѣнія:

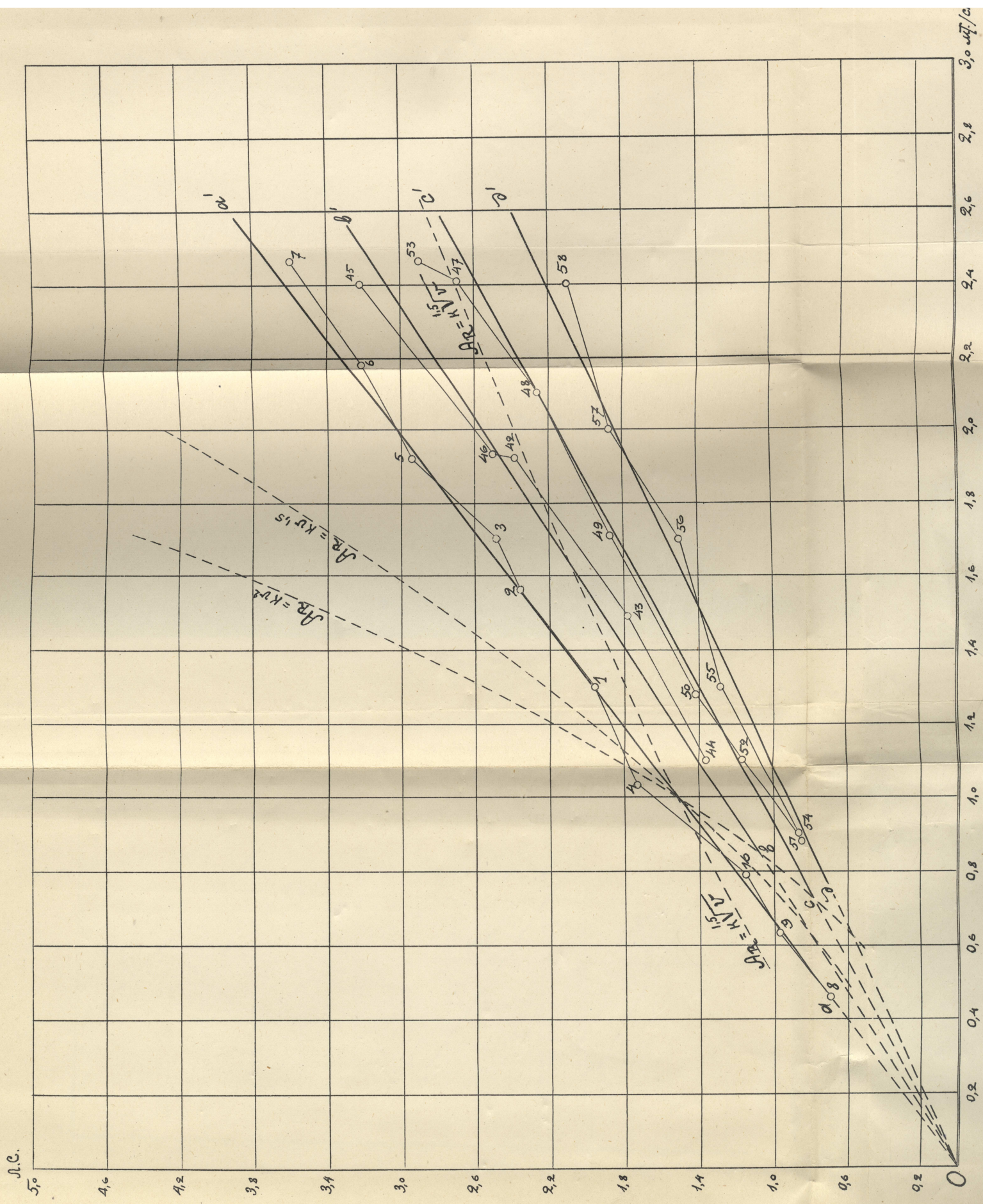
3) охлаждать машину не слишкомъ холодной водой, съ температурою не ниже 15°Ц.,

4) зимою подогревать воду теплою продуктовою горѣнія или примѣнять циркуляціонное охлажденіе,

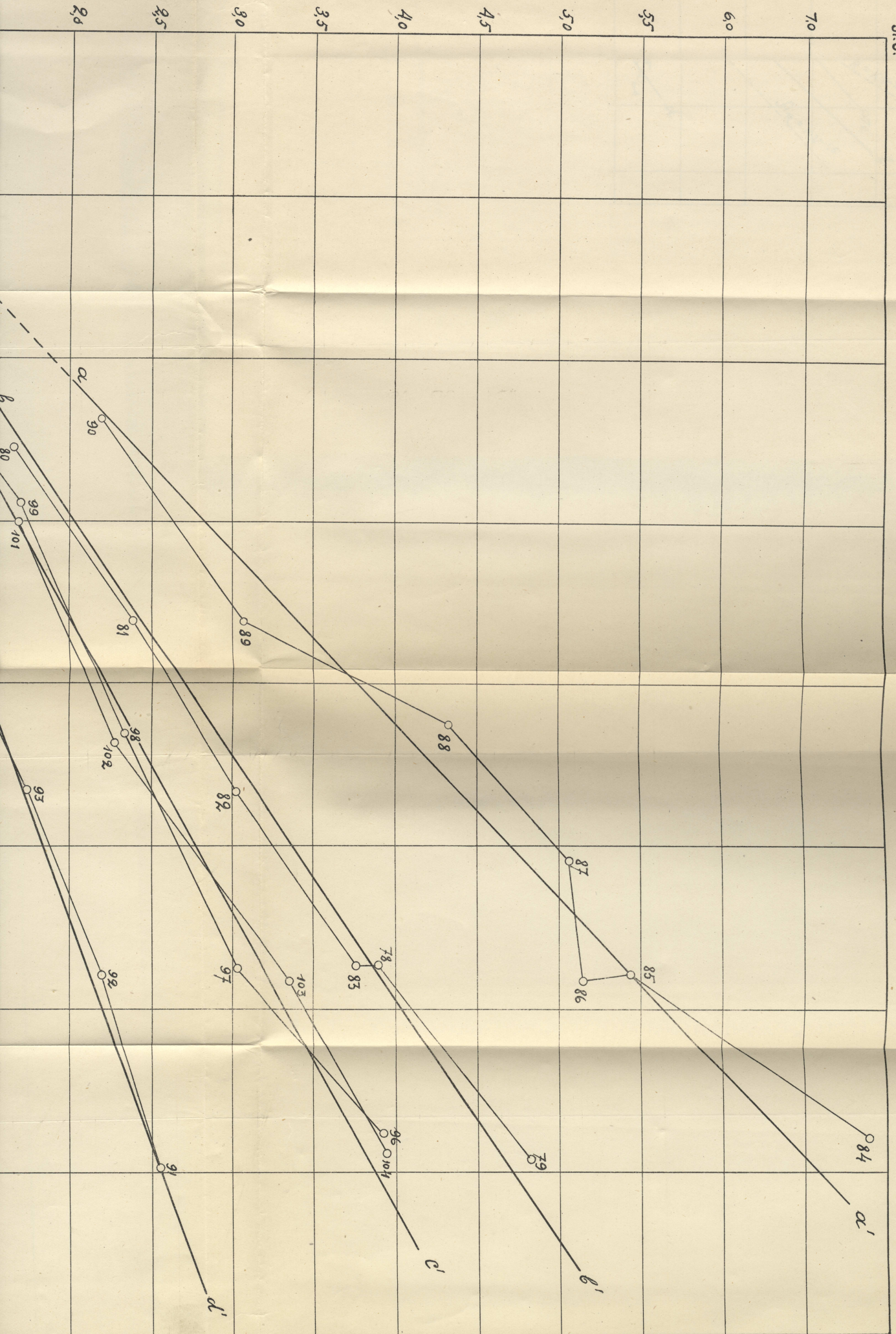
5) подводить охлаждающую воду не снизу цилиндра, а сверху,

6) употреблять не слишкомъ вязкія масла.

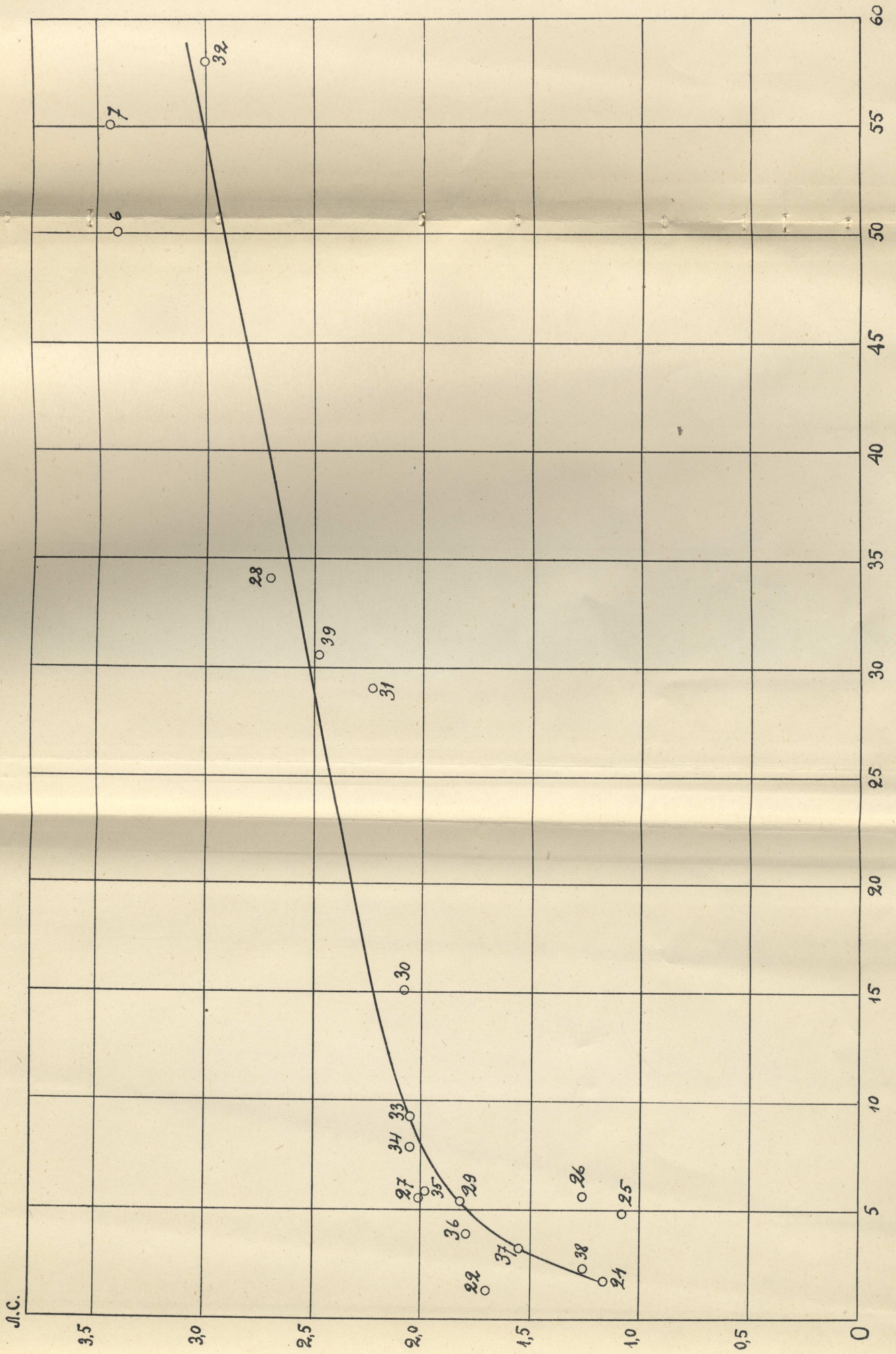
Діаграма № 3



Л.С.



Діаграма № 10.



№№ опитовъ.	В. лавления.	Температура помпы.	Температ. водк.		Рахоль в. д. л. в. 1 д.	У гелта въ 1 ед.	Работа кр. м. е.	Работа в. д. с.	Температ. стбн. цилинд.			Средняя температура стбн. цилинд.	Число оборотъ.	Средняя скорость поршня.	Исправн. раб. трени.	Вязкость при 20° ц.	Масло.		Помое снро. лив. пош.	У дбное сопро. в.	У дбн. лавл. кр. см.²		
			въ ру. в. шку.	въ ру. башк.					Около головы.	Въ сред. пилнд.	Около открв. п. конд. п.						Вязкость во время оната.	У д. вбст.				Рахоль масел в. 1 ч. тр.	У дбн. лавл. кр. см.²
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Измѣненіе числа оборотовъ.																							
Серія 1.	756	18,5	12,30	19,30	177,3	1240	147,0	1,96	—	—	—	—	121,0	1,30	—	130,4	—	0,905	30,4	113,0	0,0372	0,076	0,47
2	756	19,0	12,50	21,30	169,5	1492	177,0	2,36	—	—	—	—	146,0	1,56	—	"	"	"	28,6	113,5	0,0373	"	"
3	756	19,0	12,60	22,20	163,5	1570	186,0	2,48	—	—	—	—	158,6	1,70	—	"	"	"	30,4	109,5	0,0360	"	"
4	756	21,5	12,70	20,30	144,3	1096	130,5	1,74	—	—	—	—	96,0	1,03	—	"	"	"	28,6	126,7	0,0417	"	"
5	756	22,0	12,60	20,90	224,1	1860	220,5	2,94	32,0	35,0	30,0	30,0	180,0	1,92	—	"	"	"	30,4	114,8	0,0378	"	"
6	756	22,5	12,70	21,18	223,0	2030	241,0	3,21	33,5	36,0	30,0	30,0	204,0	2,18	3,40	"	"	"	30,4	110,6	0,0364	"	"
7	759	21,0	12,88	22,10	274,0	2280	271,0	3,61	31,0	33,0	28,5	28,5	230,4	2,46	3,44	"	"	"	30,4	110,2	0,0363	"	"
8	759	22,5	14,34	20,08	76,8	441	52,3	0,69	26,0	26,0	23,0	23,0	42,8	0,46	—	"	"	"	28,6	113,6	0,0374	"	"
9	759	23,0	13,82	21,06	84,3	611	72,7	0,97	26,0	27,0	23,5	23,5	58,6	0,63	—	"	"	"	28,6	115,4	0,0380	"	"
10	759	24,0	14,00	22,60	84,9	730	86,2	1,15	24,0	26,0	22,0	22,0	73,8	0,79	—	"	"	25,4	109,1	0,0359	"	"	
Измѣненіе температуры условій.																							
Серія 2.	755	23,5	18,00	51,50	28,3	949	112,5	1,50	53,0	54,5	55,0	38,0	224,0	2,40	1,47	130,4	27,0	0,905	28,6	46,9	0,0154	0,076	0,47
12	755	21,5	15,88	48,60	38,4	1257	149,2	1,99	51,5	53,0	53,0	36,0	217,9	2,33	2,01	"	30,0	"	30,4	64,0	0,0211	"	"
13	765	22,5	14,50	40,72	66,0	1731	205,4	2,74	44,5	46,0	46,0	32,5	222,9	2,38	2,70	"	38,5	"	28,6	86,3	0,0284	"	"
14	765	24,0	13,40	27,74	157,5	2258	268,0	3,57	33,5	37,5	37,5	30,5	217,6	2,33	2,61	"	45,5	"	28,6	115,0	0,0378	"	"
15	765	23,5	13,10	21,36	281,4	2324	276,0	3,68	30,0	35,0	35,0	30,0	216,9	2,32	3,73	"	47,5	"	30,4	118,9	0,0391	"	"
16	757	20,0	12,80	26,16	151,0	2018	237,0	3,19	33,0	38,0	38,0	31,5	215,4	2,31	3,26	"	44,0	"	30,4	102,6	0,0338	"	"
17	757	22,0	14,04	35,26	79,2	1673	199,0	2,65	39,5	43,0	43,0	32,6	220,0	2,35	2,65	"	38,5	"	28,6	84,7	0,0279	"	"
18	757	23,5	16,04	44,82	47,4	1365	162,0	2,16	47,5	49,0	49,0	34,5	218,0	2,33	2,18	"	33,0	"	30,4	69,5	0,0229	"	"
19	757	24,0	18,48	50,44	30,5	944	112,5	1,50	52,5	54,0	54,0	38,0	221,6	2,37	1,49	"	27,0	"	30,4	47,5	0,0150	"	"
Измѣненіе количества смазки.																							
Серія 3.	760	21,5	12,02	21,00	267,6	2410	286,0	3,81	30,0	34,5	35,0	30,0	217,0	2,32	3,86	130,4	47,5	0,905	54,5	123,3	0,0406	0,076	0,47
21	760	22,0	12,00	21,66	271,0	2618	310,0	4,14	30,0	36,5	37,0	31,5	217,7	2,32	4,20	130,4	44,0	0,905	262,0	133,8	0,0440	"	"
22	760	23,5	12,82	19,50	160,0	1068	126,7	1,69	22,0	25,0	25,0	22,0	225,0	2,41	1,65	1,1	1,1	0,823	—	52,6	0,0173	"	"
23	760	23,5	12,38	20,04	207,0	1585	188,0	2,51	25,0	29,0	30,0	27,0	221,0	2,36	2,50	130,4	63,0	0,905	16,5	79,7	0,0262	"	"
Измѣненіе вязкости смазки.																							
Серія 4.	754	22,0	12,62	18,52	124,8	736	87,8	1,17	20,0	22,0	25,0	22,0	221,0	2,36	1,16	1,78	1,78	0,853	140,7	37,2	0,0122	0,076	0,47
25	754	23,0	12,75	17,92	131,2	677	80,2	1,07	19,5	20,5	21,5	20,0	218,0	2,33	1,08	4,83	4,83	0,871	82,5	34,4	0,0113	"	"
26	754	23,5	13,15	20,18	112,0	788	93,8	1,25	21,0	23,5	24,0	20,0	218,0	2,33	1,26	5,60	5,60	0,873	40,5	40,3	0,0133	"	"
27	754	22,5	12,40	21,60	140,0	1288	153,0	2,04	27,0	29,0	29,0	24,5	223,0	2,39	2,01	6,65	5,10	0,876	95,8	64,0	0,0210	"	"
28	754	25,0	12,75	21,82	188,2	1706	202,0	2,70	26,5	28,5	28,5	24,0	222,0	2,37	2,67	37,75	34,00	0,902	37,9	85,2	0,0280	"	"
29	747	22,5	12,65	19,97	167,2	1124	133,5	1,78	24,0	25,0	26,0	23,0	215,0	2,30	1,82	6,37	5,40	0,879	46,0	58,1	0,0191	"	"
30	747	22,5	12,65	19,87	179,2	1294	153,7	2,05	25,0	26,5	27,5	24,0	216,0	2,31	2,08	18,2	15,0	0,884	88,4	66,6	0,0211	"	"
31	747	23,0	12,90	22,25	152,0	1420	168,6	2,25	27,0	29,0	30,0	26,0	222,0	2,37	2,23	46,7	29,0	0,899	54,0	71,2	0,0234	"	"

ТАБЛИЦА VII.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
№ опыта.	Барометрич. давление. В	Температура помпы. t	Температ. воды		Средняя температура воды. t _{ср.}	Расход воды в 1 ч. w	Количество тепла. U	Работа пор. в 1 кгр. м. ктр. м.	Работа поршня в 1 ч. с. n	Число оборотов. p	Средняя скорость. v _{ср.}	Полное сопротивление поршня. F	Удельное сопротивление. f	Количество смазки в 1 гр. K	Удельн. давлен.	
			Вход. в рубанк. t _{вх.}	Выход. из рубанка. t _{вых.}											Отг. в 1 кгр. см ² .	Отг. в 1 см ² в 1 кгр. см ² .
Компрессор.																
Серия 9. Малый цилиндр.																
59	761.0	22.0	13.43	21.30	17.36	30.20	169.0	20.0	0.267	175.5	1.46	13.70	0.0272	87.0	0.0	1.19
60	761.0	22.5	13.76	21.12	17.44	30.00	127.0	15.8	0.201	151.5	1.26	12.50	0.0249	90.0	"	"
61	761.0	22.5	14.08	20.15	17.32	29.84	99.1	11.8	0.157	121.6	1.01	11.80	0.0235	61.0	"	"
62	761.0	24.5	12.06	18.62	15.34	25.60	74.0	8.8	0.117	106.2	0.89	9.90	0.0197	87.0	"	"
63	761.0	24.5	13.00	19.26	16.13	25.00	62.6	7.4	0.099	96.0	0.80	9.25	2.0184	70.0	"	"
Серия 10. Большой цилиндр.																
64	751.0	25.0	10.20	18.20	14.20	50.50	199.0	28.6	0.315	174.6	1.46	16.16	0.0114	60.0	0.0	0.803
65	751.0	25.0	10.65	18.65	14.65	50.40	109.0	23.5	0.313	171.5	1.43	16.43	0.0116	67.0	"	"
66	751.0	26.0	11.03	18.65	14.84	50.10	177.0	21.0	0.280	157.0	1.31	16.04	0.0114	54.0	"	"
67	756.0	26.5	11.43	18.38	14.91	50.00	143.0	17.0	0.226	136.0	1.13	15.05	0.0107	58.0	"	"
68	756.0	26.5	12.00	18.37	15.19	50.00	113.7	13.5	0.180	120.0	1.00	13.50	0.0095	62.0	"	"
Серия 11. Большой цилиндр. Вода подогревалась горючкой. Кольца сняты.																
69	752.0	24.5	23.20	26.60	24.90	41.15	129.2	15.4	0.206	177.0	1.48	10.40	0.0074	57.0	0.0	0.0
70	758.0	21.0	21.15	23.20	22.18	41.52	83.0	9.8	0.131	137.0	1.14	8.60	0.0061	60.5	"	"
71	758.0	21.0	21.00	22.45	21.72	41.00	59.4	7.1	0.094	108.0	0.90	7.89	0.0056	63.0	"	"
Серия 12. Большой цилиндр. Вода подогревалась горючкой.																
72	767.0	24.5	21.77	25.56	23.66	75.50	286.0	34.0	0.453	181.3	1.51	22.50	0.0159	62.5	0.0	0.803
73	767.0	24.5	22.24	25.42	23.83	64.30	204.5	24.3	0.324	154.0	1.28	18.98	0.0134	61.0	"	"
74	767.0	24.0	20.95	24.96	22.96	64.50	258.0	30.6	0.408	165.2	1.37	22.32	0.0158	60.5	"	"
75	766.0	22.8	20.92	23.10	22.01	63.75	139.0	16.5	0.220	128.0	1.07	15.42	0.0109	65.5	"	"
76	766.0	23.5	20.90	22.77	21.84	62.35	116.5	13.8	0.184	111.4	0.93	14.85	0.0105	64.0	"	"
77	766.0	23.6	21.12	23.59	22.96	61.70	132.5	18.1	0.241	131.6	1.10	16.46	0.0117	64.5	"	"
Машина „Горисби-Акройд“																
Серия 13. Смазка машинным маслом.																
78	759.0	23.5	17.00	30.00	23.50	189.3	2460	292.0	3.89	176.2	2.86	102.10	0.0187	86.0	0.082	0.544
79	759.0	24.0	16.67	32.72	24.69	186.6	3000	361.5	4.82	214.0	3.48	104.50	0.0192	83.0	"	"
80	753.0	23.0	16.78	24.87	20.83	129.2	1042	123.7	1.65	78.5	1.27	97.40	0.0179	84.0	"	"
81	753.0	24.5	17.00	27.78	22.39	139.5	1505	178.5	2.38	111.2	1.80	99.20	0.0182	84.0	"	"
82	753.0	25.2	16.91	31.10	24.00	134.1	1904	225.8	3.01	144.0	2.33	96.90	0.0178	85.0	"	"
83	759.0	23.5	17.28	29.10	23.19	200.7	2370	281.2	3.75	176.2	2.86	98.40	0.0181	88.0	"	"
Серия 14. Смазка смесью машинного с цилиндрическим маслом.																
84	761.5	23.7	12.80	29.55	21.18	259.8	4350	517.0	6.89	210.0	3.40	152.00	0.0279	56.0	0.082	0.544
85	761.5	23.7	14.70	34.70	24.70	171.6	3432	407.2	5.43	178.5	2.89	141.00	0.0259	56.0	"	"
86	761.5	24.5	14.70	35.20	24.90	158.4	3245	385.5	5.14	179.5	2.91	132.50	0.0243	58.0	"	"
87	763.0	23.0	14.00	29.95	22.00	200.1	3190	378.8	5.05	156.5	2.54	149.20	0.0274	58.5	"	"
88	763.0	24.0	14.10	28.10	21.10	194.7	2720	324.0	4.32	131.0	2.12	152.80	0.0280	57.0	"	"
89	763.0	24.0	17.65	33.00	25.33	126.0	1930	229.6	3.06	110.8	1.80	127.50	0.0234	58.0	"	"
90	763.0	24.5	17.90	29.10	23.50	123.6	1385	164.2	2.19	73.0	1.18	139.20	0.0255	59.0	"	"
Серия 15. Смазка машинным маслом. Кольца сняты.																
91	765.0	22.0	19.30	28.90	24.10	168.0	1614	191.2	2.55	214.5	3.48	55.0	0.0101	82.0	0.082	0.0
92	765.0	22.0	19.17	28.00	23.59	156.6	1384	164.2	2.19	178.5	2.89	56.8	0.0104	84.0	"	"
93	765.0	22.5	19.50	26.80	23.15	149.4	1090	129.7	1.73	143.0	2.32	55.9	0.0103	83.0	"	"
94	763.0	22.0	20.50	24.50	22.50	189.0	756	90.0	1.20	108.4	1.76	51.1	0.0094	83.0	"	"
95	763.0	22.5	21.00	23.70	22.35	189.0	510	60.8	0.81	72.4	1.17	52.0	0.0095	82.0	"	"
Серия 16. Смазка смесью машинного с цилиндрическим маслом. Кольца сняты.																
96	760.0	21.5	15.65	25.30	20.48	256.8	2479	294.0	3.92	208.7	3.38	87.0	0.0160	55.0	0.082	0.0
97	760.0	20.0	15.30	22.70	19.00	258.0	1910	225.8	3.02	177.2	2.87	78.6	0.0144	55.5	"	"
98	760.0	18.5	15.15	22.15	18.65	210.0	1470	174.6	2.33	132.8	2.15	81.2	0.0149	56.0	"	"
99	760.0	17.0	14.58	19.80	17.19	204.0	1065	126.8	1.69	88.6	1.44	88.0	0.0161	56.0	"	"
100	760.0	15.0	14.50	19.00	16.75	171.3	771	91.5	1.22	69.2	1.12	81.7	0.0150	54.0	"	"
Серия 17. Смазка смесью машинного с цилиндрическим маслом. Кольца сняты. Люк открыт.																
101	752.0	25.0	21.50	26.32	23.91	220.2	1062	126.0	1.68	92.6	1.50	84.0	0.0154	54.0	0.082	0.0
102	752.0	25.0	19.55	26.56	23.55	204.6	1435	170.3	2.27	134.5	2.18	78.0	0.0143	54.5	"	"
103	752.0	25.0	17.40	28.10	22.75	197.4	2111	250.5	3.34	179.3	2.91	86.1	0.0158	52.0	"	"
104	752.0	22.5	15.90	28.60	22.25	196.0	2490	295.5	3.94	212.4	3.44	85.9	0.0158	53.0	"	"