

**Л. ЛОССЬЕ**  
Директор часовой школы в Безансоне

---

# ТЕОРИЯ РЕГУЛИРОВКИ КАРМАННЫХ ЧАСОВ

ПЕРЕВОД С ФРАНЦУЗСКОГО  
инженера СЕРГЕЕВА И. В. и  
ЗАВАДСКОЙ Е. А.

---

Под редакцией  
инж. СЕРГЕЕВА Ф. В.



„СТАНКОПРИБОР“  
1938 г.

**Л. ЛОССЬЕ**  
Директор часовой школы в Безансоне

---

# **ТЕОРИЯ РЕГУЛИРОВКИ КАРМАННЫХ ЧАСОВ**

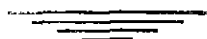
ПЕРЕВОД С ФРАНЦУЗСКОГО  
инженера **СЕРГЕЕВА И. В.** и  
**ЗАВАДСКОЙ Е. А.**

---

Под редакцией  
инж. **СЕРГЕЕВА Ф. В.**



É T U D E  
SUR LA  
Théorie du réglage des montres suivie  
d'indications et d'exemples pratiques



par  
L. LOSSIER  
directeur de l'Ecole d'horlogerie de Besançon



Genève, 1890.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Книга Лоссье Л. издана 47 лет назад, однако нельзя считать ее устарелой.

Вопросы, трактуемые автором по регулировке часов охвачены почти исчерпывающе, а изложение вполне общедоступное. Автора даже можно упрекнуть в излишней тягучести, повидимому из-за желания сделать свою книгу доступной для возможно большего круга лиц, интересующихся вопросами часостроения.

Книга много выиграла бы при условии очистки ее от излишних повторений и разъяснений, которые утомляют читателя уже знакомого, хотя бы немного, с курсом математики средней школы.

Все такие необходимые изменения мы не сделали, исходя из поставленной цели дать по возможности точный перевод без авторизованной переработки его.

Часовая промышленность в нашем Союзе сравнительно молодая отрасль, и имеющаяся литература по часостроению пока еще очень скудна.

Поэтому предлагаемая книга может оказаться хорошим пособием при преподавании курса „Часовых механизмов“ во ВТУЗ'ах и Техникумах и особенно ценной для производителей, желающих повысить свою квалификацию.

Профессор *Завадский, Н. Б.*



## ВВЕДЕНИЕ

В течение долгого времени регулировка карманных часов и хронометров представляла собою длительное и терпеливое изыскание наилучших условий для хода этих приборов и работа выполнялась артистами своего дела, обладавшими значительным практическим опытом, но несколько не обоснованная серьезными теоретическими данными. Только начиная с работ Филлипса, т. е. с момента, когда математик, инженер высшей квалификации, перестал видеть в часовом деле особое специальное искусство и попытался применить к нему принципы прикладной механики, часовое дело становится наукой и с этого момента мы наблюдаем зарождение и рост из года в год результатов, констатируемых на тех конкурсах, которые проводятся нашими лабораториями.

Данный труд построен на базе работ Филлипса. Регулировка основана на точных принципах и ясно определена при помощи математики и механики. Если еще не все стороны ее подвергнуты анализу, то во всяком случае уже можно и теперь сказать, что регулировщики-артисты уступили свое место регулировщикам ученым и что недалеко то время, когда можно будет отрегулировать часы почти до высших пределов, не наблюдая их хода.

Я знаю, что многим часовщикам это утверждение покажется слишком дерзким, но ведь когда констатируется локомотив, то конструктор знает каков будет ход его машины раньше, чем хотя бы крошка угля сгорела в его топке; инженер, строя мост, заранее знает, и с большой точностью, вибрацию малейшей его части под тяжестью поезда, он с величайшей точностью вычисляет усилия, которым подвергнется каждый болт. В машинах, равно как и в больших сооружениях, все силы приняты во внимание, все функции, с самого начала, подвергаются строго математическому разбору, чтобы по возможности все расчитав, ничего не оставить случайности.

Почему тоже самое не может быть введено в часовом производстве. Оставим другим отвечать на этот вопрос, заметим

только, что применив законы механики к часовому делу, применив к спирали законы упругости и формулы, найденные в трудах о железнодорожных пружинах, Филлипс получил возможность написать свои замечательные труды о спиральных, применяемых в часовом деле.

Ж. Гроссманн, следуя по этому же пути, дал в *Deutsche Uhrmacher Zeitung* (1882-1883) целую серию трудов, развивающих теорию Филлипса, применяя ее в различных частных случаях, встречающихся в часовом деле, изучая влияние на регулировку часов различных изменяющих причин, а именно: 1) трения, 2) штифтиков градусника, 3) „хода“ и т. д. и установив разницу, существующую между цилиндрической и плоской спиралью.

К сожалению эти труды, как и труды Филлипса, для их понимания требуют со стороны читателя знания математики, которым часовщики-практики не обладают. И если выше я приветствовал введение математики и механики в цикл знаний часовщика, то здесь я хотел бы предупредить, что не следует этим увлекаться. Данный труд необходимо свести к более скромным требованиям, чтобы молодой человек среднего развития мог освоить его в технической или профессиональной школе.

Поэтому я взялся за переработку труда Гроссмана, чтобы изложить его более простым языком, который был бы понятен каждому, прошедшему элементарный курс алгебры и механики.

Я по мере возможности следовал пути, принятому М. Гроссманом и оставил нетронутыми лучшие места его рассуждений. Но все же мне пришлось подчас полностью изменить некоторые части.

Я не претендовал на то, чтобы сделать лучше, чем Гроссман, но находя его труд чрезвычайно нужным, считал своим долгом, чтобы он дошел до большего числа читателей, а не оставался доступным только небольшому числу избранных.

Для облегчения понимания моего труда даже для тех, которые не знают элементарной механики, я даю несколько правил и формул, знание которых необходимо для понимания основного текста.

Язык теоретической механики чудесен по ясности и четкости (часто простая маленькая формула выражает больше, чем многие страницы объяснений). Потому стремиться написать теорию часового дела без математики и механики, все равно, что стараться построить часы без резца и напильника.

В то же время, мне хотелось бы помочь и часовщикам старой школы, которые интересуются только выводами, не имея ни времени, ни желания проследить за длинным путем развер-

тивания математических доказательств; для них специально я собрал выводы Филлипса, Гроссмана и др. в одно целое в главе V.

Л. ЛОССЬЕ.

### П р и м е ч а н и е.

Единицы измерения, принятые в этом труде: миллиметр, грамм, секунда. Углы везде обозначены греческими буквами и измеряются, без особого на то указания, длинами дуг, причем радиус принимается равным единице; следовательно угловая единица будет  $\pi$  равна половине окружности и все углы будут кратные  $\pi$ . Буква  $g$  показывает изменение силы тяжести  $= 9808,8 \text{ mm/сек.}^2$ . Масса  $m$  тела есть вес  $p$  того же тела, деленный на  $g$

$$m = \frac{p}{g}$$



## Г Л А В А I

# Общие понятия — законы движения баланса со спиралью

§ 1. **Маятник.** Хотя мы и поставили своей задачей вопросы изучения проверки карманных часов, т. е. изучения спирали и балаиса, мы считаем, что для простоты выводов и наглядности их мы будем исходить из изучения маятника и для него мы будем выводить все формулы.

Мы увидим после, что все выведенные формулы легко приложимы к изучению баланса.

**Простейший маятник**—это материальная точка, подвешенная на невесомой и нерастяжимой нити. Маятник, выведенный из состояния покоя, т. е. отклоненный на некоторый угол, стремится к вертикали и за счет приобретенной скорости переходит ее, теряя часть энергии, затем идет назад и т. д. до полного затухания.

Движение маятника в одну сторону называется „полуколебанием“ его.

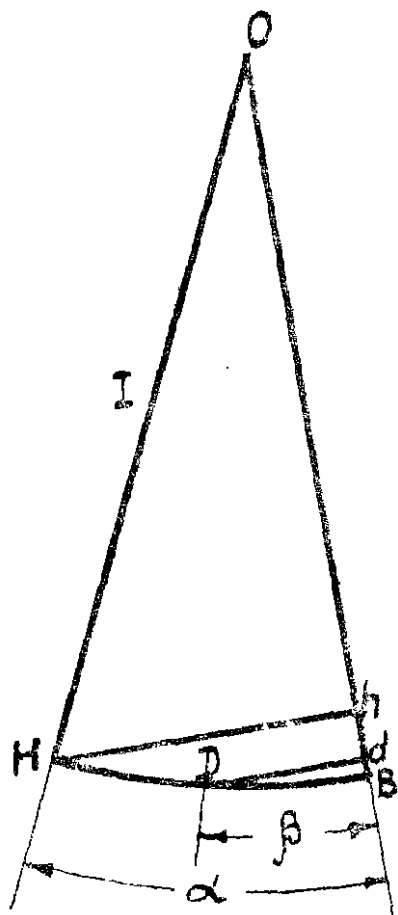
Найдем причины, от которых зависит продолжительность одного колебания.

Начнем с вывода формулы, которая позволит нам определить скорость в любой точке пройденного пути; эта формула представляет собою закон падения твердого тела.

Мы знаем, что маятник, падая от Н и В (фиг. 1) имеет при движении скорость равную скорости при падении его по вертикали на величину равную  $h_B$ , т. е.

$$V = \sqrt{2g \cdot h_B}$$

Длина  $h_B$  — неопределенна. Мы можем ее выразить как функцию длины маятника  $OH = l$  и пройденного пути  $\alpha$ , помня, что



Фиг 1.

хорда есть среднее пропорциональное между диаметром и ее проекцией на этот диаметр. Предполагая угол отклонения очень малым и принимая хорду равной ее дуге, имеем:

$$hB : \alpha = \alpha : 2l$$

(где  $l$  — радиус окружности, по которой движется материальная точка)

откуда

$$hB = \frac{\alpha^2}{2l}$$

и

$$V = \sqrt{2g \cdot \frac{\alpha^2}{2l}} = \alpha \sqrt{\frac{g}{l}}.$$

Также легко определить скорость в какойнибудь точке  $D$ , на расстоянии  $\gamma$  от точки  $B$ .

Положим, что  $hd = hB - dB$ ; подставляя их значения

$$hB = \frac{\alpha^2}{2l} \quad \text{и} \quad dB = \frac{\gamma^2}{2l},$$

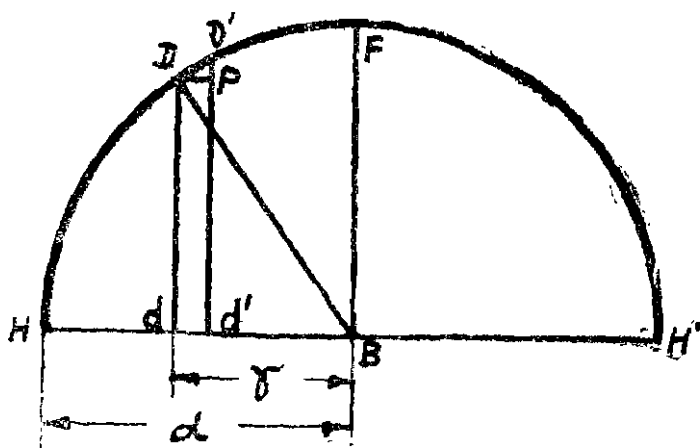
получим:

$$hb = \frac{\alpha^2 - \gamma^2}{2l},$$

и скорость маятника в  $D$  будет:

$$v = \sqrt{\frac{g}{l} (\alpha^2 - \gamma^2)}.$$

Скорость непостоянна и даже неодинаково изменяется. Мы не можем при помощи элементарной алгебры из выражения скорости прямо вывести время прохождения материальной точки от  $H$  к  $B$ , но мы можем сделать это, сравнивая движение маятника с движением (равномерным) точки по окружности.



Фиг. 2.

Действительно, если точка  $D$  (фиг. 2) вращается по окружности радиуса

$H'B = \alpha$  со скоростью  $V = \alpha \sqrt{\frac{g}{l}}$ , то движение ее проекции по диаметру  $H'BH'$  будет строго соответствовать движению маятника.

Мы легко найдем время потраченное маятником на совершение колебания,

потому что оно равно времени прохождения, взятой для сравнения точки, половины круга. Время  $T$  следовательно будет:

$$T = \frac{\text{пройденный путь}}{\text{скорость}} = \frac{\pi\alpha}{\alpha\sqrt{\frac{g}{l}}}$$

или

$$T = \pi\sqrt{\frac{l}{g}} \dots \dots \dots (1)$$

Осталось теперь доказать сходство этих двух движений. Найдем, какова будет скорость проекции точки  $D$ , в точке  $d$ , на расстоянии  $\gamma$  от центра  $B$ . При движении от  $D$  к  $D'$  ее проекция проходит путь  $= dd' = DP$ . Дуга  $DD'$  настолько мала, что совпадает с соответствующей ей хордой. Таким образом имеем два подобных прямоугольных треугольника  $DD'P$  и  $DBd$  в которых:

$$\frac{DP}{DD'} = \frac{Dd}{DB} = \frac{\sqrt{\alpha^2 - \gamma^2}}{\alpha},$$

обозначая через  $v$  скорость проекции, имеем:

$$\frac{v}{V} = \frac{\sqrt{\alpha^2 - \gamma^2}}{\alpha} \quad *)$$

заменяя  $V$  ее значением  $\alpha\sqrt{\frac{g}{l}}$ ,

получаем:

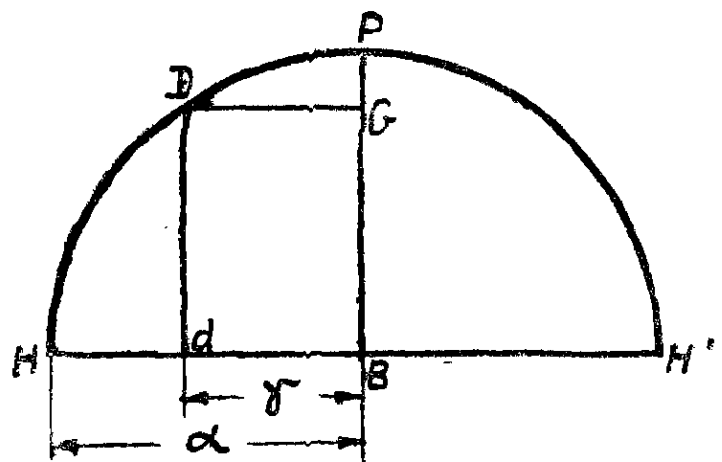
$$v = \frac{\alpha\sqrt{\frac{g}{l}}\sqrt{\alpha^2 - \gamma^2}}{\alpha}$$

или

$$v = \sqrt{\frac{g}{l}(\alpha^2 - \gamma^2)}$$

Полученное выражение для определения скорости движущейся проекции точки по диаметру точно такого же вида, как и для маятника.

§ 2. Для того, чтобы определить время, потребное для прохождения маят-



Фиг. 3.

\*) Скорости относятся между собою, как пройденные пути (при равном промежутке времени). С. Ф.

ником пути, соответствующего  $dB$ , мы воспользуемся (для сравнения) движения точки  $D$  (фиг. 3) по пути  $DF$  на полуокружности  $HFH'$ . Время  $t$ , потребное для передвижения от  $D$  до  $F$  будет:

$$t = \frac{\text{пройденный путь}}{\text{скорость}} = \frac{\text{дуга } DF}{\alpha \sqrt{\frac{g}{l}}}$$

$DF$  — есть дуга, синус которой равен  $\frac{DG}{DB} = \frac{\gamma}{\alpha}$  и л и  $\arcsin \frac{\gamma}{\alpha}$ .

Отыскивая в таблицах длину дуги, соответствующую данному синусу, мы найдем ее значение при радиусе равном единице. Для получения этой длины в мм, надо найденное выражение умножить на численное значение радиуса  $\alpha$  тогда:

$$t = \frac{\alpha \arcsin \frac{\gamma}{\alpha}}{\alpha \sqrt{\frac{g}{l}}}$$

или, исключая  $\alpha$ , имеем:

$$t = \sqrt{\frac{l}{g}} \arcsin \frac{\gamma}{\alpha} \dots \dots \dots (2)$$

**Численный пример:** Найдем сколько времени длится поднятие ( $1^\circ 30'$ ) анкера в-ходе Грагама, связанного с секундным маятником, имеющим амплитуду  $3'$ . Половина колебания соответствует амплитуде колебания  $\alpha 1' 30'$  или  $90'$ . Поднятие не симметрично относительно мертвой точки. Принимая  $30'$  для покоя, получаем поднятие ( $\gamma$ ) в одну сторону  $60'$  и  $30'$  ( $\gamma'$ ) в другую.

Мы имеем для первой части поднятия

$$\frac{\gamma}{\alpha} = \frac{60}{90} = 0,667$$

и для второй

$$\frac{\gamma'}{\alpha} = \frac{30}{90} = 0,333$$

и соответствующие дуги будут:

$$\arcsin \frac{\gamma}{\alpha} = 0,7301$$

$$\arcsin \frac{\gamma'}{\alpha} = 0,3403.$$

С другой стороны:

$$\sqrt{\frac{l}{g}} = \sqrt{\frac{994}{9808,8}} = 0,318$$

Продолжительность первой части поднятия будет:

$$t = 0,318 \cdot 0,7301 = 0,232 \text{ сек.}$$

и для другой части

$$t' = 0,318 \cdot 0,3403 = 0,108 \text{ сек.}$$

и время полного движения будет:

$$t + t' = 0,232 + 0,108 = 0,34 \text{ сек.}$$

§ 3. Формулы (1) и (2) непосредственно применяются к балансу карманных часов.

Баланс удерживается в нейтральном положении или в положении покоя при помощи спиральной пружины. Если баланс отклонить от нейтрального положения, то для возвращения в него он произведет ряд колебаний, аналогичных колебаниям маятника. Здесь действие силы тяжести заменяется силой упругости пружины и роль длины маятника выполняется радиусом баланса и его весом.

В формуле маятника

$$T = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

заменим  $l$  величиной  $A$ , зависящей от размера и веса баланса, и  $g$  величиной  $M$ , зависящей от упругой силы спирали.

Эта формула примет вид:

$$T = \pi \sqrt{\frac{A}{M}} \dots \dots \dots (3)$$

Где  $A$  — есть момент инерции баланса и  $M$  — момент упругости спирали.

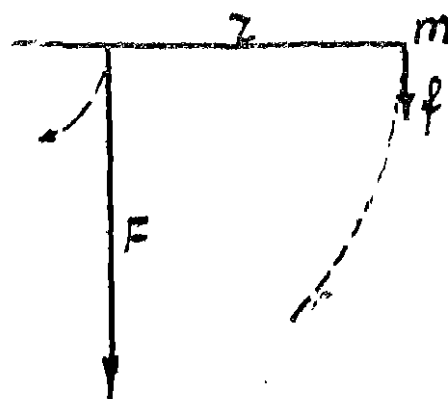
#### § 4. Момент инерции баланса.

Из механики мы знаем, что сила  $f$ , масса  $m$  и ускорение  $w$  связаны следующей формулой:

$$f = mw \dots \dots \dots (a)$$

Возьмем какое-либо тело и будем вращать его вокруг точки „о“ на расстоянии „r“ (фиг. 4).

Здесь ускорение не будет прямолинейным, а будет угловым, т. е. если это ускорение выражено в линейных



Фиг. 4.

единицах, то оно должно быть отнесено к единицам радиуса, так как, очевидно, что для одного и того же пройденного точкою угла, длина дуги будет зависеть от расстояния ее до центра вращения.

Эти два рода ускорения выражены следующей зависимостью:

$$w = \omega r \quad . . . . . (b)$$

где  $\omega$  — угловое ускорение; с другой стороны сила  $f$  должна быть заменена ее моментом  $F$  по отношению к точке  $O$ .

$$fr = F$$

откуда

$$f = \frac{F}{r} \quad . . . . . (c)$$

Иначе говоря  $F$  есть сила, которая будучи приложена к плечу, равному единице, произведет то же действие, что и сила  $f$  приложенная к плечу равному  $r$ . Заменяя в формуле (a)  $w$  и  $f$  их значениями из выражений (b) и (c), мы имеем  $\frac{F}{r} = m\omega r$  и угловое ускорение будет:

$$\omega = \frac{F}{r^2 m} \quad . . . . . (d)$$

Все рассуждения, выведенные выше, справедливы для всех точек, лежащих расстоянии „ $r$ “ от центра  $O$ , т. е. на окружности радиус которой равен  $r$ .

„ $r$ “ — называется радиусом вращения и выражение „ $r^2 m$ “ в формуле (d) являет собою выражение сопротивления ускорению и называется „моментом инерции“; эта формула применяется для расчета баланса карманных часов в предположении, что вся масса баланса сосредоточена на окружности радиуса „ $r$ “.

Следовательно, окружность вращения для баланса аналогична центру качания для маятника.

Момент инерции, обозначенный нами через „ $A$ “ в формуле (3) определяется как вес „ $P$ “, деленный на „ $g$ “ и умноженный на „ $r^2$ “

$$A = \frac{P}{g} \cdot r^2 \quad . . . . . (4).$$

На практике можно принять за радиус вращения биметаллического баланса расстояние от центра баланса до линии спайки двух металлов.

**Численный пример:** Найдем момент инерции баланса, вес которого  $= 0,6$  гр., при радиусе вращения  $r = 8,25$

$$A = \frac{0,6 \cdot 8,25^2}{9808,8} = 0,00416$$

## § 5. Крутящий момент спирали.

Если на спираль, снабженную балансом, не действуют никакие силы, ни в каком направлении, то она находится в равновесии, (или, иначе говоря в „мертвой точке“). Если баланс на его оси поворачивают на пологорота, то молекулярное равновесие будет нарушено и потребуется некоторая сила, чтобы удержать его в новом положении. Моментом этой силы будет сила умноженная на расстояние „ $r$ “ от точки ее приложения до оси баланса

$$M = pr$$

**Численный пример:**  $p = 0,3963$  г.;  $r = 10$  mm момент силы будет:

$$M = 3,963 \text{ гмм}$$

Из физики известно, что сила прямопропорциональна углу закручивания баланса.

Разделяя момент этой силы на угол закручивания, получим величину постоянную, зависящую от силы упругости спирали и выражающую момент  $M$  упругости спирали, в формуле (3)

$$M = \frac{pr}{\alpha}$$

В вышеприведенном примере имеем:

$$M = \frac{3,963}{3,1416} = 1,02725$$

Момент силы спирали будет  $M\alpha$ .

Мы нашли это значение опытным путем и остается его доказать вычислением, основываясь на законах упругости.

Законы упругости, отнесенные к металлическому бруску, могут быть сформулированы следующим образом:

1. Для одного и того же бруска, закрепленного одним концом неподвижно, удлинение, вызываемое нарастанием прикладываемой к свободному концу силы, остается одно и то-же независимо от первоначального натяжения.

2. Удлинение прямо пропорционально увеличению натяжения.

3. Оно пропорционально длине бруска.

4. Обратно пропорционально площади поперечного сечения.

Предполагается, что предел упругости не превзойден, т. е. что тело, предоставленное самому себе, возвращается к первоначальной длине.

Подвесим, теперь на проволоке сечением 1 кв. мм, имеющей длину в 1 метр, груз в 1 кг. Эта проволока под влиянием

тяжести удлиняется на некоторую величину (положим 0,05 мм), которую назовем „l“.

Очевидно, чем больше упругость металла, тем эта величина l будет больше.

Чтобы сравнить упругости тел между собой, найдем удлинение „l“, полученное под действием тяжести „P“ и вычислим по полученному удлинению тот вес E, который понадобился-бы, чтобы вызвать удлинение, равное первоначальной длине L проволоки.

$$P : l = E : L,$$

откуда

$$E = \frac{PL}{l} \dots \dots \dots (5)$$

Сечение проволоки берется равным 1 мм<sup>2</sup>. Если сечение равно „S“, то формула (5) примет вид:

$$E = \frac{PL}{ls} \dots \dots \dots (6)$$

Для получения P силы, соответствующей данному удлинению, преобразуем выражение (6) следующим образом:

$$P = \frac{Els}{L}$$

Величина E — называется коэффициентом упругости, вышеприведенный пример дает его значение для железа

$$E = \frac{1000 \cdot 1000}{0,05} = 20.000.000$$

Для стальной спирали

$$E = 26.000.000.$$

§ 6. Посмотрим теперь, что происходит в пружине круглой формы. Пусть АВ — отрезок пружины состоит из пяти слоев толщиной в 0,03 мм каждый (фиг. 5). Радиус R взят до среднего слоя и равен 10 мм.

Этот отрезок пружины на чертеже изображен свободным и без всякого натяжения.

Обозначим через β угол, образуемый пружиной, равный  $\frac{3}{4}$  оборота. Длина среднего нейтрального слоя будет равна  $\frac{3}{4}$  окружности радиуса 10 мм, т. е.

$$L = 10 \cdot \frac{3 \cdot 3,1416}{2} = 47,124 \text{ мм}$$

или выражая алгебраически в общем виде:

$$L = R\beta.$$

Длина наружного слоя будет равна трем четвертям окружности при  $r = 10$  мм плюс толщина двух слоев:

$$(10 + 0,06) \frac{3\pi}{2} = 47,407 \text{ мм}$$

Или, обозначая через  $L'$  длину любого слоя, и через  $K$  расстояние от середины этого слоя до середины нейтрального слоя, получим:

$$L' = (R + k) \beta \quad (7)$$

Теперь закрутим пружину на больший угол  $\beta + \alpha = 7/8$  окружности.

Крайняя точка  $A$  переместится в  $A'$ , а  $B$  в  $B'$ . Радиус  $R$  уменьшится, наружный слой удлинится, а внутренний сожмется. Нейтральный слой сохранит первоначальную длину, которую мы

нашли равной  $R\beta$  и если ее выразить через новый радиус  $r$ , принятый за единицу, то:

$$L = r (\beta + \alpha)$$

или

$$R\beta = r (\beta + \alpha)$$

откуда

$$r = \frac{R\beta}{\beta + \alpha} \quad \dots \dots \dots (8)$$

или в числах

$$r = \frac{10 \cdot \frac{3}{2} \pi}{\frac{7}{4} \pi} = \frac{60}{7} = 8,57 \text{ мм}$$

длина  $L''$  наружного слоя

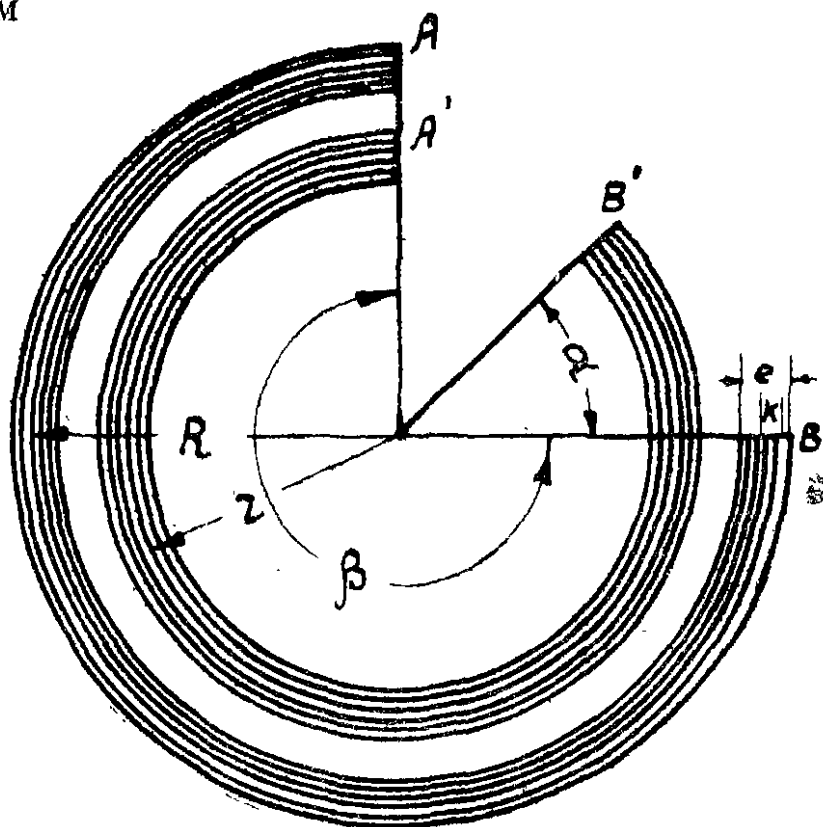
$$L'' = (r + k) (\beta + \alpha)$$

или, если мы подставим  $r$  из уравнения (8), то:

$$L'' = \left( \frac{R\beta}{\beta + \alpha} + k \right) (\beta + \alpha)$$

или

$$L'' = R\beta + k\beta + k\alpha \quad \dots \dots \dots (9)$$



Фиг. 5.

Удлинение равно:

$$L'' - L' = R\beta + k\beta + k\alpha - R\beta - k\beta$$
$$L'' - L' = k\alpha \dots \dots \dots (10)$$

или в цифрах

$$0,06 \cdot \frac{\pi}{4} = 0,047 \text{ мм.}$$

Это удлинение положительное, но для К отрицательное, т. е. оно будет отрицательным для внутренних слоев.

Оно меняет знак в зависимости от того, прибавляется-ли угол  $\alpha$  к углу  $\beta$ , или вычитается.

Удлинение отрицательное — есть укорачивание.

Надо заметить, что удлинение не зависит от „R“ и, следовательно, от кривизны пружины, которая может быть круговая, цилиндрическая, спиральная или вообще любой формы.

Чтобы узнать испытываемое усилие, нам остается заметить в уравнении (6) 1 его значением  $K\alpha$  и мы получим:

$$P = \frac{E k \alpha S}{L} \dots \dots \dots (11)$$

Принимая ширину пружины равной 1 мм и толщину внешнего слоя  $S = 0,03$  мм, получим выражение для силы:

$$P = \frac{26.000.000 \cdot 0,047 \cdot 0,03}{47,407} = 773 \text{ г}$$

Что касается внутреннего слоя, то он имеет тенденцию выпрямляться и развивает такую же силу, но обратную по знаку. Моменты этих сил: для наружного слоя „ $P \cdot (r + k)$ “, а для слоя внутреннего —  $P(r - k)$

их сумма

$$m = P(r + k) - P(r - k)$$

или

$$m = 2Pk \dots \dots \dots (12)$$

Сумма моментов сил не зависит от радиуса спирали. Заменяя „P“ его значением из формулы (11), получаем:

$$m = 2k \cdot \frac{E k \alpha S}{L}$$

или

$$m = \frac{2E \alpha S k^2}{\alpha}$$

Это уравнение представляет момент сил, действующих одновременно, но в обратных направлениях, для внутреннего

слоя и наружного слоя, расположенных симметрично относительно нейтрального слоя.

Расстояние „к“ от середины нейтрального слоя до середины первого или пятого, равняется толщине двух слоев и если мы назовем через „е“ суммарную толщину пружины, то:

$$k = 0,4 \text{ е}; \quad k^2 = 0,16 \text{ е}^2.$$

Для второго и четвертого слоя расстояние „к“, которое является толщиной не более одного слоя, выразится так: \*)

$$k = 0,2 \text{ е}; \quad k^2 = 0,04 \text{ е}^2,$$

а сумма двух величин „к<sup>2</sup>“ будет:

$$0,16 \text{ е}^2 + 0,04 \text{ е}^2 = 0,2 \text{ е}^2.$$

Суммарный момент, развиваемый пружиной, которая есть ничто иное как М<sub>α</sub> в § 5, может быть выражен следующим образом:

$$M_{\alpha} = \frac{2E \cdot 0,2 \text{ е}^2 \cdot \alpha S}{L}$$

Сечение „S“ каждого слоя, будучи равным своей толщине 0,2 е, помноженной на высоту пружины „h“, будет

$$S = 0,2 \text{ е} h$$

подставляя, получим

$$M_{\alpha} = \frac{2E \cdot 0,2 \text{ е}^2 \cdot \alpha \cdot 0,2 \text{ е} h}{L}$$

или

$$M_{\alpha} = \frac{0,08 E h e^3 \alpha}{L} \dots \dots \dots (13)$$

Мы получили 0,08, разделив пружину на 5 слоев, но если мы сделаем вычисление, разделяя пружину на очень большое число слоев, то получим более точное число

$$0,08333 \dots \dots \text{или } \frac{1}{12}.$$

Формула, дающая момент силы спирали, выразится окончательно так:

$$M_{\alpha} = \frac{E h e^3 \alpha}{12L} \dots \dots \dots (14)$$

где

- Е — коэффициент упругости
- h — ширина спирали
- е — толщина спирали
- L — длина спирали
- α — угол поворота аланса

---

\*) Примечание редактора: Следовало бы для „К“ дать разные индексы, поскольку численные расчеты их разные.

или, подставляя численные значения в нашем примере, получим:

$$M\alpha = \frac{26.000.000 \cdot 0,0034 \cdot 1 \cdot 0,7854}{12 \cdot 47,124} = 122 \text{ г.}$$

Иначе говоря, чтобы скрутить пружину длиной в  $\frac{1}{8}$  круга на оси, радиус которой равен 1 мм, требуется усилие в 122 г или в барабане радиусом в 10 мм, будет  $\frac{122}{10} = 12,2$  г сокращая  $\alpha$  в уравнении (14), мы получаем

$$M = \frac{Ehe^3}{12L} \dots \dots \dots (15)$$

Это есть алгебраическое выражение момента упругости пружины.

Можно также пользоваться уравнением (14) для расчетов заводной пружины. Угол  $\alpha$  становится тогда очень большим, увеличиваясь столько раз по  $2\pi$ , сколько имеет пружина оборотов, минус столько оборотов, сколько она имела, будучи совершенно развернута (чтобы получить более точное вычисление надо, чтобы пружина была предварительно вложена в барабан, потом вынута и оставлена свободной. Тогда число ее оборотов всегда более значительно, чем то, которое она имела, выходя из рук фабриканта).

**Численный пример:** Пусть дано; длина пружины барабана равна 628 мм, толщина 0,18 мм и ширина 2,23 мм. Вычислить силу\*), которую она будет иметь при полной заводке.

В свободном состоянии и вне барабана она имеет  $5\frac{1}{3}$  оборота, а заведенная—18 оборотов. Угол  $\alpha$  будет равен

$$(36 - 10\frac{2}{3}) \pi = 25\frac{1}{3} \cdot 3,1416 = 79,59.$$

Мы получим:

$$M\alpha = \frac{26.000.000 \cdot 2,23 \cdot 0,18^3 \cdot 79,59}{12 \cdot 628} = 3571,2 \text{ г}$$

Опыт доказал, что для того, чтобы держать в равновесии заведенную пружину, надо подвесить к рычагу длиной в 123 мм, закрепленному на квадрате оси и тщательно уравновешенному, груз в 29 г. Момент этой силы, следовательно, будет:

$$29 \cdot 123 = 3567 \text{ гмм.}$$

значение очень близкое к найденному вычислением.

## § 7. формула для определения периода колебания баланса.

Мы знаем теперь влияния, действующие на движение баланса: его момент инерции и момент упругости спирали. Нам надо еще для того, чтобы подойти к формуле, выражающей

\*) Речь идет о вычислении крутящего момента. (Примеч. ред.).

продолжительность одного колебания, вычислить также как мы это делали уже для маятника, скорость которую приобретает баланс под этим влиянием.

Рассмотрим точку В (фиг. 6) баланса, находящегося в покое, и заставим отклониться так, чтобы точка В его отошла до точки Н: если в этот момент мы его отпустим, то он возвратится в точку В с ускорением, которое зависит от силы спирали и от момента инерции баланса. Мы найдем выражение для этой скорости при помощи механических законов работы. Мы знаем, что половина живой силы  $\frac{mv^2}{2}$  тела, находящегося в движении, представляет работу  $T_r$  накопленную этим телом:

$$T_r = \frac{mv^2}{2}$$

умножая и разделяя вторую половину равенства на  $r^2$ , что не нарушает его, мы получим:

$$T_r = \frac{mr^2}{2} \cdot \frac{v^2}{r^2}$$

Выражение  $mr^2$  представляет (§ 4) момент инерции „А“ и выражение  $\frac{v}{r}$  представляет угловую скорость  $\omega$ ; ( $\frac{v^2}{r^2}$  может быть написана  $\omega^2$ ) и выражение работы, произведенной балансом, вышедшим из точки „Н“ под действием спирали и достигшим точки В с угловой скоростью „ $\omega$ “, будет:

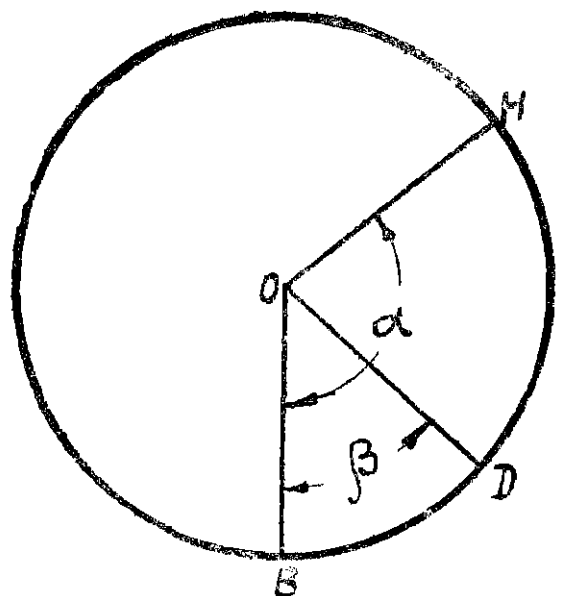
$$T_r = \frac{1}{2} A \omega^2 \quad \dots (a)$$

с другой стороны, эта же работа может быть выражена действующей силой, помноженной на пройденный путь. Действующая сила в точке „Н“ — есть момент силы спирали, или „ $M\alpha$ “; в точке В сила равна 0. Средняя сила между „Н“ и „В“ будет  $\frac{1}{2} M\alpha$  и работа, выполненная этой силой, будет  $\frac{1}{2} M\alpha$  помноженное на пройденный путь  $\alpha$ , или  $\frac{1}{2} M\alpha^2$ ; значит:

$$T_r = \frac{1}{2} M\alpha^2 \quad \dots (b)$$

Приравнявая выражения работы (a) и (b), получим

$$\frac{1}{2} A \omega^2 = \frac{1}{2} M\alpha^2$$



Фиг. 6.

откуда

$$\omega^2 = \frac{M}{A} \alpha^2$$

$$\omega = \alpha \sqrt{\frac{M}{A}} \dots \dots \dots (16)$$

это будет угловая скорость баланса, вышедшего из точки Н и достигшего точки В.

Обозначая через  $\omega_1$  угловую скорость в какой-нибудь точке D пройденного пути, мы имеем:

$$T_r = \frac{1}{2} A \omega_1^2$$

Работа, произведенная между точками D и В будет также  $\frac{1}{2} M \gamma^2$ . Работа полученная при движении от точки Н к D будет равняться разности двух величин.

$$T_r = \frac{1}{2} M \alpha^2 - \frac{1}{2} M \gamma^2$$

или, вынося за скобки общего множителя, получаем

$$T_r = \frac{1}{2} M (\alpha^2 - \gamma^2)$$

На основании этого, имеем

$$\frac{1}{2} A \omega^2 = \frac{1}{2} M (\alpha^2 - \gamma^2)$$

откуда

$$\omega^2 = \frac{M}{A} (\alpha^2 - \gamma^2)$$

и

$$\omega = \sqrt{\frac{M}{A} (\alpha^2 - \gamma^2)}$$

выражение идентичное найденному нами для скорости маятника в точке D его пути. Теперь нам остается только, зная угловую скорость баланса, вычислить продолжительность одного колебания. Для этого мы поступим также, как и в случае маятника, уподобляя движение баланса движению проекции точки на прямой, причем эта точка движется равномерно по

окружности со скоростью  $\omega = \alpha \sqrt{\frac{M}{A}}$ .

Излишне повторять все рассуждения (которые мы проследили при рассмотрении маятника в § 1), в тех же самых вы-

ражениях и с теми же обозначениями. Таким образом, мы найдем для продолжительности одного колебания:

$$T = \pi \sqrt{\frac{M}{A}}$$

формула, которая может быть принятая нами по аналогии с формулой маятника.

Заметим лишь то, что для вывода формулы маятника, мы приняли амплитуды довольно малые (для того чтобы можно было принять хорду за дугу), между тем как для баланса нам не пришлось делать подобной оговорки.

Следовательно, так как  $T$  не зависит от угла поворота баланса „ $\alpha$ “, то колебания баланса должны быть абсолютно изохронными.

Из § 5 логически вытекает, что сила спирали пропорциональна углу закручивания. Скорость пропорционально увеличивается, а время „ $T$ “ остается тоже.

Изохронизм практически осуществим постольку, поскольку ни одно внешнее влияние не изменяет функции спирали. В карманных часах эти влияния очень многочисленны; их детальное изучение и будет предметом последующих глав.

Следуя по пути рассуждений (§ 2), найдем выражение продолжительности части колебания (в смысле части пройденного пути)

$$t = \sqrt{\frac{A}{M}} \cdot \arcsin \frac{\gamma}{\alpha} \dots \dots \dots (17)$$

## § 8. Практическое применение.

**Задача 1-я.** Вычислить время, в течение которого баланс карманных часов (время одного колебания которого равно 0,2 секунды) остается в контакте с ходом, суммарное поднятие которого, будучи отнесено к балансу, равно  $30^\circ$  и амплитуда колебания  $540^\circ$  ( $1\frac{1}{2}$  оборота). Полное поднятие раскладывается на две стороны от мертвой точки и так как мы считаем углы начиная от этой точки, то  $\gamma$  будет  $= 15^\circ$ , а  $\alpha = 270^\circ$ , значит:

$$\frac{\gamma}{\alpha} = \frac{15}{270} = 0,05 \quad (5) = \sin 3^\circ 11' 5''$$

Дуга,  $\sin$  которой  $= 0,055\dots$  или дуга, угол которой  $= 3^\circ 11' 5''$ , равняется 0,05558. С другой стороны

$$\sqrt{\frac{A}{M}} = \frac{T}{\pi} = \frac{0,2}{3,1416} = 0,063662$$

Мы имеем, следовательно

$$t = \sqrt{\frac{A}{M}} \cdot \arcsin \frac{\gamma}{\alpha} = 0,063662 \cdot 0,05558 = 0,003538 \text{ сек.}$$

а для суммарного угла в 30

$$t = 0,007077 \text{ сек.}$$

**Задача № 2.** Найти толщину спирали при заданных выше условиях.

Мы опять возьмем для этого уравнение (3), где мы заменим  $M$  величиною ей равнозначущей, взятой из (15), т. е.

$$M = \frac{E e^3 h}{12 L}$$

и мы получим

$$T = \pi \sqrt{\frac{12 A L}{E e^3 h}} \dots \dots \dots (18)$$

Возводя в квадрат, получим;

$$T^2 = \pi^2 \frac{12 A L}{E e^3 h}$$

и

$$e = \sqrt[3]{\frac{12 \pi^2 A L}{T^2 E h}} \dots \dots \dots (19)$$

Пример (тот же самый что и в § 4);

$$\text{Пусть: } A = 0,00416$$

$$L = 265 \text{ м}$$

$$h = 0,22 \text{ м}$$

$$T = 0,2 \text{ сек.}$$

$$E = 26.000.000$$

мы имеем

$$e = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot 9,86 \cdot 0,00416 \cdot 265}{0,04 \cdot 26.000.000 \cdot 0,22}} = \sqrt[3]{0,000571} = 0,083 \text{ мм.}$$

Мы допустим в этом расчете, что сечение спирали прямоугольное. В действительности ребра закруглены  и чтобы получить абсолютную точность, пришлось бы считаться с этим изменением формы. На самом деле разница, которая тут получится очень незначительна.

**Задача № 3.** Найдем насколько надо укоротить или удлинить спираль, что бы получить разницу в „а“ секунд в суточном ходе.

Пусть  $T$  желаемый период колебания,  $N$  — число колебаний в сутки,  $L$  — длина спирали, отвечающая этим данным;  $T'$ ,  $N'$  и  $L'$  те-же величины до их изменения. Мы получили согласно (18)

$$T = \pi \sqrt{\frac{12AL}{Ee^3h}} \text{ и } T' = \pi \sqrt{\frac{12AL'}{Ee^3h}} \dots (20)$$

Деля первое из этих уравнений на второе, мы получим:

$$\frac{T}{T'} = \sqrt{\frac{L}{L'}}$$

С другой стороны очевидно, что числа колебаний в сутки, обратнопропорциональны их продолжительности, значит:

$$\frac{T}{T'} = \frac{N'}{N}$$

Обозначая через „n“ число колебаний, которое должен делать баланс в 1 сек., мы получим:

$$N' = N \pm an$$

где „а“ положительно, если часы идут вперед и „а“ — отрицательно, если они отстают. Замечая, что

$$\frac{N}{n} = 86400$$

есть число секунд в сутках, получим

$$\frac{T}{T'} = \frac{N \pm an}{N} = 1 \pm \frac{an}{N} = 1 \pm \frac{a}{86400} = \sqrt{\frac{L}{L'}} \dots (21)$$

и

$$\frac{L}{L'} = \left(1 \pm \frac{a}{86400}\right)^2$$

или

$$L = \left(1 \pm \frac{a}{86400}\right)^2 L' \dots (22)$$

Отсюда мы можем вычислить длину спирали с любой точностью. Если, как это обыкновенно случается „а“ слишком мало относительно 86400, мы можем пренебречь за малостью выражений  $\left(\frac{a}{86400}\right)^2$  и положить

$$\left(1 \pm \frac{a}{86400}\right)^2 = 1 \pm 2a \frac{1}{86400}$$

откуда

$$L = L' \pm L' \cdot \frac{a}{43200}$$

**Численный пример.** Пусть  $a = 60$  сек., мы получим:

$$L = L' \pm \frac{L'}{720} =$$

и

$$L - L' = \pm \frac{L'}{720}$$

возьмем  $L' = 265$  м. (Приблизительная длина спирали Брегета в часах  $d = 43$  мм, баланс которых имеет диаметр 19 мм). Длина, на которую придется изменить спираль будет:

$$L - L' \pm \frac{265}{720} = \pm 0,368 \text{ мм}$$

Чтобы вычислить практически длину спирали; пользуются приближенной формулой:

$$L = (r' + r'') \pi n \dots \dots \dots (23)^2$$

В которой  $r'$  и  $r''$  обозначают радиусы наибольшего и наименьшего витка спирали, а „ $n$ “ число витков.

**Задача 4-я.** На сколько надо изменить вес баланса, чтобы получить изменение в суточном ходе в „ $a$  сек.“.

Обозначим через  $p$  вес груза, который надо прибавить или отнять от веса баланса и через  $r$  — расстояние этого груза от центра баланса,

Момент инерции баланса получим, прибавляя этот груз к весу баланса

$$A = \frac{P}{g} \cdot R^2 \pm \frac{p}{g} \cdot r^2$$

Заменим эту величину  $A$  в первом и во втором уравнениях (20) ей равноценной, только что написанной  $A = \frac{p}{g} R^2$ . Деля одно выражение на другое, мы получим согласно (21):

$$\frac{T}{T'} = \sqrt{\frac{PR^2 \pm pr^2}{p R^2}} = 1 \pm \frac{a}{86400}$$

возводя в квадрат и умножая на  $PR^2$  получим:

$$PR^2 \pm pr^2 = \left( 1 \pm \frac{a}{86400} \right) \cdot PR^2$$

или

$$PR^2 \pm pr^2 = PR^2 \pm PR^2 \frac{2a}{86400} + PR^2 \left( \frac{a}{86400} \right)^2$$

откуда упрощая

$$p = \pm \left[ \left( \frac{a}{86400} \right) \pm \frac{2a}{86400} \right] \frac{PR^2}{r^2} \dots (24)$$

Груз, который надо прибавить будет тем больше, чем он ближе расположен к центру.

Пренебрегая за малостью величиной  $\left( \frac{a}{86400} \right)^2$  получим:

$$p = \pm \frac{2a}{86400} \cdot \frac{PR^2}{r^2} \dots (25)$$

Положим:  $a = 60$  сек.;  $R = 8,25$  м;  $r = 9,5$  мм. Груз „р“ должен быть прибавлен к винтам (путем подкладывания шайб) или снят с крайних точек винтов путем спиливания и мы получим:

$$p = \pm \frac{1}{720} \left( \frac{8,25}{9,5} \right)^2 P$$

или

$$p = \pm 0,001047 P$$

Иначе говоря, чтобы получить разницу в суточном ходе часов в 1 мин., необходимо прибавить на головках винтов тяжесть в 0,001 веса баланса.

Приближенная формула (25) может быть применена лишь при малых разницах, иначе  $\left( \frac{a}{86400} \right)^2$  нельзя было бы пренебречь.

Тем не менее это практическое правило очень удобно в большинстве случаев.

**Численный пример.** Баланс анкерных карманных часов  $= 43$  мм, весит 0,477 г, причем его внутренний радиус (радиус инерции равен 7,5 мм, наружный радиус равен 8,9 мм; часы отстают на 73 сек. в сутки. Какое изменение придется дать балансу, чтобы исправить ход часов.

Возьмем опять формулу (25)

$$p = \pm \frac{2a}{86400} \cdot \frac{PR^2}{r^2}$$

заменяя буквы числами получим

$$p = \pm \frac{2 \cdot 73 \cdot 0,477 \cdot 7,5^2}{86400 \cdot 8,9^2}$$

или

$$\rho = -0,00057 \text{ г.}$$

Распределяем тяжесть в 0,57 миллиграмма на два противоположных регулировочных винта; головка винта высотой в 0,9 мм весит 7 миллиграмм, следовательно, придется уменьшить каждую на  $\frac{1}{25}$  ее толщины. т. е. на 0,036 м.

Эти величины, как-бы они не казались малы, хорошими измерительными инструментами могут быть измерены так, что после сделанной поправки ошибка в ходе часов не будет превышать от 4-х до 5 сек. в сутки.

---

## Г Л А В А II

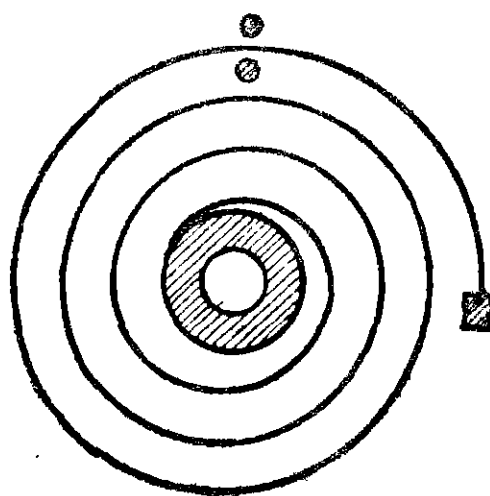
### Внешние влияния, не зависящие от баланса и спирали

§ 9. **Штифты градусника.** Известно, что карманные часы обыкновенно снабжены градусником с двумя штифтами, позволяющими удлинять или укорачивать, в зависимости от хода часов, активную часть спирали. Эти штифты могут плотно сжимать спираль или охватывать ее с некоторой игрой, более или менее значительной. Ясно, что в последнем случае действующая часть спирали не будет постоянной на протяжении всего колебания; как следствие не только произойдет отставание в ходе, но большие и малые колебания не будут уже иметь ту же продолжительность.

**1-й случай.** Положение покоя; спираль находится на равном расстоянии между двух штифтов.

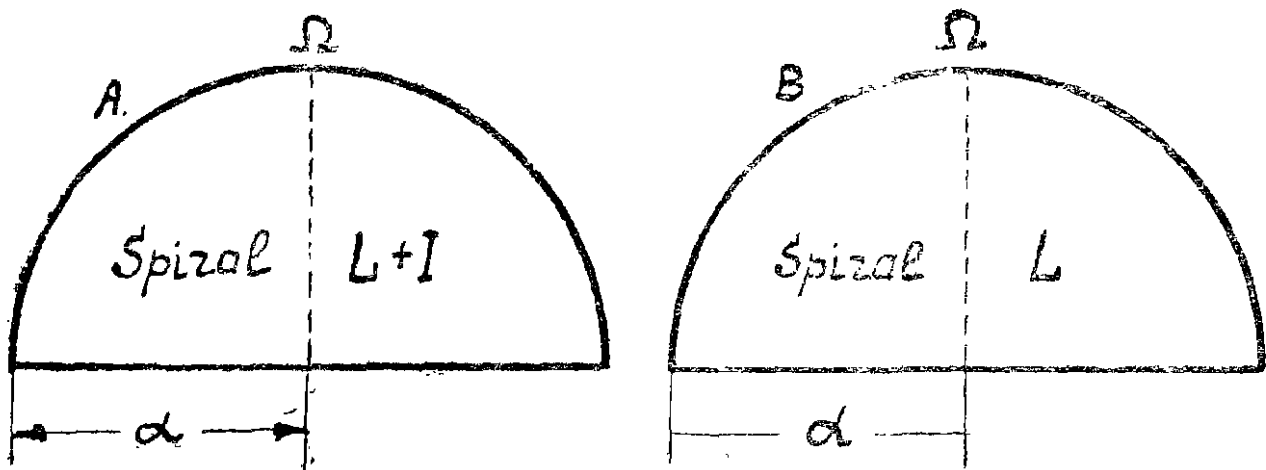
Пока баланс делает маленькие колебания действует вся спираль, как только качания достигнут известной амплитуды, угол ее, (считая от мертвой точки) мы обозначим через  $\gamma$ , тогда последний виток упрется в один из штифтов и если амплитуда увеличивается еще, тогда будет находиться в действии лишь часть спирали, заключенная между штифтами и ролькой. Пропорциональность между моментом силы спирали и амплитудой будет нарушена, а, следовательно нарушен и изохронизм.

Чтобы убедиться в важности пертурбаций, производимых в ходе часов раздвиганием штифтов, произведем вычисление согласно формул, выведенных в предыдущей главе. В период одного колебания спираль принимает две различные длины. Если бы мы могли заставить колебаться памятник сначала с суммарной длиной спирали  $L + l$  и затем с длиной уменьшенной  $L$ , сохраняя одну и ту же амплитуду колебания, то, очевидно, что скорость была бы меньшей в первом случае,



Фиг. 7

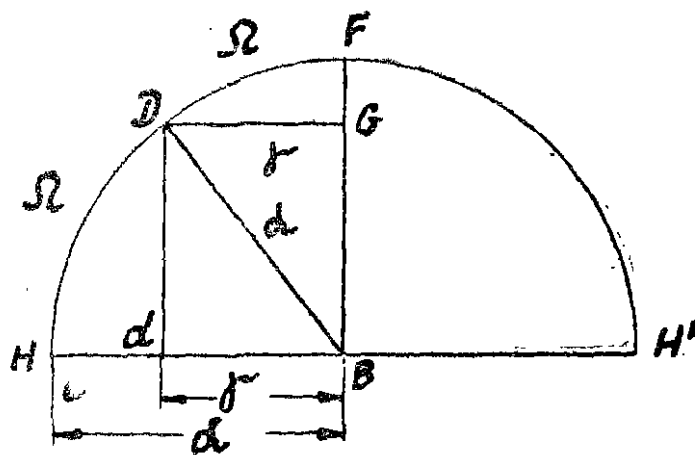
чем во втором. Таким образом опять беря построение § 2, мы представим графически в „А“ (фиг. 8) движение баланса, колеблющегося со спиралью длиною  $L+1$  и в „В“ тот-же баланс, колеблющийся со спиралью  $L$ .



Фиг. 8

В обоих случаях амплитуда  $\alpha$  остается одинакова и, очевидно, что в „А“ качание будет более продолжительное, чем в „В“ (потому что спираль длиннее) и скорость  $\Omega'$  сравниваемого движущегося тела в „А“ будет меньше, чем скорость  $\Omega$  в „В“.

Чтобы узнать действительную продолжительность колебания, мы будем сравнивать движение баланса с проекцией точки, равномерно движущейся по полуокружности  $HFH'$  на линию  $HBH'$  (фиг. 9).



Фиг. 9

Только вместо того, чтобы дать этой точке одну и ту-же скорость на всем пути, мы ей придадим скорость  $\Omega'$  от F до D и скорость  $\Omega$  от D до H.

Время, потребное балансу для прохождения угла  $\gamma$ , другими сло-

вами, то время в которое сравниваемая движущаяся точка пройдет от F до D будет:

$$t' = \frac{\text{пройденный путь}}{\text{скорость}} = \frac{\text{дуга } DF}{\Omega'}$$

но по § 2 дуга DF есть дуга, синус которой  $\frac{DG}{DB} = \frac{\gamma}{\alpha}$

т. е.  $\arcsin \frac{\gamma}{\alpha}$ , длина которой будет  $\alpha \arcsin \frac{\gamma}{\alpha}$ ,

$$\text{и мы получим: } t' = \frac{\alpha \arcsin \frac{\gamma}{\alpha}}{\Omega'}$$

Что касается до остальной части полуколебания  $\alpha - \gamma$  то время будет тоже, что и время, нужное сравниваемой движущейся точке для прохождения от D до H со скоростью  $\Omega$ , откуда

$$t = \frac{\text{дуга HD}}{\Omega}$$

Возвращаясь к § 2, мы видим, что дуга HD есть дуга, косинус которой  $\frac{DG}{DB} = \frac{\gamma}{\alpha}$  и длина которой  $\alpha \arccos \frac{\gamma}{\alpha}$ , продолжительность  $t$  в данном случае будет:

$$t = \frac{\alpha \arccos \frac{\gamma}{\alpha}}{\Omega};$$

для продолжительности полуколебания получаем:

$$t' + t = \frac{1}{2} T = \frac{\alpha \arcsin \frac{\gamma}{\alpha}}{\Omega'} + \frac{\alpha \arccos \frac{\gamma}{\alpha}}{\Omega}$$

По формуле (16), мы имеем  $\Omega = \alpha \sqrt{\frac{M}{A}}$ , но так как сравниваются длины двух спиралей, нам надо разложить „M„.

Мы знаем по (15), что момент упругости <sup>1)</sup>

$$M = \frac{Ehe^3}{12L}$$

положим

$$\frac{Ehe^3}{12} = C$$

тогда

$$M = \frac{C}{L}$$

скорость в мертвой точке для спирали длиной  $L + l$  будет:

$$\Omega' = \alpha \sqrt{\frac{C}{A(L+l)}}$$

<sup>1)</sup> Введены стандартные обозначения (Прим. ред.)

а для длины  $L$

$$\Omega = \alpha \sqrt{\frac{c}{AL}}$$

Подставляя величины в выражении для  $\frac{1}{2}T$  им равнозначущие, получим:

$$\frac{1}{2}T = \frac{\alpha \arcsin \frac{\gamma}{\alpha}}{\alpha \sqrt{\frac{c}{A(L+1)}}} + \frac{\alpha \arccos \frac{\gamma}{\alpha}}{\alpha \sqrt{\frac{c}{AL}}}$$

или, упрощая:

$$\frac{1}{2}T = \sqrt{\frac{A(L+1)}{c}} \cdot \arcsin \frac{\gamma}{\alpha} + \sqrt{\frac{AL}{c}} \arccos \frac{\gamma}{\alpha} \dots (25)$$

Эта формула (25) не вполне точна и немного отличается от полученной Гроссманом М. Я ею всетаки пользуюсь, потому что она более проста и легче доказывается и окончательный вывод остается тот-же. (См. для точной формулы М. Гросмана примеч. 1 в конце этой книги).

Воспользуемся этой формулой для численного примера.

Возьмем баланс момента инерции  $A=0,00416$  и спираль, данные которой:  $L=226$  мм;  $l=7$  мм;  $C=232$ .

Расстояние между штифтами отрегулировано так, что оно соответствует повороту баланса на угол в  $20^\circ$  (это расстояние очень мало и едва видно в лупу), считая движение витка спирали от мертвой точки до момента его соприкосновения со штифтом.

Возьмем сперва полуамплитуду  $\alpha=60^\circ$ ; тогда

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}T &= \sqrt{\frac{0,00416 \cdot 233}{232}} \cdot \arcsin \frac{20}{60} + \\ &+ \sqrt{\frac{0,00416 \cdot 226}{232}} \arccos \frac{20}{60} \end{aligned}$$

или

$$\frac{1}{2}T = 0,1004 \text{ сек. и } T = 0,2008 \text{ сек.}$$

Каждое колебание длится на 0,0008 сек. более установленного теоретически и суммарное опоздание в конце суток будет 346 сек.

Взяв несколько значений для суммарной амплитуды, мы получим следующую таблицу:

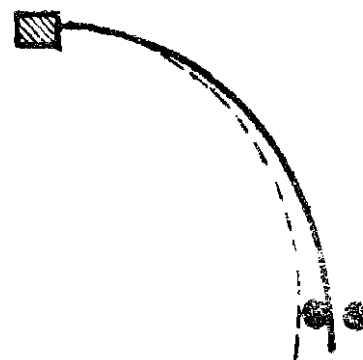
| Амплитуда<br>суммарная | $\alpha$    | Отставание<br>в 24 часа |
|------------------------|-------------|-------------------------|
| $\frac{1}{3}$ оборота  | $60^\circ$  | 346 секунд              |
| $\frac{2}{3}$ "        | $120^\circ$ | 180 "                   |
| 1 "                    | $180^\circ$ | 132 "                   |
| $1\frac{1}{4}$ "       | $225^\circ$ | 114 "                   |
| $1\frac{1}{2}$ "       | $270^\circ$ | 101 "                   |
| $1\frac{2}{3}$ "       | $300^\circ$ | 89 "                    |

Из этого примера видно, что расположение штифтов, установленное нами в первом случае, т. е. симметричное относительно спирали, создает опаздывание, причем это опаздывание гораздо более значительно при малых колебаниях, нежели при больших. Часы, отрегулированные при данных условиях, будут опаздывать находясь в **висячем положении**, потому что, как мы это увидим далее, трение в этом положении более значительно, чем в горизонтальном и, следовательно, амплитуда колебания становится меньше.

Следует отметить, что в вышеприведенном примере амплитуда колебания баланса упала с 1,5 оборота до 1,25, а суточная разница между показаниями в горизонтальном и в висячем положении будет равна 13 сек. Когда часы в висячем положении отстают, то прежде всего надо исследовать — имеет ли спираль игру между штифтами и, если имеет, то ее следует уничтожить.

§ 10. **2-й случай.** Спираль находится в покое, наружный виток не посередине между штифтами, а касается одного из них.

Линия, обозначенная пунктиром (фиг. 10) указывает положение, которое принял бы наружный виток спирали, если-бы он был свободен. В этом случае надо повернуть баланс на некоторый угол  $\gamma$  для того, чтобы спираль отошла от штифта.



Фиг. 10

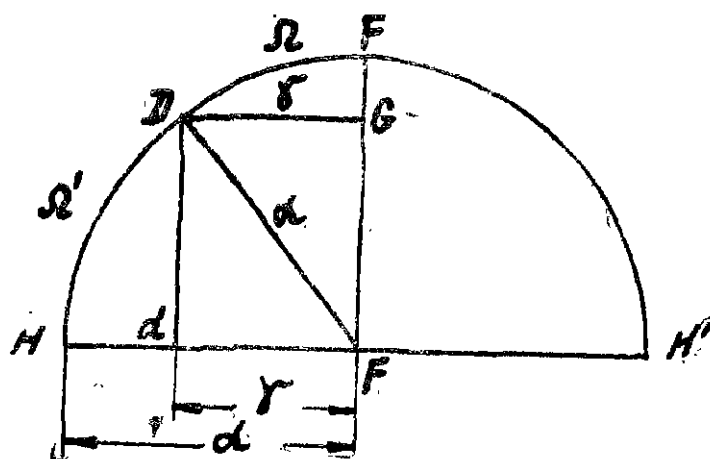
Если другой штифт расположен на таком расстоянии, что спираль в своем крайнем положении при полукколебании не достигает его, то можно вычислить продолжительность полукколебания вышеприведенным способом, отметив следующее:

1) На протяжении дуги  $\gamma$  действует сокращенная спираль, а на протяжении дуги  $(\alpha - \gamma)$  действует спираль полной длины;

2) это изменение длины спирали происходит лишь с одной стороны и действует следовательно, лишь на половину каждого колебания (фиг. 11).

Для продолжительности видоизмененного полук колебания формула примет вид

$$t + t' = \frac{\angle DF}{\Omega} + \frac{\angle HD}{\Omega'}$$



Фиг 11.

Или, делая те же подстановки, как и в уравнении (25), получим:

$$\frac{1}{2} T = \sqrt{\frac{AL}{c}} \arcsin \frac{\gamma}{\alpha} + \sqrt{\frac{A(L+1)}{c}} \cdot \arccos \frac{\gamma}{\alpha} \quad (26)$$

Беря тот-же самый пример как в предыдущем параграфе, мы вычислим отставание часов для различных амплитуд колебаний.

Вот полученные результаты:

| Суммарные амплитуды   | $\alpha$    | Опаздывание за 24 часа |
|-----------------------|-------------|------------------------|
| $\frac{1}{8}$ оборота | $60^\circ$  | 508 секунд             |
| $\frac{2}{8}$ „       | $120^\circ$ | 579 „                  |
| 1 „                   | $180^\circ$ | 601 „                  |
| $1\frac{1}{4}$ „      | $225^\circ$ | 615 „                  |
| $1\frac{1}{2}$ „      | $270^\circ$ | 623 „                  |
| $1\frac{2}{3}$ „      | $300^\circ$ | 624 „                  |

Очевидно, что часы в данном случае замедлят ход больше, нежели при сжатых штифтах, Но малые колебания дадут меньшие отставания, по сравнению с большими колебаниями.

Этот недостаток будет иметь последствием убежание часов вперед в висячем положении.

Возьмем часы, отрегулированные при этих условиях, в лежащем положении. Амплитуда колебания баланса уменьшится в висячем положении от 1,5 до 1,25 оборота и мы будем иметь суточное убежание вперед на 8 секунд. Часто случается на практике, что угол  $\gamma$  делается гораздо большим и штифты настолько близки один к другому, что оставляют мало игры, наружный виток отходит от одного из штифтов только в период самых больших колебаний; тогда замечается указанный выше недостаток хода, который очень часто приписывается другим причинам.

Существуют еще более сложные случаи, чем рассмотренные нами, но на них мы не задержимся. Рассмотренного совершенно достаточно для доказательства, что между штифтами и спиралью не должно быть игры и спираль не должна натягиваться ни в одном направлении, ни в другом.

**§ 11. Влияние внешней силы, увеличивающей крутящий момент спирали.** Теоретически баланс, колеблясь свободно под единственным влиянием спирали, находится, как мы это видели, в условиях, обеспечивающих его колебаниям изохронность.

На практике эта абсолютная свобода баланса и спирали не существует.

Другие превходящие силы в известные моменты изменяют движение этих элементов механизма и, не принимая во внимание случайных толчков, действующих кратковременно, мы видим, что даже трение кончиков (цапф) осей баланса возбуждает сопротивление движению его (которое более или менее правильно и постоянно).

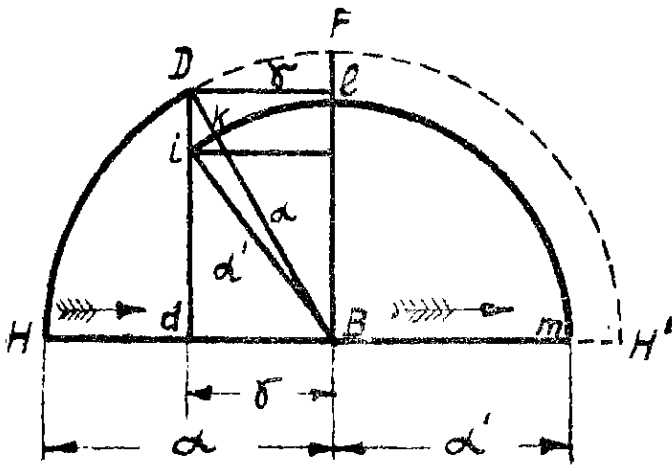
„Ход“ дает балансу при поднятии толчек в направлении его движения, при освобождении же действует против движения баланса. Мы предлагаем изучить влияния этих внешних сил на продолжительность колебания баланса, начав с изучения сил освобождения.

Для этого опять прибегаем к сравнению движения баланса с движением проекции точки, движущейся равномерно по окружности.

Линия НВН' (фиг. 12) изображает развертку в прямую пройденного пути ( $2\alpha$ ) какой нибудь точкой баланса, колеблющейся свободно. Время, необходимое ему для прохождения от точки Н до точки В, будет:

$$t = \frac{\text{пройденный путь}}{\text{скорость}} = \frac{\frac{1}{2} \pi \alpha}{\alpha \sqrt{\frac{M}{A}}} = \frac{1}{2} \pi \sqrt{\frac{A}{M}} \dots (27)$$

Предложим теперь, что выйдя из точки Н и придя в „d“, баланс получает такой толчек в обратном направлении, что полуамплитуда уменьшится от  $\alpha$  до  $\alpha'$ . Чтобы уяснить, какова при этом будет продолжительность колебания, обратимся снова к графику (фиг. 12). Движущуюся точку D заставим резко перейти из D в i по окружности  $\alpha'$ , изменяя пропорционально скорость, кото-



Фиг. 12

рая вместо  $\alpha \sqrt{\frac{M}{A}}$

примет вид  $\alpha' \sqrt{\frac{M}{A}}$  (Это

перемещение движущейся точки из одной окружности на другую, может произойти только по перпендикуляру к линии НВН' потому что следует помнить, что мы сравниваем движение баланса с проекцией кругового движения точки на прямую, и что не может быть ни разрыва, ни наложения при построении графика. Точка проходит путь из D в „K“ и очевидно, что опустив перпендикуляры из этих двухточек на прямую НВН' мы получим разрыв в проекции, что недопустимо. На следующей фигуре (фиг. 13) точка движется от D в i, тогда в проекции произойдет наложение двух дуг, что также недопустимо).

Продолжительность нисходящего полуколебания выразится так:

$$t' \text{ (нисход.)} = \frac{\text{пройденный путь}}{\text{скорость}} = \frac{\text{arc DH}}{\alpha \sqrt{\frac{M}{A}}} + \frac{\text{arc il}}{\alpha' \sqrt{\frac{M}{A}}}$$

Замечая, что дуга DH есть  $\text{arc cos } \frac{\gamma}{\alpha}$  и дуга il есть  $\text{arc Sin } \frac{\gamma}{\alpha'}$ ; мы можем написать:

$$t' \text{ (нисх.)} = \frac{\alpha \text{ arc cos } \frac{\gamma}{\alpha}}{\alpha \sqrt{\frac{M}{A}}} + \frac{\alpha' \text{ arc Sin } \frac{\gamma}{\alpha'}}{\alpha' \sqrt{\frac{M}{A}}}$$

или упрощая:

$$t' \text{ (нисх.)} = \sqrt{\frac{A}{M}} \left( \text{arc cos } \frac{\gamma}{\alpha} + \text{arc Sin } \frac{\gamma}{\alpha'} \right) . . (28)$$

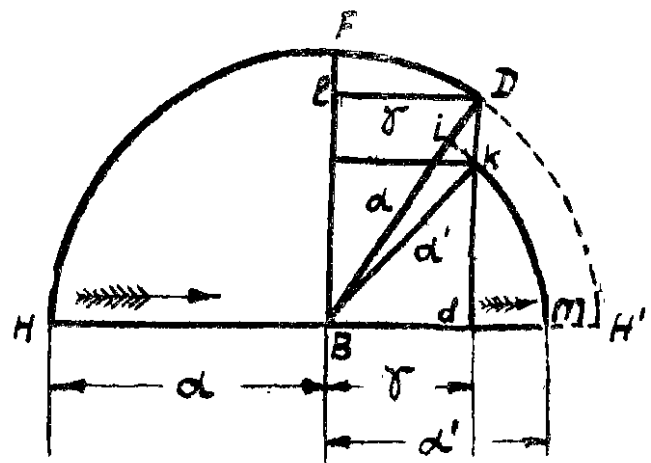
Если бы аргумент  $\arcsin$  был бы таков же как и  $\arcsin$ , то обе дуги были бы дополнительными. Дуги HD и DF составили бы вместе четверть окружности и мы вернулись бы к уравнению (27).

Уравнение (28) отличается от (27) тем, что  $\arcsin \frac{\gamma}{\alpha'}$  больше  $\arcsin \frac{\gamma}{\alpha}$  на дугу  $ik$ , следовательно,  $t'$  (нисх.) больше чем  $t$ ; иначе говоря, удар, полученный балансом в D во время нисходящего периода и в обратном направлении движению, дает увеличение продолжительности этого полукоса. Что касается полукоса следующего от B до m, то оно имеет продолжительность:

$$t = \frac{\frac{1}{2} \pi \alpha'}{\alpha' \sqrt{\frac{M}{A}}} = \frac{1}{2} \pi \sqrt{\frac{A}{M}}$$

т. е. ту же самую продолжительность, как если бы не было удара, откуда мы заключаем, что внешняя сила, прибавленная к силе спирали, имеет влияние лишь на продолжительность того полукоса, во время которого она прибавлена, но не меняет продолжительность следующего полукоса, несмотря на возможность изменения амплитуды.

Рассмотрим теперь действие толчка в обратном направлении в восходящем полукосе (фиг. 13). Баланс, приходя в d, расположенную на том же расстоянии  $\gamma$  от точки B, получает толчек, который уменьшает амплитуду этого полукоса до  $\alpha'$ . Сравниваемая движущая точка изменит скорость



Фиг. 13

$$\alpha \sqrt{\frac{M}{A}}$$

на скорость  $\alpha' \sqrt{\frac{M}{A}}$  и окружность, описанную радиусом

$\alpha$  на окружность радиуса  $\alpha'$ , т. е. перейдет из „D“ в „K“, продолжительность этого полук колебания

$$t' \text{ восх.} = \frac{\text{arc FD}}{\alpha \sqrt{\frac{M}{A}}} + \\ + \frac{\text{arc Km}}{\alpha' \sqrt{\frac{M}{A}}} = \frac{\alpha \text{ arc Sin } \frac{\gamma}{\alpha}}{\alpha \sqrt{\frac{M}{A}}} + \frac{\alpha' \text{ arc cos } \frac{\gamma}{\alpha'}}{\alpha' \sqrt{\frac{M}{A}}}$$

или

$$t' \text{ восх.} = \sqrt{\frac{A}{M}} \left( \text{arc Sin } \frac{\gamma}{\alpha} + \text{arc cos } \frac{\gamma}{\alpha'} \right) . . . (29)$$

Ясно, что  $\text{arc cos } \frac{\gamma}{\alpha'}$  (дуга km) меньше (исчисляя в долях  $\pi$ ), чем  $\text{arc cos } \frac{\gamma}{\alpha}$  (дуга DH') угла „ik“;  $t'$  — здесь меньше, чем  $t$ , т. е. удар, полученный балансом навстречу его движению во время **восходящего** периода, **уменьшает** продолжительность этого полук колебания.

Сложив продолжительность обоих полук колебаний уравнений (28) и (29), получим

$$t' \text{ нисх.} + t' \text{ восх.} = \sqrt{\frac{A}{M}} \left( \text{arc Sin } \frac{\gamma}{\alpha'} + \text{arc cos } \frac{\gamma}{\alpha} + \right. \\ \left. + \text{arc Sin } \frac{\gamma}{\alpha} + \text{arc cos } \frac{\gamma}{\alpha'} \right)$$

и так как величина в скобках — равна полуокружности, то мы имеем:

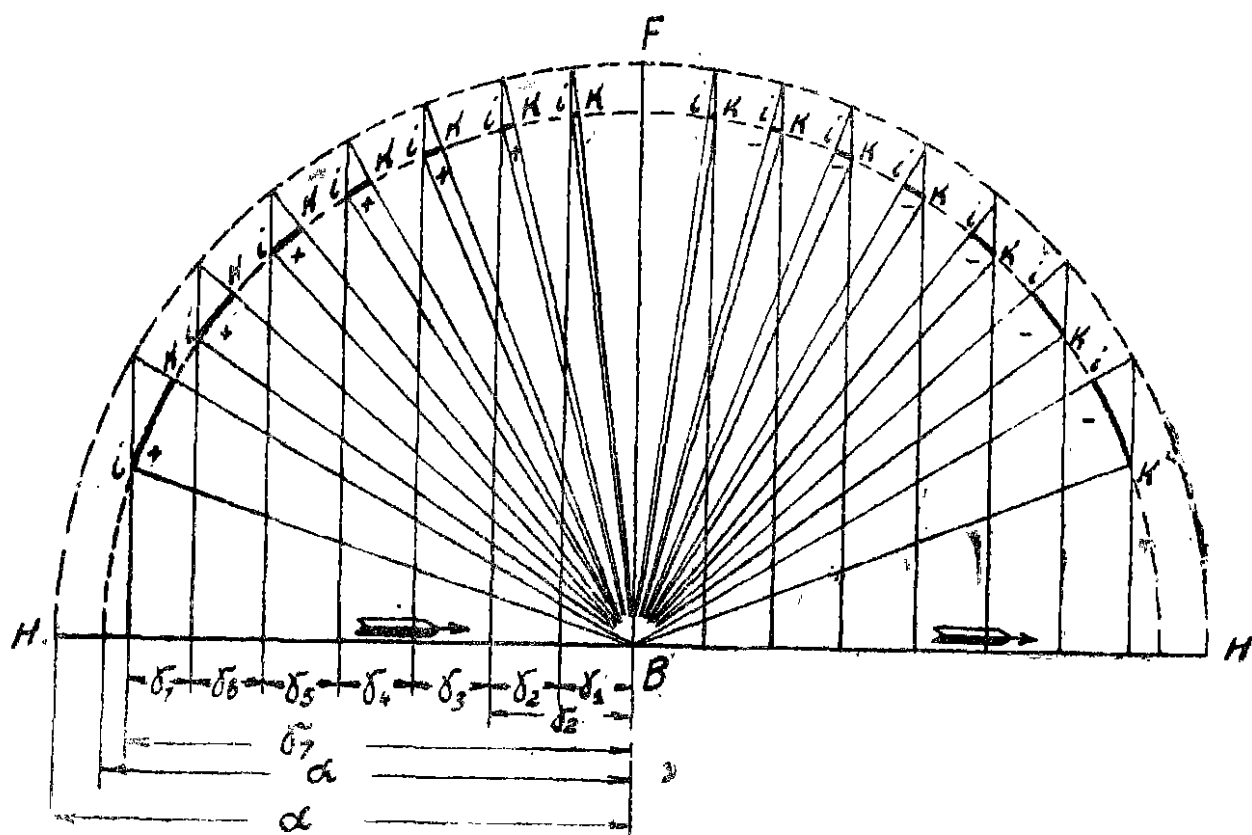
$$t' \text{ нисх.} + t' \text{ восх.} = \pi \sqrt{\frac{A}{M}}$$

Это есть продолжительность нормального колебания.

Внешняя сила, приложенная к балансу в противоположном его движению направлении во время нисходящего полук колебания или полук колебания восходящего, его замедлит в первом случае настолько, насколько ускорит во втором.

Изменяя угол  $\gamma$  в графике на фиг. 14, легко по изменениям маленькой дуги ik проследить изменения, происходящие под действием толчка в противоположном направлении. Дуга „ik“ очень большая с положительным знаком при выходе баланса из точки „H“, уменьшается по мере его приближения к точке „F“, в которой равна 0; затем она меняет знак и снова увеличивается до точки H'.

Даем графическое выражение следующего положения: Действие внешней силы, приложенной к балансу, равно 0 в мертвой точке и тем больше, чем точка приложения больше удалена от мертвой точки.



Фиг. 14

Таким образом в анкерном ходе освобождение будет влиять на ход баланса тем менее, чем ближе оно произойдет к мертвой точке.

Предположим теперь, что сила вместо того, чтобы быть направленной против движения, будет толчком по направлению движения.

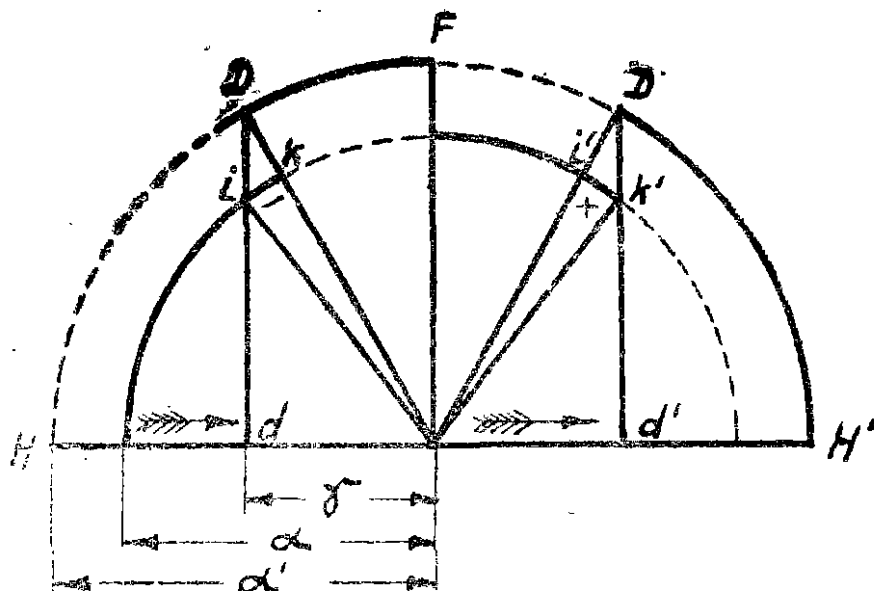
Доказательство в этом случае остается то-же, и приводит к тем же формулам (28) и (29), как и выражение продолжительности колебания. Так как здесь дополнительная сила действует в направлении движения, амплитуда увеличивается и  $\alpha'$  делается больше  $\alpha$ , откуда следует, что действие на продолжительность колебания обратно тому, которое мы видели в первом случае.

Движущаяся точка, взятая для сравнения, должна будет (фиг. 15) перескочить из точки  $i$  окружности радиуса  $\alpha$  в точку „D“ окружности радиуса  $\alpha'$ . В результате дуга  $ik$  вычитается из четверти окружности, тогда как для периода восходящего дуга  $i'k'$ , идентичная дуге  $ik$ , прибавляется к четверти окружности.

Толчек, сообщенный балансу в направлении его движения производит следующие действия:

- 1) Ускорение нисходящего полуколебания.
- 2) Замедление восходящего полуколебания.

Как и в предыдущем случае действие в мертвой точке равно нулю и тем более значительно, чем более точка приложения толчка от нее удалена.



Фиг. 15

Ясно, что если не менять угловое расстояние  $\gamma$ , а увеличивать или уменьшать угол амплитуды  $\alpha$ , то действие будет тоже самое, как при изменении в обратном направлении угла  $\gamma$ .

Таким образом, толчек, полученный балансом в обратном направлении во время нисходящего периода, на расстоя-

нии  $\gamma$  от мертвой точки, приведет к замедлению тем более заметному, чем амплитуда  $\alpha$  будет меньше.

Здесь находим объяснение факта, встречающегося в практике, что баланс, качающийся с большими амплитудами, гораздо меньше подвержен внешним влияниям, чем когда его колебания малы, т. е. он лучше регулируется.

В качестве силы, изменяющей движение баланса, мы приняли толчек. На практике эти силы действуют не так резко, но изложенная теория применяется и в этом случае.

Мы можем всегда разложить постоянную силу на известное число толчков и дойти таким образом до положения встречающегося на практике.

Впрочем, этот вопрос мы рассмотрим при изучении трения.

## § 12. Изменения, происходящие от поднятия в „ходе“.

Ход — это механизм, который сообщает балансу живую силу, уменьшенную вредными сопротивлениями и он тем более совершен, чем меньше оказывает влияния на продолжительность колебания баланса. Согласно предыдущего параграфа, влияние хода сводится к нулю только в случае, когда контакт между ходом и балансом происходит при толчке именно в мертвой точке: ни один известный нам ход не отвечает этому условию.

Рассмотрим цилиндрический ход, допуская, что баланс имеет амплитуду колебания в  $\frac{2}{3}$  оборота: угол  $\alpha = 120^\circ$ , при угле поднятия равном  $40^\circ$ , (из них  $5^\circ$  на покой и  $35^\circ$  на импульс).

Баланс, выходя из точки, отстоящей на  $120^\circ$  от мертвой точки, дойдет до точки, отстоящей от последней на  $15^\circ$ , не испытывая никаких влияний, кроме трения, — влияние которое мы рассмотрим в следующей главе.

Двигаясь от  $15^\circ$  до  $0^\circ$  он получит импульс в сторону своего движения, а следовательно — ускорение.

Пройдя мертвую точку, баланс движется под влиянием импульса, причем в восходящем периоде на протяжении  $15^\circ$  произойдет замедление, равное предыдущему ускорению, на протяжении же следующих  $5^\circ$  замедление не компенсируется.

Поднятие имеет конечной целью замедление продолжительности колебаний по той причине, что угол покоя с одной стороны мертвой точки требует импульса более продолжительного, чем с другой.

Если бы это замедление было правильным, оно не имело бы влияния на регулировку часов, но из сказанного в конце предыдущего параграфа видно, что действие дополнительного импульса на дуге в  $5^\circ$  зависит от амплитуды колебания, оно тем значительнее, чем амплитуда меньше. Иначе говоря, часы запаздывают при малых колебаниях сильнее, чем при больших, больше в висячем положении, чем в лежащем и все, что ведет за собою уменьшение амплитуды колебаний, неизбежно вызывает запаздывание в ходе часов. Поднятие в цилиндрическом ходе, давая отставание в висячем положении, дает его и в анкерном ходе, потому что поднятие в том и другом случае не распределяется равномерно по обоим сторонам мертвой точки, но с одной стороны больше, чем с другой. Мы уясним влияние этого поднятия в § 14 на численных примерах, теперь же установим только необходимые условия ограничения этого влияния до минимума.

Вот эти условия:

- 1) Сделать угол покоя возможно меньшим.
- 2) Провести угол импульса возможно ближе к мертвой точке, либо уменьшая его величину, либо увеличивая суммарную амплитуду.

Чтобы осуществить первый пункт, надо убедиться в том, что точность изготовления „хода“ позволяет уменьшить угол покоя.

Нельзя определить заранее сколько градусов он должен иметь, т. к. это зависит от точности изготовления частей хода.

Колесо, точно отфрезерованное и не имеющее эксцентриситета, обуславливает само собою разумеется меньший покой, чем колесо неточное. Для цилиндра можно допустить угол в  $5^\circ$  как минимум, и как максимум угол в  $10^\circ$  выявляет уже плохую работу.

В анкерном ходе минимум покоя, вычисленный по отношению к центру якоря, равен  $1^\circ$  и  $2^\circ$ , что является допустимым максимумом.

Чтобы определить этот угол покоя по отношению к оси баланса, надо заменить угол, вычисленный для якоря, соответствующим углом, пройденным балансом, умножая первый на отношение плеч вилки и колонштейна.

Сообразно с тем, что отношение будет  $4\frac{1}{2}$ , 4,  $3\frac{1}{2}$ , 3, угол пройденный балансом во время прохождения якорем  $1^\circ$  покоя, будет  $4\frac{1}{2}^\circ$ ,  $4^\circ$ ,  $3\frac{1}{2}^\circ$ ,  $3^\circ$  и для  $2^\circ$  покоя  $9^\circ$ ,  $8^\circ$ ,  $7^\circ$ ,  $6^\circ$ .

Мы видели кроме того, что влияние силы, которая действует на баланс, зависит от углового расстояния ее точки приложения до мертвой точки.

Если мы имеем  $2^\circ$  покоя для якоря и отношение длины вилки к плечу колонштейна 4,5, то действие покоя начнется при  $22,5^\circ$  от мертвой точки (для поднятия в  $10^\circ$  якоря) и прекращается к  $22,5^\circ - 9^\circ = 13,5^\circ$ .

Если это отношение только 3, действие начинается с  $15^\circ$  и прекращается в  $15^\circ - 6^\circ = 9^\circ$ .

Влияние угла покоя на регулировку будет во втором случае менее ощутительно, чем в первом.

Можно было-бы теперь задать вопрос: если сделать угол поднятия баланса еще меньше (принимая вышеуказанное отношение равным 2 или 1), не получим-ли мы более точную регулировку. Это можно было бы допустить, если-бы от этого не страдала точность изготовления хода.

Кроме того, надо считаться еще с инерцией якоря и колеса, влияние которой увеличивается, когда угол поднятия уменьшается. Если угол поднятия слишком велик, происходит остановка на пальце импульса при поднятии, если он напротив мал, то происходит остановка на покое. И этого одинаково следует избегать.

Угол поднятия баланса, для которого не будет остановки ни на пальце, \*) ни на покое, не одинаков для всех часов и зависит от разных обстоятельств.

Наконец, можно еще уменьшить влияние покоя, делая амплитуду колебания насколько возможно большей.

Это увеличение амплитуды не должно быть получено ни от применения слишком сильной пружины, ни от слишком малого баланса, ни уменьшением числа колебаний, потому что во всех этих случаях потерялись-бы все выгоды дальнейшей регулировки, могущие быть получены от других причин, т. е. либо от увеличения импульса и сопротивления освобождению, либо от уменьшения момента инерции или угловой скорости баланса.

Это увеличение амплитуды может дать известный эффект лишь постольку, поскольку оно может быть получено за счет

---

\*) Под пальцем следует понимать колонштейн.

уничтожения вредных сопротивлений, т. е. благодаря внимательному исполнению всех частей, в особенности хода. Падение должно быть наименьшим. Моменты инерции якоря и колеса должны быть уменьшены до минимума и баланс должен быть сконструирован так, чтобы возможно легче мог рассекал воздух.

### § 13. Влияние неуравновешенности якоря.

Необходимо ли чтобы центр тяжести якоря находился на его оси?

Этот вопрос должен быть рассмотрен с двух точек зрения.

1. Возьмем сначала часы 43 мм, якорь которых, с длинной вилкой, не уравновешен.

Пусть вес вилки равен 0,016 г и расстояние от ее центра тяжести до оси равно 3,4 мм. Ясно, что якорь будет в равновесии, если центр его тяжести будет на вертикальной прямой, проходящей через центр вращения. Максимальный момент силы, будет:

$$0,016 \cdot 3,4 = 0,0544 \text{ г мм.}$$

Крутящий момент на ходовом колесе в часах такого рода, приблизительно равен 1 г мм.

Возьмем угол затяжки в  $12^\circ$ , и приняв во внимание трение кончиков зубцов на покое якоря, получим момент притяжки к ограничителю равный 0,035 г мм.

Если часы находятся в положении, когда вес вилки действует против затяжки, очевидно притягивания не будет и копьецо будет тереть о „плато“, вследствие чего будут иметь место большие неправильности в ходе. Даже если момент силы вилки меньше момента затяжки, то и в этом случае могло бы еще получиться трение копьеца при внешних толчках.

Итак, с первой точки зрения необходимо, чтобы якорь был хотя бы приблизительно уравновешен.

2. Посмотрим теперь влияние, которое может иметь этот недостаток с точки зрения проверки.

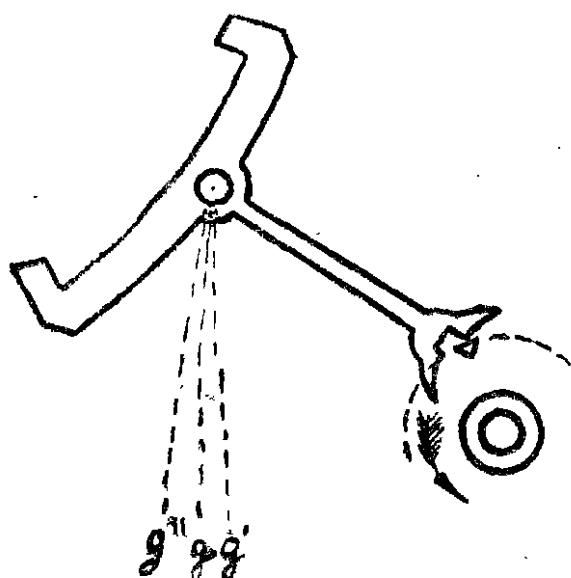
Если центр тяжести вилки находится на уровне оси якоря, когда часы висят, будет опаздывание на одном полуколебании и соответственное ускорение на другом полуколебании.

Если, центр тяжести якоря будет находиться выше или ниже оси (как на фиг. 16, где „g“ — указывает положение центра тяжести когда баланс проходит мертвую точку), то воздействия на якорь будут складываться.

Как только в нисходящем полуколебании (указанном стрелкой) „колонштейн“ достигнет вилки, момент центра тяжести будет действовать в направлении движения и уменьшит его продолжительность.

Во время восходящего полуколебания центр тяжести будет действовать в обратном направлении и снова уменьшит продолжительность качания.

В результате, от неуравновешенности якоря получится ускорение в этом положении; тогда как если повернуть часы на  $180^\circ$ , тот тот-же недостаток приведет к запаздыванию.



Фиг. 16

Если этот недостаток мал, то он практически при проверке не ощутим, как доказывает численный пример, данный в следующем параграфе.

Следует прибавить, что по новым наблюдениям Гроссмана (после опубликования его записок) излишек тяжести со стороны вилки не действует ощутительно на ход часов. Недостаток-же обратный (т. е. перевес с противоположной стороны) производит более значительные изменения в ходе.

Это происходит от того, что не только инерция якоря от этого увеличивается, но кроме того, живая сила, полученная этим перевесом с противоположной стороны от ограничителей, о которые ударяется якорь, причиняет при каждом импульсе по всей длине вилки вибрацию, вредную для правильной работы „хода“.

#### § 14. Примеры.

Мы рассмотрели в § 11 влияние внешней силы на продолжительность колебаний и установили, что это влияние имело одно и тоже значение но было различно по направлениям, смотря по тому, как действовала сила, с одной или другой стороны от мертвой точки.

Исследуем влияние силы, приложенной к балансу на расстояние „ $\alpha$ “ от мертвой точки, сначала на период нисходящий, а потом — восходящий, на том же расстоянии и в том же направлении.

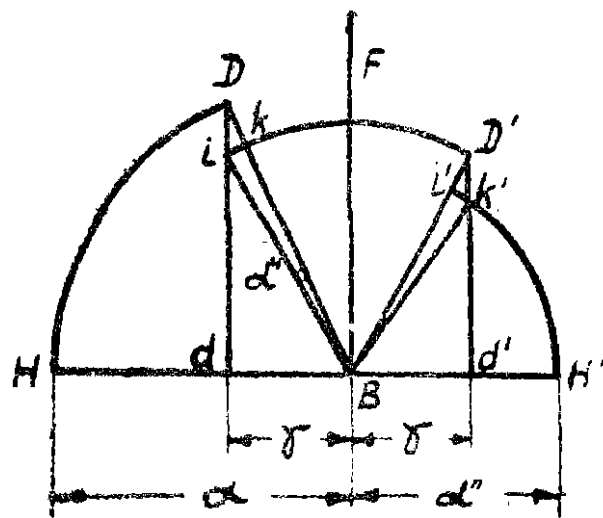
Первый толчек естественно изменяет амплитуду „ $\alpha$ “. Если новая амплитуда  $\alpha'$  опять сделалась бы равной  $\alpha$  пройдя мертвую точку, то очевидно, мы вернулись бы к § 11: оба явления компенсируются и продолжительность суммарного колебания сохраняет нормальное значение.

Допустим противное, что на самом деле на практике и происходит, а именно, что амплитуда, измененная первым толчком, сохраняет свое новое значение „ $\alpha'$ “ до второго толчка и тогда меняется снова на  $\alpha$ . Мы увидим в этом случае, что действие не вполне компенсируется.

**Пример.** Пусть баланс (фиг. 17), который вышел из точки Н в точку „В“, получает в d первый толчек, потом в d' второй толчек той-же силы и того же направления.

В точке d амплитуда изменит свое значение  $\alpha$  на „ $\alpha'$ “, а в точке d' получит значение  $\alpha''$ .

Рассмотрим то же построение, как и прежде, заставляя пройти движущуюся точку, взятую для сравнения, сначала дугу НД, затем дугу ikД' и наконец k'Н'. С одной стороны эта движущаяся точка должна будет пройти  $\frac{1}{4}$  круга + дугу „ik“, а с другой стороны  $\frac{1}{4}$  круга — дуга i'k'. Надо найти отношение этих двух дуг.



Фиг. 17

Чтобы решить задачу полностью, нам надо сначала определить значение  $\alpha'$  и  $\alpha''$ .

Живая сила баланса прошедшего расстояния от точки Н до точки В (эквивалентная затраченной работе спирали) будет в нормальном колебании (§ 7) равна  $\frac{1}{2} A\Omega^2$ ; с другой стороны эта работа может выразиться через произведение момента силы спирали на половину пройденного пути  $\frac{1}{2} \alpha$ , что составит  $\frac{1}{2} M\alpha^2$ ; следовательно мы можем написать

$$\frac{1}{2} A\Omega^2 = \frac{1}{2} M\alpha^2$$

В точке d баланс получит толчек, работа которого равна L (положительное или отрицательное значение которой берется в зависимости от того, в каком направлении по отношению к вращению баланса она взята), это выражение прибавится к  $\frac{1}{2} M\alpha^2$  и, так как живая сила баланса и его скорость в точке „В“ будут изменены одним и тем-же толчком, то первый член уравнения примет вид  $\frac{1}{2} A\Omega'^2$  и мы получим

$$\frac{1}{2} A\Omega'^2 = \frac{1}{2} M\alpha^2 + L$$

$$\Omega'^2 = \frac{M\alpha^2}{A} + \frac{2L}{A}$$

мы можем по уравнению 16 выразить скорость как функцию амплитуды:

$$\Omega'^2 = \alpha'^2 \cdot \frac{M}{A}$$

откуда сравнивая два последние выражения, получим:

$$\alpha'^2 \cdot \frac{M}{A} = \frac{M\alpha^2}{A} + \frac{2L}{A}.$$

Деля обе части этого уравнения на  $\frac{M}{A}$  получим:

$$\alpha'^2 = \alpha^2 + \frac{2L}{M}$$

или

$$\alpha' = \sqrt{\alpha^2 + \frac{2L}{M}} \dots \dots \dots (30)$$

Чтобы найти  $d''$ , достаточно рассмотреть второй толчек, полученный балансом, на амплитуде  $\alpha'$ ; нам останется лишь сделать соответствующие замены в уравнении (30):

$$\alpha'' = \sqrt{\alpha'^2 + \frac{2L}{M}}$$

или заменяя  $\alpha'^2$  равнозначущей величиной получим:

$$\begin{aligned} \alpha'' &= \sqrt{\left(\alpha^2 + \frac{2L}{M}\right) + \frac{2L}{M}}; \\ \alpha'' &= \sqrt{\alpha^2 + \frac{4L}{M}} \dots \dots \dots (31) \end{aligned}$$

Зная  $\alpha'$  и  $\alpha''$  нам останется лишь вычислить  $t'$  нисходящее и  $t'$  восходящее по формулам (28) и (29).

### Численные примеры.

#### Пример 1.

Возьмем тот-же баланс, с тою же самою спиралью, которые нам служили в предыдущих примерах; момент инерции баланса  $A = 0,00416$  и момент упругости спирали  $M = 1,027$ .

$$\text{Пусть } \alpha = 180^\circ = 3,1416$$

$$\gamma = 50^\circ = 0,8727$$

$$L = -0,8 \text{ мг/м} \quad (\text{отрицательно, т. е. толчек в обратном направлении})$$

Из уравнения (30) получим

$$\alpha' = \sqrt{\alpha^2 - \frac{2L}{M}} = \sqrt{9,87 - \frac{2 \cdot 0,8}{1,027}}$$

или

$$\alpha' = 2,883$$

и

$$\alpha'' = \sqrt{\alpha^2 - \frac{4L}{M}} = \sqrt{9,87 - \frac{4 \cdot 0,8}{1,027}}$$

или

$$\alpha'' = 2,598$$

Остается лишь вычислить продолжительность нисходящего полук колебания (28) и восходящего полук колебания (29). Формула (28) дает:

$$t' \text{ нисх.} = \sqrt{\frac{A}{M}} \left( \arccos \frac{\gamma}{\alpha} + \arcsin \frac{\gamma}{\alpha'} \right)$$

Подставляя численные значения, получим

$$\begin{aligned} t' \text{ нисх.} &= 0,0637 \cdot \left( \arccos \frac{0,8727}{3,1416} + \arcsin \frac{0,8727}{2,8830} \right) = \\ &= 0,0637 \cdot (1,5967) = 0,1017 \text{ сек.} \end{aligned}$$

Нормальное полук колебание должно продолжаться 0,1 сек.; это же полук колебание продолжится на 0,0017 сек. больше.

Кроме того, вычитая значение четверти окружности 1,5708 из величины 1,5967, мы можем найти значение дуги  $ik$  (фиг. 17), соответствующее 0,0259 или  $1^\circ 27'$ .

Для восходящего полук колебания продолжительность

$$\begin{aligned} t' \text{ восх.} &= \sqrt{\frac{A}{M}} \left( \arcsin \frac{\gamma}{\alpha'} + \right. \\ &\left. + \arccos \frac{\gamma}{\alpha''} \right) = 0,0637 \left( \arcsin \frac{0,8727}{2,883} + \arccos \frac{0,8727}{2,598} \right) = \\ &= 0,0637 (1,5358) = 0,0978 \text{ сек.} \end{aligned}$$

иначе говоря на 0,0022 менее чем нормальная продолжительность

Значение дуги  $i' k'$  будет здесь

$$1,5358 - 1,5708 = -0,035 = -2$$

Мы видим, чтобы оба влияния действующие на равных расстояниях от мертвой точки, сначала во время нисходящего периода, а затем во время восходящего периода, не компенсируются полностью.

Запаздывание в первом периоде меньше, чем опережение во втором и в конечном результате получается опережение.

Здесь  $L$  и  $\gamma$  взяты для примера очень большими, чтобы сделать пример более разительным. На практике эти величины в большинстве случаев значительно меньше (как покажут следующие примеры) и разницей между двумя влияниями можно пренебречь.

## Пример 2.

Расчет действия импульса в анкерном ходе на продолжительность колебания баланса, допуская, что этот импульс одинаково отнесен к двум равноотстоящим положениям от мертвой точки.

Давление, оказываемое вилкой на колонштейн равно 0,12 г при расстоянии от колонштейна до оси баланса равном 1,5 мм, момент этого давления  $p = 0,12 \cdot 1,5 = 0,18$  и работа этого давления (за время прохождения угла  $\gamma$ )  $L = p\gamma$ ; формулы (30) и (31) примут вид:

$$x' = \sqrt{x^2 + \frac{2p\gamma}{M}}; \quad x'' = \sqrt{x^2 + \frac{4p\gamma}{M}} \dots (32)$$

(Мы рассматриваем работу импульса, как приложенного в одной точке на расстоянии  $\gamma$  от мертвой точки, в действительности же он действует последовательно на протяжении всего пути угла  $\gamma$ . Но ошибка настолько мала, что не меняет численные результаты, вследствие чего вычисления делаются значительно проще).

Возьмем те же данные, что и для предыдущего примера. Исключая  $\gamma$ , значение которого для  $10'$  будет равняться 0,1745, мы получим:

$$x' = \sqrt{9,87 + \frac{2 \cdot 0,18 \cdot 0,1745}{1,027}} = 3,1512;$$

$$x'' = \sqrt{9,87 + 0,122} = 3,1607$$

согласно (29) продолжительность нисходящего полуколебания будет:

$$t' \text{ нисх.} = 0,0637 \left( \arccos \frac{1745}{31416} + \arcsin \frac{1745}{31512} \right) = \\ = 0,0637 \cdot (1,57063).$$

Видно, что величина в скобках, представляющая дугу, пройденную движущимся телом, взятым для сравнения, на 0,00017 меньше, чем длина дуги соответствующая  $1/4$  окружности.

Для восходящего полуколебания

$$t' \text{ восх.} = 0,0637 \left( \arcsin \frac{1745}{31512} + \arccos \frac{1745}{31607} \right) = \\ = 0,0637 \cdot (1,57096).$$

Здесь длина дуги больше, чем длина дуги соответствующая  $\frac{1}{4}$  окружности, на 0,00016. Не достаёт 0,00001 для того, чтобы обе дуги компенсировались.

Отсюда видно, что импульс, симметричный с двух сторон от мертвой точки, укорачивает нисходящий период более, чем удлиняет восходящий. Следовательно в результате получается убежание вперед, которое будет:

$$0,0637 \cdot 0,00001 = 0,000.000.637 \text{ сек.}$$

Помножая это число на 432000, чтобы найти убежание вперед в течение суток, мы получим приблизительно 0,3 сек., т. е. величину незначительную и которой можно пренебречь потому, что она остается приблизительно постоянной.

### Пример № 3.

Рассмотрим теперь импульс, распределенный не равномерно по сторонам от мертвой точки, а как это имеет место в действительности, более продолжительный в восходящем периоде.

Так как за тот-же самый путь действие импульса с обеих сторон от мертвой точки не влияет существенно на продолжительность колебаний, мы его сейчас не будем рассматривать, а займемся дополнительной частью импульса, которая имеет место во время дуги покоя восходящего полукосебания.

Пусть  $\beta$  — угловое расстояние, где начинается покой, и  $\gamma$  — расстояние где он кончается; угол покоя будет  $\gamma - \beta$  и обозначая, как в предыдущем примере через  $p$  момент силы импульса на балансе по формуле (30) получим:

$$\alpha' = \sqrt{\alpha^2 + \frac{2p(\gamma - \beta)}{M}} \dots \dots \dots (33)$$

Раз нам известно  $\alpha'$ , мы вычислим при посредстве (29) отставание в восходящем полукосебании.

Вот результаты, полученные из того же самого примера для различных амплитуд колебаний, при сохранении силы импульса  $p$  — постоянной.

Мы возьмем:

$$\gamma = 20^\circ = 0,3491 \text{ и } \beta = 14^\circ = 0,1444$$

| Амплитуды           | $\alpha$    | Отставание<br>в 24 часа |
|---------------------|-------------|-------------------------|
| $\frac{1}{3}$ обор. | $60^\circ$  | 151,0 сек.              |
| $\frac{2}{3}$ "     | $120^\circ$ | 18,5 "                  |
| 1 "                 | $180^\circ$ | 5,6 "                   |
| 1,25 "              | $225^\circ$ | 2,7 "                   |
| 1,5 "               | $270^\circ$ | 1,6 "                   |

Эти цифры нам показывают, что влияние импульса значительно, когда амплитуда колебаний мала, и быстро уменьшается, когда амплитуда колебания превосходит 1 оборот. Таким образом в нашем примере предположим, что при перемене положения с горизонтального на вертикальное, амплитуда уменьшится с 1,5 оборотов на 1,25; суточное отставание, происходящее отсюда будет: 1,1 сек.

Тут мы рассматривали силу импульса, как постоянную, т. е. что изменение амплитуды колебания могло происходить лишь от вредных сопротивлений.

Если, наоборот, изменение амплитуд колебаний происходит от изменения силы импульса, результаты будут другие, формула примет вид:

$$\alpha' = \sqrt{\alpha^2 + \frac{2p'(\gamma - g)}{M}} \dots \dots \dots (34)$$

Где  $\alpha'$  и  $p'$  меняются одновременно. Таким образом в вышеприведенном примере уменьшим  $p$  с 180 до 40 миллиграмм в то время как  $\alpha$  уменьшим от  $270^\circ$  до  $60^\circ$  — получим следующий результат:

| Амплитуда       | $\alpha$    | Отставание<br>в 24 часа |
|-----------------|-------------|-------------------------|
| 1,5 обор.       | $270^\circ$ | 1,6 сек.                |
| 1,25 „          | $225^\circ$ | 2,2 „                   |
| 1 „             | $180^\circ$ | 3,7 „                   |
| $\frac{2}{3}$ „ | $120^\circ$ | 8,2 „                   |
| $\frac{1}{3}$ „ | $60^\circ$  | 34,0 „                  |

Мы видим отсюда, что когда амплитуда колебания меняется, вследствие пропорционального изменения движущей силы, влияние поднятия на ход часов гораздо менее ощутительно, чем при изменении амплитуды от других причин.

#### Пример № 4.

#### Действие неуравновешенного якоря на продолжительность колебания.

Пусть  $p$  — вес якоря с вилкой,  $r$  — расстояние от центра тяжести  $g$  до оси  $O$  якоря (фиг. 18).

$\lambda$  — угол, на который отклоняется центр тяжести в крайних положениях якоря.

Сила  $p$  — соответствующая весу якоря, действуя по  $g'n$  разлагается на две других силы  $g'a$  и  $g'v$  из которых одна сила  $g'a = f$  есть та, которая стремится вернуть центр тяжести якоря в точку  $g$ .

Треугольники  $Og's$  и  $g'an$  — подобны и мы получим:

$$\frac{Oc}{cg'} = \frac{g'n}{g'a}$$

откуда

$$g'a = \frac{cg' \cdot g'n}{Oc}$$

угол  $\lambda$  очень мал, а потому мы можем линию  $cg'$  принять за дугу

$$gg' = \lambda r$$

так-же допустим, что

$$Oc = r$$

тогда получим

$$g'a = f = \frac{\lambda r p}{r} = \lambda p$$

момент этой силы будет  $\lambda r p$

Момент силы уменьшается по мере приближения  $g'$  к  $g$  и равняется нулю в этой точке, следовательно среднее значение момента будет  $= \frac{\lambda r p}{2}$  и работа  $L$

равна произведению этого момента на пройденный путь  $\lambda$ , т. е.

$$L = \frac{1}{2} \lambda^2 r p$$

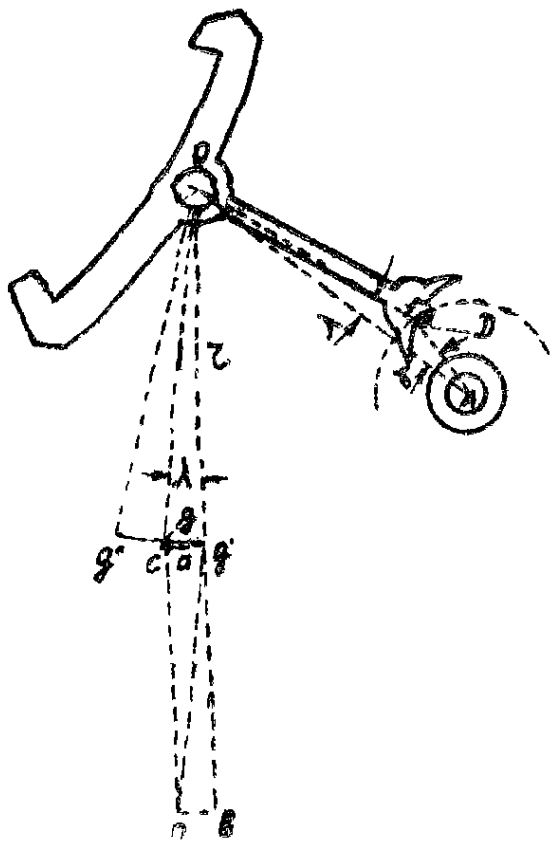
Угол  $\lambda$  — угол поднятия якоря; чтобы вычислить действие вышеуказанной работы на движение баланса, надо ее отнести к оси баланса, заменяя  $\lambda$  через соответствующий угол  $\gamma$  — описанный балансом.

Углы  $\lambda$  и  $\gamma$  обратно-пропорциональны плечам вилки и колонштейна

$$\frac{\lambda}{\gamma} = \frac{AD}{OD}$$

или, обозначая  $k = \frac{AD}{OD}$  получаем

$$\frac{\lambda}{\gamma} = k$$



Фиг. 18

откуда

$$\lambda = k \gamma$$

и работа

$$L = \frac{1}{2} k^2 \gamma^2 p r$$

Это есть значение  $L$  в формуле 30, значение положительное, потому что эта сила действует в направлении движения якоря, значит:

$$\alpha' = \sqrt{\alpha^2 + \frac{p r k^2 \gamma^2}{M}} \dots \dots \dots (35)$$

Начиная от мертвой точки эта сила действует уже в обратном направлении; она делается отрицательной и мы имеем

$$\alpha'' = \sqrt{\alpha'^2 - \frac{p r k^2 \gamma^2}{M}}$$

или

$$\alpha'' = \alpha$$

т. е. в конце концов амплитуда колебания не изменяется, но изменяется продолжительность колебаний, потому что если мы вернемся к формулам 28 и 29 мы получим:

$$t' \text{ нисх.} = \sqrt{\frac{A}{M}} \left( \arccos \frac{\gamma}{\alpha} + \arcsin \frac{\gamma}{\alpha'} \right)$$

$$t' \text{ восх.} = \sqrt{\frac{A}{M}} \left( \arcsin \frac{\gamma}{\alpha'} + \arccos \frac{\gamma}{\alpha} \right)$$

Мы видим, что обе формулы идентичны, потому что как было в § 13, влияние должно быть то-же самое в обоих полуколебаниях.

### Численный пример.

Возьмем для  $p$  и  $r$  численные величины из § 13,

$$\alpha = 180^\circ = 3,1416, \quad k = \frac{1}{4};$$

$\lambda = 5^\circ$  и следовательно

$$\gamma = 20^\circ = 0,3491.$$

$\alpha'$  получает следующее значение:

$$\alpha' = \sqrt{9,86965 + \frac{0,016 \cdot 3,4 \cdot \frac{1}{16} \cdot 0,1219}{1,027}}$$

$$\alpha' = 3,14167$$

и продолжительность колебания

$$T = 2t' = 2 \cdot 0,0637 \left( \arcsin \frac{0,3491}{3,14167} + \arccos \frac{0,3491}{3,1416} \right)$$

Разница между величиной в скобках и длиной дуги  $\frac{1}{4}$  окружности будет на 0,0000002 менее и продолжительность T-целого колебания будет менее на  $2 \cdot 0,0637 \cdot 0,0000002$ , т. е. на 0,000000026 сек., что дает, помножая на 432000, убежание вперед на 0,11 сек. в сутки.

Если повернуть часы на пол-оборота, то вместо убежания будет отставание, так что изменение в ходе между этими двумя положениями дойдет до 0,22 сек. в сутки.

### Пример № 5.

#### Влияние освобождения.

Энергию, которую нужно затратить на освобождение якоря, можно разбить на два слагаемых: 1) энергия, необходимая чтобы систему якорь-вилка из состояния покоя привести в движение и 2) преодолеть силу давления зубца колеса на плоскость покоя и возникающую при этом силу трения.

Для первой части; если мы назовем через  $\omega$  — угловую скорость баланса в момент, когда колонштейн достигнет вилки и через  $\omega'$  — уменьшенную скорость баланса после освобождения, мы увидим, что скорость, полученная якорем, будет этой последней скоростью  $\omega'$  помноженной на отношение  $k$ , т. е.  $k\omega'$ ; и работа затраченная на вилку для сообщения ей этой скорости будет (см. § 7) эквивалентна ее живой силе, т. е.  $\frac{1}{2} m k^2 \omega'^2$  (обозначая через  $m$  момент инерции вилки).

Второе слагаемое энергии будет произведение момента силы освобождения  $d$  на угол освобождения (отнесенный к оси баланса  $\beta$ ), т. е.  $d\beta$ , суммарная работа освобождения:

$$L = -\frac{1}{2} m \omega'^2 k^2 - d\beta$$

Работа взята с отрицательным знаком, так как сила производящая ее действует в направлении обратном движению баланса. Подставляя это значение в уравнение, предшествующее формуле (30) и дающее выражение для  $\alpha'^2$  мы получим:

$$\alpha'^2 = \alpha^2 - \frac{m \omega'^2 k^2}{M} - \frac{2d\beta}{M} \dots \dots \dots (36)$$

Увеличение скорости баланса при прохождении угла  $\gamma$  очень мало и мы можем в вышеприведенном уравнении им

пренебречь, заменив  $\omega'$  скоростью баланса в мертвой точке  $= \dot{\varphi}'$ .  
С другой стороны, мы имеем из формулы (16)  $\dot{\varphi}' = \alpha' \sqrt{\frac{M}{A}}$   
или  $\dot{\varphi}'^2 = \alpha'^2 \frac{M}{A}$  и подставляя в уравнение (36) имеем:

$$\alpha'^2 = \alpha^2 - \frac{m k^2}{M} \cdot \alpha'^2 \cdot \frac{M}{A} - \frac{2d\beta}{M}$$

или

$$\alpha'^2 = \alpha^2 - \frac{m k^2}{A} \cdot \alpha'^2 - \frac{2d\beta}{M}$$

и, наконец, извлекая корень, получаем:

$$\alpha' = \sqrt{\frac{\alpha^2 - \frac{2d\beta}{M}}{1 + \frac{m k^2}{A}}} \dots \dots \dots (37)$$

Продолжительность колебания выводится из уравнений (28) и (29).

### Численный пример.

Возьмем  $\lambda = 20^\circ = 0,3491$ ; отношение плеча колонштейна к плечу вилки  $k = \frac{1}{4}$ ; вес якоря и вилки равен 0,0374 г.; радиус вращения вилки равен 3 мм; момент силы освобождения, отнесенный к оси якоря, равен 0,035 г мм и этот же момент, отнесенный к оси баланса, равен  $\alpha = 0,035 \cdot \frac{1}{4} = 0,009$ . Угол освобождения отнесенный к оси баланса

$$\beta = 6^\circ = 0,1047 \text{ и } \alpha = 180^\circ = 3,1416.$$

Момент инерции системы якорь—вилка примет вид (§ 4)

$$m = \frac{0,0374 \cdot 9}{9808,8} = 0,000034$$

при

$$\alpha^2 = 9,86965$$

мы имеем для  $\alpha'$ :

$$\alpha' = \sqrt{\frac{9,86965 - \frac{0,001885}{1,027}}{1 + \frac{0,000002}{0,00416}}} = 3,1406$$

Вычислим  $t'$  по формуле (28):

$$t'_{\text{нисх.}} = 0,0637 \left( \arccos \frac{0,3491}{3,1416} + \arcsin \frac{0,3491}{3,1406} \right)$$

Разность между величиной в скобках и четвертью окружности равна 0,00004.

Продолжительность одного колебания увеличивается на  $0,637 \cdot 0,00004 = 0,0000025$  и запаздывание в сутки будет в 43.2000 раз больше, т. е. 1,1 сек.

---



## Г Л А В А III.

### Влияние трения.

#### § 15. Влияние трения в цапфах баланса на продолжительность колебаний.

Вопрос о трении, несмотря на всестороннее изучение его, до настоящего времени все-же еще недостаточно освещен. Это зависит от того, что в часовом деле (особенно при изучении функции столь миниатюрных частей, как цапфы баланса и хода) трение рассматриваемое, как сопротивление скольжению двух твердых тел одного по другому, осложняется слипанием их, происходящим от смазки.

Влияние смазки для частей мелких механизмов превосходит даже влияние трения. Если трение изучено до конца со всеми его последствиями, то этого нельзя сказать по отношению к смазке в смысле ее вязкости, густоты и т. д.

В этом вопросе нет достаточных опытных данных. Результаты испытаний разноречивы, а расчеты, произведенные многими авторами, не кажутся достаточно убедительными. Когда имеют ввиду только трение, то расчеты показывают, как мы увидим дальше, что его влияние на продолжительность колебания баланса равняется нулю.

Вязкость смазки, как это уже доказано, изменяет продолжительность колебания на такие малые величины в сравнении с другими причинами изменения регулировки, что ими можно пренебречь.

Надо заметить, что влияние трения только тогда не оказывает ощутительного влияния на продолжительность колебания баланса и спирали, если последние движутся свободно, вне других внешних влияний, колеблясь, например, между двух платин без других механизмов и без хода.

Если возьмем баланс в соединении с ходом, то трение будет влиять ощутительно и может быть точно рассчитано: оно дает отставание в ходе часов.

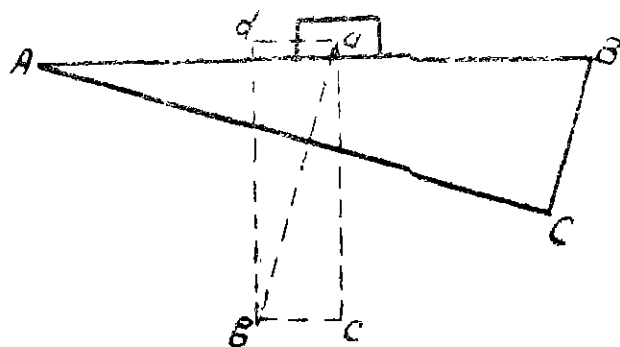
Рассмотрим методику изучения вредных влияний на ход часов начиная с трения. Этот вопрос был подробно рассмотрен в *Journal Suisse d'horlogerie* (швейцарский журнал по часовому

делу — 8 и 9 год изд.); мы напомним главные законы и исследуем влияние факторов, определяющих эти законы, на продолжительность колебания баланса. Вот эти законы:

- 1) Трение прямо пропорционально давлению одного трущегося тела на другое.
- 2) Оно не зависит от величины трущихся поверхностей.
- 3) Оно не зависит от скорости.

Кроме того, трение зависит от материала трущихся поверхностей, а потому мы в вычислениях введем коэффициент, который для каждого материала различен и который мы определим.

На фиг. 19 мы, постепенно, наклоняя плоскость АВ, подойдем к моменту, когда составляющая сила трения  $F = ad$  будет равна составляющей  $ac$ ; обозначая  $ac = db = P$  напишем:



Фиг. 19.

$$\frac{cb}{ac} = \frac{F}{P}$$

где  $\frac{F}{P}$  называется коэффициентом трения, обозначим его через  $f$ . Из подобия треугольников  $acb$  и  $ACB$  мы получаем.

$$\frac{cb}{ac} = \frac{CB}{AC} = f$$

т. е. определяя опытным путем предельный наклон плоскости АВ, при котором тело начинает скользить и взяв  $\operatorname{tg} \angle BAC$ , получим искомый коэффициент.

**Численный пример.** На стальную наленую полированную пластинку кладем рубин, поднимаем один край пластины до тех пор, пока рубин не начнет скользить. Высота ВС, на которую нужно поднять край пластины, в среднем 13,4 мм, при длине основания  $AC = 89$  мм, коэффициент трения рубина по стали будет:

$$f = \frac{13,4}{89} = 0,15$$

число, которое мы примем в наших дальнейших вычислениях

## § 16. Работа трения в цапфах баланса при горизонтальном расположении его оси.

В положении покоя баланса (при горизонтальном расположении его оси) цапфа лежит в наиболее низкой точке отверстия, когда баланс приходит в движение, то цапфа, вследствие



Возьмем

$$BC = 15$$

и

$$AC = 100$$

откуда

$$F = 0,15 \frac{100}{\sqrt{10000 + 225}} \quad p = 0,1483 \text{ р.}$$

Работа  $L$  трения будет

$$L = \lambda r F$$

где  $F$  — сила трения, ее момент  $Fr$  — где  $r$  — радиус цапфы и  $\lambda$  — угол поворота баланса. Заменяя  $F$  значением, найденным выше получим

$$L = 0,1483 \lambda r p \dots \dots \dots (36)$$

Работа трения в цапфах баланса прямо пропорциональна амплитуде колебания, радиусу цапф и весу баланса. Отсюда видно, что если при данной движущей силе, увеличить диаметр цапф или вес баланса, то тем самым пропорционально уменьшится амплитуда колебания.

Мы вели рассуждение об одной цапфе, но формула определяет работу двух цапф, так как мы брали полный вес баланса и, как мы видели в § 15, трение зависит только от давления, а не от величины трущихся поверхностей.

#### § 17. Работа трения в цапфах баланса при вертикальном расположении его оси.

Здесь весь вес баланса давит на конец цапфы, выражение  $P$  формулы (36) делается равным весу баланса, т. е.  $p$ ; и мы имеем:

$$F = fp$$

Работа трения будет равна произведению из силы  $F$  на пройденный путь. Пройденный путь неодинаков во всех точках трущейся поверхности, так как равняется нулю в центре и достигает макс. на окружности.

Чтобы получить среднее, мы разобьем эту поверхность на число „ $n$ “ секторов, достаточно малых, для того, чтобы внешнюю дугу каждого из секторов можно было принять за прямую. Давление, оказываемое на каждый сектор  $\frac{P}{n}$  — будет приложено в центре тяжести каждого из полученных треугольников.

Пройденный центром тяжести путь каждого треугольника будет:  $\frac{2}{3} R\lambda$ ; работа трения для каждого треугольника будет

$$L = \frac{2}{3} R\lambda \cdot \frac{P}{n} \cdot f,$$

а для всей поверхности цапфы в „n“ раз более:

$$L = \frac{2}{3} R \lambda p f.$$

Мы обозначим через R радиус трущейся поверхности.

Т. к. конец цапфы слегка закругляют, то в этом случае можно рассматривать радиус трущейся поверхности равным половине радиуса цапфы „r“, формула тогда примет вид:

$$L = \frac{2}{3} \cdot \frac{r}{2} \cdot \lambda p f$$

заменяя f — равнозначущей величиной 0,15 получим

$$L = 0,05 r \lambda p \dots \dots \dots (37)$$

Сравнивая формулы (36) и (37) мы видим, что трение цапф в горизонтальном положении часов приблизительно в три раза меньше, чем в вертикальном положении.

Впрочем практические данные значительно разнятся от этих цифр по причине вязкости масла, сопротивления воздуха и пр.

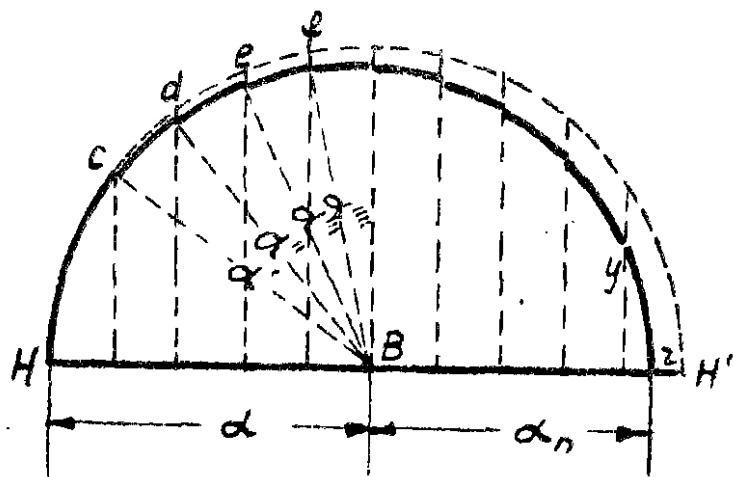
Дальше мы увидим, что при регулировке незачем вдаваться в подробный анализ этих вредных сопротивлений; мы их сгруппируем в одно легко вычисляемое выражение.

## § 18. Математическое определение влияния трения на продолжительность колебаний баланса.

Вычисления будем вести аналогично § 14, рассматривая трение, как силу, противодействующую движению баланса.

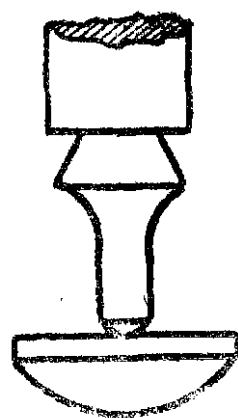
Сила трения действует непрерывно, но мы условимся ее рассматривать как ряд толчков (на равных расстояниях по амплитуде  $\alpha$ ).

Мы разделим линию НВН' (фиг. 22) на некоторое число



Фиг. 22

равных частей. Потом мы вычислим для каждой части, при помощи формул (30 и 31) новый уменьшенный трением угол амплитуды. Имея последовательные значения  $\alpha'$ ,  $\alpha''$ ,  $\alpha'''$  . . .  $\alpha_n$ , найденные как радиусы, мы начертим ряд дуг Нс, cd, de, ef, . . . yz, которые определяют путь движущегося тела, взя-



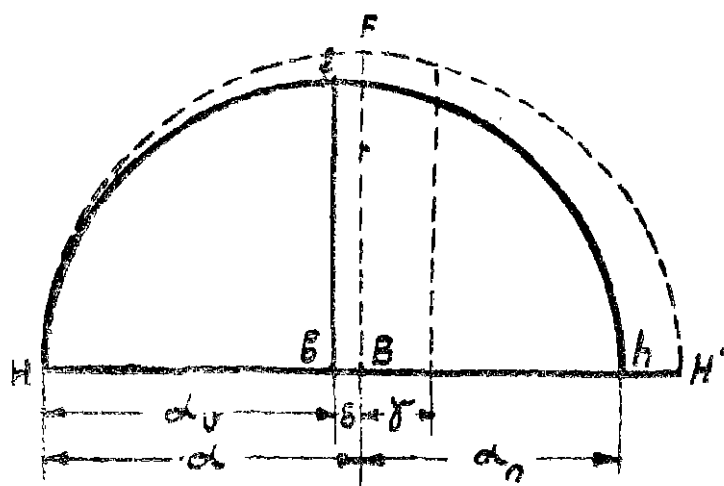
Фиг. 21

того для сравнения, проекция этого пути на линии  $НВН'$  даст действительное движение баланса. Увеличивая число делений  $\alpha$ , мы ближе подойдем к действительности.

Из фиг. 22 видно, что увеличивая число делений до бесконечности, мы получим плавную кривую, которую мы примем за дугу окружности среднего радиуса между полуамплитудой  $\alpha$  в начале и  $\alpha_n$  в конце колебания.

Центр „в“ этой полуокружности будет мертвой точкой баланса, т. е. следствием трения явится перемещение мертвой точки из „В“ в „в“ в направлении обратном движению баланса, на величину „ $\delta$ “, равную половине разности полуамплитуд восходящей и нисходящей (сравните Ивон Виларсо: исследования движений и компенсации хронометров).

Очевидно, что приняв „в“ как мертвую точку, и полуокружность радиуса  $\alpha_v$ , как путь тела, взятого для сравнения,



Фиг. 23

получим восходящее и нисходящее полуколебания в точности одинаковой продолжительности.

Напротив, если на расстоянии „ $\gamma$ “ от „В“, например, направо, подействует какой-то толчек на баланс, то расстояние точки приложения этого толчка до мертвой точки увеличивается на величину „ $\delta$ “

и, согласно § 13, влияние толчка на продолжительность колебания будет более значительно.

Если мы теперь рассмотрим последствия толчков на ход анкерных или цилиндрических часов, мы увидим, что чем больше увеличивается трение, тем больше смещается мертвая точка, а также увеличивается расстояние  $\gamma = \delta$ , на котором импульс не компенсируется. Увеличение трения будет иметь последствием отставание в анкерных или цилиндрических часах.

### Численный пример:

Возьмем данные, послужившие для примера 3 § 14. Допустим, что амплитуда колебания баланса под влиянием трения уменьшилась с первоначальных  $1\frac{1}{2}$  оборотов до  $\frac{2}{3}$  оборота. Как мы видели в предыдущем § работа трения зависит от произведения пройденного угла на некоторые факторы, как напр. коэффициент трения, радиус цапф и вес баланса.

Чтобы обобщить вопрос, обозначим сумму этих факторов через коэффициент „С“, таким образом работа трения будет:

$$L = \alpha C \dots \dots \dots (38)$$

Взяв половину амплитуды  $\alpha$  за угол пройденный балансом, найдем численное значение для „С“ и затем определим уменьшение амплитуды.

Формула (32):

$$\alpha' = \sqrt{\alpha^2 + \frac{2 p \gamma}{M}}$$

нам служила для определения увеличения амплитуды колебания под действием импульса хода. С другой стороны, для определения уменьшения амплитуды под влиянием трения во время одного периода, в формуле (30) заменяем „L“ его значением из формулы (38), взяв его отрицательным, так как эта работа противодействует движению баланса. Таким образом:

$$\alpha' = \sqrt{\alpha^2 - \frac{2 C \alpha}{M}}$$

и принимая во внимание одновременность действия трения и импульса, получим:

$$\alpha' = \sqrt{\alpha^2 + \frac{2 p \gamma}{M} - \frac{2 C \alpha}{M}} \dots \dots \dots (39)$$

Говоря, что амплитуда упала до  $\frac{2}{3}$  оборота, мы утверждаем, что это постоянный и нормальный режим, при котором при каждом колебании импульс, даваемый ходом, компенсируется работой трения, так что  $\alpha' = \alpha$ , т. е., что уравнение (39) примет вид:

$$\alpha' = \sqrt{\alpha^2}$$

Для получения этого результата необходимо, чтобы в уравнении (39) под корнем выражения второе и третье были равны между собой, т. е.

$$\frac{2 p \gamma}{M} = \frac{2 C \alpha}{M}$$

или

$$p \gamma = C \alpha \dots \dots \dots (40)$$

Надо заметить, что в формуле (32) „ $\gamma$ “ представляет угол импульса, разделенный мертвой точкой пополам, что для анкерного хода невозможно (вследствие наличия угла покоя). Также как в примере 3, и здесь суммарный импульс равен  $\beta + \gamma$  и

так как  $\alpha$  представляет собою полуамплитуду, то и для полупульса мы имеем:

$$\frac{\gamma + \beta}{2}$$

Уравнение примет вид:

$$p \frac{\gamma + \beta}{2} = C \alpha$$

откуда

$$C = \frac{p (\gamma + \beta)}{2 \alpha} \dots \dots \dots (41)$$

Эта формула позволяет нам вычислить трение при данной амплитуде и наоборот. Взяв для  $p, \gamma, \beta$ , те же данные, как и в § 14, мы получим:

$$p = 0,18; \gamma = 0,3491; \beta = 0,2443, \alpha = 2,0944.$$

Эти данные соответствуют суммарной амплитуде  $2/3$  оборота. Откуда:

$$C = \frac{0,18 (0,3491 + 0,2443)}{2 \cdot 2,0944} = 0,0255$$

Теперь нам надо найти насколько мертвая точка сместится вследствие трения, т. е. определить величину „ $\delta$ “. Мы видели, что это смещение равно половине уменьшения амплитуды, вследствие трения, т. е.

$$\delta = \frac{\alpha - \alpha_n}{2} \dots \dots \dots (42)$$

Вычислим  $\alpha_n$  по формуле (30) заменяя „ $L$ “ ее значением „ $C\alpha$ “ из (38), т. е.

$$\alpha_n = \sqrt{\alpha^2 - \frac{2 C \alpha}{M}}$$

или численно

$$\alpha_n = \sqrt{2,0944^2 - \frac{2 \cdot 0,0255 \cdot 2,0944}{1,027}} = 2,0695$$

и

$$\delta = \frac{2,0944 - 2,0695}{2} = 0,0125$$

или  $0^\circ 43'$ .

Мертвая точка смещена по отношению к Н фиг. (24),

Ясно, что и углы поднятия, которые компенсируются с одной и с другой стороны этой точки, изменяются. Угол поднятия делается в нисходящем полукколебании равным  $\beta - \delta$ , и компенсируется в восходящем полукколебании углом  $\beta - \delta$ , так что часть некомпенсируемая, которая только и влияет на продолжительность колебания, делается равной

$$\gamma + \beta - 2(\beta - \delta)$$

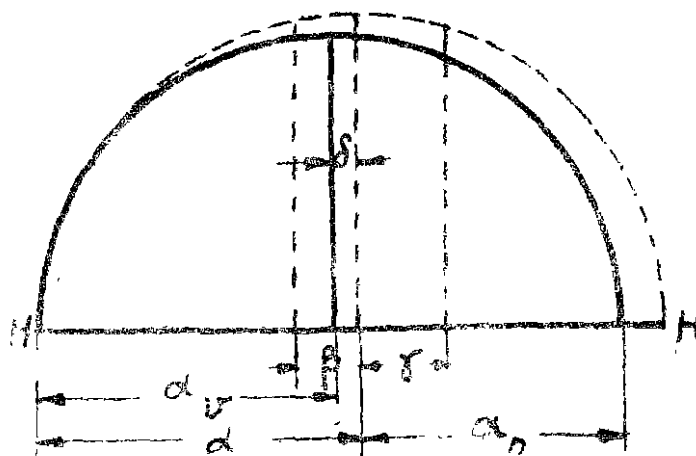
или

$$\gamma - \beta + 2\delta$$

Расстояние от мертвой точки, в которой кончается покой, где мы применили дополнительный импульс, будет  $\gamma + \delta$ , как показывает фиг. 24.

Мы имеем теперь все нужные данные для расчета продолжительности восходящего полукколебания по формуле (29), а именно:

$$t' = \sqrt{\frac{A}{M}} \left( \arcsin \frac{\gamma + \delta}{\alpha_v} + \arccos \frac{\gamma + \delta}{\alpha'_v} \right) \quad (43)$$



Фиг. 24.

предварительно мы вывели  $\alpha_v$  из формулы (33), в которой некомпенсированный угол импульса  $\gamma - \beta$  будет заменен углом, найденным выше:  $\gamma - \beta + 2\delta$  и мы получим сперва:

$$\alpha'_v = \sqrt{\alpha_v^2 + \frac{2p(\gamma - \beta + 2\delta)}{M}} \quad (44)$$

или, заменяя буквы числами и считая, что  $\alpha_v = \alpha - \delta$ , получим:

$$\alpha'_v = \sqrt{(2,0944 - 0,0125)^2 + \frac{2 \cdot 0,18(0,3491 - 0,2443 + 2 \cdot 0,0125)}{1,027}}$$

или

$$\alpha'_v = 2,0927$$

продолжительность восходящего полукколебания будет:

$$t' = 0,0637 \left( \arcsin \frac{0,3616}{2,0819} + \arccos \frac{0,3616}{2,0927} \right)$$

Положительная разность между величиною в скобках и  $\frac{1}{4}$  оборота почти приближается к разности между двумя дробями, являющимися аргументами функций  $\arcsin$  и  $\arccos$ , т. е. равна 0,0009, что дает отставание для каждого колебания 0,0637 · 0,0009 или 0,000057 сек., т. е. в сутки 24,6 сек.

Беря снова таблицу § 14 и допуская, что различие в амплитудах происходит от изменений трения, получаем следующие суточные отставания:

| Амплитуда             | $\alpha$    | Отставание<br>в 24 час.: |
|-----------------------|-------------|--------------------------|
| $\frac{2}{3}$ оборота | $120^\circ$ | 24,6 сек.                |
| 1 "                   | $180^\circ$ | 7,6 "                    |
| $1\frac{1}{4}$ "      | $225^\circ$ | 3,7 "                    |
| $1\frac{1}{2}$ "      | $270^\circ$ | 2,9 "                    |

Если в вышеописанных часах, под влиянием увеличения трения в цапфах баланса, амплитуда уменьшилась бы с 1,5 до 1 оборота, то мы получили бы отставание 5,7 сек. в сутки. Впрочем, следует заметить, что это влияние трения компенсируется в известной степени центробежной силой. Мы до сих пор рассматривали трение двух тел без смазки. Теперь мы рассмотрим какое действие оказывает сгущение масла. Мы знаем, что оно не может быть рассчитываемо по тому же способу, так как здесь следует уже считаться с поверхностями трения, а также здесь уже будет другой коэффициент трения. Работа трения равна произведению известной уже величины „С“, обобщающей вышеприведенные факторы, на пройденный путь „ $\alpha$ “. Мы допустили в нашем примере, что амплитуда уменьшилась от 1,5 до  $\frac{2}{3}$  оборота и мы установили коэффициент  $C = 0,0255$ .

Независимо от того, получена эта цифра от увеличения диаметра цапф, от коэффициента трения или от сгущения масел, конечный результат один и тот же. Можно было бы думать, что получится другой результат если бы считаться с сопротивлением воздуха, так как оно изменяется со скоростью вращения, и таким образом различно в каждой точке пути баланса.

Но так как изменения скорости происходят с обеих сторон от мертвой точки в одинаковых условиях, то влияние сопротивления взаимно компенсируется.

Здесь также, как и при трении, мертвая точка смещается. Можно без особых ошибок ввести сопротивление воздуха в коэффициент „С“ и рассматривать числовые результаты как точные, несмотря на вредные сопротивления, которые сюда входят.

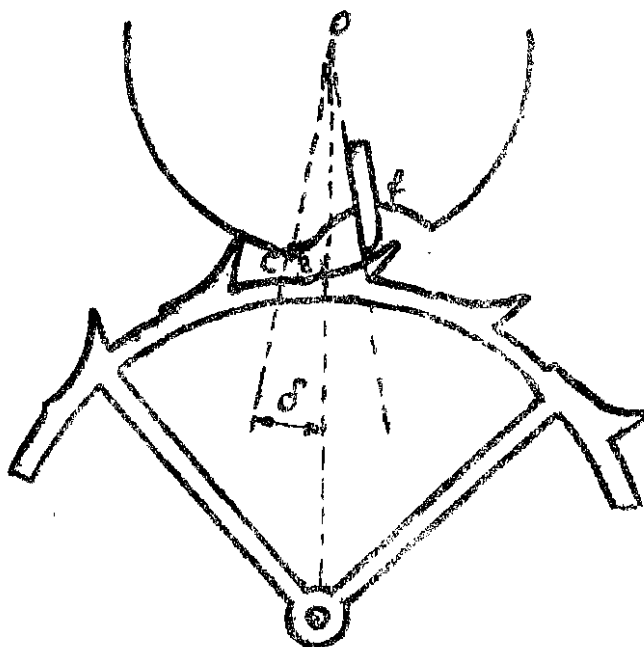
## § 19. Влияние трения в цапфах баланса — рассматриваемое со специальной точки зрения регулирования хронометренного хода с пружинной.

До сих пор мы рассматривали трение в ходе анкерных часов; т. е. таких, где импульс дается при каждом колебании баланса в обе стороны.

Легко понять, что для такого рода „хода“, вследствие покоя, импульс не распределяется ровно по сторонам от мертвой точки. Здесь отставание, происходящее вследствие комбинации импульса и трения, не может быть уничтожено и остается причиной неправильности в суточном ходе часов. Совершенно другой результат может иметь место, когда импульс дается в одну сторону. Здесь ничто не заставляет импульс распределяться в неравных частях по сторонам мертвой точки. Ясно, что если мертвая точка находится на равных расстояниях от начала и от конца импульса, влияние его на продолжительность колебания будет равно нулю. Как только вводится трение, мертвая точка смещается в направлении обратном движению из точки В в С (фиг. 25), вследствие чего следует распределить импульс по обе стороны новой мертвой точки, т. е. перенести весь угол импульса левее или, что равноценно, помещению поднятия правее в точку „f“. Если бы трение было бы постоянным, то можно было бы совершенно не считаться с его влиянием на продолжительность колебания, но на практике это не так. Трение со временем сильно возрастает и смещение мертвой точки, которое происходит вследствие этого, приводит к отставанию. Впрочем, мы имеем возможность свести до минимума влияние трения на продолжительность колебания.

Для этого вычисляют смещение „ $\delta$ “ от мертвой точки при максимальном трении. Потом на столько же перемещают центр поднятия со стороны восходящего полук колебания. Иначе говоря, устанавливают поднятие в желаемое положение, лишь только трение достигнет своего макси-

мума, импульс в этот момент должен находиться точно размещенным по обе стороны от измененной мертвой точки. Из этого следует, что в начале работы хронометра импульс более длителен со стороны нисходящего полук колебания, вследствие чего



Фиг. 25.

период колебания уменьшается (§ 12) и получается убежание вперед. Также как отставание (прим. 3, § 14), так и убежание здесь меняется с амплитудой и увеличивается с ее уменьшением. В начале работы хронометра колебания имеют максимальную амплитуду и убежание будет минимальным. По мере сгущения масла трение будет увеличиваться, амплитуда будет уменьшаться и одновременно мертвая точка будет удаляться все более от своего нормального положения. Обе причины действуют противоположно, но не компенсируются вполне. В первое время уменьшение амплитуды имеет более значительное влияние и хронометр мало по малу уходит вперед до тех пор, пока трение не достигнет приблизительно  $\frac{3}{4}$  своего максимума. Потом убежание уменьшается до того момента, для которого было рассчитано смещение поднятия, где оно и уничтожается совершенно.

С этого момента хронометр начинает быстро отставать.

Так как вышеописанное увеличение трения имеет некоторое значение для хода хронометра, то при регулировке хронометров следует учитывать влияние этого увеличения. Эти указания будут выяснены на численных примерах следующего параграфа. Итак, чтобы сгущение масла производило минимальное влияние на ход хронометра, нужно рольку волоска поместить так, чтобы при покое большого рычага она не находилась посередине угла импульса, а была бы смещена в сторону выходного зубца. Величина, на которую смещается поднятие, не очень мала, поэтому импульс начинается на несколько градусов позже, вследствие инерции колеса хода, которое достигает следующего поднятия на несколько градусов далее. Мы считаем вышеприведенное условие выполненным и поднятие хорошо отрегулированным, когда при ослабленной движущей силе хронометра, т. е. амплитуде уменьшенной приблизительно на половину, мы получаем при малых колебаниях убежание приблизительно от 0,5 до 0,75 сек. в 24 часа.

## **§ 20. Опыты Рамбаля.**

### **Численный пример**

Чтобы уяснить на практике влияние трения на ход морского хронометра, проф. Рамбаль (Женева) изобрел очень простое приспособление (фиг. 26), которое позволяет создать искусственное трение на оси баланса, регулируемое по желанию. На оси Т приложена с жестким трением стрелка А, к которой прикреплена пружинка R из палладима, трущаяся по оси баланса, ее нажим может регулироваться движением стрелки R (по делениям).

Это трение производит отставание хронометра и дает ему следующий ход:

| Полная<br>амплитуда | Суточный ход |
|---------------------|--------------|
| 440°                | 0,0 сек.     |
| 300                 | — 7,9 "      |
| 190°                | — 96,0 "     |

Поднятие было помещено по способу, принятому многими хронометристами, возле входного зубца. Это расположение плохое, как это мы увидим дальше, в смысле компенсации трения, имеет, наоборот, большое преимущество в смысле избежания, насколько возможно, остановки на пальце. При помощи имеющихся у нас данных можем проанализировать этот опыт до мельчайших деталей и вывести заключение имеющее известное значение для хронометренных ходов с пружинкой.

### 1-й пример.

Определение смещения мертвой точки „ $\delta$ “ и соответствующего суточного опаздывания.

Если мы опять возьмем формулу 40,  $p\gamma = C\alpha$ , которая позволяет вычислить изменения амплитуды, пропорциональные изменению трения, мы увидим сперва, что эта формула должна быть изменена для хронометренного хода в том смысле, что импульс дается для каждого двух колебаний и что вследствие этого он восстанавливает потери на трение в двух колебаниях. Следовательно, можно положить:

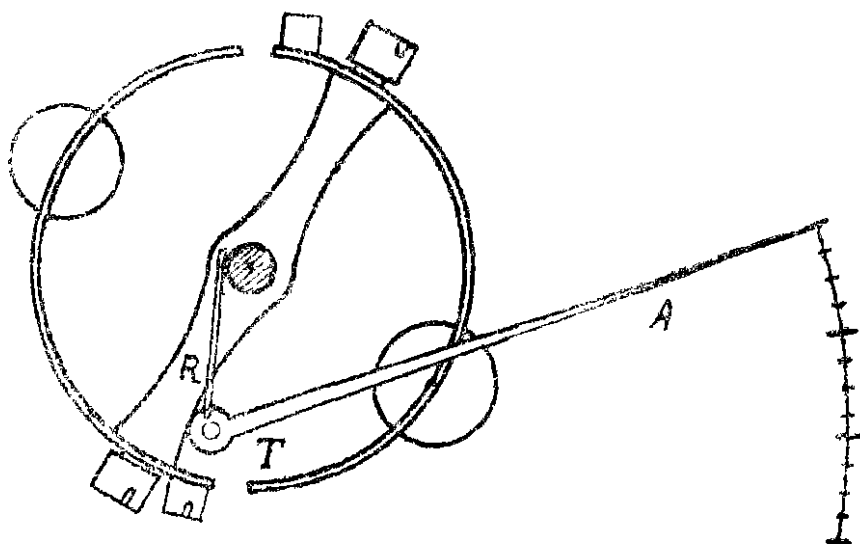
$$p\gamma = 2C\alpha$$

Буква „ $p$ “ обозначает момент силы нажима колеса умноженного на плечо поднятия по отношению к оси баланса,

здесь  $p = 3,824$  г.

Угол полу-импульса  $\gamma$  был взят в  $20^\circ = 0,3491$ , так что мы имеем

$$2C\alpha = 3,824 \cdot 0,3491 = 1,335.$$



Фиг. 26.

Нам надо теперь вычислить смещение мертвой точки для всех значений „С“, которые уменьшают угол „α“ с 220° до 60° (через каждые 10°). Для этого мы воспользуемся формулой (42)

$\delta = \frac{\alpha - \alpha_n}{2}$ , заменяя  $\alpha_n$  числом, полученным из уравнения

$$\alpha_n = \sqrt{\alpha^2 - \frac{2 C \alpha}{M}}$$

Как пример сделаем это вычисление для  $\alpha = 100^\circ = 1,7453$ ;  $M = 24,5$ .

Мы имеем

$$\alpha_n = \sqrt{1,7453^2 - \frac{1,335}{24,5}} = 1,7296,$$

откуда

$$\delta = \frac{\alpha - \alpha_n}{2} = \frac{1,7453 - 1,7296}{2} = 0,0078$$

Некомпенсированная часть импульса будет равна  $2\delta$  (см. § 18, фиг. 24) и она будет приложена на расстоянии  $\gamma + \delta$  так, что уравнение (44) примет вид

$$\alpha'_v = \sqrt{\alpha_v^2 + \frac{2 p \cdot 2\delta}{M}} \dots \dots \dots (45)$$

или, заменяя буквы их численными значениями и принимая во внимание, что

$$\alpha_v = \alpha - \delta = 1,7375$$

$$\alpha'_v = \sqrt{1,7375^2 + \frac{2 \cdot 3,824 \cdot 2 \cdot 0,0078}{24,5}} = 1,7389$$

Чтобы получить продолжительность восходящего полуколебания, мы возьмем формулу (29), в которой заменим  $\gamma$  через  $\gamma + \delta$ ; потому что это угловое расстояние от смещенной мертвой точки, к которой прилагается некомпенсируемый импульс (фиг. 24, § 18). Точно так же мы поставим  $\alpha_v$  и  $\alpha'_v$  на место  $\alpha$  и  $\alpha'$  и получим

$$t' \text{ восх.} = \sqrt{\frac{A}{M}} \left( \arcsin \frac{\gamma + \delta}{\alpha_v} + \arccos \frac{\gamma + \delta}{\alpha'_v} \right) \dots (46)$$

Чтобы получить величину  $\sqrt{\frac{A}{M}}$  достаточно взять формулу баланса

$$T = \pi \sqrt{\frac{A}{M}}$$

откуда, деля на  $\pi$ , получим

$$\frac{T}{\pi} = \sqrt{\frac{A}{M}}$$

Так как  $T$  есть продолжительность одного колебания, т. е. в данном случае 0,25 сек., то мы получим

$$\sqrt{\frac{A}{M}} = \frac{0,25}{3,1416} = 0,07958$$

уравнение (46) будет

$$t' = 0,07958 \left( \arcsin \frac{0,3569}{1,7375} + \arccos \frac{0,3569}{1,7389} \right)$$

Величина в скобках больше, чем  $\frac{1}{4}$  оборота на величину 0,00017. Продолжительность восходящего полукосебания будет увеличена на  $0,07958 \cdot 0,00017 = 0,00001353$  сек. или, помножая на 172800 двойных колебаний, совершаемых балансом хронометра в 24 часа, получаем суточное отставание в 2,34 сек.

Это вычисление, повторенное для всех значений  $\alpha$ , снижаясь с  $220^\circ$  до  $60^\circ$ , через каждые  $10^\circ$ , дает результаты, записанные во втором столбце таблицы, приведенной ниже.

## 2-й пример.

Поднятие смещено на величину „ $\delta$ “, таким образом, что оно на эту же величину удлиняет нисходящий период импульса.

Пусть смещение поднятия такое, что запаздывание вследствие трения компенсируется (для угла амплитуды  $\alpha = 100^\circ$ ), т. е. по предыдущему расчету смещение равно 0,0078 или  $0'' 27'$ .

Очевидно, что в первое время хода хронометра, смещение мертвой точки, вследствие трения, будучи меньше чем величина, на которую сместили поднятие, даст излишек импульса в нисходящем полукосебании, откуда произойдет убегание, что вычисляется по формуле (28), выведенной специально для данного случая.

Возьмем сначала период самых больших колебаний, где  $\alpha = 3,8397$  и отыщем  $\alpha'_v$  при помощи (форм. 45), мы получим

$$\alpha'_v = \sqrt{\alpha_v^2 + \frac{2p \cdot 2\delta''}{M}}$$

Замечая, что здесь  $\delta$  должна быть заменена  $\delta''$ , которая является разностью (фиг. 27) между смещением поднятия  $\delta$  (обозначенного выше) равным 0,0078 и действительным смещением мертвой точки происходящим от трения  $\delta' = 0,0036$ , согласно ниже приведенной таблицы. Мы получим:

$$\delta'' = \delta - \delta' = 0,0078 - 0,0036 = 0,0042$$

С другой стороны

$$\alpha_v = \alpha - \delta' = 3,8397 - 0,0036 = 3,8361$$

и

$$\alpha'_v = \sqrt{3,8361^2 + \frac{2 \cdot 3,824 \cdot 2 \cdot 0,0042}{24,5}} = 3,8365$$

Таким образом формула 28 будет:

$$t'_{\text{нисх.}} = \sqrt{\frac{A}{M}} \left( \arccos \frac{\gamma + \delta''}{\alpha_v} + \arcsin \frac{\gamma + \delta''}{\alpha'_v} \right) \quad (47)$$

и так как

$$\gamma + \delta'' = 0,3491 + 0,00442 = 0,3533$$

$$t'_{\text{нисх.}} = 0,07958 \left( \arccos \frac{0,3533}{3,8361} + \arcsin \frac{0,3533}{3,8365} \right)$$

откуда найдем суточное убегание равным 0,11 сек. Повторяя этот самый расчет для всех значений  $\alpha$  через каждые  $10^\circ$ , мы найдем числа в третьем столбце нижеследующей таблицы.

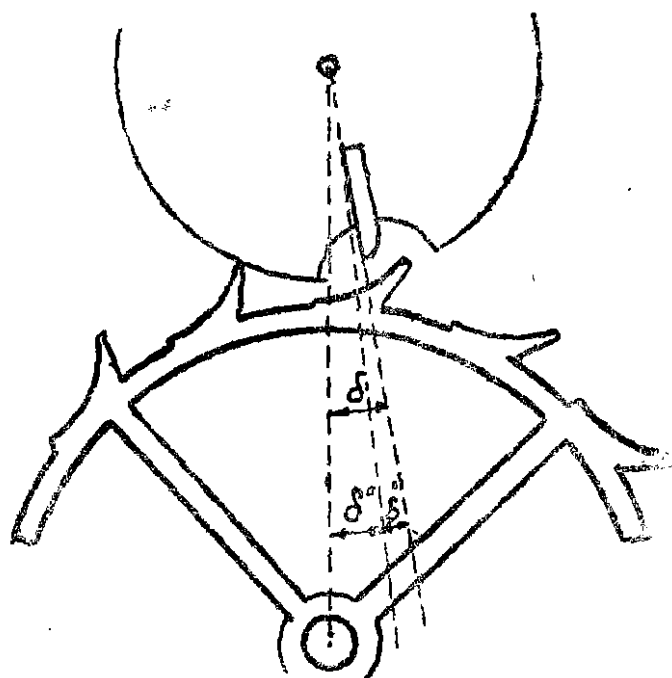
Столбцы 4, 5 и 6 показывают ход одного и того же хронометра при смещении поднятия на  $0^\circ 45'$  направо и на  $3^\circ$  и  $10^\circ$  налево. Эти два последние хода плохие и были вычислены

только для показа влияния на регулировку неправильно-го положения поднятия или ролики спирали. На это обстоятельство следует обратить особое внимание, потому что ничто не обнаруживает этот недостаток в начале хода хронометра.

Хронометр может давать прекрасные показания в течение многих месяцев и дать неправильный ход позже, когда трение увеличится. Это ясно вытекает из сравнения данных таблицы.

Столбцы 3 и 4 показывают, что когда хронометр проверен с учетом компенсации трения для данной амплитуды, он дает равномерное ускорение до максимума, который

по колонке 3 указан равным 0,44 сек. для полуамплитуды в  $120^\circ$ , а в колонке 4 + 2,20 сек. для полуамплитуды в  $80^\circ$ . Начиная от этих максимальных точек, опережение быстро уменьшается и



Фиг. 27.

прекращается когда амплитуда достигает значения, до которого было рассчитано смещение мертвой точки.

**Т А Б Л И Ц А**  
**изменения суточного хода хронометра для пяти различных положений поднятия и амплитуд, изменяющихся от 440° до 110°.**

| Полу-амплитуда<br>% | 1.<br>Угол смещения<br>δ | 2.                           | 3.                                  | 4.                                  | 5.                              | 6.                               |
|---------------------|--------------------------|------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
|                     |                          | Поднятие в середине импульса | Поднятие смещенное на 0° 27' вправо | Поднятие смещенное на 0° 45' вправо | Поднятие смещенное на 30' влево | Поднятие смещенное на 100' влево |
|                     |                          | сек.                         | сек.                                | сек.                                | сек.                            | сек.                             |
| 220°                | 0 12'                    | — 0,10                       | + 0,11                              | + 0,23                              | — 0,17                          | — 0,32                           |
| 210°                | 0 12' 40"                | — 0,12                       | + 0,12                              | + 0,28                              | — 0,41                          | — 1,9                            |
| 200°                | 0 13' 20"                | — 0,15                       | + 0,13                              | + 0,33                              | — 1,02                          | — 4,5                            |
| 190°                | 0 14' 10"                | — 0,18                       | + 0,15                              | + 0,38                              | — 1,6                           | — 7,9                            |
| 180°                | 0° 15'                   | — 0,21                       | + 0,17                              | + 0,44                              | — 2,2                           | — 11,0                           |
| 170°                | 0 15' 50"                | — 0,24                       | + 0,19                              | + 0,50                              | — 3,4                           | — 14,8                           |
| 160°                | 0 16' 40"                | — 0,28                       | + 0,21                              | + 0,56                              | — 4,8                           | — 18,2                           |
| 150°                | 0 17' 40"                | — 0,33                       | + 0,23                              | + 0,62                              | — 6,1                           | — 23,1                           |
| 140°                | 0 19'                    | — 0,41                       | + 0,25                              | + 0,69                              | — 8,5                           | — 27,7                           |
| 130°                | 0° 20' 40"               | — 0,67                       | + 0,35                              | + 0,76                              | — 11,3                          | — 36,0                           |
| 120°                | 0 22' 30"                | — 1,08                       | + 0,44                              | + 0,88                              | — 14,0                          | — 46,3                           |
| 110°                | 0° 24' 40"               | — 1,60                       | + 0,36                              | + 1,12                              | — 17,3                          | — 59,4                           |
| 100°                | 0° 27'                   | — 2,34                       | 0,00                                | + 1,51                              | — 21,5                          | — 77,0                           |
| 90°                 | 0° 30' 20"               | — 3,58                       | — 0,72                              | + 1,93                              | — 25,7                          | — 130,0                          |
| 80°                 | 0° 34' 30"               | — 5,60                       | — 1,90                              | + 2,20                              | — 35,2                          | —                                |
| 70°                 | 0° 39'                   | — 9,70                       | — 3,72                              | + 1,86                              | — 47,0                          | —                                |
| 60°                 | 0° 45'                   | — 18,30                      | — 7,29                              | 0,00                                | —                               | —                                |
| 55°                 | 0° 49' 40"               | —                            | —                                   | — 6,8                               | —                               | —                                |

Пройдя эту точку суточное изменение переходит в опаздывание, которое сильно увеличивается; это указывает, что необходимо произвести чистку и что хронометр недалеко от полной остановки. Ход в колонке 6 соответствует приблизительно ходу хронометра в опыте Ромбаля, указанном выше.

Смещение поднятия в другом направлении привело бы к соответственному опережению.

Сравнивая колонки 2, 3 и 4 видим, что лучший ход в колонке 3, т. е. тот, который соответствует уменьшению амплитуды приблизительно на половину ее первоначального значения. Отклонение поднятия было бы здесь  $0\ 27'$ , а так как крайне трудно сместить поднятие на такой маленький угол<sup>1)</sup>, то необходимо проверить точность смещения ходом самого хронометра, пользуясь приемом, указанным в предыдущем параграфе, т. е. заставляя амплитуду уменьшаться до предела пропорционального ослаблению действующей пружины. Следствием явится опережение, которое легко вычислить и которое строго соответствует смещению поднятия. (Надо заметить, что последствия уменьшения амплитуды будут различны в зависимости от того, происходят ли они от ослабления действующей пружины или от увеличения трения). (Сравните § 14, прим. 3).

### 3-й пример.

Определение опережения при малых колебаниях.

Мы возьмем опять 2-й пример, в котором изменим угол  $\alpha$  и пропорционально момент „р“ импульса. Для хода соответствующего данным колонки 3-ей таблицы мы уменьшим значение угла  $\alpha$  до  $100' = 1,7453$  и мы получим соответствующее значение для  $p'$  из пропорции

$$\frac{p}{p'} = \frac{3,8397}{1,7453}$$

откуда

$$p' = \frac{3,824 \cdot 1,7453}{3,8397} = 1,7382$$

Потом мы вычисляем  $\alpha'$  по формуле

$$\alpha' = \sqrt{\alpha^2 + \frac{2p' \cdot 2\delta''}{M}}$$

Выражение  $\delta''$  есть разность между величиной  $\delta$  (смещение поднятия) и сдвигом  $\delta'$  мертвой точки вследствие трения.

Это значение  $\delta'$  не есть значение, находимое в таблице для амплитуды равной 3,8397, но оно должно быть уменьшено пропорционально уменьшению амплитуды  $\alpha$  которая делается  $\alpha = 1,7453$ , тогда получим:

$$\frac{\delta}{\delta'} = \frac{3,8397}{1,7453}$$

<sup>1)</sup> К тому же и другие причины могут заставить положение центра импульса отличаться от вычисленного положения.

Откуда

$$\delta' = \frac{0,0036 \cdot 1,7453}{3,8397} = 0,0016$$

и

$$\delta'' = \delta - \delta' = 0,0078 - 0,0016 = 0,0062.$$

Расчет заканчивается, как в вышеприведенных примерах и мы находим суточное опережение на 0,83 сек., из которого надо вычесть нормальное опережение 0,11 сек. в начале хода.

Мы находим в конце концов, что вышеприведенный хронометр проверенный по данным колонки 3-ей, будет иметь для малых колебаний ( $\alpha = 100^\circ$ ) суточное опережение на 0,72 сек., против больших колебаний ( $\alpha = 220^\circ$ ).

По данным найденным для колонки 4-ой получим опережение при малых колебаниях, на 1,28 сек. Этот ход не рекомендуется. Очевидно, что смещение поднятия должно быть таковым, чтобы опережение при малых колебаниях не превышало  $\frac{3}{4}$  сек.

Во всех предшествующих расчетах мы пренебрегали некоторыми факторами, которыми на практике нельзя пренебрегать. Эти упущения были необходимы, так как мы не хотели усложнять расчета, но теперь полезно рассмотреть, в какой мере они изменят полученные результаты. Прежде всего, центробежная сила имеет значительное влияние на момент инерции разрезного баланса, каковыми бывают большинство компенсационных балансов. При больших колебаниях полу-обод баланса, вследствие центробежной силы расходится больше, чем при малых, так что баланс меняет размеры. Ясно, что должно получиться опережение при малых колебаниях.

Мы дальше увидим, как и в предыдущем примере, что даже при поднятии находящемся в центре импульса, получится опережение при малых амплитудах, с чем надо считаться при расчете необходимых поправок хода, расстраивающегося в дальнейшем вследствие увеличения трения. К этому мы еще вернемся.

Кроме того, было допущено, что сила импульса остается независимой от амплитуды в то время, как это не совсем так. Когда амплитуда увеличивается, скорость баланса также увеличивается, окружная сила на зубцах ходового колеса увеличивается и работа импульса уменьшается. Импульс, следовательно, должен стать более энергичным при малых колебаниях, нежели при больших.

Однако, надо заметить, что в то же время, как трение в цапфах баланса увеличивается, также возрастает оно и в зацеплениях; действующая сила, переданная ходу, уменьшается в значительной степени, так что разница импульса, указанная выше, уравнивается. Наконец сама спираль может быть

регулируема по желанию, при опережении или при отставании, изменяя малые колебания на большие и совершенно изменяя таким образом указанные результаты. Это будет предметом будущей главы. Повторяем, что для ясности мы рассматриваем отдельно каждое влияние, действующее на ход хронометра, и анализируем каждое, считая его как бы не зависящим от всех остальных. Рассмотрев отдельно каждое явление, перейдем к изучению совокупности влияний, чтобы получить прямые и практически применимые выводы.

---

## Г Л А В А IV.

### Изменения в ходе часов, происходящие от несовершенства спирали и баланса.

#### § 21. Деформация спирали.

В § 6, мы видим, что длина спирали может вычисляться по формуле

$$L = R\beta$$

Где:  $R$  — радиус спирали,

$\beta$  — суммарный угол спирали, или иначе говоря, количество ее полезных витков.

Когда, во время колебания баланса, спираль скручивается или раскручивается, то изменяется ее радиус и одновременно суммарный угол: назовем через  $r$  — новый радиус спирали и  $\alpha$  — угол отклонения баланса, тогда выражение длины  $L$  будет

$$L = r(\beta + \alpha)$$

Так как сама по себе длина спирали не меняется, то эти два значения  $L$  равны и мы можем написать

$$R\beta = r(\beta + \alpha)$$

откуда, деля обе части на  $\beta + \alpha$  мы приходим снова к формуле (8):

$$r = \frac{R\beta}{\beta + \alpha}$$

Отсюда вычисляем новый радиус  $r$  спирали, когда она деформировалась. В то же время мы замечаем, что если радиус  $R$  в покое не везде одинаков (при плоской спирали), то все же какова бы ни была величина  $R$ , можно найти соответствующее значение  $r$  и после деформации. Эта формула может служить для вычисления изменений радиусов кривизны спирали цилиндрической или плоской, а также „концевых кривых“, которыми мы займемся дальше. Формула может быть выражена более

удобно для вычислений, если заменить  $\beta$  ее значением  $-\frac{L}{R}$ , полученным из первого уравнения, тогда:

$$r = \frac{R \cdot \frac{L}{R}}{-\frac{L}{R} + \alpha}$$

или

$$r = \frac{R}{1 + \frac{\alpha}{L} \cdot R} \dots \dots \dots (48)$$

Угол  $\alpha$  — положительный, когда он прибавляется к суммарному углу  $\beta$ , т. е. когда спираль скручивается, и отрицательный при раскручивании.

### Численный пример.

Пусть плоская спираль имеет длину 265 мм и внешний радиус 4,5 мм. Амплитуда колебания полтора оборота. Мы получим  $\alpha = 270^\circ = 4,7124$ , и радиус вследствие скручивания будет

$$r = \frac{4,5}{1 - \frac{4,7124}{265} \cdot 4,5} = 4,17 \text{ мм}$$

При развернутой спирали

$$r = \frac{4,5}{1 + \frac{4,7124}{265} \cdot 4,5} = 4,89 \text{ мм}$$

Если свободный конец спирали закреплен в питоне, то «игра» будет только в одну сторону. Центр спирали стремится уходить от нитона при раскручивании и, наоборот, приближается к питону при скручивании. Так как положение оси баланса постоянное, то спираль будет давить на ось либо по одному направлению, либо по другому.

Заметим, что согласно вышеприведенному примеру, уменьшение радиуса (0,33) во время сжатия спирали не равно его увеличению (0,39) во время раскручивания. Этот факт имеет значение, и с ним придется считаться впоследствии.

Движение спирали, в соединении с давлением на ось баланса, будут иметь три различных действия:

1. Давление цапфы на стенки подшипника и следовательно увеличения трения.
2. Постоянное перемещение центра тяжести спирали.
3. Скручивание, действующее на ось баланса, которое то прибавляясь к силе спирали, то вычитаясь из нее, нарушает изохронизм.

Первое имеет на продолжительность колебаний очень маленькое влияние. Толчек, получающийся от деформации спирали, очень мал по сравнению с весом баланса и еще менее значителен по сравнению с другими вредными сопротивлениями, так что мы можем им пренебречь. Но не так обстоит дело со смещением центра тяжести спирали и скручивающим усилием, действующим на ось баланса, которые нам придется изучить подробнее.

## § 22. Смещение центра тяжести спирали (по Гроссману, Ю.).

Рассмотрим баланс при вертикальном положении часов; спираль цилиндрическая, ее крайние витки прикреплены один к питону, а другой к рольке и рассмотрим отдельно движение каждого из этих витков. Виток, закрепленный в питоне, может рассматриваться как давящий на питон всей своей тяжестью, так что перемещение центра тяжести не может влиять на продолжительность колебаний. Но иначе обстоит дело с другим витком, укрепленным на балансе. Допустим, что амплитуда 1,5 оборота, и проследим смещение центра тяжести этого витка одновременно с ходом баланса. Мы допустим сначала, что в покое точка прикрепления спирали к рольке находится наверху (фиг. 1, табл. 1). Во время периода скручивания спирали центр тяжести перемещается последовательно в а, b и с (фиг. 2, 3 и 4), удаляясь все более и более от центра баланса. При движении баланса по часовой стрелке (фиг. 2) центр тяжести спирали смещается от о к а горизонтально, действие смещения весьма ничтожно, так как эта часть колебания близка к мертвой точке; при движении центра тяжести баланса от а к b имеет место опускание его (фиг. 3) и центр тяжести действует по направлению движения баланса, т. е. стремится вызвать запаздывание, так как это период восходящий. При движении от b до с (фиг. 4) центр тяжести поднимается и действует в обратном направлении движению баланса, стремясь вызвать опережение. Мы получаем: от а до b — отставание, от b до с — убегание. Эти два явления не компенсируются, потому что отрезок от b до с, будучи более удален от мертвой точки и имея плечо приложения больше, даст убегание больше, чем отставание, происходящее раньше.

Начав наблюдение над балансом в мертвой точке и проследив его ход в восходящий период и при раскручивании спирали, мы найдем, что смещение центра тяжести спирали от а до b' будет действовать против движения баланса и от b' до с' в направлении этого движения.

Мы получим: от а до b' — опережение  
от b' до с' — отставание.

Результат остается тот же для нисходящих периодов. Опережение компенсируется отставанием при полном колебании если смещения центра тяжести одинаковы в периоды закручивания и раскручивания. Но это не совсем так, раскручивание сильнее, чем закручивание и поэтому в вышеприведенном примере мы получим легкое запаздывание (фиг. 8).

Если, вместо того, чтобы быть на верху, точка крепления витка была бы внизу, разность перемещений центра тяжести дала бы напротив, легкое опережение (фиг. 9).

Что касается случая, когда точка крепления находится справа от оси, то траектория центра тяжести примет положение фиг. 10.

В продолжении закручивания спирали при восходящем периоде центр тяжести перемещается из „О“ в „d“ и дает отставание. Затем он поднимается из „d“ в „с“ и дает опережение. При возвращении, центр тяжести спускается из „с“ в „d“ и дает опережение, потом поднимается из „d“ в „О“ и дает запаздывание.

Аналогичное явление происходит при разворачивании, так что каковы бы ни были направление и период движения, смещение центра тяжести даст запаздывание от „О“ до „d“ или „d'“ и опережение от „d“ до „с“ или от „d'“ в „с'“.

Ясно, что смещение из „d“ в „с“ значительно больше, чем смещение происходящее из „О“ в „d“: влияние первого смещения на продолжительность колебаний также более интенсивно потому, что действие сказывается в положениях наиболее удаленных от мертвой точки и при более длинном плече приложения. Во всех случаях влияния смещения из „d“ в „с“ будет на много превышать аналогичное влияние, происходящее при движении центра тяжести из „d“ в „О“ и часы получат значительное опережение. Опережение уменьшается с уменьшением амплитуды и уничтожится для суммарной амплитуды приблизительно равной  $300^\circ$ , потом переменит направление и перейдет в отставание при меньших амплитудах. Поместим точку закрепления (питон) налево от оси, тогда траектория центра тяжести примет положение (фиг. 11) и результат будет противоположный вышеприведенному случаю, т. е. отставание. До сих пор, мы рассматривали влияние, производимое смещением центра тяжести лишь для первого витка, лежащего всей своей тяжестью на оси баланса. Относительно каждого витка можно применить это рассуждение, приняв во внимание, ближе или дальше они расположены от центра тяжести, так что влияние смещения для второго витка несколько меньше, уменьшается для каждого последующего из витков и для последнего, укрепленного в питоне, равно нулю. Среднее смещение для всей спирали будет средним смещением всех витков, т. е. половина смещения первого. Полученные изменения могут быть вычислены по известным уже формулам. Но так как нам придется

делать тот же расчет для изменений, происходящих от неуравновешенности баланса, то здесь мы не будем на нем останавливаться, а только закончим предшествующим, т. е. что спираль цилиндрическая, прикрепленная к ролюке просто крайним витком, даст плохие результаты в ходе при вертикальном положении, вследствие смещения центра тяжести во время раскручивания и скручивания спирали. Что касается плоской спирали, то результат аналогичен, но по своей величине менее значителен. Внутренний виток имеет очень маленький диаметр, радиус ролюки в точке закрепления также очень мал, таким образом, смещение центра тяжести, хотя и происходит как и при цилиндрической спирали, но относительно гораздо меньше и изменения хода в различных положениях будут также меньше. Впрочем, они могут достигать 5—6 сек. в одном или другом направлении; изменение хода в двух противоположных положениях в этом случае 10—12 сек. В карманных часах, где надо считаться с тремя вертикальными положениями (подвеска вверх, направо и налево) можно исправить этот недостаток, располагая точку крепления спирали в определенном месте. Никогда часы не носят подвеской вниз, поэтому это положение не входит в наши наблюдения. При нахождении точки крепления спирали справа (если смотреть на часы со стороны циферблата) от центра баланса, когда последний находится в покое, как мы видели, произойдет опережение при подвеске сверху и изменения сведутся до минимума (приблизительно 1 секунда) — между двумя другими положениями: подвеской направо и налево. Опережение при подвеске сверху будет 3—6 сек., в зависимости от амплитуд, если не будет влиять какая либо другая причина. На практике это опережение является скорее преимуществом, так как оно служит компенсацией отставанию в других положениях.

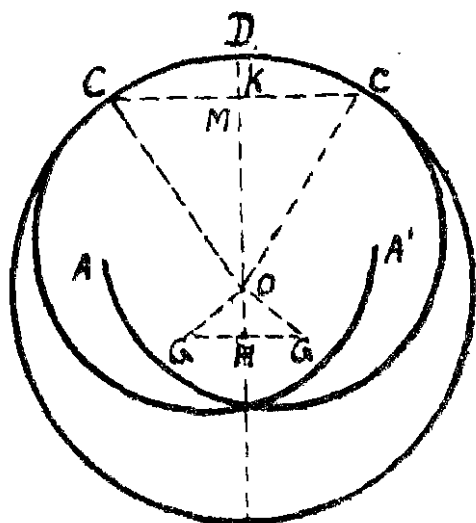
### **§ 23. Теория Филлипса. — Концевые кривые спирали.**

На основании всего предыдущего делаем вывод, что несмотря на смещение центра тяжести спирали, происходящего вследствие неподвижности точек закрепления, анкерные часы, снабженные плоской спиралью, могут быть регулируемы достаточно удовлетворительно для обихода.

Но этого нельзя сказать, когда дело идет о морской хронометрии, а так же о точной регулировке карманных хронометров. Для этих механизмов пришлось искать способа который позволил бы избежать смещения центра тяжести спирали. Уже в конце XVIII столетия хронометристы установили, что этот результат можно получить, соединяя спираль с ее двумя точками закрепления кривыми определенной формы, полученными опытным путем. Инженеру Филлипсу удалось установить математические условия, которым должны удовлетворять кон-

цевые кривые, чтобы совершенно уничтожить смещение спирали и ее центра тяжести.

Цилиндрические спирали, снабженные концевыми кривыми, мы должны рассматривать с двух точек зрения: во-первых, совокупности всех витков, составляющих некоторое число цельных окружностей, начинающихся и заканчивающихся в одной и той-же точке  $C$  (фиг. 28), и центр тяжести которых как раз совпадает с центром фигуры  $O$  и во-вторых—совокупности двух кривых  $CA$  и  $C'A'$  с отрезком дополнительной спирали  $CDC'$  произвольной длины. Следова-



Фиг. 28.

CDC' произвольной длины. Следовательно речь идет не о том, чтобы вся спираль имела центр тяжести в  $O$ , а о том, что надо расположить кривые таким образом, чтобы все три части спирали  $AC$ ,  $CC'$  и  $C'A'$  находились бы в равновесии и имели общий центр тяжести в точке „ $O$ “. Для этого нам надо найти положения центров тяжести  $G$  и  $G'$ , отвечающие этим требованиям.

Расстояние ОК от центра тяжести К дуги CDC' до центра „О“ выражается следующей формулой

$$OK = R \frac{\text{хорда}}{\text{дуга}} = \frac{R \cdot CC'}{CDC'} \dots (a)$$

(см. прикладную механику).

Момент этой части спирали по отношению к центру „О“, полагая, что ее вес пропорционален длине, будет

$$m = OK \cdot CDC'$$

или, заменяя  $\Theta K$  ее значением из формулы (а), получим

$$m = \frac{R \cdot CC'}{CDC'} \quad CDC' = R \cdot CC'.$$

Чтобы найти момент двух кривых, которые мы сначала предположим идентичными, возьмем  $G$  и  $G'$  как центры тяжести каждой из них; их общий центр тяжести будет посредине линии  $GG'$  в точке  $H$ . Момент этих двух кривых, обозначая длину каждой из них через „ $l$ “, и заменяя вес длиной, будет:

$$m' = 21.0 \text{ H}$$

Чтобы суммарный центр тяжести попал в точку „О“, надо, чтобы  $m$  и  $m'$  были равны, т. е. чтобы

$$R \cdot CC' = 21 \cdot OH \cdot \dots \dots \dots (b)$$

Теперь нам надо вывести из этого равенства расстояние  $OG$ , что, невозможно, если углы  $\angle COG$  и  $\angle C'OG'$  произвольны, потому что тогда не будет существовать зависимости между треугольниками  $OCM$  и  $OGH$ . Если, напротив, мы сделаем из

угла COG — прямой угол, то оба треугольника OCM и OGH будут подобны и тогда

$$\frac{OH}{OG} = \frac{CM}{R}$$

или

$$OH = \frac{OG \cdot CM}{R} \dots \dots \dots (c)$$

Заменяя в равенстве (b) OH полученным значением, имеем:

$$R \cdot CC' = \frac{2l \cdot OG \cdot CM}{R}$$

или

$$R^2 \cdot CC' = 2l \cdot OG \cdot CM \dots \dots \dots (d)$$

CM — являясь половиной хорды, равна  $\frac{CC'}{2}$ , так что равенство (d) становится

$$R^2 \cdot CC' = \frac{2l \cdot OG \cdot CC'}{2}$$

или упрощая

$$R^2 = l \cdot OG$$

и, наконец

$$OG = \frac{R^2}{l} \dots \dots \dots (49)$$

Такова очень простая формула Филлипса, которая устанавливает такие условия для концевых кривых, чтобы центр тяжести всей спирали находился на оси баланса.

Эти условия следующие:

1) Чтобы центр тяжести кривой находился на линии OG, составляющей с линией ОС прямой угол (это условие мы сразу ввели, чтобы найти разрешение задачи).

2) Расстояние от центра тяжести кривой до центра тяжести спирали должно равняться квадрату радиуса спирали, деленному на длину кривой.

Вычислениями, которые мы не можем здесь привести, Филлипс доказал, что если центр тяжести совпадает с осью баланса, он там удерживается, каковы бы ни были деформации спирали, так что она свертываясь и развертываясь остается концентричной самой себе.

Филлипс, кроме того, изобрел (Phillips. Mémoire sur le spiral réglant) метод графического построения теоретических кривых; но этот метод очень неудобен, занимает много времени при вычислении и может быть с успехом заменен правилом практического исправления, основанным на симметричном

развертывании спирали, указанном выше, чем мы займемся в следующем параграфе. В предыдущих выводах было допущено, что обе концевые кривые одной и той же спирали идентичны по форме и размеру, но это вовсе не необходимо. Если в действительности одна из кривых длиннее, чем другая, то для того, чтобы она удовлетворяла формуле Филлипса, необходимо чтобы центр тяжести ее был приближен к центру спирали, так, чтобы ее момент по отношению к центру спирали оставался тот же. Допустим, например, что одна из кривых вдвое больше другой, т. е. что ее длина равна  $2l$ ; чтобы кривая удовлетворяла формуле Филлипса нужно, так как  $R$  не изменяется, чтобы расстояние от ее центра тяжести до центра тяжести спирали равнялось половине расстояния другой кривой. Момент этой кривой будет  $2l \cdot \frac{OG}{2}$  или  $l \cdot OG$ , т. е. тем же самым, как и другой кривой и равновесие всей спирали не будет изменено. Очевидно, что можно менять форму, положение и длину кривых как угодно, лишь бы каждая в отдельности отвечала данному условию.

Теория Филлипса применяется одинаково хорошо к плоской спирали (М. Гроссман в своих записках развил математически теорию плоской спирали, но мне не удалось применить к ней простой алгебраический расчет), как для внешней кривой, которая не отличается ощутительно от кривой, построенной для цилиндрической спирали, так и для внутренней кривой. Эта последняя должна быть рассматриваема, как составленная из спирали, соединяющей самый большой и самый малый виток, и кривой, соединяющей с ролькой.

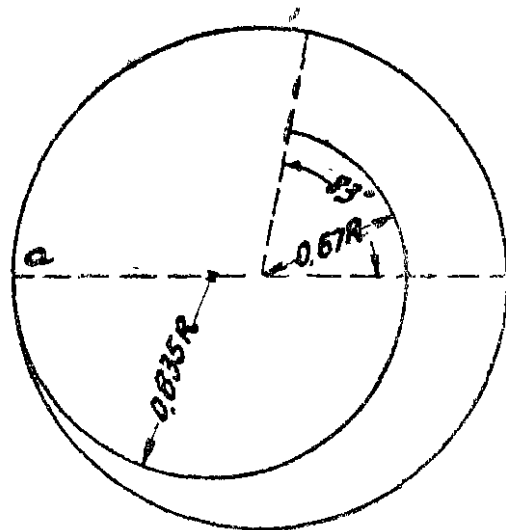
Отсюда получается, что эта маленькая соединительная кривая не может самостоятельно отвечать условиям Филлипса, потому что она должна удовлетворять этим условиям совместно со спиралью Архимеда. Однако разница не особенно велика и так как эту внутреннюю кривую, вследствие ее малости, трудно воспроизвести согласно чертежа, то на практике рекомендуется делать ее только приближенно и исправлять ее во время раскручивания спирали, согласно указаний, данных нами в следующем параграфе. Надо заметить, что когда спираль заканчивается кривыми Филлипса, то не только ее центр тяжести не смещается, но она не вызывает никакого давления и никакого скручивающего усилия на ось баланса. Кривые Филлипса уничтожают сразу все три причины изменений, указанных в конце § 21 и осуществляют таким образом изохронную спираль.

Однако, не следует думать, что изохронная спираль есть идеал часовщика; Филлипс сам никогда не выражал этого мнения и довольно странно слышать от поверителей утверждение, что теория Филлипса не отвечает опыту, потому что в большинстве случаев они отступают от установленных данных.

Эти утверждения покоятся на одном недоразумении. Филлипс установил теоретические условия, которым должна удовлетворять спираль, чтобы быть изохронной, но изохронная спираль не обуславливает изохронности самих часов: есть много причин, не зависящих от спирали, влияющих на ход часов. Случается, что поверитель, устраняющий влияние изменений в „ходе“, вынужден уничтожить изохронизм спирали, а следовательно и изменить концевые кривые; при этом он отступает от теоретических данных, так как ему изохронная спираль не нужна. Но это далеко не умаляет значение теории Филлипса, напротив того, подтверждает ее поразительным образом.

## § 24. Практическое исправление концевых кривых спирали.

Существует, множество концевых кривых, отвечающих вышеприведенным условиям. Филлипс их вычертил в большом количестве и они находятся в его „записках о регулируемой спирали“, некоторые из них воспроизведены в таблице II, здесь приложенной. Эти кривые, теоретически совершенно правильные, не все одинаково удовлетворяют практическим требованиям регулировки. Большинство из них не удовлетворяют необходимым требованиям часов с градусником, заключающимся в том, чтобы последний оборот спирали был дугою круга с центром на оси баланса. На фиг. 29 представлена кривая, которую легко построить и которая удовлетворяет требованию часов с градусником. Она может служить образцом для внешней кривой плоской или цилиндрической спирали, которую достаточно только слегка изменить, согласно хода часов. Из центра спирали описывают дугу окружности радиуса  $0,67 R$  ( $R$  — радиус внешнего витка). Эта дуга должна соответствовать углу в  $83^\circ$  (отсчитывая от штифтов градусника) и ее соединяют с внешним витком спирали в точке „а“ полуокружностью радиуса  $\frac{1,67 \cdot R}{2} = 0,835 R$ .



Фиг. 29.

Эта же кривая может служить внутренней кривой, как для цилиндрической, так и для плоской спирали. Для этой последней оставляют между ролькой и внутренней кривой пространство приблизительно равное четырем виткам и ее соединяют кривой, построенной как и на фиг. 29, принимая  $R$  за радиус внутреннего витка. Часть „bc“ (фиг. 30) кривой, будучи концентричной с ролькой, коснулась бы этой

ние спирали концентричным, над достаточно сравнить теоретические кривые (сплошные) и не теоретические (пунктир) на таблице II, чтобы сразу понять в чем они отличаются. Возьмем для примера спираль на фиг. 1, которая закреплена прямо в питон Р без концевой кривой. Развертываясь, она отклонится в направлении противоположном питону — в сторону стрелки N. Если мы вернем первый полувиток в точку С, таким образом чтобы получить концевую кривую, составленную двумя четвертями окружно-



Возьмем теперь кривую, обозначенную пунктиром (фиг. 2), состоящую из полуокружности радиуса  $\frac{R}{2}$ .

Какую бы из этих трех форм кривых мы не выбрали, все равно для исправления пунктирной кривой (фиг. 2) нам надо переместить ее справа налево от центра к окружности. Наконец, рассмотрим новую кривую не теоретическую (фиг. 4 — пунктир). Помещая ее, как и другие так, чтобы раскручивание происходило с верхней стороны чертежа, а накладывая на нее

другую, правильную кривую (сплошную), мы видим, что для совпадения необходимо справа подвинуть кривую к центру, а слева ее отодвинуть (оба направления находятся почти под прямым углом). Из этих 3-х примеров мы выведем следующее практическое правило: когда спираль раскручивается с одной стороны больше, чем с другой, ее помещают перед собой в положении кривых табл. II и исправляют внешнюю концевую кривую согласно требованиям точек крепления или калибра: 1) подвигая часть кривой, находящейся справа, к центру, по линии перпендикулярной к линии раскручивания MON или 2) отодвигая левую часть к окружности, по тому же самому направлению или 3) производя над кривой обе эти операции сразу по направлениям OS и OR (фиг. 4.), находящихся друг от друга под углом  $90^\circ$ .

Внутренние концевые кривые цилиндрической или плоской спирали исправляются таким же способом, но с несколько большей трудностью, так как линия раскручивания вращается вместе с балансом и необходимо внимание, чтобы установить верное направление. Для этого вращают баланс, рассматривают ближайший к рольке оборот спирали и останавливают пинцетом баланс в момент максимального раскручивания последнего витка. Фигуры табл. II все заимствованы из записок Филлипса и представляют применение вышеприведенных практических данных. Исправление кривых сделаны:

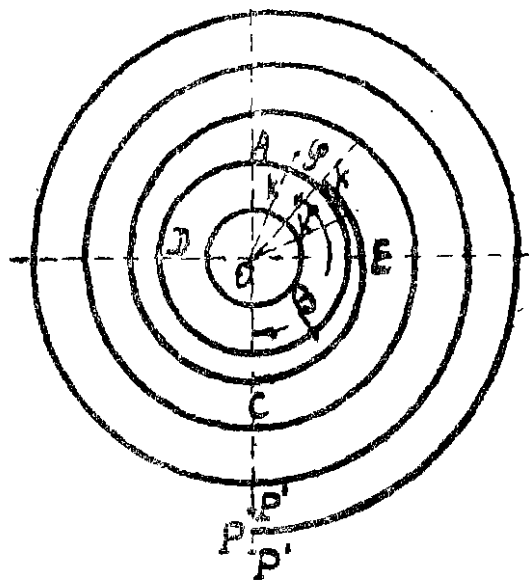
|           |              |                |
|-----------|--------------|----------------|
| для фигур | 1, 5, 6 и 7  | по 1-му методу |
| " "       | 2, 3, 9, 12  | " 2-му "       |
| " "       | 4, 8, 10, 11 | " 3-му "       |

Само собой разумеется, что направления исправления применимы лишь для направлений спиралей, закрученных, как показано на фигурах табл. II, что же касается кривых повернутых в обратную сторону (фиг. 29 и 30 текста), следует взять обратное направление и для исправления.

## § 25. Влияние бокового усилия спирали, производимого на ось баланса при эксцентрическом раскручивании спирали.

Мы знаем, при каких условиях спираль должна раскручиваться концентрично балансу; но этого недостаточно. Важно, также знать, в какой степени третья причина, указанная в § 21 при эксцентрическом раскручивании может изменить ход часов. Пусть плоская спираль (мы выбрали плоскую спираль для ясности чертежа, но те же рассуждения остаются в силе и для цилиндрической спирали) без концевых кривых при некотором числе полных оборотов плюс дуга  $\beta$ , закреплена в колодочке p и в рольке k. Когда она разворачивается или сокращается (фиг. 31), то получает со стороны колодочки толчек на ось баланса, или

натяжение в обратном направлении (§ 21). Действие будет такое же, как если бы баланс находился в покое, а перемещался бы питон из  $P$  в  $P'$  и  $P''$ . В первом случае смещение питона поворачивает баланс на известный угол  $\varphi$  направленный к  $k'$ , иначе говоря, получится накручивание спирали на ось. Во втором случае (при смещении питона из  $P$  в  $P''$ ) получится раскручивание спирали и баланс повернется на тот же угол  $\varphi$  обратно в направлении  $k''$ .



Фиг. 31.

Когда баланс находится в движении, то усилие производимое колодочкой то в одном направлении, то в другом, преобразуется в кратковременную силу, которая прибавляется к силе спирали и нарушает строгую пропорциональность между нею и амплитудой колебания. Так как изохронизм абсолютно зависит от этой пропорциональности (§ 7), то следовательно, он будет изменяться одновременно с нею.

Угол  $\varphi$ , получающийся от смещения колодочки, не постоянен

и зависит от длины дуги  $\beta$ , т. е. от углового расстояния точек закрепления. Когда эти последние противолежат друг другу, и  $\beta = 180^\circ$ , то толчек колодочки только изменяет радиусы кривизны, и угол  $\varphi$  вычисляется тогда по формулам § 6. Если же  $\beta = 90$  или  $270^\circ$ , т. е. точки закрепления расположены под прямым углом друг к другу, то изменение радиуса кривизны менее раннее рассмотренного и точка закрепления спирали к рольке непосредственно получает толчек колодочки так, что обе причины влияют на образование угла  $\varphi$ . Этот последний равен нулю при  $\beta$  равном нулю и когда обе точки закрепления находятся с одной стороны. Сила, развиваемая балансом под действием раскручивания или закручивания спирали, действует на продолжительность колебаний различно, в зависимости от амплитуды и положений точки внутреннего закрепления в начале пути, во время движения и в конце колебания. Эта точка закрепления, поворачиваясь, проходит последовательно все положения и угол  $\beta$  меняется произвольно. Увеличение внешнего радиуса спирали меньше, чем его уменьшение при закручивании (§ 21). Для вычисления хода необходимо разделить на части суммарное колебание и определить продолжительность каждой из них, повторяя этот ряд вычислений для известного числа амплитуд между четвертью и  $1\frac{3}{4}$  оборотов. Наконец, надо вычислить ход для различных начальных значений  $\beta$ , т. е. для случая, когда в состоянии покоя

точка закрепления в рольке находится со стороны колодочки потом при  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  и  $270^\circ$ . Все эти расчеты чрезвычайно затруднительны и поэтому мы удовлетворимся анализом результатов по графикам кривых, данных в таблице III. ОХ — соответствует градусному значению полуамплитуд  $\alpha$ , а линии ОО — суточному опережению в секундах. Когда кривая проходит под линией ОХ — значения ее соответствуют **суточным отставаниям**. Четыре кривые соответствуют четырем различным положениям (через каждые  $90^\circ$ ) точек закрепления (в покое), а числа соответствуют данным той же плоской спирали анкерных часов размером 43 мм, которые нам уже встречались в прежних примерах. Рассматривая эти графики, мы видим, что ни один из них не дает изохронных колебаний. Кривая наиболее близкая к изохронным колебаниям будет № 2 при  $\beta = 90^\circ$ , если ее сравнить с последующей, то видно, что кривизна последней между  $90^\circ$  и  $270^\circ$  амплитуды, обратна и более значительна. Следовательно существует промежуточное значение  $\beta$  (около  $98^\circ$ ), для которого колебания будут изохронными в пределах амплитуд, заключенных между  $\frac{1}{2}$  оборотом и  $1\frac{1}{2}$  оборотами. Точно также, сравнивая графики 3 и 4, видим, что между двумя значениями  $\beta$ , равными  $180^\circ$  и  $270^\circ$  (т. е. для углового расстояния точек закрепления приблизительно равным  $250^\circ$ ) существует точка, где колебания будут изохронными для амплитуд, заключенных между 1 и  $1\frac{1}{2}$  оборотами.

Еще Пьером Леруа было замечено, что некоторые длины спиралей дают изохронные колебания без употребления концевых кривых (Сравните замечательный труд Е. Caspary „Исследование хронометров и морских инструментов“). Уже давно, (около 12 лет тому назад) некоторые женевские фабриканты карманных хронометров, в частности Patek, Philippe & C поставляли часы, дающие прекрасный ход, со спиралями без концевых кривых.

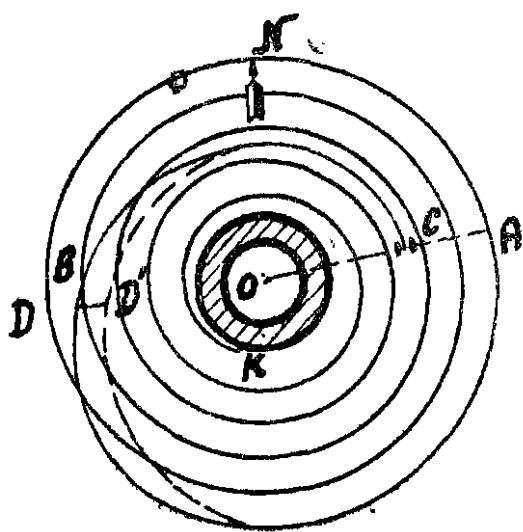
Мы видели (§ 22) что при вертикальном положении, только определенные точки закрепления в рольке дают ход приблизительно одинаковым в различных общепринятых положениях и можно расположить части таким образом, чтобы место точек закрепления, дающее изохронизм, было бы приблизительно то же самое, как и для получения одинаковых ходов в вертикальных положениях. Теперь ясно, каким образом можно достигнуть удовлетворительной регулировки со спиралью без концевых кривых. Однако, с тех пор, как Филлис установил правила построения кривых, употребление этих последних получило распространение в точных хронометрах.

Графики таблицы III еще интересны с другой точки зрения. Если сравнить кривые №№ 1 и 3, то видно, что изменения хода происходят в обратном направлении для амплитуд заключенных между  $150^\circ$  и  $315^\circ$ . Кривая № 1 дает опережение при малых амплитудах, тогда как кривая № 3 дает, наоборот,

опаздывание. Все это происходит в обычных границах амплитуд часов и хронометров, между 1 и  $1\frac{1}{2}$  оборотами.

Согласно сказанному в начале этого параграфа ясно, что изменения хода, представленные в графиках, происходят по причине эксцентричности раскручивания спирали, не снабженной концевыми кривыми. Эксцентричность определяется положением колодочки и раскручивание происходит всегда в сторону ей противоположную. Мы видели, с другой стороны, что концевые кривые — не теоретические — могут производить эксцентрическое раскручивание в любых направлениях, не зависящих от положения колодочки. Таким образом все пунктирные кривые в таблице II дают эксцентрическое раскручивание и, кроме того, правила, изложенные в § 24, служащие для исправления кривых с целью получения концентрического раскручивания, могут быть применены в обратном смысле, а именно для получения концентрического раскручивания, а также для изменения изохронизма сообразно желанию. Следовательно, мы получили в концевых кривых удобный способ для компенсации недостатков хода, присущих данному механизму карманных часов и хронометров.

Допустим, например, что спираль, представленная на фиг. 32, снабжена правильной концевой кривой и установлена в часах с анкерным ходом, имеющих слишком большой покой,



Фиг. 32.

который вследствие какой либо причины невозможно исправить. Как было сказано в § 12, эти часы будут отставать при малых колебаниях; нам надо их поставить в условия, приближающиеся к условиям хода графика № 1. Этот ход дает спираль у которой обе точки закрепления находятся на одной стороне и раскручивание происходит с противоположной стороны от закрепления в рольке. Нам надо в нашей спирали также получить эксцентричное раскручивание с противоположной стороны за-

крепления в рольке в точке N и для этого сделать обратное тому, что требуется для исправления эксцентрического раскручивания в данной точке, т. е. подвинуть кривую из B в B'.

Отсюда следует, что для получения опережения при малых амплитудах поступают таким образом: взяв закручивающуюся спираль, начиная от рольки справа (в направлении движения часовой стрелки) и помещая точку закрепления в рольке перед собой, подвинуть внешнюю кривую спирали налево к оси баланса, от D к O, или, судя по расположению кривой, ее сдвинуть направо от O к A.

В случае, часто встречающемся в морских хронометрах, где нужны запаздывания при малых колебаниях, поступают обратно только что сказанному.

Графики показывают, что в большинстве случаев деформации концевых кривых производят опережение в среднем ходе, с чем необходимо считаться. Кроме того, из графиков 1 и 2 видно, что спираль раскручиваясь с одной стороны, как это происходит в спирали без концевой кривой, дает возможность получить между большими и малыми колебаниями, рознящими-ся между собой на четверть круга, приблизительно 18 сек. отклонения (для часов размером 43 мм с плоской спиралью).

Конечно, этот способ не следует широко применять. Утрированное эксцентрическое раскручивание спирали неприятно для глаза, оно может служить лишь в крайнем случае для компенсирования какого либо крупного недостатка.

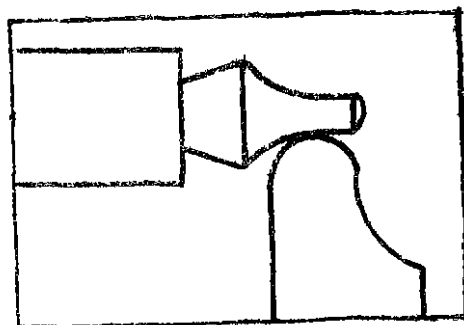
Другое дело, если надо компенсировать недостатки изохронизма в 2—3 сек., которые могут встречаться даже в тщательно изготовленных часах; в этом случае удобно их исправить при помощи поправки кривой и происходящее при этом эксцентрическое раскручивание спирали будет едва заметно.

До сих пор речь шла лишь об амплитудах больше одного оборота. Для амплитуд меньших, графические кривые показывают совершенно другие результаты. Таким образом, в часах с балансом, амплитуда которого находится в пределах от 0,75 до 1 оборота, не придется много изменять при поправке по соответствующему графику (1-му); может случиться даже, что полученное изменение хода будет обратно тому, которого мы добивались, так как высшие точки кривой графика различных спиралей не совпадают; таким образом в пределах амплитуд близлежащих к точкам перемены направления движения баланса, т. е. между  $\frac{3}{4}$  и 1 оборотом, нельзя рассчитывать получить точные показания.

## § 26. Влияние неуравновешенности баланса и рольки.

Известно, что центр тяжести баланса должен точно находиться на его геометрической оси. В противном случае ход часов претерпевает изменения. Поверка уравновешенности баланса производится на инструменте называемомся „Баланс-ваге“.

Баланс-ваге состоит из двух пластинок—металлических<sup>1)</sup> или сапфировых, совершенно прямых, установленных параллельно, но рабочие грани которых горизонтальны; на этих гранях



<sup>1)</sup> Стальных закаленных. (Прим. ред.)

Фиг. 33.

устанавливается баланс таким образом, что он может вращаться на обоих своих цапфах.

Для получения от прибора максимальной чувствительности и точности, очень существенно чтобы цапфы вращались на пластинках с минимальными потерями на трение. Следовательно, рабочие грани пластинок должны быть наилучшим образом отполированы, чтобы вращение цапф никоим образом не могло перейти в скольжение.

Кривые или шероховатые пластинки не годятся.

Прибор должен легко устанавливаться в горизонтальной плоскости, либо посредством установочных винтов, либо иным способом и пластинки без усилия должны сдвигаться и раздвигаться для того, чтобы любой баланс мог вращаться на кончиках цапф.

Для того, чтобы избежать образования впадин, которые неизбежны при остром рабочем ребре, пластинки следует заканчивать не острой кромкой, а закруглением, как это показано на фиг. 33 и полировать их вдоль.

С инструментом следует обращаться очень бережно и следить, чтобы на пластинки не попало ничего такого, что вызвало бы их повреждение. Перед применением следует протереть замшей или чистой льняной тряпочкой рабочие грани для снятия пыли и всех посторонних тел, могущих стеснить вращение цапф.

Поместив баланс на инструмент, последний устанавливают совершенно горизонтально так, чтобы баланс не имел стремления вращаться в одну сторону легче чем в другую. Затем при помощи тонкого пинцета баланс осторожно поворачивают для того, чтобы убедиться, что во всех положениях он остается в равновесии. Наконец, для большей уверенности в совершенном равновесии слегка встряхивают инструмент.

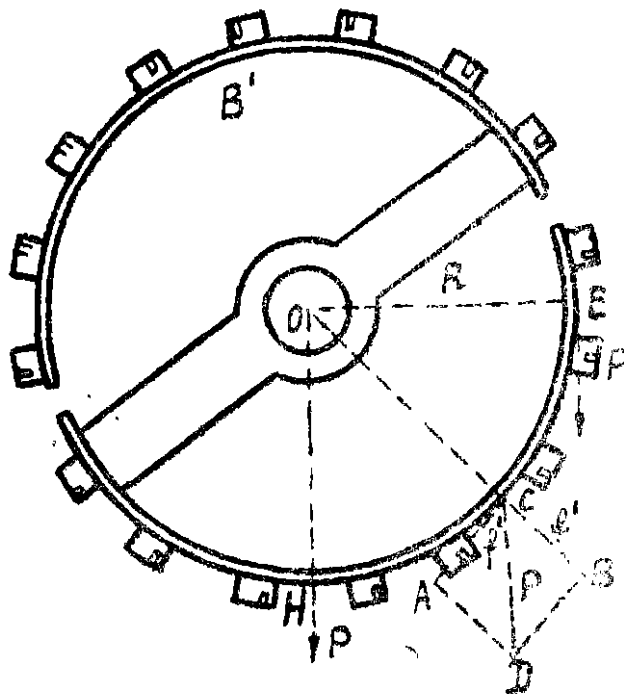
Приняв все указанные меры предосторожности, получим такую чувствительность, при которой инструмент обнаруживал бы нецилиндричность цапф. Нужно только не забывать, что компенсационный баланс от прикосновения руки может быстро нагреться только с одной стороны, а это его быстро выведет из равновесия. Следовательно, при необходимости дотронуться рукой до биметаллического баланса, чрезвычайно важно выждать некоторое время прежде чем начать проверку его равновесия.

Кроме того, баланс совершает колебания не один, а всегда в сопровождении рольки, к которой крепится спираль, причем неправильная форма последней очень затрудняет установку абсолютного равновесия. Может случиться, что баланс прекрасно уравновешенный, образует с ролькой — (разрезанной и со вставленным штифтом) — такой комплекс, центр тяжести которого не находится на оси, вследствие чего получаются изменения в ходе часов в различных положениях. Результирующая непра-

вильность может быть обнаружена только комплексом всех деталей баланса и исправление может быть произведено в соответствии с полученными неправильностями при проверке.

Может случиться, что вполне уравновешенный баланс, образуя вместе с разрезной и заштифтованной ролькой систему, центр тяжести которой не лежит на геометрической оси, вследствие чего происходит изменение хода в различных положениях.

Пусть  $B'$  (фиг. 34) баланс в положении покоя, в нижней части которого мы приложим некоторый груз  $p$ ; определим влияние этого груза на продолжительность колебаний. Повернем баланс на  $90^\circ$  так, чтобы груз „ $p$ “ переместился в точку  $E$ ; сила спирали, которая стремится привести баланс в мертвую точку, будет больше на величину  $p$ , так как последняя действует в том же направлении. Дойдя до  $C$ , отстоящей под углом в  $45^\circ$  от мертвой точки, действие силы „ $p$ “ уменьшается, так как она раскладывается на две равные силы —  $f$  и  $f'$ . Из параллелограмма сил видно, что углы  $A$  и  $B$  прямые и отрезки  $CA$  и  $AD$  равны.



Фиг. 34.

Отсюда из  $CAD$ ;

$$\overline{AC}^2 + \overline{AD}^2 = \overline{CD}^2$$

или

$$2f^2 = p^2$$

и

$$f = \sqrt{\frac{p^2}{2}}$$

В мертвой точке действующая составляющая равна нулю; Таким образом, в точке  $E$ , прибавляясь к силе спирали, она будет максимум, в точке  $C$  будет меньше и в точке  $H$  будет равна нулю.

Допуская, что она меняется пропорционально пройденному пути, найдем, что работа, производимая дополнительным грузом между точками  $E$  и  $C$  равна произведению момента средней силы на пройденный угол. Средняя сила во время

пути ЕС равна  $\frac{p+f}{2}$  и ее момент по отношению к центру баланса  $\frac{p+f}{2}R$ , где  $R$  — расстояние точки приложения  $p$  до оси баланса. Приняв пройденный угол в  $45^\circ = 0,7854$  длины дуги, при радиусе равном единице, получим работу

$$L = 0,7854 \frac{(p+f) R}{2}$$

От С до Н работа будет

$$L' = 0,7854 \frac{fR}{2}$$

Заменяя  $f$  его значением, найденным выше, получим для работы от С до Н выражение

$$L = \frac{0,7854 \sqrt{\frac{p^2}{2}} R}{2}$$

а для работы от Е до С

$$L' = \frac{0,7854 \left( p + \sqrt{\frac{p^2}{2}} \right) R}{2}$$

аменяя  $L$  и  $L'$  в формуле (30) соответственно через  $\alpha'$  и  $\alpha''$  и принимая  $\alpha$  за амплитуду, соответствующую действительной скорости баланса в момент его прохождения через мертвую точку, получаем:

$$\alpha' = \sqrt{\alpha^2 - \frac{0,7854 \sqrt{\frac{p^2}{2}} R}{M}} \dots \dots \dots (50)$$

$$\alpha'' = \sqrt{\alpha^2 - \frac{0,7854 R}{M} \left( 2 \sqrt{\frac{p^2}{2}} + p \right)} \dots \dots \dots (51)$$

Мы можем без большой ошибки допустить, как и в других примерах, что дополнительный груз действует не постепенно между точками Е, С и Н, но резко, как толчек посередине пути ЕС и СН так что  $\alpha$  делается  $\alpha''$  на угловом расстоянии  $\gamma = \frac{45^\circ}{2}$  и  $\alpha'$  переходит в  $\alpha''$  на расстоянии  $\gamma = 45^\circ + \frac{45^\circ}{2}$ .

Аналогично предыдущему построим путь движущего тела, взятого для сравнения, как показывает фиг. 35.

Груз  $p$  действует в направлении движения при нисходящем колебании и в обратном направлении в период восходящего колебания в результате чего получается опережение,

Рассматривая фиг. 35, видим, что опережение представлено дугами  $ik$  и  $i'k'$  и что движущееся тело, взятое для сравнения, имеет **меньший** путь. Алгебраическое выражение этого опережения по формуле (28) будет

$$\text{опережение} = \sqrt{\frac{A}{M}} (\text{arc } ik + \text{arc } i'k')$$

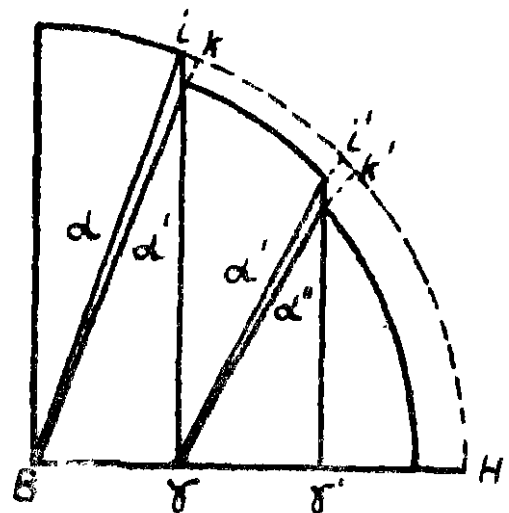
Значения этих дуг будут:

$$\text{arc } ik = \text{arc sin } \frac{\gamma}{\alpha'} - \text{arc sin } \frac{\gamma}{\alpha}$$

$$\text{arc } i'k' = \text{arc sin } \frac{\gamma'}{\alpha''} - \text{arc sin } \frac{\gamma'}{\alpha'}$$

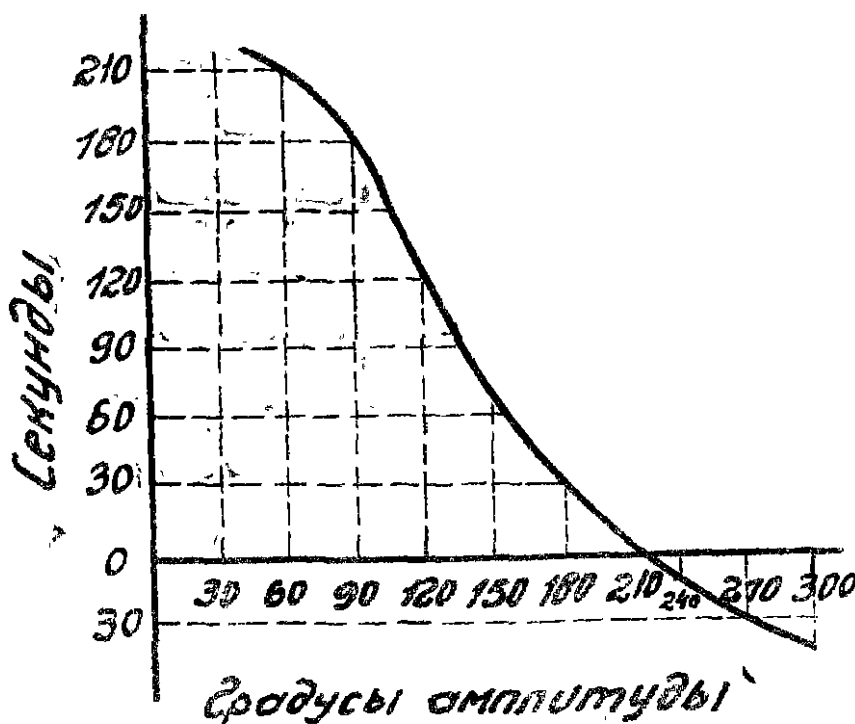
Заменяя эти значения, получим:

$$\begin{aligned} \text{опережение} = \sqrt{\frac{A}{M}} & \left( \text{arc sin } \frac{\gamma}{\alpha'} - \frac{\gamma}{\alpha'} \text{arc sin } \frac{\gamma}{\alpha} + \text{arc sin } \frac{\gamma'}{\alpha''} - \right. \\ & \left. - \text{arc sin } \frac{\gamma'}{\alpha'} \right) \dots \dots \dots (52) \end{aligned}$$



Фиг. 35.

Чем больше значенье амплитуды, тем больше увеличивается опережение по формуле (52). Эта формула не будет пред-



Фиг. 36.

ставлять особенной сложности, за исключением знаков для  $\text{arc sin}$ , что потребует некоторого внимания. Так как по формуле 52 опережение получается для одного полуколебания, то надо 432,000 (т. е. число полуколебаний в сутки) умножить на два, чтобы получить опережение в течение 24 часов. Беря те же данные, что и в предыдущих примерах и вес

$p = 1$  миллиграмму, найдем для амплитуды в  $1\frac{1}{2}$  оборота, опережение в 180 сек. (как суточное суммарное).

Если теперь повернем часы так, чтобы груз  $p$  находился выше оси, то получим отставание, почти равное полученному выше опережению.

Выражая в числах изменения для различных амплитуд, производимые дополнительным грузом  $p=1$  миллиграмму внизу баланса, находим, что опережение уменьшается с увеличением амплитуды, что оно делается ничтожным, когда амплитуда достигает  $440'$  и переходит в отставание для больших амплитуд. Это выражено на графике фиг. 36, где горизонтальная линия представляет градусные значения полуамплитуд  $z$  и вертикаль — изменения суточного хода в сек. Эти значения вычислены, как это было показано выше, для баланса часов размером 43 мм, имеющего момент инерции  $A=0,00416$  и спираль с крутящим моментом  $M=1,027$ .

---

## Г Л А В А V

### Практические выводы и заключения.

#### § 27. Общие положения.

Мы не имели намерения изучить в предшествующих главах все причины, влияющие на ход часов. Однако, мы рассмотрели главные, и теперь имеем возможность установить правильный путь для проверки хронометров.

Эта глава посвящается практикам и содержит указания понятные для всех. Мы не даем проверок на температуру, что хотя и имеет большое значение, но привело бы нас в другую область техники. Если бы удалось построить баланс и спираль строго изохронными, то, несмотря ни на какие внешние влияния, такие часы могли бы быть точно отрегулированы. Но этого к сожалению нет и внешние влияния (например „хода“) действуют иногда даже на продолжительность колебания, не изменяя суммарной амплитуды (§ 14, прим. 4). Однако, вообще изменения хода сопровождаются соответствующими изменениями амплитуды. Поэтому поверители с давних пор, стремясь дать хорошую регулировку, регулируют амплитуды. Таким образом, постепенно вошло в хронометры употребление фюзее, — корректирующего крутящий момент пружины, потом „хода“, называемые „ходами постоянной силы“, которые, уравнивая усилия каждого импульса, регулируют амплитуду колебания.

Сравнительно недавно для уравнивания трения в вертикальном и горизонтальном положениях, утоньшали цапфы и делали их торцевые поверхности плоскими. Многие опыты показали при применении этих способов хорошие результаты регулировки до тех пор, пока масло было свежее, т. е. в течение 6 недель — 2 мес., промежуток, достаточный для испытания часов.

Однако, ознакомившись со всем вышеизложенным, мы должны сказать, что регулировка этого рода обманчива, так как сам принцип ложен. Однообразие амплитуд не гарантирует однообразия хода. Впрочем, нельзя получить абсолютное однообразие амплитуд, и если иногда получают относительное однообразие, то всегда за счет других преимуществ и на относи-

тельно короткое время. Теперь стараются сохранить колебания изохронными, путем устранения внешних влияний, либо нейтрализуя их компенсацией. Итак, основной принцип регулировки это изохронизм колебаний, откуда выводим основное правило: Чтобы отрегулировать хронометр, надо изменять амплитуды колебаний в возможно больших пределах и исправлять до тех пор, пока не установится постоянство хода в этих пределах.

## **§ 28. Повторяемость причин, нарушающих изохронность колебаний баланса.**

Предположим, что баланс и спираль сами по себе изохронны и рассмотрим влияние „хода“ разбирая лишь анкерный ход.

Напомним следующие правила: каждый импульс, данный балансу до мертвой точки, лежащей на линии центров, **ускоряет** колебания и наоборот, за линией центров вызывает **отставание**.

Эти отклонения тем больше, чем меньше амплитуда колебания. Каждое действие обратное импульсу, т. е. всякое сопротивление движению баланса, вызывает отставание, если происходит до прохождения через мертвую точку и опережение, если происходит за линией центров (§ 11).

Нормальный импульс „хода“ действует с одной и с другой стороны мертвой точки, за исключением той части, которая соответствует дуге покоя; только эта последняя влияет на продолжительность колебаний и, так как она входит в действие всегда за линией центров, то производит отставание.

Это отставание, как было указано, более значительно при малых колебаниях, чем при больших. В этом и есть изменение изохронизма, которое мы для сокращения обозначим „опаздыванием покоя“. Изменения движущей силы не имеют большого влияния, так как с увеличением импульса увеличивается и амплитуда (см. пример 3, § 14).

Мы допускали, что оба поднятия (входа и выхода) располагались симметрично по обоим сторонам от мертвой точки и получали импульсы равной силы. На практике часто встречаются отклонения от вышеизложенного, таким образом и влияние поднятия на продолжительность колебаний также изменяется.

Допустим, что импульс более значителен на плече выхода, чем на плече входа (что обыкновенно и бывает) и кроме того, мертвая точка вместо того, чтобы находиться на равном расстоянии от двух поднятий, находится на середине поднятия входа (это расположение часто встречается и оно желательно, так как предотвращает остановку на пальце при поднятии плеча входа). В этом случае не будет некомпенсированной части импульса, приходящейся на поднятие входа. Наоборот, часть

поднятия выхода будет двойной по продолжительности и кроме того она более удалена от мертвой точки. Так как импульс на этом поднятии более значителен, чем на поднятии входа, то „отставание покоя“ здесь сильнее, чем для нормального хода, и отставание при малых колебаниях будет более резко выражено. В этом „ходе“ следует возратить мертвую точку в ее нормальное положение, чтобы получить опережение при малых колебаниях. „Освобождение“, обусловленное сопротивлением встретившимся до линии центров, равным образом вызывает отставание, которое также значительней при малых колебаниях, чем при больших.

Вычисления (§ 14, прим. 5) показывают, что в обыкновенных условиях этим опаздыванием, в виду его малости, можно пренебречь. Но нам придется здесь считаться с явлением, о котором раньше не было и речи. Когда происходит освобождение анкера, под влиянием наличия „затяжки“ колесо слегка повернется назад и этот поворот не прекращается точно в момент окончания освобождения, а продолжается немного и после, вследствие инерции. Хотя это движение и очень мало, но оно все-таки дает запаздывание колеса против якоря. Колесо приобретает ускоренное движение до тех пор, пока оно не догонит наклонную плоскость палеты (плоскость импульса). Отсюда следует, что импульс начинается лишь на известном расстоянии от того места, где ему следует начаться и потерян углом нельзя пренебречь, так как например, в анкерных часах он доходит приблизительно до  $2\frac{1}{2}^\circ$ : следовательно некомпенсирующая часть поднятия увеличивается еще на  $2\frac{1}{2}^\circ$ , и вместе с углом покоя  $1\frac{1}{2}^\circ$  составляет  $1\frac{1}{2}^\circ + 2\frac{1}{2}^\circ = 4^\circ$ .

Отставание покоя увеличивается на столько же, но окончательный результат не будет оказывать того же влияния на изохронизм. Ясно, что потеря пути, как результат отхода колеса назад, возростает со скоростью баланса, так как, с одной стороны, увеличивается попятное движение, и, с другой стороны, баланс пройдет больший путь, прежде чем колесо нагонит наклонную плоскость палетты.

Опаздывание, происходящее вследствие потери импульса, будет сильнее при больших амплитудах, чем при малых, и влияние на изохронизм будет противоположно влиянию, производимому опаздыванием покоя.

В нормальных условиях анкерного хода оба влияния на изохронизм, противоположные влиянию освобождения, почти компенсируются; напротив, с увеличением затяжки (более 15) опережение при малых колебаниях будет значительнее. Увеличение груза, или диаметра ходового колеса, дает тот же результат. Недостатки затяжки, в связи с другими неисправностями, могут произвести значительные изменения в ходе.

Допустим например, что затяжка неодинакова на обоих поднятиях, предположим, что она слаба на поднятии выхода.

В лежащем положении часы не будут давать большой разницы в ходе. но в вертикальном положении часов, недостаток слабой затяжки, соединившись, например, с отсутствием равновесия якоря (заметим, что эти недостатки чаще всего и встречаются), в ряде случаев, при различных положениях часов еще больше ослабляет затяжку, что вызывает нарушение правильной работы якоря. Кольцо будет часто касаться малого плато, и вызовет отставание или опережение, смотря по обстоятельствам (скорее отставание, см. „трение“, § 18). Для проверки углов поднятия, покоя, затяжки и т. д. можно употреблять „метод дисков“<sup>1)</sup> М. Grossmann. *L' échappement libre à ancre* (édition française) p 120.

Вычертив на металлической пластинке точное положение и размеры двух плечей анкера, накладываем на этот чертеж анкер поверяемых часов. Проверка скоро и точно производится при помощи микроскопа с микрометром, сконструированного Thury и Aney (в Женеве). Как мы видели ранее, изменения во взаимном расположении частей „хода“ могут привести к нежелательным последствиям. Возьмем для примера цапфы, имеющие большую игру в подшипниках. Ясно, что в зависимости от положения часов, положение частей хода, а также и их работа изменяются и происходят многочисленные нарушения, иногда совершенно неожиданные. Укажем несколько примеров.

Суточные изменения, происходящие без видимой причины, зависят, главным образом, от трения цапф баланса. Положение и состав масла все время меняется, изменяя вместе с тем потери на трение. Очевидно, что чем незначительнее трение, тем меньше будут изменения. Трение же можно уменьшить, уменьшая по возможности диаметр цапф баланса. Однако, существуют пределы толщины цапф и ошибочно делать их слишком тонкими. Бывают цапфы диаметром в 0,04 мм. Правда, этим облегчается регулировка и наименьшее суточное изменение хода, но часы получаются чрезвычайно чувствительными на удары. Малейший толчек ломает цапфы и наилучшие часы начинают идти как наихудшие.

Всегда следует иметь ввиду практическую цель и если часы предназначаются для повседневного употребления, то следует остановиться на цапфах от 8 до 10 сотых миллиметра.

Игра цапф баланса должна быть от 0,015 до 0,02 мм, для анкера и ходового колеса от 0,010 до 0,015 мм в часах калибра 43 мм (Henrie Lossier).

Понятно, что ось баланса, имеющая большую скорость, чем другие оси часового механизма, должна иметь больший зазор между цапфой и отверстием в камне для уменьшения

---

<sup>1)</sup> В последнее время для измерения вышеуказанных углов успешно применяется заводский и универсальный микроскопы Цейса и часовые разметочные машины Гаузера, Дикси и др. (Примеч. ред.).

трения. Разница в боковой игре цапф оси баланса может дать разницу в ходе между двумя плоскими положениями: циферблат вниз, циферблат вверх (Ch. Haas), а также может произвести наклон цапфы относительно подпятника. Игра вдоль оси должна быть уменьшена также по мере возможности (анкер, ходовое колесо, баланс) для того, чтобы в различных положениях относительное расположение частей не менялось.

## **§ 29. Положение спирали.**

Спираль должна устанавливаться так, чтобы ее рабочая длина не изменялась во время хода часов. Не должно быть, следовательно, игры в штифтах градусника, что вызвало бы запаздывание при малых колебаниях (§ 9). В то же время спираль не должна быть слишком сжата между штифтами, потому что она может поцарапаться, что вызовет расстройство хода. Надо, чтобы она располагалась свободно между штифтами, но так, чтобы даже в лупу нельзя было заметить игры между этими штифтами.

Этот вопрос следует особо отметить, потому что молодые регулировщики обычно уделяют мало внимания установке штифтов градусника.

Штифтики делают из латуни, но очень тонкими, примерно для часов калибра 43 мм (19 линий) наиболее подходящий размер будет 0,25 мм. Они должны быть устойчивыми, прямыми, перпендикулярными к плоскости спирали и точно параллельны друг к другу. Спираль под влиянием своего веса перемещается между штифтами в соответствии с положением часов и если штифты размещены под углом друг к другу, то игра между штифтами и спиралью будет изменяться, в зависимости от того, лежат ли часы на крышке, или на стекле, что в свою очередь дает довольно значительную разницу в ходе.

Чрезвычайно важно, чтобы спираль между штифтами лежала совершенно свободно и без напряжения, иными словами, штифты никоим образом не должны изменять ни формы, ни положения спирали. Если это условие не выполнено и спираль сдавлена где нибудь штифтами, то произойдет изменение в ходе часов. В § 10 мы рассмотрели случай, когда неправильная установка штифтов вызвала при малых колебаниях опережение приблизительно от 10 до 15 секунд.

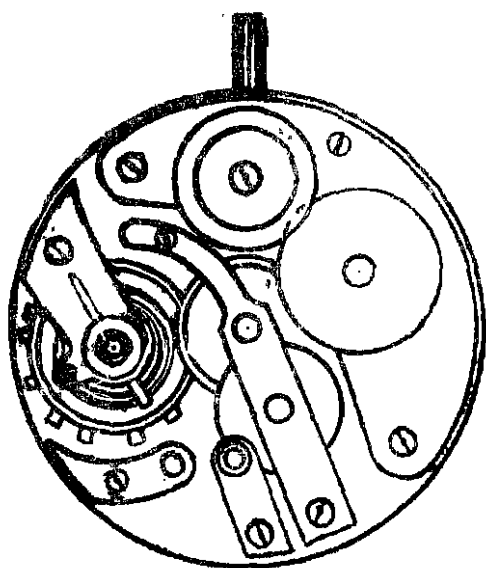
Штифтики слегка смазывают со стороны спирали; излишек масла снимают пинцетом и обтирают, так чтобы масло не могло расплываться.

Согласно установленному принципу, что действующая длина спирали не должна изменяться во время хода, необходимо, чтобы первый внутренний виток не упирался в рольку около точки крепления. Если внутренний виток соприкасается, хотя бы даже на протяжении нескольких сотых мм, то и этого до-

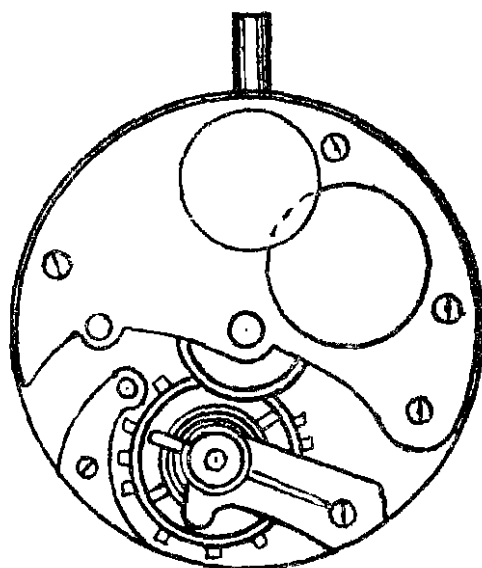
статочно для того, чтобы длина уменьшилась, что снова приведет к разнице в ходе между малыми и большими колебаниями,

Положение точки крепления к рольке имеет большое значение (§ 22). В висячих часах, если смотреть со стороны хода, а не циферблата, точка крепления спирали, закручивающейся от рольки направо (в направлении движения часовой стрелки), должна находиться (фиг. 37) на уровне оси с левой стороны. Левая спираль (фиг. 38) строится аналогичным способом, но в обратном направлении.

Для того, чтобы быть уверенным в правильном помещении точки крепления спирали, пользуются приемом Гроссмана:



Фиг. 37.

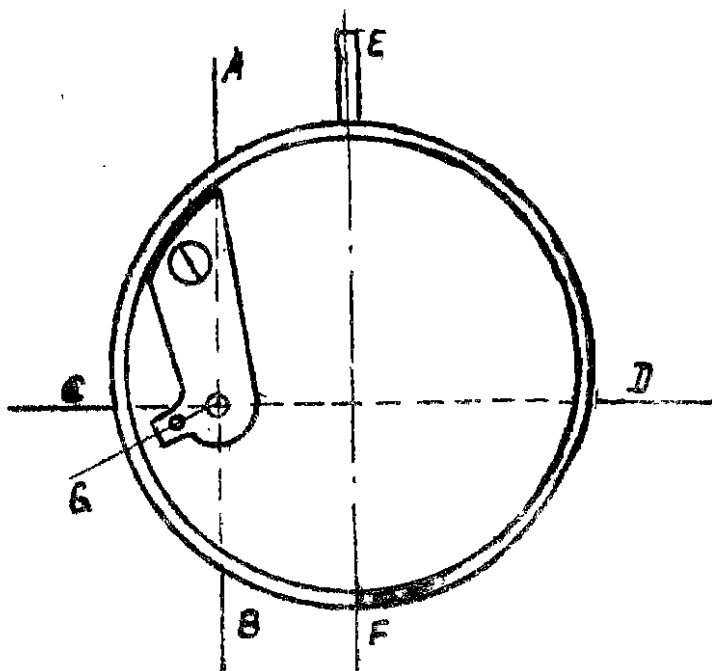


Фиг. 38.

чертят на бумаге две взаимно-перпендикулярных линии АВ и CD (фиг. 39), накладывая механизмы на чертеже совмещают центр баланса с их точкой пересечения и проводят EF через цифру 12 параллельно АВ. Делают заметку (точка G) напротив питона. Поднимают часы с бумаги, проводят прямую от G до O (фиг. 40), накладывают спираль с ролькой на пересечение линий АВ и CD таким образом, чтобы точка O точно совпала с центром рольки и точка крепления Т к рольке находилась

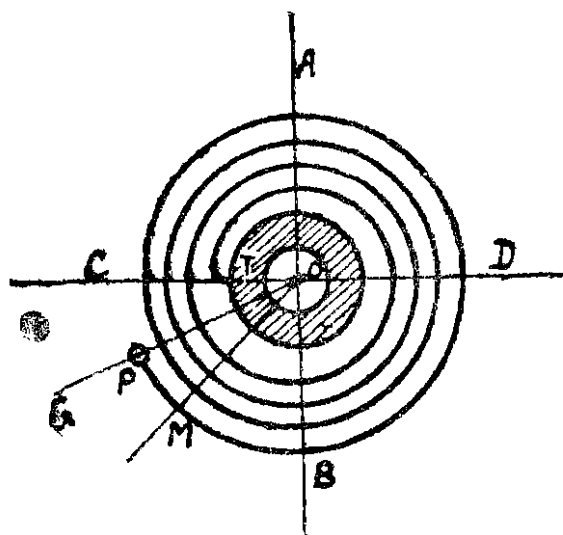
на линии СО. Тогда намечают на спирали в Р место, которое должен занять питон. Ясно, что при спирали обратного направления (фиг. 38) точка крепления будет справа от О на линии ОД.

Из § 22 видно, что лучший ход будет в 3-х вертикальных положениях. Может случиться, что по той или иной причине, которая ускользает от наблюдения поверителя или которую слишком трудно уничтожить, имеется отставание в положении с подвеской налево. Можно компенсировать этот недостаток помещая точку крепления таким образом, чтобы получить опережение в этом же самом положении. Для часов лежащих на стекле (фиг. 39 и 40) получили бы искомый результат, срезая приблизительно  $7/8$  оборота внутренней части спирали, чтобы установить точку крепления в М.



Фиг. 39.

Из фигур — табл. 1, видно, что подвеска, находясь справа (см. со стороны циферблата), имеет точку крепления не внизу, где она дала бы незначительное опережение, а слева, где она дает по фиг. 11 сильное отставание. Наоборот в часах с подвеской слева точка крепления будет находиться справа и даст опережение. Итак получаем от перемещения точки крепления из Т в М опережение в положении с подвеской налево.



Фиг. 40.

Это опережение тем больше, чем больше М удалено от Т и достигнет максимума, когда точка крепления совпадет с ОВ. При большом навыке удастся точку крепления поместить сразу так, чтобы исправить неполадки.

В нашем примере опережение в положении с подвеской вверх, будет меньше, чем оно было до исправления.

Иногда удастся получить одинаковость хода в вертикальных положениях, срезывая на ощупь внутреннюю часть спирали, пока не получится искомый результат.

Поверители в сущности действуют сообразно с правилами, но делают это вслепую и наощупь, тогда как зная правила, можно сознательно работать, что дает более быстрый и надежный результат. Сравнивая таблицу II-ю с фигурами от 37 до 40, нужно помнить, что первая относится к наблюдению со стороны циферблата, а вторые со стороны механизма.

Следует обратить внимание на то обстоятельство, что когда говорят о положении часов с подвеской направо или налево, то обычно подразумевается, что смотрят со стороны циферблата, когда же речь идет относительно баланса, то принято смотреть со стороны механизма.

Для ясности приводим таблицу изменений, в зависимости от положения подвески и точки крепления.

Положения подвески подразумеваются для часов, видимых со стороны циферблата, а положения точки крепления спирали, со стороны механизма и в висячем положении.

### **Спираль „правая“ (фиг. 37)**

(развертывающаяся вправо)

| Положение точки<br>крепления | П о д в е с к а |            |            |            |
|------------------------------|-----------------|------------|------------|------------|
|                              | Налево          | Направо    | Вверх      | Вниз       |
| Слева . . .                  | 0               | 0          | Опережение | Отставание |
| Справа . . .                 | 0               | 0          | Отставание | Опережение |
| Сверху . . .                 | Отставание      | Опережение | 0          | 0          |
| Снизу . . .                  | Опережение      | Отставание | 0          | 0          |

### **Спираль „левая“ (фиг. 38)**

(развертывающаяся влево)

| Положение точки<br>крепления | П о д в е с к а |            |            |            |
|------------------------------|-----------------|------------|------------|------------|
|                              | Налево          | Направо    | Вверх      | Вниз       |
| Слева . . .                  | 0               | 0          | Отставание | Опережение |
| Справа . . .                 | 0               | 0          | Опережение | Отставание |
| Сверху . . .                 | Опережение      | Отставание | 0          | 0          |
| Снизу . . .                  | Отставание      | Опережение | 0          | 0          |

Для большей ясности очень малые изменения, соответствующие некоторым положениям точки крепления и положения часов, обозначены 0.

**Пример.** Часы закрытые (Savonette) с „левой“ спиралью уходят вперед на 8 сек. в положении с подвеской направо. Точка крепления, согласно правилу, помещена направо от оси,

Чтобы найти какое именно исправление необходимо для спирали, достаточно отыскать на 2-ой таблице в колонке, соответствующей подвеске направо, «отставание», а в 1-ой колонке положение, соответствующее точке крепления.

Находят «сверху», значит придется срезать слегка спираль внутри, чтобы перенести точку крепления приблизительно на  $1\frac{1}{8}$  круга выше. Это исправление даст искомое запаздывание на 8 сек. Правда, в то же самое время получают легкое опережение в положении подвески налево, но, в конце концов, разница в ходе в различных вертикальных положениях уменьшается.

Присоединение внутренней кривой (фиг. 30) уничтожает изменения, происходящие от перемещения центра тяжести спирали, но она уничтожает также возможность исправления других изменений. Так как существуют и другие способы исправления изменений от различных положений, то употребления внутренней кривой рекомендуется во всех отношениях. Она позволяет более полную и точную регулировку. Зато она представляет то неудобство, что ее выполнение слишком трудно и она не поддается достаточно приближенному выгибанию.

Неправильная внутренняя кривая вредна и спираль снабженная ею работает хуже, нежели без таковой.

### § 30. Концевые кривые спирали.

Когда плоская или цилиндрическая спираль, должна иметь две концевые кривые, то их делают не заботясь о положении точек крепления, так как в этом случае они не имеют влияния.

Когда же дело идет о плоской спирали, имеющей только внешнюю концевую кривую, то начинают с крепления ее к рольке, наблюдая, чтобы отверстие штифта находилось абсолютно в плоскости спирали. Из этого не следует, что можно выгнуть виток спирали для расположения штифта в плоскости спирали, так как при изгибе неизбежно получится плохой ход. Кроме того, необходимо при определении внутренней точки крепления считаться с расположением внешней точки крепления так, чтобы спираль по возможности сохраняла, свою правильную длину.

Чтобы сделать кривую быстро и просто, поступают так: чертят циркулем на пластинке латуни типовую кривую (напр. фиг. 29), соответствующую размеру спирали. Затем берут спираль, внимательно следя, чтобы не нарушить параллельность витков и чтобы не было скручивания. Изгиб, образующийся при этом между приподнимаемой частью и плоскостью спирали не должен быть резким, но угол должен быть по возможности острым. Затем ставят спираль на чертеж и при помощи инструмента сжимают понемногу конечный виток, заставляя его постепенно принимать форму чертежа. Нужно начинать кривую

только от сгиба, находящегося над плоскостью спирали, для того, чтобы не позволить началу кривой приблизиться к соседнему витку и не допустить ее дотронуться до этого витка при больших амплитудах.

Вообще не следует долго мять спираль, а в особенности не скручивать ее. Искривления неизбежно вызывает нарушения молекулярного равновесия металла, которое можно восстановить слегка подогревая спираль на циферблате из белой эмали до того момента, пока капелька масла, помещенная рядом, не начнет дымиться. (J. B. Grandjean).

Так как установка спирали редко удается сразу, то ее выправляют уже во время хода (§ 24). Конечно, исправление всегда сместит точку крепления, но столь мало, что этим пренебрегают. Чтобы предупредить в известной степени отставание, вызванное впоследствии увеличением трения (сгущение масла и т. д.) хорошо сделать внешнюю кривую по фиг. 32; при этом получится децентрирование спирали со стороны N и как следствие, опережение при малых качаниях (§ 19).

Изготовив спираль с хорошей кривой, плоскую и вполне центрированную, уже не следует ее трогать для достижения абсолютной регулировки часов. Для этого воздействуют только нагрузкой на баланс (+ и —), в зависимости от обстоятельств.

### § 13. Баланс.

Мы видели в § 26 как необходимо, чтобы баланс и ролька были в равновесии. Для проверки этого часы пускают в ход в четырех вертикальных положениях при амплитуде колебания<sup>1)</sup> не было одного оборота. В большинстве случаев легко добиться этого, заводя пружину настолько, чтобы часы шли 3 часа.

Затем часы опять заводят полностью так, чтобы при подвеске вверх они имели амплитуду от  $1\frac{1}{4}$  до  $1\frac{1}{2}$  оборота. Снова наблюдают механизм в четырех положениях каждые три часа, затем третью серию наблюдений проводят при амплитуде приблизительно в  $440^\circ$ .

Для пояснения полученных результатов вернемся к изложенному уже нами в § 26, а именно, что смещение центра тяжести баланса книзу (когда он в покое) дает опережение при малых амплитудах, запаздывание при больших и не имеет влияния на ход при амплитуде в  $440^\circ$ .

Положим, что мы получили следующий ход (изменения всегда считаются по отношению к 24 часам хода, чтобы было возможно сравнение):

---

<sup>1)</sup> Суммарной. (Примеч. ред.).

| АМПЛИТУДЫ      | П о д в е с к а |          |           |          |
|----------------|-----------------|----------|-----------|----------|
|                | вверху          | внизу    | налево    | направо  |
| Малые (330°)   | + 9 сек.        | — 3 сек. | + 10 сек. | — 3 сек. |
| Средние (440°) | + 2 .           | + 3 .    | + 1 .     | + 2 .    |
| Большие (540°) | + 1 .           | + 4 .    | — 1 .     | + 4 .    |

Из этих цифр видно, что баланс не уравновешен. Утяжеленная часть его находится внизу, когда часы в промежуточном положении, между подвеской вверх и подвеской влево.

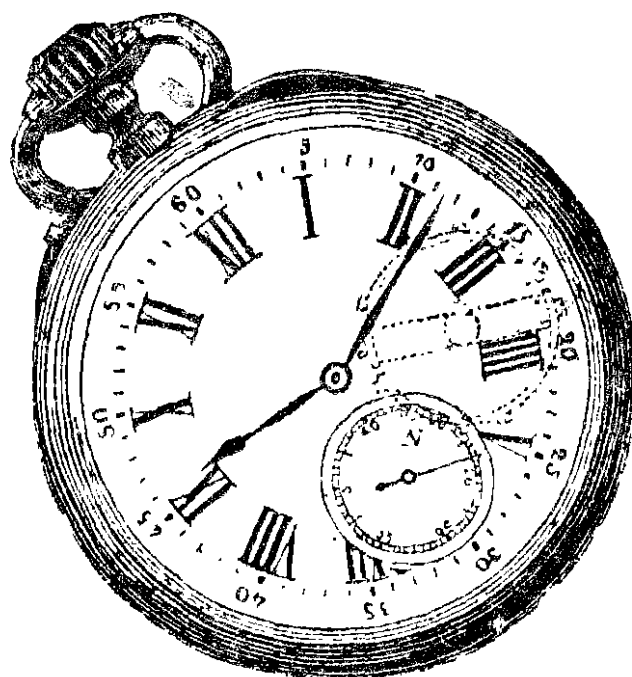
Помещая часы в эти положения, мы увидим (фиг. 41), что баланс должен быть облегчен в точке N (фиг. 32).

Возьмем еще пример.

| АМПЛИТУДЫ      | П о д в е с к а |          |           |          |
|----------------|-----------------|----------|-----------|----------|
|                | вверху          | внизу    | налево    | направо  |
| Малые (330°)   | + 15 сек.       | — 9 сек. | + 16 сек. | — 7 сек. |
| Средние (440°) | + 8 .           | — 1 .    | + 10 .    | + 1 .    |
| Большие (540°) | + 6 .           | + 1 .    | + 8 .     | + 3 .    |

Из этой таблицы видно, что причина не только в неуравновешенности баланса. Постараемся ее найти. При уменьшении амплитуды колебания баланса влияние внешних сил на баланс резко увеличивается (на что мы указывали неоднократно). Последнее подтверждается теорией баланса и спирали. При малых колебаниях баланса пропорционально увеличиваются все недостатки баланса и хода, поэтому рекомендуется поверять часы в возможно более широких пределах амплитуд и особенно внимательно при малых амплитудах.

Существует еще одна причина изменений изохронизма: деформация разрезного баланса под влиянием центробежной силы. Эта сила раздвигает ветви обода, в результате чего увеличивается радиус инерции баланса и происходит отставание. Чем



Фиг. 41.

больше скорость, т. е. чем больше амплитуда, тем больше отставание, следовательно отсюда получается запаздывание при больших колебаниях и опережение при малых.

Это влияние центробежной силы удачно компенсирует (по крайней мере частично) отставание «на покое». Однако, этим влиянием нельзя пользоваться как правилом, потому что оно значительно отличается в различных часах.

Очевидно, что баланс с тонким ободом и с тяжелыми компенсирующими винтами, больше реагирует на влияние центробежной силы, чем баланс с массивным ободом и маленькими винтами, предполагая, что оба баланса имеют одинаковый диаметр.

## **§ 32. Методика регулировки нормальных часов.**

Полагаем, что часы, которые мы должны регулировать, изготовлены согласно всех поставленных нами условий. «Ход» тщательно выверен, согласно существующих норм. Баланс плоский и круглый и настолько уравновешен, насколько это возможно. Ролька небольшой высоты (около 2 мм), часть оси, на которую она насажена, должна быть не полирована, но подвергнута тщательной шлифовке крокусом. Ролька плотно насажена на конусную часть оси. Это очень важно для того, чтобы регулировка не менялась при вставлении и снятии баланса и спирали.

Необходимо также, чтобы нижние края рольки были закруглены: внутри для того, чтобы ролька входила свободно при сборке и снаружи для того, чтобы ее легко было снять без риска задеть спираль.

Разрез должен быть возможно меньше. Спираль устанавливается согласно правил § 29. Что касается ее размеров, то на это нет вполне установленных правил, хотя очевидно, что большая спираль легче подвергается влиянию внешних толчков, чем маленькая. Поэтому, обычно избегают придавать плоской спирали диаметр, превосходящий половину внешнего диаметра баланса.

Когда пружина заведена на пол-оборота и часы повешены, то амплитуда колебания должна быть не меньше  $1\frac{1}{8}$  оборота. При полном заводе и горизонтальном положении часов, амплитуда может достигать не более  $1\frac{3}{4}$  оборота, в противном случае палец импульса будет снаружи ударять по вилке вследствие чрезмерной амплитуды колебания и внешних толчков.

Слишком малые колебания обыкновенно приписываются недостаткам хода (большая инерция колеса или вилки и т. д.), иногда же неправильным зацеплениям. В последнем случае и амплитуда неправильная.

Если нет неисправностей, то необходимо взять более сильную пружину или облегчить баланс. По выполнении всех условий механизм наблюдают в положении на горизонтальной плоскости в продолжении 2-х часов, затем нагружают или разгружают баланс на

желаемую величину так, чтобы суточные колебания не превышали 30 сек. Следуя указаниям § 8 легко достигнуть желаемых результатов не более чем после 2 исправлений. Затем, часы оставляют ходить в нормальных условиях около 8 часов, записывая температуру, после чего их проверяют в течение 4—5 часов в условиях отклонения температуры от нормальной на 15—20° выше или ниже.

Исправляют компенсацию до тех пор, пока отклонение не будет более 6—8 сек. максимум в сутки при разности температур в 30°.

Эта будет предварительная поверка на компенсацию для избежания изменений во время поверки от перемены окружающей температуры. Затем наблюдают часы в 4-х вертикальных положениях, уменьшая колебания амплитуды до минимума. Каждое наблюдение продолжается от 3—4 часов. Результаты записывают по весьма практичной системе Rambal'a.\*).

Эти наблюдения ведутся непрерывно круглые сутки в течение нескольких дней над часами полностью заведенными в 2-х положениях — на циферблате и на задней крышке. Затем сравнивают между собой ход часов в 4-х различных вертикальных положениях для того, чтобы видеть, достаточно ли баланс уравновешен (см. пред. §) и повторяют наблюдения до тех пор пока не убедятся, что недостатки в равновесии баланса и рольки совершенно устранены. Затем сравнивают суточный ход в двух горизонтальных положениях и в случае неравенства наблюдают, в каком положении ход неправилен. Для этого наблюдают часы каждые 3—4 часа и если ход в течении 24 часов в одном и том же положении не постоянен, тогда вероятно, что в данном положении происходит ненормальное трение, которое может быть следствием трения анкера о мостик или колонштейн о копье и т. д.

Очень часто происходит в сущности не соприкосновение частей, а кратковременное прилипание близких к ходу частей, вызываемое маслом; это одна из причин наблюдаемой неравномерности хода. Случается иногда, что масло, стекая вдоль вилки, приклеивает ее к упорному штифту.

Если ход различный в двух положениях, но постоянный, то надо искать причину изменений не в случайном трении, а в неправильном расположении какой либо части. Прежде всего следует проверить игру цапф баланса и положение подшипников. Если игра одной цапфы больше, чем другой, или подшипники не совершенно прямые, то это достаточно объясняет разность в ходе при двух положениях и следует исправить ошибку. Наконец, следует проверить не скручена ли спираль в точке крепления к рольке или у начала внешней кривой. Спираль, неправильно укрепленная штифти-

---

\*) Journal Suisse d'Horlogerie, XII année, p. 131.

ком в рольке, но которую путём изгибания поставили плоско, даёт всегда неправильный ход в двух горизонтальных положениях. Следовательно, необходимо внимательно, с большой тщательностью все проверить (J. B. Grandjean).

По достижении одинакового хода в горизонтальных положениях производят испытания на изохронизм, наблюдая часы в горизонтальном положении с пружиной ослабленной и полностью заведённой, т. е. заставляя амплитуду колебания изменяться насколько возможно.

Мы видели, что среди причин, производящих запаздывание или опережение при малых амплитудах, некоторые взаимно уничтожаются, как например центробежная сила, дающая опережение при малых колебаниях и опаздывание «на покое», которое вызывает опаздывание. Эти различные действия компенсируются отчасти, но не полностью, так что если одна из причин преобладает, то следует делать исправления в соответствующем направлении.

Следует считаться также с увеличением трения в вертикальном положении, а также с возможностью в дальнейшем сгущения масла (§ 18).

Предвидя запаздывание, не следует добиваться абсолютного изохронизма, но следует добиваться опережения при малых колебаниях, которое при анкерном ходе достигает приблизительно 2—3 секунды, т. е. прежде всего следует исправить «ход».

Если запаздывание происходит при малых колебаниях, можно это исправить, увеличивая затяжку; если при малых колебаниях будет опережение, тогда надо немного более увеличить покой или слегка сместить мертвую точку в сторону поднятия входа.

Именно эти исправления относятся к вертикальному положению и поскольку дело касается «хода», они должны производиться одновременно с исправлениями на изохронизм. К несчастью здесь нет определенных правил. Изменения от неправильности хода бесконечно разнообразны и за редкими исключениями, о которых мы еще скажем, очень трудно установить связь между известным ходом и неполадками. Лучшее правило — это хорошо изучить результаты проверки хода и на основе последнего определить те аномалии, от которых произошли наблюдаемые изменения хода, как между большими и малыми амплитудами, так и между различными вертикальными положениями (§ 28).

Если, несмотря на все исследования и исправления, сделанные в «ходе», изменения между вертикальными положениями не вполне исключены, тогда исправляют смещение точки крепления спирали (§ 29).

Также если отсутствует изохронизм, то этот дефект можно уменьшить, изменяя внешнюю концевую кривую, согласно § 25. Считается удовлетворительным ходом такой, когда наибольшая

разница между различными вертикальными и горизонтальными положениями (исключая положение подвеской вниз) не превышает 5 сек. в сутки.

В поисках предела в регулировке, можно идти и дальше, но это будут лишь только попытки, а регулировка будет длительная и тяжела. С другой стороны сомнительно, чтобы эти попытки привели к улучшению обычных часов.

До сих пор часы подвергались наблюдению за короткие промежутки времени с одной стороны, чтобы сэкономить время, с другой в особенности для того, чтобы наблюдать отдельно хода при малых и при больших амплитудах колебаний, потому что часы идут достаточно равномерно только при заводе каждые три или четыре часа.

Исправив все недочеты в установленных пределах, остается только наблюдать, как идут часы при нормальных условиях, т. е. заводя их каждые 24 часа, и придавая им различные положения в соответствии с установленным испытаниями. Обычно они идут лучше всего при нормальных условиях чем если бы они шли при малых амплитудах.

Суточные изменения в основном одновременно зависят от недостатков изохронизма и непостоянства трения. Нелегко помешать последнему, в особенности если цапфы баланса толсты, но если добились изохронизма, то трение не будет иметь большого влияния на продолжительность колебаний и изменения в суточном ходе могут дойти до минимума.

Следуя данным принципам, возможно регулировать и сложные механизмы (репетиций, боевые, хронографы и т. п.). Основной принцип — это достигнуть идентичности в ходе как при малых, так и при больших амплитудах колебаний.

### § 33. Различные примеры.

В пояснение к предыдущему приведем несколько примеров. В двух из них показана полная поверка, а в других частные случаи, которые обычно встречаются.

**Пример № 1.** Часы калибра 43 мм, правая спираль, анкерный ход. Угол затяжки при входе  $19^\circ$  и  $14^\circ$  при выходе; это значит углы затяжки слишком велики. Кроме того, ось якоря имеет большую игру в цапфах 0,025 мм. Часы полностью заведенные ходят в лежащем положении с амплитудой  $1\frac{3}{8}$  оборота и в вертикальных —  $1\frac{1}{8}$  оборота.

Излишек затяжки вполне может служить причиной малости амплитуды, поэтому пока не будем затрагивать этого вопроса.

Затем наблюдаем при самых больших амплитудах каждые 4 часа и 3 раза подряд в каждом положении, чтобы определить не-правильности.

Обозначения принятые в Женеве и Безансоне: «отставание» берется со знаком минус (—) и «опережение» со знаком плюс (+).

Наблюдения дают следующие результаты (всегда отнесенные к суточному ходу):

| Положение<br>на крышке<br>(П. Н. К.) | Положение<br>на цифер-<br>блате<br>(П. Н. Ц.) | П о д в е с н а |            |                          |              |
|--------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------|------------|--------------------------|--------------|
|                                      |                                               | Сверху<br>h     | Снизу<br>b | Налево<br>g              | Направо<br>d |
| — 49 сек.                            | — 59 сек.<br>Ход неправ                       | — 37 сек.       | — 48 сек.  | — 58 сек.<br>Ход неправ. | — 42 сек.    |

Неправильности, которые были обнаружены в положении на циферблате и в вертикальном положении подвеской налево, происходили от прикосновения копья к колонштейну в этих двух положениях. После того как колонштейн был укорочен наблюдения при больших амплитудах дали (в секундах):

| П. Н. К. | П. Н. Ц. | П о д в е с н а |      |      |      |
|----------|----------|-----------------|------|------|------|
|          |          | h               | b    | g    | d    |
| — 49     | — 51     | — 37            | — 48 | — 53 | — 42 |

Этот ход более правильный, однако, еще недостаточно удовлетворительный. Во всех положениях, особенно в положениях подвеской налево и направо, наблюдают изменения от 1 до 1,5 сек. После установления причины неправильностей наблюдают ход часов при самых малых амплитудах, величина которых в лежащем положении будет не менее одного оборота, а в вертикальном положениях приблизительно  $\frac{7}{8}$  оборота; ход будет таким (в секундах):

| П. Н. К. | П. Н. Ц. | П о д в е с н а |      |      |      |
|----------|----------|-----------------|------|------|------|
|          |          | h               | b    | g    | d    |
| — 42     | — 44     | — 39            | — 44 | — 57 | — 33 |

Сравнивая этот ход с предыдущим мы видим, что при малых колебаниях часы уходят вперед в положении подвеской вниз и подвеской направо и отстают в двух других положениях.

В среднем часы уходят вперед по сравнению с предыдущим, особенно в лежащих положениях. Прежде всего здесь нет равновесия баланса, который заставляет часы идти вперед в положениях подвеской вверх и направо и отставать в других положениях; кроме того, есть общая причина опережения при малых колебаниях. Исправим сначала неуравновешенность баланса. Центр тяже-

сти баланса слишком смещен книзу, когда часы помещены так, что 10 час. 30 мин. находятся наверху. Уравновесив баланс мы получим следующие ходы:

Малые амплитуды (в секундах)

| п. н. к. | п. н. ц. | h    | b    | g    | d    |
|----------|----------|------|------|------|------|
| — 26     | — 28     | — 17 | — 36 | — 34 | — 22 |

Большие амплитуды (в секундах)

|     |      |      |      |      |      |
|-----|------|------|------|------|------|
| — 3 | — 35 | — 21 | — 32 | — 37 | — 26 |
|-----|------|------|------|------|------|

Теперь мы устанавливаем вполне ясно общее опережение при малых амплитудах, которое, вероятно, происходит от излишка затяжки. Исправив затяжку, мы получаем большие амплитуды:  $1\frac{5}{8}$  оборота в лежащем положении с заведенной пружиной. Ход при малых колебаниях даст:

(в секундах)

| п. н. к. | п. н. ц. | h   | b    | g    | d    |
|----------|----------|-----|------|------|------|
| — 6      | — 7      | — 7 | — 27 | — 24 | — 11 |

Мы имеем еще порядочное отставание в положении подвеской налево. Отставание подвеской вниз нормально относительно точки крепления волоска и на этом не придется заниматься.

Отставание в положении подвеской налево можно отнести (хотя и с некоторой неуверенностью) к излишку игры в цапфах оси. Сменив камни, получим следующий ход при малых колебаниях:

(в секундах)

| п. н. к. | п. н. ц. | h   | b    | g    | d    |
|----------|----------|-----|------|------|------|
| — 6      | — 7      | — 7 | — 22 | — 14 | — 11 |

Недостаток исправлен и нам ничего не надо исправлять в точке крепления. Кроме того, маленькие неправильности хода, которые упорно оставались до сих пор, исчезли. Они тоже, следова-

тельно, происходили от слишком большой игры в цапфах оси. Оставляя в стороне положение с подвеской вниз, мы констатируем, что средний ход в 3-х вертикальных положениях — 17,7 сек., тогда как средний в двух горизонтальных положениях — 5,6 сек.

Мы имеем в горизонтальных положениях отставание, которое необходимо исправить. Мы исправляем правую спираль по § 25 фиг. 32 и получаем, при малых амплитудах, следующий ход.

(в секундах)

| п. н. к. | п. н. ц. | h   | b  | g  | d  |
|----------|----------|-----|----|----|----|
| +4       | +4       | +10 | -7 | +2 | +5 |

Можем рассматривать этот ход, как вполне приемлемый и будем наблюдать теперь часы в нормальных условиях, т. е. каждые 24 часа при полном заводе. Наблюдения при этом будут следующие:

(в секундах)

| п. н. к. | п. н. ц. | h  | b  | g  | d  |
|----------|----------|----|----|----|----|
| +2       | +3       | +6 | -7 | +2 | +1 |

После нескольких исправлений градусником, чтобы уничтожить среднее опережение в 3 сек. в 5-ти обычных положениях, получаем

(в секундах)

| п. н. к. | п. н. ц. | h  | g  | d  |
|----------|----------|----|----|----|
| -1       | 0        | +3 | -1 | -2 |

Эти часы, имея легкое опережение при малых амплитудах, долго сохраняют выверку, несмотря на сгущение масла.

**Пример № 2.** Часы с ремонтуаром, калибра 43 мм., анкерные и с правой спиралью.

Ход подвергся обыкновенному испытанию, которое обнаружило многие недостатки. Но так как каждый из недостатков имеет вполне определенное влияние, мы разберем их по мере обнаруживания.

Часы, пущенные в ход в лежащем положении на задней крышке и наблюдаемые в продолжении 6 дней в двух горизонталь-

ных положениях: на крышке и на циферблате (П. Н. К. и П. Н. Ц.) при изменении амплитуд от  $\frac{3}{4}$  до 1,5 оборотов, дали очень неравномерный ход, с колебаниями от — 8 сек. до — 59 сек.

Кроме того, можно констатировать сильное опережение при малых амплитудах и неправильности более значительные при положении на нижней крышке. После выверки оказалось, что ветви би-металлического баланса вогнуты слегка, а также иногда касаются мостика якоря.

Обнаруженные неправильности были на самом деле значительно больше при малых амплитудах; это объясняется тем, что при больших амплитудах центробежная сила, раздвигая ветви баланса, уменьшает вышеуказанный недостаток; еще более значительные неправильности обнаруживаются в положении на циферблате, потому что тогда баланс ближе всего к анкерному мостику.

После сделанного исправления, т. е. спиливания мостика и выправления ветвей баланса, часы начинают сильно отставать — 547 сек. (вследствие увеличения момента инерции баланса).

После уменьшения веса баланса и регулировки его на равновесие, приблизительно в середине ход становится — 63 сек., но продолжает быть неправильным и дает еще значительную разницу между П.Н.К. и П.Н.Ц. Эта разница изменяется с амплитудами: для малых амплитуд ход при П. Н. К.: — 44 сек., при П. Н. Ц.: — 82 сек., тогда как для больших амплитуд она почти такая же как в двух горизонтальных положениях, т. е. около 60—70 сек. Кроме того, цапфа баланса со стороны циферблата слишком коротка, конус цапфы почти касается камня и масло между ними вызывает увеличение трения между конусом и камнем. Палец импульса наклонен в сторону оси приблизительно на 5 градусов.

Наконец, заставляя баланс работать без спирали, устанавливают что он идет хорошо в П. Н. К. и останавливается в П. Н. Ц. Внимательно наблюдая «ход» находят, что игра рожек вилки очень мала; колонштейн касается в углах рожек; игра в высоту баланса и якоря слишком велика (0,02 мм.). После исправления всех этих недостатков ход принимает средние амплитуды (полтора оборота) и дает в П. Н. К. — 77 сек., в П. Н. Ц.: — 91 сек. Разница хода в двух положениях, которая ранее была в 35 сек., доведена до 14 сек.; но это еще недостаточно и есть еще неправильности: зазор между пальцами импульса и рогом выхода недостаточен, есть касание в средней части кривой. Баланс без спирали останавливается еще иногда П. Н. К. на роге выхода.

После исправления этого недостатка часы дают следующий ход: — 53 сек. и П. Н. Ц.: — 62 сек. Разность хода при двух горизонтальных положениях, может произойти вследствие неисправности подпятника или от разности в игре в цапфах баланса.

Тщательное исследование этих частей не обнаруживает ничего подобного, а выявляет серьезный недостаток в спирали.

После того, как она была заштифтована в рольке, которая села слишком низко, оказалось, что спираль скрутилась в точке крепления. Исправив ее при соответствующем нагреве и заштифтовав в другой рольке, получаем ход:

$$\frac{\text{П. Н. К.}}{+43} \quad \frac{\text{П. Н. Ц.}}{+42}$$

т. е. совершенно правильный.

Проследим теперь поверку этих часов.

Наблюдение в вертикальных положениях дает следующие результаты:

(в секундах)

|                                                | П о д в е с к а |     |     |     |
|------------------------------------------------|-----------------|-----|-----|-----|
|                                                | h               | b   | g   | d   |
| Большие амплитуды<br>( $1\frac{3}{8}$ оборота) | +44             | -16 | +40 | +49 |
| Малые амплитуды<br>( $\frac{3}{4}$ оборота)    | +46             | +62 | +65 | +42 |

Здесь мы не имеем равновесия баланса, отчего происходит опережение при малых амплитудах, в положениях подвески вниз и налево, т. е. когда часы помещены так, что 4 ч. 30 м. находится наверху, центр тяжести баланса должен быть смещен кверху. Кроме того, имеем средний ход при

Больш. ампл. +44,7 сек.

Малых . +53,8

Мы имеем, следовательно, общее опережение при малых амплитудах. Штифты градусника были сжаты так, что спираль не могла свободно скользить. Воспользуемся опережением при малых амплитудах, чтобы придать небольшую игру спирали (§ 9). Уравновесив баланс, получим

(в секундах)

|                  | П. Н. К. | П. Н. Ц. | П о д в е с к а |     |    |     |
|------------------|----------|----------|-----------------|-----|----|-----|
|                  |          |          | h               | b   | g  | d   |
| Больш. амплитуды | -13      | -22      | -9              | -16 | -9 | -12 |
| Малые            | -3       | -1       | -5              | -7  | -1 | -6  |

После разведения штифтов градусника наощупь, ход делается:

(в секундах)

|                 | п. н. к | п. н. ц. | П о д в е с к а |      |      |      |
|-----------------|---------|----------|-----------------|------|------|------|
|                 |         |          | h               | b    | g    | d    |
| Больш амплитуды | - 47    | - 45     | - 43            | - 31 | - 42 | - 46 |
| Малые           | - 43    | - 42     | - 42            | - 51 | - 40 | - 45 |

Часы теперь идут удовлетворительно и остается только подогнать вес баланса так, чтобы довести суточные изменения до нуля.

После этой подгонки веса и легкого исправления градусника получают нормальный ход при заводке каждые 24 часа.

(в секундах)

| п. н. к. | п. н. ц. | П о д в е с к а |     |     |
|----------|----------|-----------------|-----|-----|
|          |          | h               | g   | d   |
| - 3      | - 1,5    | + 1,5           | - 2 | + 1 |

Часы таким образом выверены в очень хороших условиях.

**Пример № 3.** Часы 43 мм. анкерные, закрытые, спираль — из палладиума — левая. Эти часы имеют удовлетворительный ход во всех положениях, кроме положения подвеской налево, где отставание равно 20 сек. Внутренняя точка крепления спирали находится в соответствующем месте, т. е. направо от оси, когда часы в покое и подвеской кверху. Амплитуды малы,  $1\frac{1}{8}$  оборота в вертикальных положениях. При проверке оказалось, что точка крепления находится почти прямо под осью, значит внизу, когда часы висят.

Часовщик должен был в начале поместить точку крепления направо, но видя необходимость укоротить спираль снаружи, он не подумал о расположении точки крепления.

Спираль из палладиума тяжелее стальной (при тех же размерах) и естественно, что неправильности хода, зависящие от смещения центра тяжести, более заметны; вот почему тут мы имели разницу в ходе в 20 сек., со стальной спиралью она не превысила бы и половины этой величины. После исправления этого недостатка часы еще не шли удовлетворительно. Было запаздывание в среднем ходе в вертикальных положениях против горизонтальных и опережение в положении подвеской вверх. Отставание в вертикальных положениях уничтожено уменьшением очень большого (3 градуса) покоя на плече выхода. В то же время амплитуда колебания благоприятно увеличилась на одну четверть оборота. Не-

большое исправление неуравновешенности баланса уничтожило сильное опережение в положении подвеской сверху — которое впрочем, уже почти вполне исчезло вследствие увеличения амплитуды.

**Пример № 4.** Часы 30 мм. (13 линий), закрытые, левая спираль. Отстают в среднем на 32 сек. в вертикальных положениях.

Довольно большая игра спирали между штифтами. После уничтожения игры отставание доведено до 14 сек. Остальное происходит, очевидно, от неисправности «хода». Надо заметить, что в часах малого размера (как напр. в данных), ошибки «хода» имеют большее влияние, чем в часах от 40 мм. и выше.

Поэтому в данных часах отставание, зависящее от «хода» трудно уничтожить.

**Пример № 5.** Часы 28 мм. (12 лин.) открытые, правая спираль. Опережение на 28 сек. в положении подвеской налево, против положения подвеской направо.

Внутренняя точка крепления помещена неправильно. Ставят ее на место, отрезая спираль изнутри. Разность в ходе с 28 сек. доведена до 6 сек. в том же самом положении.

**Пример № 6.** Часы 43 мм., анкерные, плоская спираль без концевых кривых. Со, следующим ходом:

(в секундах)

| П. Н. К. | П. Н. Ц. | П о д в е с к а |      |      |      |
|----------|----------|-----------------|------|------|------|
|          |          | h               | b    | g    | d    |
| — 7      | — 8      | — 19            | — 11 | — 29 | — 13 |

Амплитуды колебания, в вертикальных положениях от 490 до 530°. Эти часы идут плохо в П. Н. К. и П. Н. Ц. и кроме того не изохронны, а также сильно отстают при малых амплитудах.

Можно сразу признать, что все ошибки происходят от неправильного крепления в рольке. Видно, что «ход» выполнен очень тщательно, цапфы, отверстия, подпятники безупречны. Этот случай дает поразительный пример, когда очень хорошие часы плохо идут от неумения применить законы спирали. Точка крепления к рольке, при балансе в положении покоя, помещается почти как раз под мостиком баланса. Приняв во внимание § 25, увидим, что в случае отсутствия концевых кривых, усилие скручивания, происходящее от эксцентрического развертывания спирали, дает опережение при больших колебаниях. Но как только, вследствие трения в вертикальных положениях, амплитуда колебания уменьшается, то получается отставание. Кроме того, согласно § 29, смещение центра тяжести спирали производит запаздывание при положении подвески налево и опережение при подвеске направо. Срезывая

спираль и перемещая внутреннюю точку крепления налево от оси приблизительно на линию соединяющую ось с питоном, получим, только слегка увеличивая вес баланса, следующий ход:

(в секундах)

| п. н. к. | п. н. ц. | П о д в е с н а |      |      |      |
|----------|----------|-----------------|------|------|------|
|          |          | б               | н    | л    | п    |
| + 28     | + 27     | + 34            | + 27 | + 28 | + 31 |

Еще раз нагрузив осторожно баланс, получим

| п. н. к. | п. н. ц. | П о д в е с н а |     |     |     |
|----------|----------|-----------------|-----|-----|-----|
|          |          | б               | н   | л   | п   |
| - 1      | - 2      | + 5             | - 2 | - 1 | + 2 |

Что дает вполне удовлетворительный ход, особенно для часов, не имеющих концевых кривых.

**Пример № 7.** Часы 43 мм., анкерные, левая спираль. Плохого качества. У них плохой суточный ход, каждые сутки разнятся на 3—4 сек.

При обследовании часы обнаруживают полное отсутствие изохронизма, с сильным опережением при малых амплитудах колебания баланса. Кроме того амплитуды непостоянны и изменяются от  $3^{\circ}$  до  $11^{\circ}$  оборотов при одном положении. При проверке было установлено, что в последних сцепляющихся зубчатых парах имеет место спирание, причем это спирание не одинаково в различных положениях, но главная неправильность заключается в отсутствии изохронизма, которая всегда дает себя знать наличием значительного опережения при малых амплитудах.

Ходовое колесо изогнуто с одной стороны, очень плохой конструкции, слишком тяжелое и плохо сделано.

Исправления производят без особой тщательности. Облегчив ходовое колесо приблизительно на одну треть первоначального веса, уменьшаем опережение при малых амплитудах (полоборота) с 18 сек. до 7 сек. (§ 28). Исправляют эти 7 сек. слегка разводя штифты градусника. Таким образом, получают почти совершенно изохронный ход, несмотря на весьма плохое качество механизма. Этот пример доказывает, до какой степени можно в некоторых случаях исправить путем регулировки даже очень плохие часы. Эти часы еще подверглись очень важным исправлениям в зацеплениях, после чего годились к употреблению.

**Пример № 8.** Хронометр 50 мм. (22 линии). Правая цилиндрическая спираль с двумя кривыми. Баланс с регулируемыми грузами типа морского хронометра, ход с пружинным спуском.

Очень хорошие часы, которые могли быть легко доведены до очень хорошего суточного хода; все-же они дают разницу на 24 сек. между вертикальными и горизонтальными положениями. Мертвая точка помещена, как это принято у морских хронометров (§ 19) таким образом, чтобы рычаг импульса в положении покоя находился по возможности ближе к зубу входа.

Импульс дается таким образом весь целиком в восходящей части колебания и производит, следовательно, отставание более значительное при малых колебаниях, нежели при больших, — следовало бы получить отставание при малых амплитудах, мы же получаем обратное. Этот случай, часто встречающийся при проверке морских хронометров, очень интересен для изучения. Наблюдаемое явление происходит исключительно вследствие действия центробежной силы на балансы морских хронометров с тонким ободом и тяжелыми регулирующими массами, приложенными к одной точке, а не распределенными по всей окружности, как в балансе карманных часов. Мы видим здесь, что хотя импульс в «ходе» вообще содействует отставанию в малых амплитудах, опережение, причиненное центробежной силой, на много превосходит его и для исправления следует прибегнуть к деформации концевых кривых спирали. Для того, чтобы получить отставание в малых амплитудах между  $400^\circ$  до  $500^\circ$ , как в данном случае), надо помнить, что спираль должна отойти в сторону, противоположную внешней точке крепления. Нам придется деформировать спираль и с внутренней стороны так, что при эксцентрическом движении ось спирали остается параллельной самой себе.

Таким образом доводим опережение в малых амплитудах до 3-х сек. в сутки, что считается хорошим ходом.

**Пример № 9.** Часы 50 мм. Брежетовские, с хронометровым спуском (ходом). Два барабана, обеспечивающие продолжительность хода в течение 42 часов, цилиндрическая спираль толще у рольки, чем у питона, без концевых кривых. Часы не имеют фюзе (улитки). Такая форма спирали по распространенному ранее мнению давала изохронный ход. Вот ее ход при различных натяжениях пружины барабана.

| От 0 до 12 ч.  | 0 секунд |              |
|----------------|----------|--------------|
| От 12 до 24 ч. | + 20     | (опережение) |
| От 24 до 36 ч. | + 40     | .            |
| От 36 до 42 ч. | + 40     | .            |

В четырех различных вертикальных положениях различие в ходе превышает 2 минуты. Компенсированный баланс снабжен 4-мя регулировочными винтами. Удерживая его в малых амплитудах, регулируют расположение винтов так, чтобы уравнивать ход в четы-

рех вертикальных положениях до 5 сек. Пробуя затем ходы в 4-х вертикальных положениях при больших амплитудах получим, что разница возрастает до 50 сек., что происходит, очевидно, от смещения центра тяжести спирали при больших колебаниях. Часы не имеют градусника и спираль зажата между двумя винтами в питоне, что позволяет легко освобождать ее конец. Затем помещают баланс со спиралью и ролькой на баланс-ваге и убеждаются, что центр тяжести всей системы строго совпадает с геометрической осью, что является подтверждением результата, полученного от регулировки винтами, согласно наблюдаемым ходам при малых амплитудах.

Не получив удовлетворительного хода поправляют рольку, которая очень тяжела и неуравновешена. Затем уравнивают баланс и придают концам спирали форму теоретических кривых Филлипса. Без других поправок ход при всех степенях раскручивания пружины делается правильным. При вертикальных положениях самая большая разница в ходе падает до 6 сек. и изменение при переходе из горизонтального в вертикального положение подвеской вверх дает отставание 4 сек.

Этот замечательный результат совершенно уничтожает существовавшее мнение об изохронизме данного типа спирали. Спираль вела себя как и обыкновенная (по данным Ж. Гроссмманна).

**Пример № 10.** Часы 45 мм. (20 линий). Хронометровый ход с коромыслом, спираль цилиндрическая, имеющая только 6 оборотов большого диаметра с концевыми кривыми, с неправильным ходом:

(в секундах)

| П. Н. К. | П. Н. Ц. | П о д в е с к а |     |     |    |
|----------|----------|-----------------|-----|-----|----|
|          |          | б               | н   | л   | п  |
| +3       | +8       | -10             | -19 | -42 | +1 |

Как видно, происходят большие изменения в вертикальных положениях, из которых среднее вертикальное дает большее отставание против горизонтального положения.

Кроме того, наблюдается ощутительная разница между ходами при заведенном и свободном положении пружины барабана. После осмотра констатируют, что кривая у рольки не соответствует теоретической. Точно выправив ее по кривой № 7 табл. II, получают следующий ход:

(в секундах)

| П. Н. К. | П. Н. Ц. | П о д в е с к а |    |    |    |
|----------|----------|-----------------|----|----|----|
|          |          | б               | н  | л  | п  |
| -7       | -11      | -6              | -8 | -3 | -3 |

Кроме того, в вертикальных положениях получается опережение, которое легко исправить, немного сместив поднятие. Но этого не сделали, находя ход удовлетворительным (по данным Г. Баттансона).

Очевидно, часы с плоской спиралью не дали бы таких значительных отклонений, как в первом указанном ходе. Очевидно также, что цилиндрическая спираль, снабженная не теоретическими кривыми, дает большее отклонение в ходе в вертикальных положениях, чем спираль плоская, и чем диаметр спирали больше, тем отклонение значительней. Причина в том, что плечо, на конец которого действует смещение центра тяжести спирали, длиннее чем у плоской спирали или у цилиндрической спирали меньшего диаметра.

#### **Пример № 11. Часы 43 мм., анкерные.**

Эти часы очень хорошо отрегулированы и вернулись из обсерватории после того как они не дали хорошего результата в термостате при  $0^{\circ}$ . (Надо заметить, что описанное явление происходит лишь при  $0^{\circ}$ , те же часы уже при  $+5^{\circ}$  дали очень хорошие результаты).

При проверке они показали самый плохой ход, до 13 сек. суточного изменения и среднее отставание приблизительно 20 сек., которое происходило от недостатка с виду очень незначительного: игра баланса в высоту была лишь 0,005 мм. и от сжатия при холоде, в связи с различными коэффициентами линейного расширения латуни и стали (мостик и ось) уничтожался этот незначительный зазор, что в связи со сгущением масла, затрудняло ход баланса до такой степени, что амплитуда колебания в лежачем положении падала с  $1\frac{1}{3}$  оборота до  $\frac{1}{2}$  оборота (по данным Голэй-Одемар).

Этот опыт дополняет указание данное в § 28, где рекомендуется уменьшать насколько возможно игру в высоту, однако, не переходя известного предела. Этот опыт определил нисший предел игры, которая не должна быть меньше 1,5 сотых миллиметра.

#### **Примечание 1. Влияние штифтов градусника (§§ 9 и 10).**

Влияние раздвижения штифтов градусника, вычисленное в §§ 9 и 10 представлено в числах не совсем совпадающих с найденными М. Гроссманном, более значительны. Это происходит от того, что в моих вычислениях я не принял в расчет силу упругости спирали, находящейся между штифтами и питоном. Начиная с момента, когда спираль упирается в один из штифтов, я считал, что этот конец спирали уже не существует. На самом деле этот конец спирали отчасти участвует в работе спирали и влияет на продолжи-

тельность колебания. Окончательная формула, выведенная Гроссманном при помощи интегрального исчисления для первого случая (спираль в одинаковом расстоянии от штифтов) будет:

$$\frac{1}{2} T = \sqrt{\frac{A(L+1)}{K}} \arcsin \frac{\gamma}{\alpha} + \sqrt{\frac{AL}{K}} \arccos \frac{\gamma - \frac{\gamma l}{L+1}}{\alpha - \frac{\gamma l}{L+1}}$$

Эту формулу можем легко сравнить с формулой § 9. Числа, полученные Гроссманном, увеличена против § 9 приблизительно на 30%. Для второго случая формула Гроссмана выражается так

$$\frac{1}{2} T = \sqrt{\frac{AL}{K}} \arcsin \frac{\gamma}{\alpha} + \sqrt{\frac{A(L+1)}{K}} \arccos \frac{\gamma + \frac{\gamma l}{L}}{\alpha + \frac{\gamma l}{L}}$$

Числа, полученные здесь, разнятся от § 10 на 10% в сторону уменьшения результата. Я не придаю большого значения этой разнице, потому что она не влияет на окончательные выводы. Но это не значит, что влияние этой части спирали незначительно, и я надеюсь в дальнейшем вернуться к этому вопросу.

**Примечание II.** Поверка хода с пружинным спуском § 19 и § 20.

Я в принципе не считаю должным всегда помещать поднятие посредине угла импульса и в мертвой точке. Я только принял для удобства доказательства «ход» с большим поднятием, расположенным посредине угла импульса. Это положение нормальное и логичное, которое должно было бы существовать, если бы не приходилось считаться с причинами, вызывающими вторичную ошибку и исходя отсюда, я находил, как поверитель должен смещать поднятие в зависимости от вышеуказанных причин. Вообще помещают поднятие ближе к зубцу входа во избежание остановки баланса от сотрясения, останавливающего баланс при прохождении угла импульса; особенно надо это учесть в морских хронометрах. В этом случае баланс остановится и будет находиться в покое до нового толчка, который должен быть настолько значителен, чтобы освободить ходовое колесо.

Следовательно, есть серьезное основание помещать большое поднятие близко к зубцу входа. Но все же остается правильным, что хронометр, таким образом выверенный, отстаёт при малых колебаниях, если другая причина не изменит его ход. В морских хронометрах центробежная сила даёт совершенно другие результаты. Она вызывает настолько сильное опережение при малых колеба-

ниях, что его никакими имеющимися средствами не удастся вполне компенсировать.

Отсюда не следует, что я рекомендую предпочесть одно положение перед другим вообще, но в каждом случае следует применяться сообразно обстоятельствам.

**Примечание III.** Введение поправок на изохронизм концевыми кривыми (§ 25).

Я думаю, будет уместным резюмировать здесь выводы для исправления концевых кривых. Я допускаю, что спираль снабжена, в зависимости от случая, одной или двумя концевыми теоретическими кривыми. Эта спираль сама по себе (особенно с двумя концевыми кривыми) абсолютно изохронная и, если ее изменяют, то лишь для того, чтобы исправить нарушение изохронизма, происходящее от другой части механизма и констатированное по наблюдениям в больших и малых амплитудах.

Скажем о плоской спирали, снабженной одной внешней кривой, где следует остановить наше внимание на методах исправления хода согласно сделанным наблюдениям.

Всякое нарушение изохронизма вызывается эксцентрическим развертыванием спирали, и зависит от углового расстояния, которое отделяет среднее направление этой эксцентричности от точки крепления к рольке.

Деформация, которую претерпевает концевая кривая спирали будет зависеть, как от расположения самой кривой, так и от положения точки крепления к рольке и должна происходить в части кривой, расположенной на 90 градусов в направлении навивки спирали, независимо от того, правая или левая спираль.

Для того чтобы получить опережение при малых амплитудах колебания необходимо подвинуть кривую к центру, а для получения отставания в малых колебаниях ее надо удалять от центра.

Чтобы получить опережение при цилиндрической спирали и малых амплитудах, надо деформировать обе концевые кривые в одном и том-же направлении, сохраняя радиусы кривых.

Чтобы получить отставание в малых амплитудах надо деформировать обе концевые кривые в обратном направлении, сохраняя радиусы кривых.

Первая деформация произведет эксцентричное развертывание спирали в обратных направлениях вверх и вниз так, что качаясь, спираль будет наклоняться то в одну сторону, то в другую.

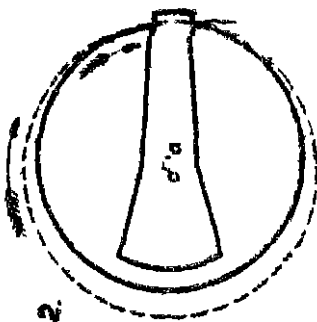
Вторая деформация заставит, напротив, развертываться верхнюю и нижнюю часть спирали в том-же направлении так, что спираль переместится параллельно самой себе. Этот последний случай чаще всего встречается в морских хронометрах, потому что дает как мы это видели выше, опережение при больших амплитудах, компенсируя отставание, получающееся от центробежной силы.

---

# Мод. 1 Теория регулировки

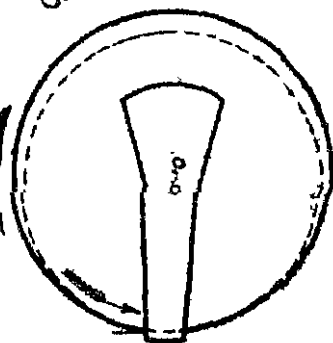
Скручивание

Фиг. 2.

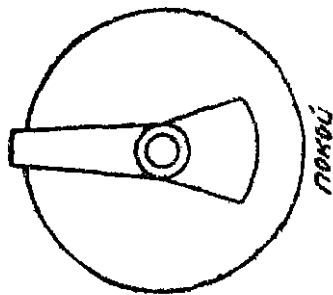


Роскручивание

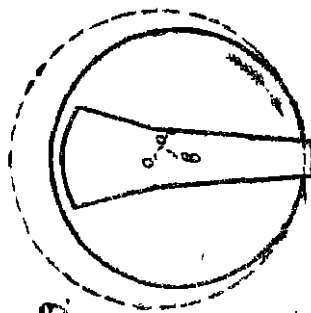
Фиг. 5



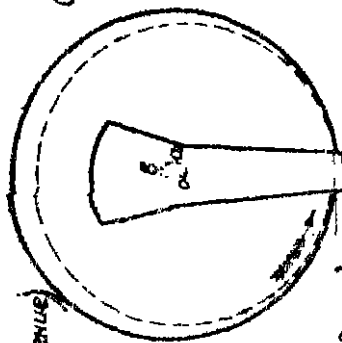
Фиг. 1



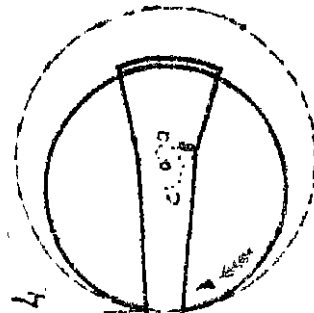
Фиг. 3.



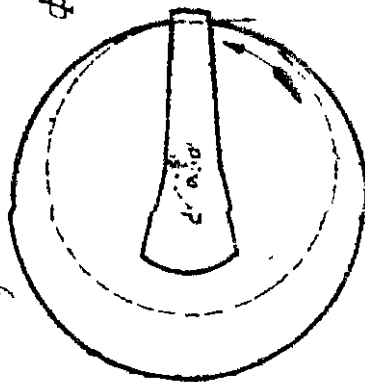
Фиг. 6



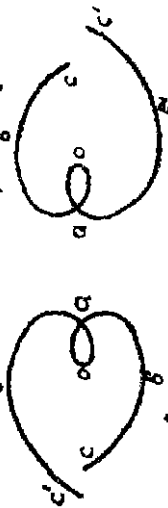
Фиг. 4.



Фиг. 7

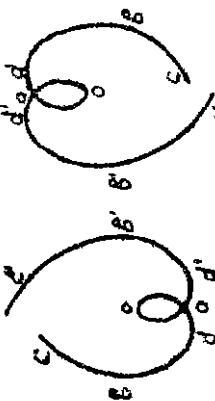


Точка крепления  
вверху (слабое запаздывание)  
внизу (слабое опережение)



Фиг. 9.

Точка крепления  
справа (сильное опережение)  
слева (сильное запаздывание)



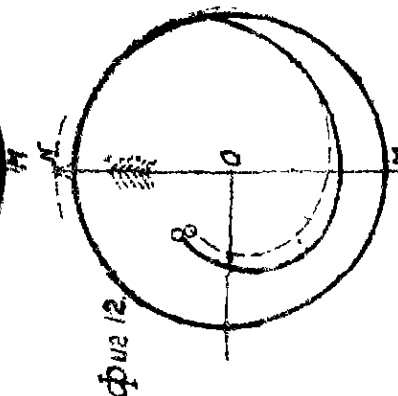
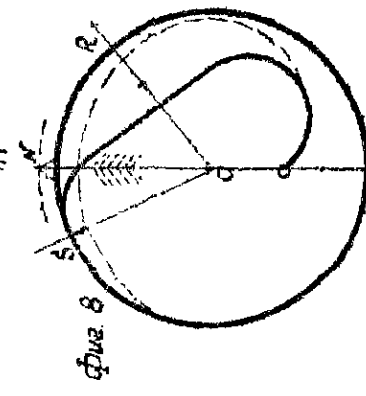
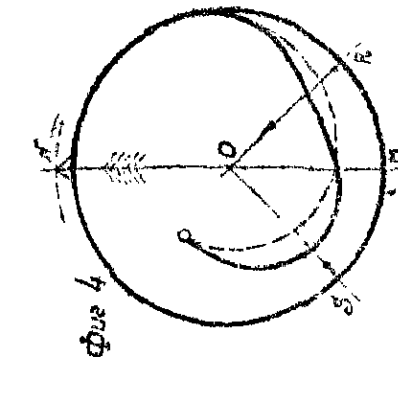
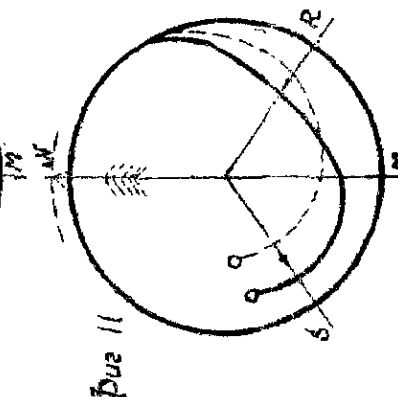
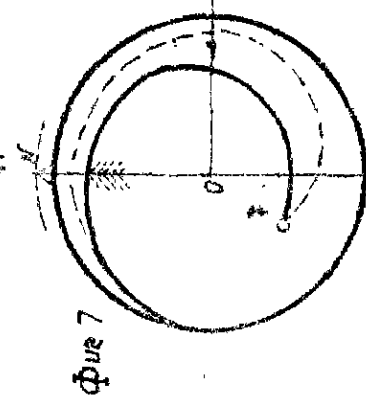
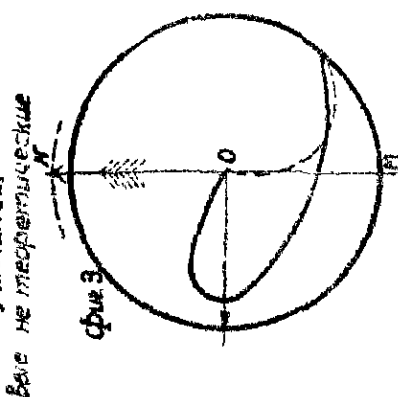
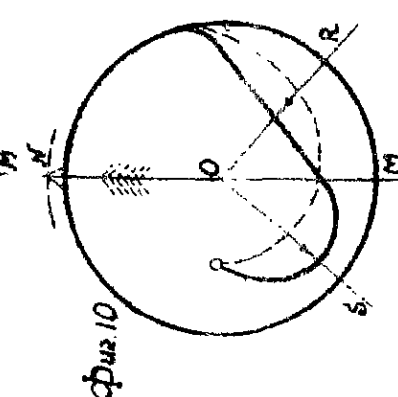
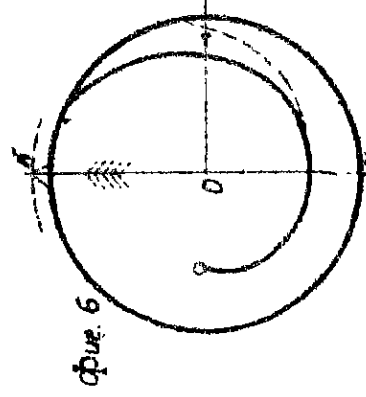
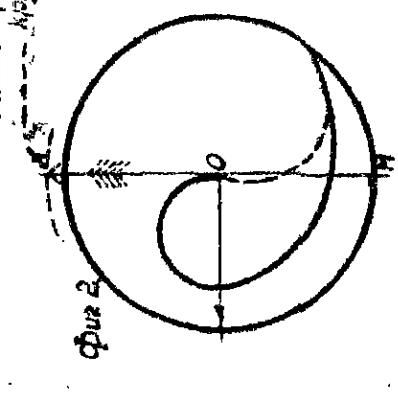
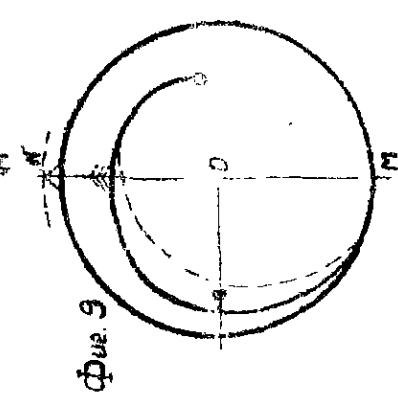
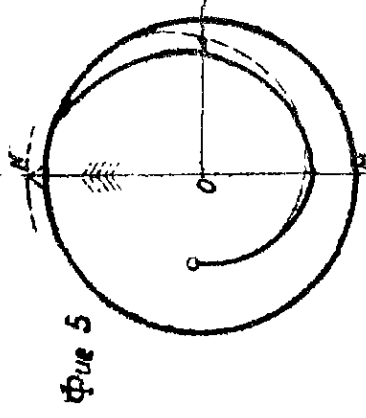
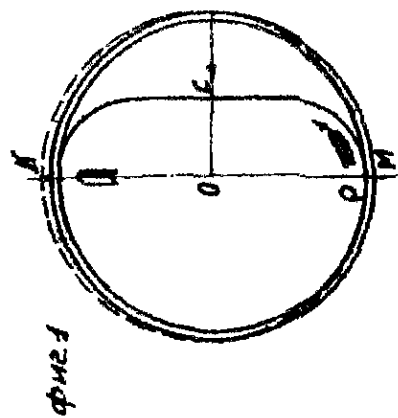
Фиг. 11

Фиг. 10.

# Мас. 2 Теория регуляровки концевые кривые спиралей.

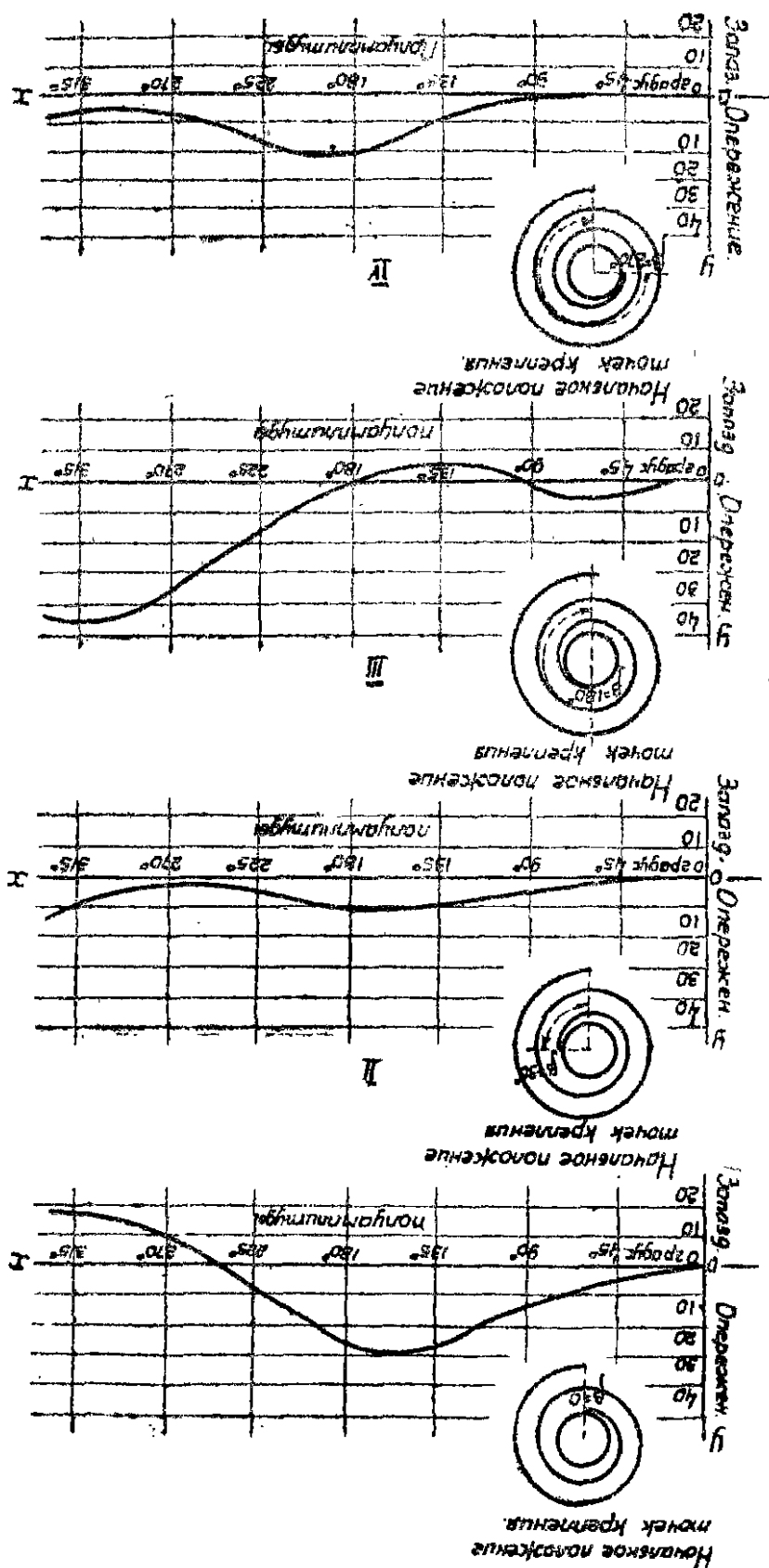
Энциклопедия В. Journal Suisse d'Horlogerie

— кривые Филиппса.  
--- кривые не теоретические



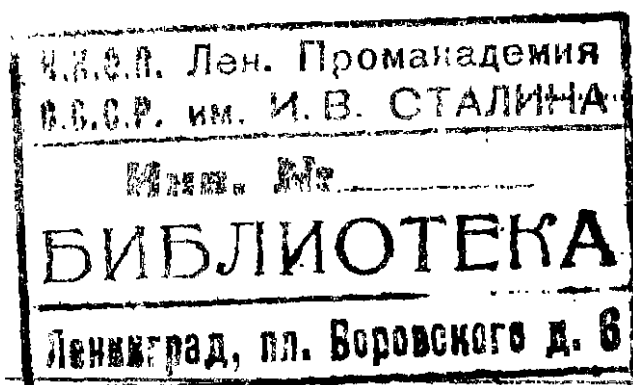
# Таб. 3 Теория регулировки.

Сравнительно хороши спирали без концевых кривых для  
различных начальных положений точек крепления.



## О Г Л А В Л Е Н И Я

|                                                                                                   | Стр. |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1. Предисловие . . . . .                                                                          | 3    |
| 2. Введение . . . . .                                                                             | 5    |
| 3. Глава I-я. Общие понятия — законы движения баланса со спиралью . . . . .                       | 9    |
| 4. Глава II-я. Внешние влияния, не зависящие от баланса и спирали . . . . .                       | 29   |
| 5. Глава III-я. Влияние трения . . . . .                                                          | 57   |
| 6. Глава IV-я. Изменения в ходе часов, происходящие от несовершенства спирали и баланса . . . . . | 77   |
| 7. Глава V. Практические выводы и заключения . . . . .                                            | 97   |



Ответственный редактор: Гурьев В. К.

Технический редактор: Завадская Е. А. Корректор: Перстов П. П.

Ленгорлит № 5523. Типография ЛКБТКУКС. Тираж 2000. Зак. 1202.  
Формат бумаги 60х92. Печати. л. 8. Типогр. знаков в печатном листе 51200.

## Замеченные опечатки

| Страница | Строка | Счет   | Напечатано:                                                    | Должно быть:                                              |
|----------|--------|--------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 3        | 11     | сверху | разъяснений                                                    | разъяснений                                               |
| 5        | 12     | снизу  | констатируется                                                 | конструируется                                            |
| 9        | 2      | снизу  | выразить как                                                   | выразить, как                                             |
| 10       | 10     | сверху | $V = \sqrt{2g \frac{\alpha^2}{21}}$                            | $v = \sqrt{2g \frac{\alpha^2}{21}}$                       |
| 11       | 2      | сверху | Время Т следовательно                                          | Время Т, следовательно,                                   |
| 12       | 14     | снизу  | найдем сколько                                                 | найдем, сколько                                           |
| 14       | 2      | снизу  | = 0,6 гр.,                                                     | = 0,6 г                                                   |
| 15       | 13     | снизу  | при                                                            | при                                                       |
| 15       | 5      | снизу  | Предполагается                                                 | Предполагается                                            |
| 15       | 2      | снизу  | Подвесим, теперь                                               | Подвесим теперь                                           |
| 19       | 13     | сверху | иное как                                                       | иное, как                                                 |
| 19       | 19     | снизу  | $M\alpha = \frac{2E \cdot 0,2e^2 \cdot \alpha \cdot 0,2eh}{L}$ | $M\alpha = \frac{2E \cdot 0,2 \cdot e^2 \alpha 0,2eh}{L}$ |
| 19       | 4      | снизу  | спиралиб                                                       | спирали                                                   |
| 19       | 3      | снизу  | аланса                                                         | баланса                                                   |
| 20       | 6      | сверху | $\frac{122}{10} = 12,2 \text{ г}$                              | $\frac{122}{10} = 12,2 \text{ г};$                        |
| 20       | 20     | сверху | Пусть дано;                                                    | Пусть дано:                                               |
| 21       | 15     | сверху | $T_r = \frac{mg^2}{2} \cdot \frac{v^2}{r^2}$                   | $T_r = \frac{mg^2}{2} \cdot \frac{v^2}{r^2}$              |
| 21       | 5      | снизу  | помноженное                                                    | помноженная                                               |
| 24       | 10     | снизу  | 0,22 м                                                         | 0,22 мм                                                   |
| 24       | 11     | снизу  | 265 м                                                          | 265 мм                                                    |
| 25       | 4      | сверху | Тусть                                                          | Пусть                                                     |
| 25       | 2      | снизу  | выражений                                                      | выражения                                                 |
| 29       | 11     | сверху | как следствие                                                  | как следствие,                                            |
| 29       | 18     | сверху | колебания действует<br>вся спираль                             | колебания, действует<br>вся спираль;                      |
| 29       | 4      | снизу  | памятник                                                       | маятник                                                   |
| 35       | 13     | снизу  | толчек                                                         | толчок                                                    |
| 36       | 2      | сверху | толчек                                                         | толчок                                                    |
| 36       | 14     | сверху | (Это                                                           | Это                                                       |
| 36       | 20     | сверху | из D в „К-                                                     | из D в К                                                  |
| 40       | 1      | сверху | толчек                                                         | толчок                                                    |
| 40       | 6      | снизу  | совершен                                                       | совершенен                                                |
| 41       | 5      | сверху | отстающий                                                      | отстающий                                                 |

(см. на обороте)