

Инж. П. А. ЖДАНОВ

ЭЧЗ

УРАВНОВЕШИВАНИЕ ДВИЖУЩЕГО МЕХАНИЗМА ПАРОВОЗА



ГОСУДАРСТВЕННОЕ
ТРАНСПОРТНОЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА ТРАНСЖЕЛДОРИЗДАТ 1937

В данной книге описывается кинематика кривошипно-шатунного механизма паровоза; дается способ подсчета сил, оказывающих при движении вредное действие на работу паровоза и на верхнее строение пути. Автором в популярном изложении дается метод уравнивания этих сил противоресами.

Книга рассчитана на квалифицированных рабочих, техников, инженерно-технических работников, а также может служить пособием для студентов транспортных техникумов и вузов.

1850/9
37

ОБЕРКА

ОБЕРКА

ОБЕРКА

ГОС. ПУБЛИЧНАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА СССР

1968¹/₆₀

7024

О П Е Ч А Т К И
к книге Жданова, „Уравновешивание движущего
механизма паровоза“

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть	Примечание
13	20 св.	ход-	ходе	α (альфа)
13	21 св.	отсчитываемые.	отсчитываемые	
58	1 св.	Графу 6-ю читать α	
88	4 св.	$G_r = G^e$	$G_r = G \frac{e}{r}$	

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	Стр. 5
--------------------	-----------

Глава I

Кинематика кривошипно-шатунного механизма

§ 1. Кривошипно-шатунный механизм паровой машины	7
§ 2. Путь, скорость и ускорение вращающихся частей	9
§ 3. Путь, скорость и ускорение возвратно-движущихся частей	12
а) Путь поршня	12
б) Скорость поршня	16
в) Ускорение поршня	20
§ 4. Путь, скорость и ускорение шатуна	27

Глава II

Силы инерции движущего механизма паровой машины

§ 1. Инерция. Силы инерции	31
§ 2. Силы инерции вращающихся масс и их воздействие на путь и паровоз	33
§ 3. Силы инерции поступательно-движущихся масс	36
§ 4. Силы инерции шатуна; влияние сил инерции шатуна и поступательно-движущихся масс на строение паровоза и на путь	38

Глава III

Уравновешивание сил инерции движущего механизма паровой машины

§ 1. Уравновешивание центробежных сил инерции вращающихся масс	64
а) Основные формулы для уравновешивания центробежных сил	64

б) Распределение веса от дышела по пальцам паровоза серии С _У	81
в) Уравновешивание центробежных сил вращающихся неуравновешенных масс первого ската паровоза серии С _У	83
г) Уравновешивание центробежных сил вращающихся неуравновешенных масс третьего ската паровоза серии С _У	85
д) Уравновешивание центробежных сил вращающихся неуравновешенных масс второго ската (ведущего) паровоза С _У	87
е) Уравновешивание центробежной силы контрукривошипа	89
§ 2. Уравновешивание силы Y	94
а) Формулы для уравновешивания силы Y	94
б) Уравновешивание силы Y паровоза серии С _У	99
§ 3. Уравновешивание силы X	113
а) Формулы для уравновешивания силы X	113
б) Уравновешивание силы X паровоза серии С _У	114
§ 4. Определение суммарного противовеса в колесе на радиусе кривошипа	134
а) Предварительные соображения	134
б) Определение суммарного противовеса на радиусе кривошипа в колесе первой сцепной оси паровоза С _У	134
в) Определение суммарного противовеса на радиусе кривошипа колеса ведущей оси паровоза С _У	136
§ 5. Размещение суммарного противовеса в колесе	140
а) Конфигурация противовесов	140
б) Формулы для размещения противовеса в колесе в виде сегмента	143
в) Размещение суммарного противовеса в колесе первой сцепной оси паровоза С _У	144
г) Размещение суммарного противовеса в правом и левом колесе ведущей оси паровоза С _У	145

ВВЕДЕНИЕ

В паровозной машине имеются следующие три группы частей, которые, перемещаясь со всей массой паровоза поступательно, участвуют еще в относительных движениях:

- 1) части, имеющие чисто вращательное движение, как например: кривошип, контр-кривошип;
- 2) части, имеющие только поступательное движение: поршень, шток, крейцкопф;
- 3) со сложным движением: шатун, который имеет и вращательное и поступательное движение.

В современных мощных, быстроходных паровозах—ФД, ИС части движущего механизма имеют значительные веса и получают при движении большие ускорения, почему обладают колоссальными силами инерции.

При движении паровоза движущий механизм машины в результате действия сил инерции вызывает на опорах (на пальце кривошипа ведущей оси и на параллели) силы, оказывающие вредное воздействие как на строение самого паровоза, так и на путь. Эти силы на практике по возможности уравнивают противовесами, помещаемыми в колесах. Центробежные силы инерции вращающихся неуравновешенных масс машины уравнивают противовесами полностью.

В данной книге на конкретных примерах дается техника выявления центробежных сил инерции вращающихся неуравновешенных масс,

сил на опорах движущего механизма и их уравновешения для паровоза с нормальным кривошипно-шатунным механизмом (паровоз С^у). Расчет противовесов производится для случая равномерного движения паровоза без пара по прямому участку пути.

ГЛАВА I

КИНЕМАТИКА КРИВОШИПНО-ШАТУННОГО МЕХАНИЗМА

§ 1. Кривошипно-шатунный механизм паровозной машины

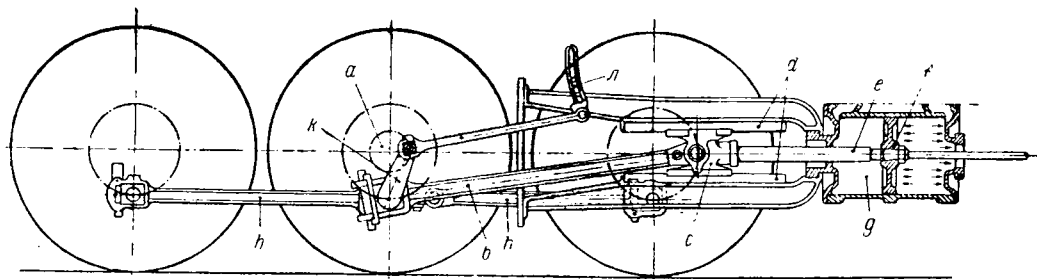
Кривошипно-шатунный механизм паровозной машины (фиг. 1) состоит из кривошипа a , шатуна b и крейцкопфа c , который движется по направляющим d , называемым параллелями.

Назначение кривошипно-шатунного механизма в паровозной машине заключается в преобразовании поступательно-возвратного движения поршня во вращательное движение ведущего колеса.

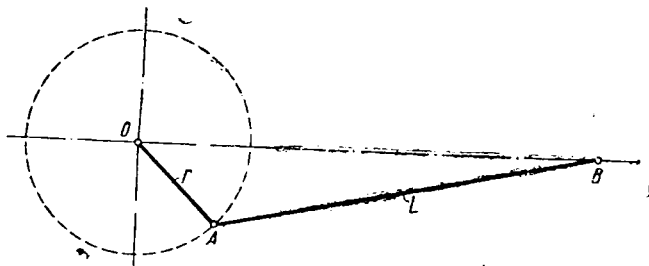
Сцепными дышлами (спарниками h , фиг. 1) приводятся во вращательное движение колеса сцепных осей, и, в зависимости от направления вращения колес, вся масса паровоза передвигается по рельсам с определенной скоростью.

Поршень, шток и крейцкопф жестко соединены друг с другом, за определенный промежуток времени проходят одинаковые отрезки пути, имеют общую скорость и общее ускорение. Обозначим суммарный вес поступательно-движущихся частей W_k кг и будем считать, что этот вес сосредоточен в центре крейцкопфного валика. Тогда кривошипно-шатунный механизм паровозной машины представляем схематически так, как показано на фиг. 2, где обозначаем:

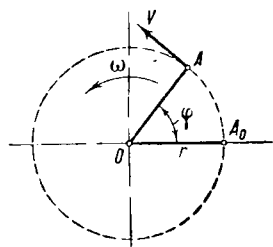
$\overline{OA} = r$ — радиус кривошипа,



Фиг. 1.



Фиг. 2.



Фиг. 3.

$\overline{AB} = L$ — длину шатуна.

Длина шатуна измеряется расстоянием между центрами головок шатуна.

(Дальше будем считать, что вес W_k кг сосредоточен в точке B).

§ 2. Путь, скорость и ускорение вращающихся частей

Из теоретической механики известно, что путь, проходимый точкой во вращательном движении, выражается функцией от угла поворота так (фиг 3):

$$S = \overset{\curvearrowright}{A_0 A} = r\varphi, \quad (1)$$

где

r — радиус вращения,

φ — угол поворота, измеряемый в радианах¹.

Стрелкой-указано направление вращения.

Так как φ за полный оборот изменяется от 0 до 360° , то путь, проходимый точкой за полный оборот, будет равен $S = r \cdot 2\pi$, т. е. путь S равен полной длине окружности $2\pi r$. Из выражения (1) видно, что путь прямо пропорционален радиусу вращения: чем точка отстоит дальше от оси вращения, тем больший путь она проходит при одном и том же угле поворота по сравнению с точкой, находящейся ближе к центру вращения.

При равномерном движении паровоза колеса также вращаются с постоянной угловой скоростью ω , которая может быть выражена так:

$$\omega = \frac{\varphi}{t} \left[\frac{\text{рад.}}{\text{сек}} \right]. \quad (2)$$

¹ Радианом называется центральный угол, длина дуги которого S равна длине радиуса r . Один радиан равен приблизительно $57^\circ 17' 45''$.

Радиян—число отвлеченное, почему размерность угловой скорости есть $\omega \left[\frac{1}{сек} \right]$.

В технике угловую скорость ω при равномерном движении выражают через число оборотов в минуту:

$$\omega = \frac{\varphi}{t} = \frac{2\pi n}{60} = \frac{\pi n}{30},$$

т. е.

$$\omega = \frac{\pi n}{30} \left[\frac{1}{сек} \right], \quad (3)$$

где n —число оборотов в минуту.

Можно приближенно считать, что

$$\omega \cong 0,1n. \quad (4)$$

Линейная скорость v через угловую скорость ω (фиг. 3) выражается зависимостью:

$$v = \omega r. \quad (5)$$

При равномерном вращении:

$$v = \omega r = \frac{\pi n}{30} r = \frac{\pi D n}{60} \left[\frac{м}{сек} \right], \quad (6)$$

$$n = \frac{v \cdot 60}{\pi D} \left[\frac{об.}{мин.} \right]. \quad (7)$$

Так как скорость паровоза дается в км/час, то формула (7), в которой скорость выражена в м/сек, может быть написана так:

$$n = \frac{v \cdot 1\,000 \cdot 60}{3\,600 \cdot \pi D} = \frac{v}{0,06 \cdot \pi D},$$

т. е.

$$n = \frac{v}{0,06 \cdot \pi D} \left[\frac{об.}{мин.} \right], \quad (7-а)$$

где:

v —скорость в км/час,

D —диаметр колеса в метрах.

Пример. Паровоз серии С^У имеет конструктивную скорость

$$v = 100 \left[\frac{\text{км}}{\text{час}} \right].$$

Диаметр колес $D = 1850$ мм.

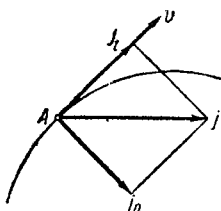
По формуле (7-а) определяем число оборотов в минуту:

$$n = \frac{v}{0,06 \cdot \pi D} = \frac{100}{0,06 \cdot 3,14 \cdot 1,85} = 286,9 \left[\frac{\text{об.}}{\text{мин.}} \right].$$

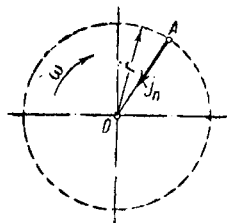
Угловую скорость определяем по формуле (3):

$$\omega = \frac{\pi n}{30} = \frac{3,14 \cdot 286,9}{30} = 30,03 \left[\frac{1}{\text{сек}} \right].$$

Если точка А движется по криволинейному участку пути со скоростью v (фиг. 4), то она обладает ускорением j , которое не совпадает



Фиг. 4.



Фиг. 5.

с направлением движения. Это полное ускорение можно разложить на два направления:

j_t —касательное ускорение, совпадающее с направлением скорости v ;

j_n —нормальное ускорение, перпендикулярное к касательному ускорению.

В точке А, вращающейся по окружности с постоянной угловой скоростью $\omega \left(\frac{1}{\text{сек}} \right)$ (фиг. 5) воз-

никает только нормальное ускорение, направленное к центру вращения и равное:

$$j_n = \omega^2 r \left[\frac{m}{сек^2} \right]. \quad (8)$$

Ускорение j_n при большом числе оборотов достигает очень больших значений.

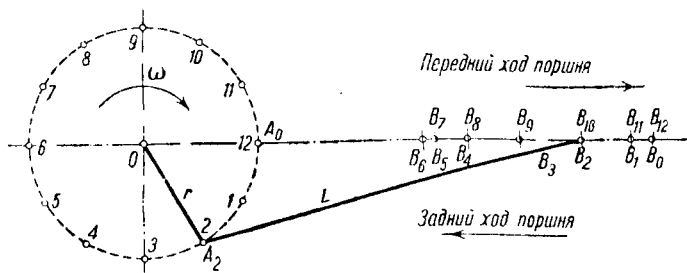
Так, точки бандажа колеса паровоза СУ, находящиеся на круге катания, обладают нормальным ускорением при скорости движения $v = 100 \left[\frac{км}{час} \right]$, равным:

$$j_n = \omega^2 R = 30,03^2 \cdot \frac{1,85}{2} = 835 \left[\frac{м}{сек^2} \right].$$

§ 3. Путь, скорость и ускорение возвратно-движущихся частей

а) Путь поршня

Путь, проходимый поршнем при равномерном вращении кривошипа, графически определяем следующим образом. Вычерчиваем в определенном



Фиг. 6.

масштабе кривошипно-шатунный механизм (фиг. 6). Окружность, описываемую центром кривошипа за один оборот, разбиваем на 12 равных частей (можно разбивать и на большее число). Из каждой

точки, отмеченной на окружности, отрезком, пропорциональным (в том же масштабе) длине шатуна, циркулем делаем засечку на линии хода поршня. Получаем точки $B_0, B_1, B_2 \dots B_6$, соответствующие заднему ходу поршня, и $B_6, B_7, B_8 \dots B_{12}$, соответствующие переднему ходу поршня. Крайние точки B_0 и B_6 , в которых поршень меняет направление движения, называются мертвыми точками. На фиг. 6 видно, что, когда поршень находится в мертвых точках, радиус кривошипа совпадает с направлением шатуна. Такое положение кривошипно-шатунного механизма называется мертвым положением.

Отрезки B_0B_1, B_1B_2, B_2B_3 и т. д. не равны между собой. На фиг. 6 наглядно видно, что отрезки пути поршня при подходе к середине цилиндра больше по сравнению с отрезками пути, которые ближе к мертвым точкам B_0 и B_6 . Далее, можно заметить, что отрезки B_0B_1 и B_6B_7, B_0B_2 и B_6B_8 , проходимые поршнем при заднем и переднем ходе одинаковые углы поворота кривошипа, отсчитываемые от горизонтали, не равны между собой. Это неравенство вызвано тем, что шатун имеет конечную длину: чем шатун будет короче, неравенство будет больше¹. При бесконечно большой длине шатуна отрезки, пропорциональные ходу поршня вперед и назад от мертвых точек, будут равны между собой.

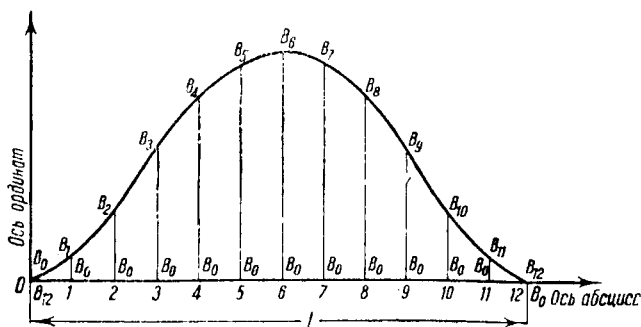
В паровозостроении длина шатуна колеблется в пределах от 6 до 10 радиусов кривошипа, т. е.

$$\frac{r}{L} = \left(\frac{1}{6} \div \frac{1}{10} \right). \quad (9)$$

Зная изменение пути поршня (фиг. 6) за каждый угол поворота кривошипа, можно построить кривую хода поршня за полный оборот колеса.

¹ О влиянии конечной длины шатуна см. специальный выпуск (Парораспределение паровозной машины).

Для этого в прямоугольных осях координат по оси абсцисс откладываем 12 равных отрезков на длине l (фиг. 7), равной длине окружности, описываемой точкой A на фиг. 6. По оси ординат откладываем отрезки пути поршня: B_0B_1 , B_0B_2 и т. д., соответствующие определенному углу поворота кривошипа. Соединив полученные точки B_0, B_1 ,



Фиг. 7.

$B_2 \dots B_{12}$ плавной кривой, получим график пути поршня в зависимости от угла поворота кривошипа.

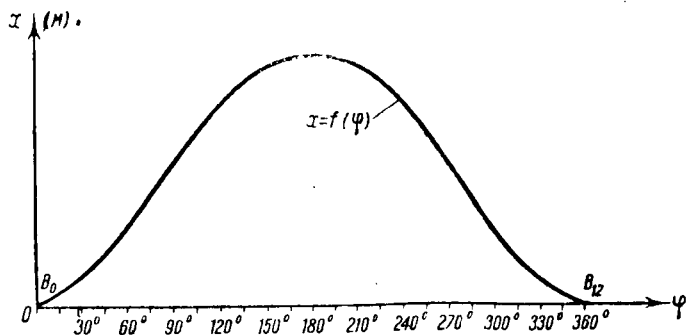
Аналитическая зависимость пути поршня от угла поворота кривошипа

Рассматриваем кривошипно-шатунный механизм в прямоугольной системе координат, при чем за начало координат берем мертвую точку B_6 , соответствующую заднему мертвому положению кривошипа (фиг. 8), где $OA = r$; $AB = L$. Положительное направление осей координат и направление вращения кривошипа указаны стрелками. Для определения знаков тригонометрических величин, входящих во все выражения, условимся считать 1, 2, 3 и 4 четверти те, которые на фиг. 8 указаны соответственно римскими цифрами *I*, *II*, *III*, *IV*.

В табл. 1 для определенного отношения $\frac{r}{L}$ вычислены значения:

$$1 - \cos \varphi - \frac{r}{2L} \sin^2 \varphi$$

через каждые 15° поворота кривошипа. Пользуясь этой таблицей, можно легко построить в любом



Фиг. 8-а.

масштабе график пути поршня паровоза за оборот колеса, умножив радиус кривошипа r на значение

$$1 - \cos \varphi - \frac{r}{2L} \sin^2 \varphi,$$

взятое из табл. 1 при определенном отношении $\frac{r}{L}$.

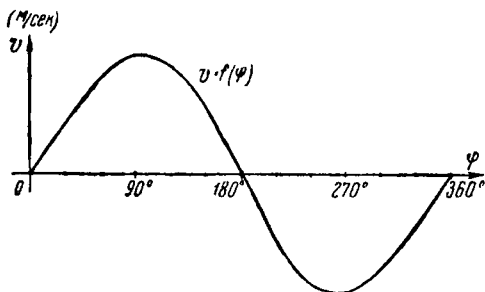
б) Скорость поршня

Скорость поршня:

$$v = \omega r \left(\sin \varphi - \frac{r}{2L} \sin 2\varphi \right), \quad (12)$$

где ω —угловая скорость вращения кривошипа.

Давая различные значения углу φ от 0 до 360° (будем изменять угол φ через каждые 15°), получим в осях координат график скорости, который будет иметь вид, показанный на фиг. 9.



Фиг. 9.

Из выражения (12) при:

$$\begin{aligned} \varphi = 0^\circ & \quad \sin \varphi = 0; \quad \sin 2\varphi = 0; \quad v = 0; \\ \varphi = 90^\circ & \quad \sin \varphi = 1; \quad \sin 2\varphi = 0; \quad v = \omega r; \\ \varphi = 180^\circ & \quad \sin \varphi = 0; \quad \sin 2\varphi = 0; \quad v = 0; \\ \varphi = 270^\circ & \quad \sin \varphi = -1; \quad \sin 2\varphi = 0; \quad v = -\omega r; \\ \varphi = 360^\circ & \quad \sin \varphi = 0; \quad \sin 2\varphi = 0; \quad v = 0; \end{aligned}$$

Необходимо заметить, что в мертвых положениях поршень, а, следовательно, и все поступательно-движущиеся части имеют скорость, равную нулю. Когда же кривошип находится в вертикальных положениях ($\varphi = 90^\circ$ и $\varphi = 270^\circ$), поршень имеет скорость, равную $+\omega r$ и $-\omega r$.

В виду конечной длины шатуна поршень имеет максимальную скорость при угле поворота кривошипа, близком по значению к

$$\varphi \cong 90^\circ \quad \text{и} \quad \varphi \cong 270^\circ.$$

Табл. 2, в которой вычислены значения

$$\sin \varphi - \frac{r}{2L} \sin 2\varphi$$

	Значения $1 - \cos \varphi - \frac{r}{2L} \sin^2 \varphi$									
	$\frac{1}{6,0}$	$\frac{1}{6,2}$	$\frac{1}{6,4}$	$\frac{1}{6,6}$	$\frac{1}{6,8}$	$\frac{1}{7,0}$	$\frac{1}{7,2}$	$\frac{1}{7,4}$	$\frac{1}{7,6}$	$\frac{1}{7,8}$
0°	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
15°	0,028	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,030	0,030	0,030
30°	0,113	0,114	0,114	0,115	0,116	0,116	0,117	0,117	0,118	0,118
45°	0,251	0,253	0,254	0,255	0,256	0,257	0,258	0,259	0,260	0,261
60°	0,438	0,440	0,441	0,443	0,445	0,446	0,448	0,449	0,451	0,452
75°	0,663	0,666	0,668	0,671	0,673	0,675	0,676	0,678	0,680	0,681
90°	0,917	0,919	0,922	0,924	0,926	0,929	0,931	0,932	0,934	0,936
105°	1,181	1,184	1,186	1,188	1,190	1,192	1,194	1,196	1,197	1,199
120°	1,438	1,440	1,441	1,443	1,445	1,446	1,448	1,449	1,451	1,452
135°	1,665	1,667	1,668	1,669	1,670	1,671	1,672	1,673	1,674	1,675
150°	1,845	1,846	1,846	1,847	1,848	1,848	1,849	1,849	1,850	1,850
165°	1,960	1,961	1,961	1,961	1,961	1,961	1,961	1,961	1,962	1,962
180°	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000

при данных отношениях $\frac{r}{L}$											
$\frac{1}{8,0}$	$\frac{1}{8,2}$	$\frac{1}{8,4}$	$\frac{1}{8,6}$	$\frac{1}{8,8}$	$\frac{1}{9,0}$	$\frac{1}{9,2}$	$\frac{1}{9,4}$	$\frac{1}{9,6}$	$\frac{1}{9,8}$	$\frac{1}{10,0}$	
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	360°
0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,031	0,031	0,031	0,031	345°
0,118	0,119	0,119	0,119	0,120	0,120	0,120	0,121	0,121	0,121	0,121	330°
0,262	0,262	0,263	0,264	0,264	0,265	0,266	0,266	0,267	0,267	0,268	315°
0,453	0,454	0,455	0,456	0,457	0,458	0,459	0,460	0,461	0,462	0,463	300°
0,683	0,684	0,686	0,687	0,688	0,689	0,690	0,692	0,693	0,694	0,695	285°
0,938	0,939	0,940	0,942	0,943	0,944	0,946	0,947	0,948	0,949	0,950	270°
1,201	1,202	1,203	1,205	1,206	1,207	1,208	1,209	1,210	1,211	1,212	255°
1,453	1,454	1,455	1,456	1,457	1,458	1,460	1,460	1,461	1,462	1,463	240°
1,676	1,677	1,677	1,678	1,679	1,679	1,680	1,681	1,681	1,682	1,682	225°
1,850	1,851	1,851	1,851	1,852	1,852	1,852	1,853	1,853	1,853	1,854	210°
1,962	1,962	1,962	1,962	1,962	1,962	1,962	1,962	1,962	1,963	1,963	195°
2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	180°

через каждые 15° , убеждает нас в том, что, например, при

$$\frac{r}{L} = \frac{1}{6}$$

максимальное значение

$$\sin \varphi - \frac{r}{2L} \sin 2\varphi,$$

а, следовательно, и максимальное значение скорости поршня, по выражению (12) соответствует углу $\varphi = 105^\circ$ и $\varphi = 255^\circ$.

Пользуясь табл. 2, можно для данного отношения $\frac{r}{L}$ легко построить в определенном масштабе график скорости поршня, поступая точно так же, как строили график пути поршня, пользуясь табл. 1.

в) Ускорение поршня

Ускорение поршня:

$$j = \omega^2 r \left(\cos \varphi - \frac{r}{L} \cos 2\varphi \right). \quad (13)$$

Давая значение углу φ от 0° через каждые 15° и откладывая в осях координат соответствующие ускорения, получим график ускорения поршня, который показан на фиг. 10. Из выражения (13) при:

$$\varphi = 0^\circ \quad \cos \varphi = 1; \quad \cos 2\varphi = 1; \quad j = \omega^2 r \left(1 - \frac{r}{L} \right)$$

$$\varphi = 90^\circ \quad \cos \varphi = 0; \quad \cos 2\varphi = -1; \quad j = \frac{\omega^2 r^2}{L}$$

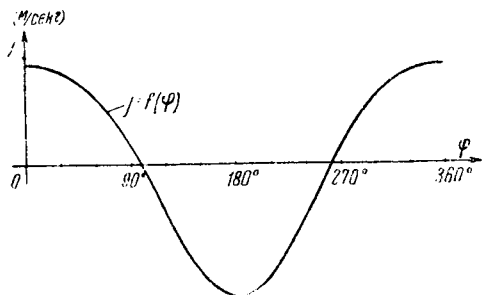
$$\varphi = 180^\circ \quad \cos \varphi = -1; \quad \cos 2\varphi = 1; \quad j = -\omega^2 r \left(1 + \frac{r}{L} \right)$$

$$\varphi = 270^\circ \quad \cos \varphi = 0; \quad \cos 2\varphi = -1; \quad j = \frac{\omega^2 r^2}{L}.$$

Не трудно видеть, что при вертикальных положениях кривошипа ($\varphi = 90^\circ$ и $\varphi = 270^\circ$) ускорение поршня не равно 0. При $\varphi = 0^\circ$ и $\varphi = 180^\circ$ поршень имеет ускорение, различное по величине и направлению.

Пользуясь табл. 3, в которой вычислены значения

$$\cos \varphi - \frac{r}{L} \cos 2\varphi,$$



Фиг. 10.

мы можем легко построить график ускорения поршня при определенном отношении $\frac{r}{L}$. Здесь же нужно заметить, что поршень при переднем мертвом положении ($\varphi = 180^\circ$) имеет по абсолютной величине большее значение ускорения, чем при заднем мертвом положении ($\varphi = 0^\circ$).

Совместив кривые пути, скорости и ускорения поршня (фиг. 11), можно сделать следующие заключения:

1) за один оборот колеса поршень делает два полных хода $x = 2r$ вперед и назад; путь поршня зависит от угла поворота φ ;

2) в крайних мертвых положениях ($\varphi = 0^\circ$, $\varphi = 180^\circ$ и $\varphi = 360^\circ$) поступательно-движущиеся части имеют скорость, равную 0, ускорение максимальных значений;

φ	Значения $\sin \varphi - \frac{r}{2L} \sin 2\varphi$									
	$\frac{1}{6,0}$	$\frac{1}{6,2}$	$\frac{1}{6,4}$	$\frac{1}{6,6}$	$\frac{1}{6,8}$	$\frac{1}{7,0}$	$\frac{1}{7,2}$	$\frac{1}{7,4}$	$\frac{1}{7,6}$	$\frac{1}{7,8}$
0°	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
15°	0,217	0,218	0,219	0,221	0,222	0,223	0,224	0,225	0,226	0,227
30°	0,428	0,430	0,432	0,434	0,436	0,438	0,440	0,442	0,443	0,444
45°	0,624	0,626	0,629	0,631	0,634	0,636	0,638	0,640	0,641	0,643
60°	0,794	0,796	0,798	0,800	0,802	0,804	0,806	0,808	0,809	0,811
75°	0,924	0,926	0,927	0,928	0,929	0,930	0,931	0,932	0,933	0,934
90°	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
105°	1,008	1,006	1,005	1,004	1,003	1,002	1,001	1,000	0,999	0,998
120°	0,938	0,936	0,934	0,932	0,930	0,928	0,926	0,925	0,923	0,922
135°	0,790	0,788	0,785	0,783	0,781	0,779	0,777	0,775	0,773	0,771
150°	0,572	0,570	0,568	0,566	0,564	0,562	0,560	0,558	0,557	0,556
165°	0,300	0,299	0,298	0,297	0,296	0,295	0,294	0,293	0,292	0,291
180°	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Примечание. При углах поворота кривошипа от 180 до 360°

при данных отношениях $\frac{r}{L}$											φ
$\frac{1}{8,0}$	$\frac{1}{8,2}$	$\frac{1}{8,4}$	$\frac{1}{8,6}$	$\frac{1}{8,8}$	$\frac{1}{9,0}$	$\frac{1}{9,2}$	$\frac{1}{9,4}$	$\frac{1}{9,6}$	$\frac{1}{9,8}$	$\frac{1}{10,0}$	
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	360°
0,228	0,228	0,229	0,230	0,230	0,231	0,232	0,232	0,233	0,233	0,234	345°
0,446	0,447	0,448	0,450	0,451	0,452	0,453	0,451	0,454	0,456	0,457	330°
0,645	0,646	0,648	0,649	0,650	0,652	0,653	0,654	0,655	0,656	0,657	315°
0,812	0,813	0,814	0,816	0,817	0,818	0,819	0,820	0,821	0,822	0,823	300°
0,935	0,935	0,936	0,937	0,938	0,938	0,939	0,939	0,940	0,940	0,941	285°
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	270°
0,997	0,996	0,996	0,995	0,994	0,994	0,993	0,993	0,992	0,991	0,991	255°
0,920	0,919	0,918	0,916	0,915	0,911	0,913	0,912	0,911	0,910	0,909	240°
0,769	0,768	0,767	0,765	0,764	0,763	0,761	0,760	0,759	0,758	0,757	225°
0,554	0,553	0,552	0,550	0,549	0,548	0,547	0,546	0,545	0,544	0,543	210°
0,290	0,289	0,289	0,288	0,287	0,287	0,286	0,285	0,285	0,284	0,284	195°
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	180°

значения надо брать с обратным знаком.

Значения $\cos \varphi - \frac{r}{L} \cos 2\varphi$

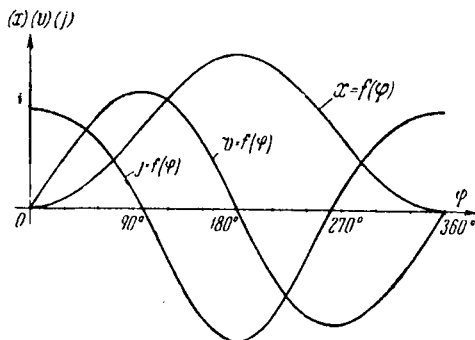
φ	$\frac{1}{6,0}$	$\frac{1}{6,2}$	$\frac{1}{6,4}$	$\frac{1}{6,6}$	$\frac{1}{6,8}$	$\frac{1}{7,0}$
0°	0,883	0,889	0,844	0,848	0,853	0,857
15°	0,822	0,826	0,831	0,835	0,839	0,842
30°	0,783	0,785	0,788	0,790	0,792	0,795
45°	0,707	0,707	0,707	0,707	0,707	0,707
60°	0,583	0,581	0,578	0,576	0,574	0,571
75°	0,403	0,398	0,394	0,390	0,386	0,383
90°	0,167	0,161	0,156	0,152	0,147	0,143
105°	- 0,114	- 0,119	- 0,123	- 0,128	- 0,131	- 0,135
120°	- 0,417	- 0,419	- 0,422	- 0,424	- 0,426	- 0,429
135°	- 0,707	- 0,707	- 0,707	- 0,707	- 0,707	- 0,707
150°	- 0,949	- 0,947	- 0,944	- 0,942	- 0,940	- 0,937
165°	- 1,110	- 1,106	- 1,101	- 1,097	- 1,093	- 1,090
180°	- 1,167	- 1,161	- 1,156	- 1,152	- 1,147	- 1,143

при данных отношениях $\frac{r}{L}$

$\frac{1}{7,2}$	$\frac{1}{7,4}$	$\frac{1}{7,6}$	$\frac{1}{7,8}$	$\frac{1}{8,0}$	$\frac{1}{8,2}$	$\frac{1}{8,4}$	$\frac{1}{8,6}$
0,861	0,865	0,869	0,872	0,875	0,878	0,881	0,884
0,846	0,849	0,852	0,855	0,858	0,860	0,863	0,865
0,797	0,798	0,800	0,802	0,804	0,805	0,807	0,808
0,707	0,707	0,707	0,707	0,707	0,707	0,707	0,707
0,569	0,568	0,566	0,564	0,563	0,561	0,560	0,558
0,379	0,376	0,373	0,370	0,367	0,364	0,362	0,360
0,139	0,135	0,132	0,128	0,125	0,122	0,119	0,116
- 0,139	- 0,142	- 0,145	- 0,148	- 0,151	- 0,153	- 0,156	- 0,158
- 0,431	- 0,432	- 0,434	- 0,436	- 0,438	- 0,439	- 0,440	- 0,442
- 0,707	- 0,707	- 0,707	- 0,707	- 0,707	- 0,707	- 0,707	- 0,707
- 0,935	- 0,934	- 0,931	- 0,930	- 0,929	- 0,927	- 0,926	- 0,924
- 1,086	- 1,083	- 1,080	- 1,077	- 1,074	- 1,072	- 1,069	- 1,067
- 1,139	- 1,135	- 1,132	- 1,128	- 1,125	- 1,122	- 1,119	- 1,116

Значения $\cos \varphi - \frac{r}{L} \cos 2 \varphi$ при данных отношениях $\frac{r}{L}$							
$\frac{1}{8,8}$	$\frac{1}{9,0}$	$\frac{1}{9,2}$	$\frac{1}{9,4}$	$\frac{1}{9,6}$	$\frac{1}{9,8}$	$\frac{1}{10,0}$	φ
0,886	0,889	0,891	0,891	0,896	0,898	0,900	360°
0,868	0,870	0,872	0,874	0,876	0,878	0,879	345°
0,809	0,810	0,812	0,813	0,814	0,815	0,816	330°
0,707	0,707	0,707	0,707	0,707	0,707	0,707	315°
0,557	0,558	0,554	0,553	0,552	0,551	0,550	300°
0,357	0,355	0,353	0,351	0,349	0,347	0,345	285°
0,114	0,111	0,109	0,106	0,104	0,102	0,100	270°
- 0,160	- 0,163	- 0,165	- 0,167	- 0,169	- 0,170	- 0,172	255°
- 0,443	- 0,444	- 0,446	- 0,447	- 0,448	- 0,449	- 0,450	240°
- 0,707	- 0,707	- 0,707	- 0,707	- 0,707	- 0,707	- 0,707	225°
- 0,923	- 0,922	- 0,920	- 0,919	- 0,918	- 0,917	- 0,916	210°
- 1,084	- 1,082	- 1,080	- 1,058	- 1,056	- 1,054	- 1,053	195°
- 1,114	- 1,111	- 1,109	- 1,106	- 1,104	- 1,102	- 1,000	180°

3) скорость поступательно-движущихся масс достигает наибольших значений при φ около 90° (положительное максимальное значение) и при $\varphi = 270^\circ$ (отрицательное максимальное значение).



Фиг. 11.

Ускорение в этих точках равно нулю. При $\varphi = 90^\circ$ и $\varphi = 270^\circ$, как было указано выше, ускорение поршня не равно нулю.

§ 4. Путь, скорость и ускорение шатуна

Шатун относится к частям со сложным движением, так как любая промежуточная точка его участвует в двух движениях: в поступательном и вращательном относительно центра крейцкопфного валика.

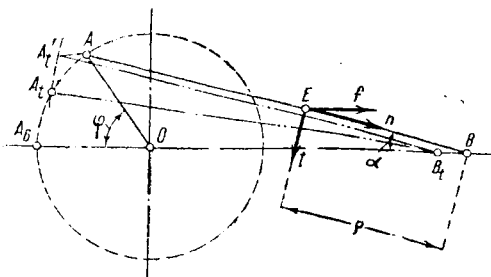
Переход центра задней головки шатуна из положения A_1 в A (фиг. 12) можно рассматривать как результат двух движений:

- 1) вращательного движения из A_1 в A_1' по окружности относительно точки B_1 , при котором центр задней головки проходит дугу A_1A_1' ; радиус вращения при этом равен длине шатуна;
- 2) поступательного движения, параллельного

ходу поршня, из A_t' в A , при чем в этом движении путь $A_t'A$ равен B_tB .

Таким образом, чтобы определить действительное движение шатуна, необходимо и достаточно знать в любой момент скорость и ускорение точки B в поступательном движении и угловую скорость и ускорение вращательного движения шатуна относительно центра крейцкопфного валика, т. е. относительно точки B .

При повороте кривошипа $OA = r$ из заднего мертвого положения на угол φ (фиг. 12) шатун



Фиг. 12.

образует с линией хода поршня угол α , при чем произвольная точка шатуна E , отстоящая на расстоянии ρ от B , пройдет по дуге путь $S = \rho\alpha$.

Угловая скорость точки E во вращательном движении:

$$\omega_E = \omega \frac{r}{L} \frac{\cos \varphi}{\cos \alpha}, \quad (14)$$

где:

ω_E — угловая скорость точки E ;

ω — угловая скорость кривошипа.

Полное ускорение точки E во вращательном движении будем раскладывать на нормальное и касательное ускорение.

Нормальное ускорение, направленное всегда по радиусу к центру вращения (в нашем случае

будет направлено по шатуну к точке B), равно, как уже нам известно, произведению квадрата угловой скорости на радиус вращения. Поэтому для точки E нормальное ускорение:

$$j_E^n = \omega^2 r \varrho = \frac{\omega^2 r^2 \cos^2 \varphi}{L^2 \cos^2 \alpha} \varrho. \quad (15)$$

Обозначим это нормальное ускорение j_E^n вектором $E\bar{n}$ и отложим его на фиг. 12.

Касательное ускорение точки E :

$$j_E^t = - \frac{\omega^2 r (L^2 - r^2) \sin \varphi}{L^3 \cos^3 \alpha} \varrho. \quad (16)$$

Знак минус в выражении (16) указывает на то, что ускорение при данном положении шатуна должно быть направлено вниз. Обозначим j_E^t вектором $E\bar{t}$ и отложим его на фиг. 12.

Участвуя в поступательном движении, точка E имеет еще ускорение

$$j_E = j = \omega^2 r \left(\cos \varphi - \frac{r}{L} \cos 2\varphi \right),$$

равное и совпадающее по направлению с ускорением поршня. Обозначим ускорение точки E в поступательном движении вектором $E\bar{j}$ и отложим его на фиг. 12. Ускорение в поступательном движении, параллельном движению поршня, для всех точек шатуна одинаково.

Во вращательном движении ускорения $\bar{E\bar{n}}$ и $\bar{E\bar{t}}$ различных материальных точек шатуна, отстоящих на разных расстояниях ϱ от точки B , различны. То же самое можно сказать и про скорость во вращательном движении точек шатуна, которая больше у точки, более удаленной от B .

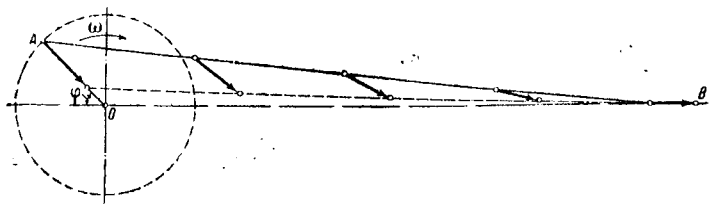
По выражениям (15) и (16) для любой точки, отстоящей на определенном расстоянии от B , мы

можем определить ускорения E_n и E_t при определенном положении механизма.

На фиг. 13 даны полные ускорения точек шатуна кривошипно-шатунного механизма паровоза серии C^y при конструктивной скорости движения

$$v = 100 \left[\frac{\text{км}}{\text{час}} \right].$$

Мы видим на фиг. 13, что центр передней головки шатуна, находящийся в точке B и уча-



Фиг. 13.

ствующий только в поступательном движении, имеет одно ускорение в поступательном движении.

Центр задней головки шатуна, находящийся в точке A и участвующий тем самым в равномерном вращательном движении, имеет одно только центростремительное ускорение, направленное к центру по радиусу r .

ГЛАВА II

СИЛЫ ИНЕРЦИИ ДВИЖУЩЕГО МЕХАНИЗМА ПАРОВОЗНОЙ МАШИНЫ

§ 1. Инерция. Силы инерции

Свойство массы тела сохранять свое состояние покоя или состояние прямолинейного равномерного движения называется инерцией. Таким образом, благодаря действию инерции массы, тело оказывает сопротивление приложенным внешним силам, стремящимся вывести данное тело из одного состояния и перевести в другое. Эти силы сопротивления тела — результат действия инерции массы и называются силами инерции.

Под массой тела m принято понимать постоянное для данного тела отношение между внешней силой $P_{\text{вн}}$, действующей на тело, и вызываемым этой силой ускорением j , т. е.

$$m = \frac{P_{\text{вн}}}{j}. \quad (17)$$

Масса тела — величина существенно положительная. В выражении (17) сила $P_{\text{вн}}$ прямо пропорциональна величине ускорения j ; направление ускорения j совпадает с направлением силы $P_{\text{вн}}$.

Из выражения (17) приложенная сила определяется так:

$$P_{\text{вн}} = mj, \quad (18)$$

$$j = \frac{P_{\text{вн}}}{m}. \quad (19)$$

В технической системе единица массы тела m равна весу тела G [кг], поделенному на ускорение свободного падения тел

$$g = 9,81 \left[\frac{м}{сек^2} \right],$$

т. е.

$$m = \frac{G}{g} \left[\frac{кг \cdot сек^2}{м} \right]. \quad (20)$$

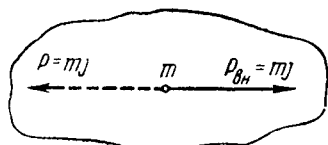
Таким образом, зная вес тела, мы из выражения (20) всегда можем определить его массу.

Например, шатун паровоза серии С^У весит $G = 225,28$ кг.

Следовательно, его масса равна:

$$M = \frac{G}{g} = \frac{225,28}{9,81} = 22,95 \left[\frac{кг \cdot сек^2}{м} \right].$$

Сила инерции P , равная произведению массы m на ускорение j (т. е. равная внешней силе $P_{вн} = mj$), действует в противоположную сторону ускорения:



$$P = -mj. \quad (21)$$

Направление ускорения
от силы $P_{вн}$

Фиг. 14.

(На фиг. 14 направление действия силы инерции показано пунктиром).

Из выражения (21) видно, что сила инерции больше у того тела, которое обладает большей массой и имеет большее ускорение.

Следовательно, зная массу тела и ускорение, которым обладает тело в данный момент, можно по формуле (21) определить силу инерции тела.

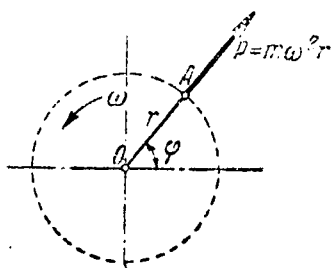
Если тело массы m находится в состоянии покоя $P_{вн} = 0$, то оно, значит, имеет ускорение, равное нулю ($j = 0$), почему сила инерции также равна нулю, т. е. $P = -mj = 0$.

§ 2. Силы инерции вращающихся масс и их воздействие на путь и паровоз

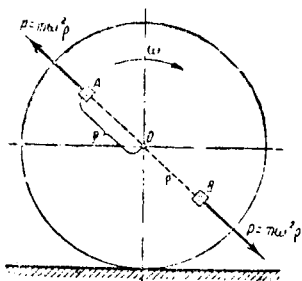
В каждой материальной частице, обладающей массой m и вращающейся с постоянной угловой скоростью ω , полное ускорение равно центростремительному ускорению $j_n = \omega^2 r$, где r — радиус вращения (формула 8).

Имея представление о силах инерции, можем сказать, что в рассматриваемой материальной частице с массой m будет действовать сила инерции, направленная в сторону, обратную центростремительному ускорению, т. е. от центра вращения, и называемая поэтому центробежной силой. Таким образом, центробежная сила, равная произведению вращающейся массы на центростремительное ускорение

$$P = -mj_n = -m\omega^2 r, \quad (22)$$



Фиг. 15.



Фиг. 16.

всегда направлена по радиусу от центра вращения (фиг. 15).

Рассмотрим, какое действие оказывают центробежные силы вращающихся масс колес паровоза.

Если вращающаяся масса m , сосредоточенная в точке A (фиг. 16), отстоит от центра колеса на расстоянии, равном $\overline{OA} = r$, то в ней при равномерном вращении возникает центробежная

сила $P = -m\omega^2 \varrho$. Эта центробежная сила будет стремиться сместить ось вращения O по направлению своего действия. Если в точке B , находящейся на линии, служащей продолжением OA и отстоящей от оси вращения O на расстоянии, также равном ϱ , т. е. $BO = \varrho$, находится масса m , равная массе, помещенной в точке A , то центробежная сила от массы в точке B также будет равна $P = -m\omega^2 \varrho$, но направлена она будет прямо-противоположно по отношению центробежной силы, приложенной в точке A . Теперь эти две равные и прямо-противоположно направленные центробежные силы $P = -m\omega^2 \varrho$ на ось вращения O никакого действия оказывать не будут в смысле смещения оси вращения, и между точками A и B будет лишь существовать растягивающее усилие $m\omega^2 \varrho$. Таким образом, эти две центробежные силы, как говорят, уравнивают друг друга.

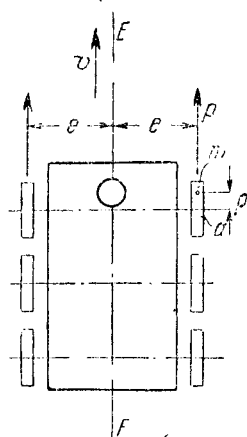
Поэтому в паровозостроении стремятся массы в колесе расположить так, чтобы совокупное действие центробежных сил от всех вращающихся масс на ось вращения O равнялось нулю (в смысле смещения оси вращения). Техника подсчета такого расположения масс в колесе называется уравниванием центробежных сил вращающихся масс. С этим отделом мы подробно ознакомимся в дальнейшем, а здесь продолжаем разбор влияния неуравновешенной центробежной силы в колесе на строение самого паровоза и на путь.

Предположим, что центробежная сила массы элемента A (фиг. 16) не уравновешена центробежными силами других элементов; как мы уже знаем, эта неуравновешенная центробежная сила $m\omega^2 \varrho$ во время вращения будет действовать на ось вращения O по радиусу r , как внешняя сила, приложенная в плоскости, перпендикулярной

к оси вращения. Направление действия этой силы на ось вращения O за оборот колеса будет все время переменным.

Если на паровоз, движущийся со скоростью v , посмотрим сверху (фиг. 17), то неуравновешенная центробежная сила $P = -m\omega^2\rho$, находящаяся, предположим, в правом колесе a первой оси, будет оказывать следующее действие. Когда масса

элемента m будет находиться на переднем конце горизонтального диаметра колеса a , то на это колесо будет действовать горизонтально центробежная сила $P = -m\omega^2\rho$, направленная вперед по ходу движения. После того, как колесо повернется на половину оборота (на 180°), масса m будет находиться на заднем конце горизонтального диаметра колеса и сила $P = -m\omega^2\rho$ будет направлена против движения паровоза, оттягивая тем самым колесо a назад. Таким образом, сила P , отстоящая на определенном расстоянии e от продольной оси

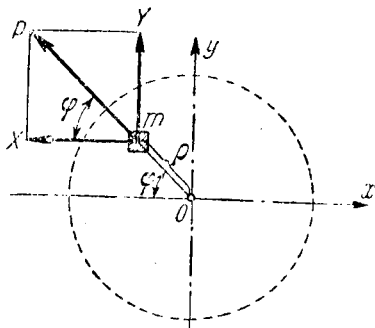


Фиг. 17.

паровоза EF , действуя то вперед, то назад, создает извилистость движения паровоза (влияние). Замечаем, что когда сила P действует по направлению движения, она сообщает паровозу некоторое ускорение, направленное вперед; в результате этого паровоз получает увеличение скорости. Когда же сила P действует назад, то она замедляет движение паровоза. Такое свойство движения паровоза под действием силы P стремиться оторваться от прицепленных к нему вагонов, когда сила P действует вперед, и, наоборот, прижиматься к вагонам, когда сила P

действует назад, называется подергивание м. Подергивание вредно отражается на тяговых приборах, сцепляющих паровоз с вагонами.

Центробежная сила $P = -m\omega^2\rho$ неуравновешенной массы m , вращающейся с угловой ско-



Фиг. 18.

ростью ω на расстоянии ρ от оси вращения (фиг. 18), может быть разложена на два направления:

горизонтальное $X = P \cos \varphi = m\omega^2\rho \cos \varphi$;

вертикальное $Y = P \sin \varphi = m\omega^2\rho \sin \varphi$.

Горизонтальная составляющая X влияет на подергивание и виляние; вертикальная Y влияет на изменение давления колеса на рельс.

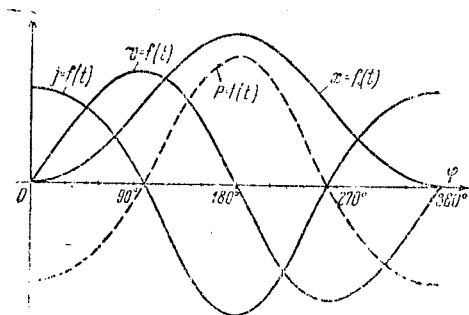
Если колеса паровоза не меняют величину давления на рельс при движении, то говорят, что в паровозе достигнуто вертикальное равновесие.

§ 3. Силы инерции поступательно движущихся масс

Вес поступательно движущихся масс (W_x) сосредоточен в точке B . Ускорение поршня, а следовательно, и всех поступательно движущихся

масс, изменяется за один оборот колеса по кривой (фиг. 10). Силы инерции поступательно движущихся масс, направленные в противоположную ускорению сторону при движении, за один оборот колеса могут быть выражены кривой (фиг. 10)—только в другом масштабе и повернутой на 180° .

На фиг. 19, где совмещены кривые пути, скорости, ускорения и сил инерции поступательно движущихся масс; кривая сил инерции обозначена пунктирной линией.

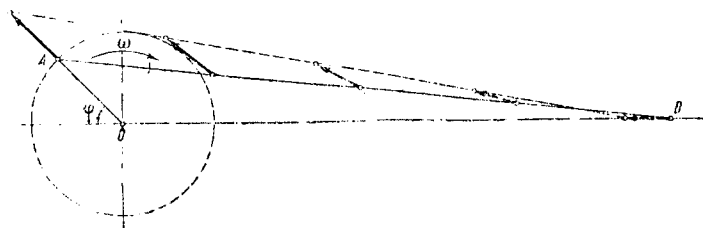


Фиг. 19.

Анализируя эти кривые, можно заметить, что в крайних мертвых положениях ($\varphi = 0^\circ$ и $\varphi = 180^\circ$) силы инерции поступательно движущихся масс имеют максимальное значение. При повороте кривошипа от $\varphi = 0^\circ$ примерно до $\varphi = 90^\circ$ силы инерции имеют отрицательное значение—действуют против движения поршня; от $\varphi = 90^\circ$ до $\varphi = 180^\circ$ силы инерции действуют по направлению движения поршня, все время увеличиваясь по величине. При изменении угла φ от 180° до 360° , что соответствует обратному ходу поршня, действие сил инерции поступательно движущихся масс изменяется в обратном порядке.

§ 4. Силы инерции шатуна; влияние сил инерции шатуна и поступательно движущихся масс на строение паровоза и на путь

На фиг. 13 даны полные ускорения различных материальных точек, составляющих в совокупности массу шатуна. Зная, что в каждой материальной частице, обладающей массой m и имеющей определенное ускорение j , развивается сила инерции $P = -mj$ по направлению, прямо-противоположному ускорению, можем представить себе распределение сил инерции шатуна на длине AB , используя фиг. 13. На фиг. 20 в определенном масштабе даны силы инерции шатуна паровоза серии СУ.



Фиг. 20.

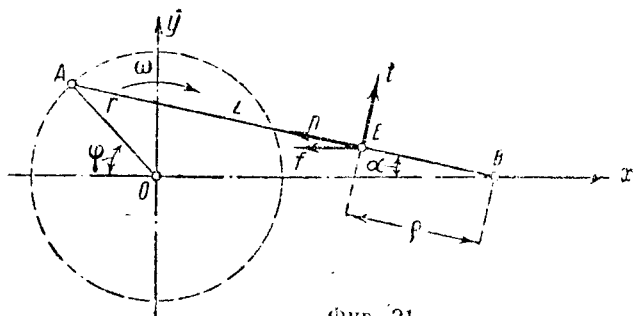
Заметим, что сила инерции частицы массы шатуна, сосредоточенной в точке B , совпадает с направлением действия сил инерции поступательно движущихся масс. Это так и должно быть, потому что точка B соответствует центру передней головки шатуна, который участвует только в поступательном движении.

Далее мы видим, что сила инерции частицы массы шатуна, сосредоточенной в точке A , действует как центробежная сила по направлению радиуса $\overline{OA} = r$ от центра вращения. Это объясняется тем, что точка A соответствует центру задней головки шатуна, который участвует только во вращательном движении.

Промежуточные точки шатуна $\overline{AB} = L$, участвующие, как говорилось выше, в поступательном и вращательном движении, имеют различные силы инерции по величине и направлению действия.

При другом положении механизма каждая частица шатуна будет иметь другое ускорение, почему и распределение сил инерции всех частиц, составляющих массу шатуна, будет отличное от распределения, показанного на фиг. 20.

Для определения влияния сил инерции шатуна воспользуемся методом, рекомендованным инженером Е. Е. Нольтейн.



Фиг. 21.

На фиг. 12 мы видим, что каждая промежуточная материальная точка шатуна имеет три ускорения, следовательно, эта точка, обладая массой m , будет иметь и три силы инерции. На фиг. 21 представлены силы инерции точки E , отстоящей на расстоянии ρ от точки B , относительно которой при движении вращается шатун. Здесь \overline{Ef} — сила инерции массы m от поступательного движения.

$$\overline{Ef} = -mj. \quad (23)$$

Из выражения 13:

$$j = \omega^2 r \left(\cos \varphi - \frac{r}{L} \cos 2\varphi \right) -$$

ускорение поступательно-движущихся масс.

\overline{En} — нормальная сила инерции массы m вращательного движения.

$$En = -mj_E^n. \quad (24)$$

Из выражения (15):

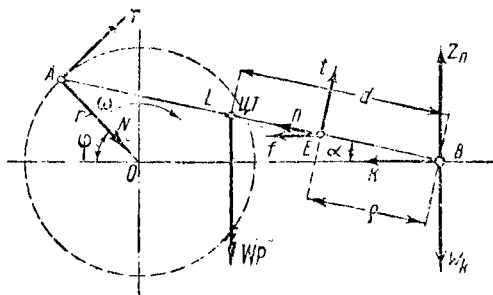
$$j_E^n = \frac{\omega^2 r^2 \cos^2 \varphi}{L^2 \cos^2 \alpha} \cdot \rho.$$

Et — касательная сила инерции массы m вращательного движения.

$$Et = -mj_E^t. \quad (25)$$

Из выражения (16):

$$j_E^t = -\omega^2 r \frac{(L^2 - r^2) \sin \varphi}{L^3 \cos^3 \alpha} \cdot \rho.$$



Фиг. 22.

На фиг. 21 эти три силы инерции имеют истинное направление при данном положении механизма. Чтобы определить силы инерции шатуна и выявить их влияние на опоры A и B (на палец кривошипа и на параллель), рассмотрим кривошипно-шатунный механизм со всеми действующими на него силами при равномерном движении паровоза.

На фиг. 22 изображен схематически кривошипно-шатунный механизм, на который действуют следующие силы:

1) силы инерции;

2) силы, возникающие на опорах,—опорные реакции;

3) внешние силы.

Рассмотрим сначала силы инерции, действующие в механизме.

а) BK — сила инерции поступательно-движущихся масс. Мы знаем, что

$$BK = -M_k j \text{ [кг]}, \quad (26)$$

где

$M_k = \frac{W_k}{g} \left[\frac{\text{кг.сек}^2}{M} \right]$ — масса поступательно движущихся частей;

$j = \omega^2 r \left(\cos \phi - \frac{r}{L} \cos 2\phi \right) \left[\frac{M}{\text{сек}^2} \right]$ — ускорение поступательно движущихся масс.

б) Ej — сила инерции частицы массы m шатуна в точке E .

По выражению (23) $Ej = -mj \text{ [кг]}.$

En — нормальная сила инерции массы m точки E во вращательном движении.

Из формулы (24)

$$En = -mj_E^n \text{ [кг]}$$

Et — касательная сила инерции массы m точки E во вращательном движении.

Из (25) мы знаем, что $Et = -mj_E^t \text{ [кг]}.$

Таковыми тремя силами инерции обладает точка шатуна E , отстоящая на расстоянии ρ от B . Но так как можно рассматривать, что масса шатуна состоит из суммы отдельных элементарных (бесконечно-малых) масс, то при учете действия сил инерции шатуна на опоры (палец кривошипа и параллель) надо брать сумму отдельных сил

E_f , E_n , E_t , распределенных по всей длине шатуна $\overline{AB} = L$.

в) Центробежные силы инерции вращающихся масс колеса сюда не вошли потому, что они, как было указано выше, всегда могут быть уравновешены. В следующем разделе „Уравновешивание центробежных сил инерции вращающихся неуравновешенных масс“ мы найдем окончательное подтверждение этому.

Переходим к разбору сил, возникающих при движении на опорах шатуна в точках A и B .

Полную силу на опоре A —на пальце кривошипа в точке A —будем раскладывать на два направления: нормальное AN и касательное AT (фиг. 22).

На опоре B шатун, соединенный передней головкой с крейцкопфом, который направляющими скользит во время движения по параллели (фиг. 1), вызывает силу BZ_{II} , действующую в вертикальном направлении. Трением между направляющими крейцкопфа и параллелями пренебрегаем, почему считаем, что силы трения, которая действовала бы в горизонтальном направлении, нет. Сила BZ_{II} направлена на фиг. 22 вверх.

Внешними силами, действующими на механизм, будет вес шатуна W_p , приложенный в центре тяжести в точке C , отстоящей на расстоянии d от B , и вес поступательно-движущихся масс W_k , приложенный в точке B . Силы весов W_p [кг] и W_k [кг] при любом положении механизма в силу земного тяготения всегда направлены вниз¹.

Итак, на фиг. 22 мы разобрали все действующие на механизм силы, из которых нам неизвестны силы AN , AT и BZ_{II} . Если в дальнейшем при определении этих трех сил получим для них положительные значения, то, значит, направление

¹ Силы пара и реакции рельсов мы не учитываем.

силам на фиг. 22 дали правильное. Если же получим отрицательное значение какой-либо силы, то на фиг. 22 надо изменить ее направление на обратное.

На основе математического анализа имеем:

$$AT = \frac{F \cos \varphi + QL \sin (\varphi - \alpha)}{L \cos \alpha}, \quad (27)$$

$$AN = \frac{QL \cos (\varphi - \alpha) - F \sin \varphi}{L \cos \alpha}, \quad (28)$$

где:

$$Q = a \left(\frac{W_p + W_k}{g} \right) + (b - c) \frac{W_p}{g} \cdot d$$

$$F = a \sin \alpha \cdot \frac{W_p}{g} d - uJ + W_p d \cdot \cos \alpha.$$

J — момент инерции шатуна относительно оси вращения; d — расстояние от точки B до центра тяжести шатуна;

$$a = \omega^2 r \left(\cos \varphi - \frac{r}{L} \cos 2\varphi \right);$$

$$b = \frac{\omega^2 r^2 \cdot \cos^2 \varphi}{L^2 \cdot \cos \alpha};$$

$$c = \frac{\omega^2 r^2 \cdot (L^2 - r^2) \cdot \sin^2 \varphi}{L^4 \cdot \cos^3 \alpha};$$

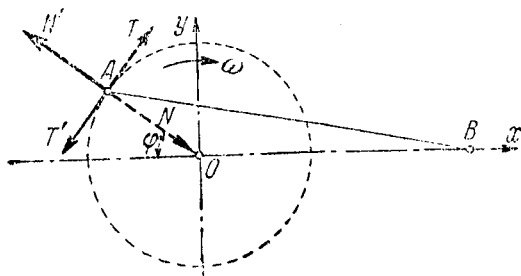
$$u = \omega^2 r \frac{(L^2 - r^2) \sin \varphi}{L^3 \cdot \cos^3 \alpha}.$$

Таким образом по формулам (27) и (28) мы можем при любом положении механизма определить силы AN и AT .

Но нас интересуют не сами опорные реакции AN и AT , возникающие при движении на опоре A , а силы противоположного направления, соответствующие действию внешних сил и сил инерции шатуна и поступательно-движущихся масс движущего механизма.

На фиг. 23 пунктирными линиями показаны силы AN и AT , действующие в механизме при данном положении; сплошными линиями показаны силы: AN' — нормальная сила от внешних сил и сил инерции шатуна и поступательно-движущихся масс;

AT' — касательная сила от внешних сил и силы инерции шатуна и поступательно-движущихся масс.



Фиг. 25.

Имея в виду, что силы AN' и AT' соответственно равны по абсолютной величине силам AN и AT , запишем:

$$AN' = \frac{QL \cos(\varphi - \alpha) - F \sin \varphi}{L \cos \alpha}, \quad (29)$$

$$AT' = \frac{F \cos \varphi + QL \sin(\varphi - \alpha)}{L \cos \alpha}. \quad (30)$$

В дальнейших расчетах мы будем учитывать только силы AN' и AT' , выявим их значение и влияние на механизм.

В разделе „Уравновешивание сил инерции паровозной машины“ будем стремиться уравновесить, устранить эти силы и, если это осуществим полностью, то тем самым устраним и силы AN и AT , оказывающие при движении вредное дей-

ствие на палец кривошипа и на ось ската — на рельс.

Чтобы можно было иметь представление о величине и направлении действия сил AN' и AT' за оборот колеса, подсчитаем эти силы для паровоза серии C^y при максимальной скорости движения $v = 100 \text{ км/час}$.

Необходимые данные для определения сил AN' и AT' возьмем из пояснительной записки Коломенского завода по расчету противовесов паровоза серии C^y 1-3-1 переделки 1932 г. Эти необходимые данные занесены в табл. 4.

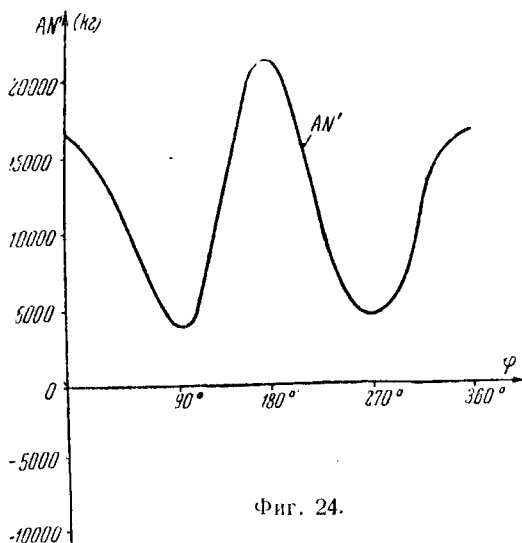
Таблица 4

r	L	$\frac{r}{L}$	v	$D_{кол}$	ω	ω^2
[м]	[м]		$\left[\frac{\text{м}}{\text{сек}} \right]$	[м]	$\left[\frac{1}{\text{сек}} \right]$	$\left[\frac{1}{\text{сек}^2} \right]$
0,350	2,350	0,1489	27,777	1,850	30,03	901,8

$\omega^2 r$	W_p	W_k	d	J	$\frac{W_p + W_k}{g}$	$\frac{W_p d}{gL}$
$\left[\frac{\text{м}}{\text{сек}^2} \right]$	[кг]	[кг]	[м]	[кг м сек ²]	$\left[\frac{\text{кг сек}^2}{\text{м}} \right]$	$\left[\frac{\text{кг сек}^2}{\text{м}} \right]$
315,63	225,28	365,75	1,5375	71,665	60,247	15,22

Определять значение силы AN' из выражения (29) и значение силы AT' из выражения (30) будем через каждые 15° поворота кривошипа; результаты значений сил сведены в табл. 5.

В гр. 11 и 9 табл. 5 мы видим, что силы AN' и AT' при изменении угла φ от 0 до 90° имеют положительное значение. Положительное значение сил AN' и AT' в первой четверти говорит за то, что направление силам AN и AT (опорным реакциям в точке A) на фиг. 22 мы дали правильное.



Фиг. 24.

Для наглядности силу AN' , изменяющуюся по величине за оборот колеса, представим в виде кривой в осях координат, где по оси абсцисс будем откладывать угол φ через каждые 15° (фиг. 24), а по оси ординат будем откладывать значение силы AN' при данном угле поворота кривошипа в определенном масштабе (значение силы AN' будем брать из гр. 11 табл. 5).

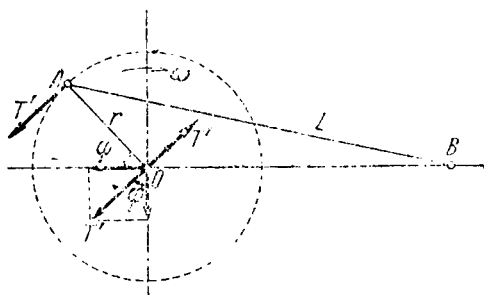
На кривой фиг. 24 мы видим, что при мертвых положениях механизма: заднем, когда $\varphi = 0^\circ$, и

переднем, когда $\varphi = 180^\circ$, сила AN' имеет раз-
личное значение:

так, при $\varphi = 0^\circ$ сила $\overline{AN'} = 16\,542 \text{ кг}$;

при $\varphi = 180^\circ$ сила $AN' = 21\,429 \text{ кг}$.

То обстоятельство, что кривая силы AN' на
фиг. 24 не пересекает оси $O\varphi$, надо понимать так:
сила AN' действует как центробежная сила по
меняющемуся все время направлению (по на-
правлению радиуса кривошипа) и на фиг. 24 дано
изменение силы AN' за оборот колеса только по
величине.

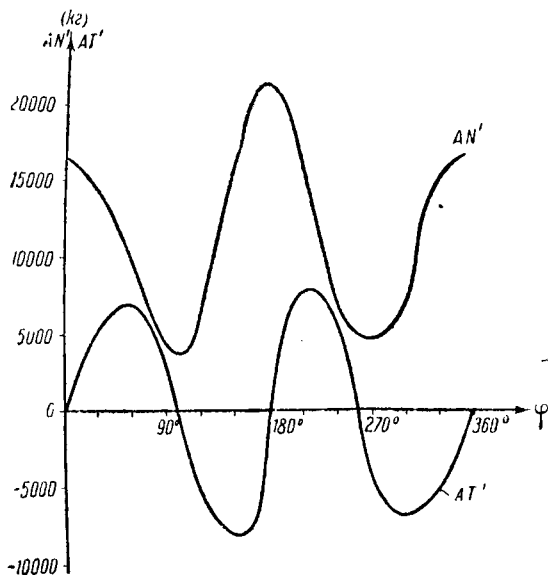


Фиг. 25.

Для рассмотрения действия касательной силы
 $\overline{AT'}$, изменение которой за оборот колеса дано
в гр. 9 табл. 5, поступим следующим образом.
При определенном положении механизма (фиг. 25)
приложим в точку O две равные и противопо-
ложно направленные силы OT' , равные силе AT'
($\overline{OT'} = \overline{AT'}$). В результате этого получили пару
сил $M = \overline{AT'} \cdot r$, действующую на ось в данном
случае в направлении, противоположном враще-
нию колеса, и силу $\overline{OT'}$, равную AT' , на-
правленную от центра оси и, следовательно, дейст-
вующую как центробежная сила. Если мы эту силу

$\overline{OT'} = \overline{AT'}$ разложим на два направления—вертикальное и горизонтальное (фиг. 25), то вертикальная составляющая $\overline{AT'} \cos \varphi$ в данном случае будет увеличивать давление колеса на рельс; горизонтальная составляющая $\overline{AT'} \sin \varphi$ будет влиять на подергивание и виляние паровоза.

Воспользовавшись гр. 9 табл. 5, представим изменение силы $\overline{AT'}$ в виде кривой (фиг. 26).



Фиг. 26.

На фиг. 26 мы видим, что сила $\overline{AT'}$ за оборот колеса четыре раза меняет направление своего действия.

При $\varphi = 0^\circ$ и $\varphi = 180^\circ$ сила $\overline{AT'}$ равна 0. При значениях φ , близких к 90° и 270° , сила $\overline{AT'}$ также равна 0. Максимальные значения сила $\overline{AT'}$

имеет при φ , близком по значению 00° , 135° , 225° и 300° . Так, при $\varphi = 60^\circ$ сила $\overline{AT}' = 7\,070$ кг и действует в направлении, противоположном вращению колеса.

При $\varphi = 135^\circ$ сила $\overline{AT}' = 8\,282$ кг и действует по направлению вращения колеса, на что указывает знак минус при силе \overline{AT}' в гр. 9.

При $\varphi = 225^\circ$ сила $\overline{AT}' = 8\,071$ кг и действует против направления вращения колеса.

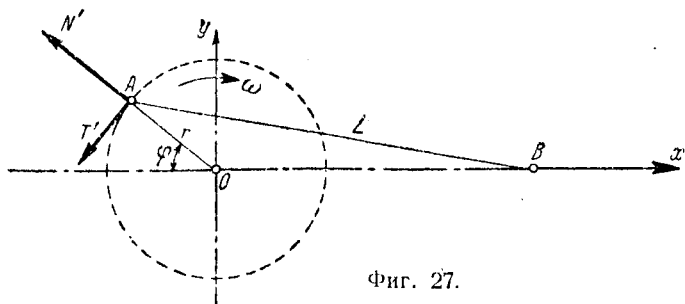
При $\varphi = 300^\circ$ сила $\overline{AT}' = 6\,921$ кг и действует согласованно с вращением колеса.

Для большей наглядности действия сил \overline{AN}' и \overline{AT}' за оборот колеса мы на фиг. 26 представим совместно кривые этих сил в общем масштабе. На фиг. 26 мы видим, что в те моменты, когда сила \overline{AN}' имеет наибольшие ($\varphi = 0^\circ$ и $\varphi = 180^\circ$) и наименьшие значения ($\varphi \cong 90^\circ$ и $\varphi \cong 270^\circ$); сила \overline{AT}' равна 0. При наибольших значениях силы \overline{AT}' сила \overline{AN}' имеет промежуточные значения.

При исследовании влияния сил инерции шатуна и сил инерции поступательно-движущихся масс на опору-А (фиг. 22) Нольтейн учитывал влияние только силы \overline{AN}' и совершенно не принял во внимание силу \overline{AT}' , действие которой за оборот колеса для паровоза серии С^У при $v = 100 \left[\frac{\text{км}}{\text{час}} \right]$ было представ-

лено в виде кривой на фиг. 26. Поэтому в дальнейшем будем вести расчет, придерживаясь метода проф. Раевского. По методу Раевского рассчитываются противовесы всеми проектными организациями нашего Союза. Сущность способа Раевского заключается в том, что он при разборе влияния сил инерции шатуна и сил инерции поступательно-движущихся масс на механизм силу в точке А раскладывает на горизонтальное

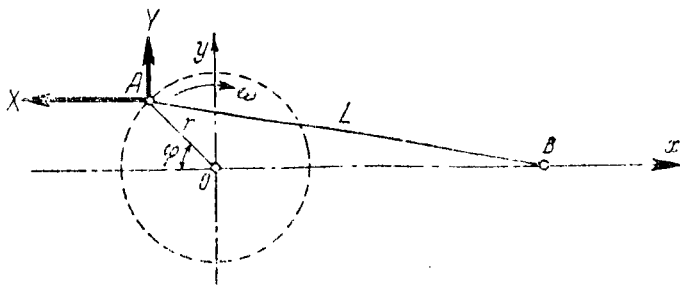
и вертикальное направление (по методу Польтейна мы раскладывали силу в точке A на нормальное и касательное направление, фиг. 27).



Фиг. 27.

Силы, действующие в точке A в горизонтальном и вертикальном направлении и вызывающие на опоре A реактивные силы, проф. Раевский обозначает буквами X и Y (фиг. 28).

Запомним, что сила X есть результирующая от внешних сил и сил инерции шатуна и поступательно-движущихся масс механизма. Сила X действует в точке A в горизонтальном направлении.

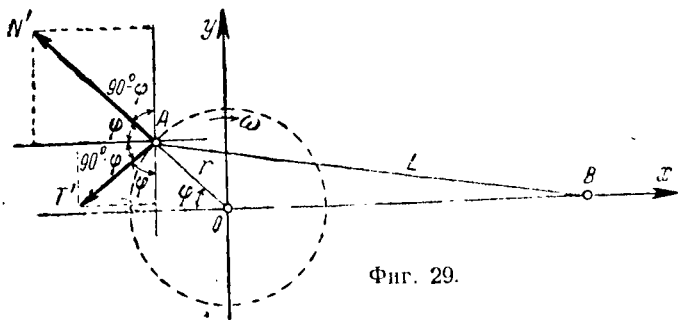


Фиг. 28.

Сила Y есть результирующая от внешних сил и сил инерции шатуна и поступательно-движущихся масс механизма. Сила Y действует в точке A в вертикальном направлении.

Из фиг. 27 и 28 видно, что сила X может быть найдена, если мы спроектируем силы $\overline{AN'}$ и $\overline{AT'}$ на горизонтальную ось, проходящую через точку A параллельно оси Ox ; сила Y будет равна сумме проекций тех же сил $\overline{AN'}$ и $\overline{AT'}$, но уже на вертикальную ось.

Запишем значение сил X и Y , воспользовавшись фиг. 29, на которой указаны углы, образованные силами AN' и AT' с горизонтальной и вертикальной осями. Положительное направление



Фиг. 29.

горизонтальной оси Ox нами взято попрежнему вправо; положительное значение вертикальной оси Oy взято вверх.

Напишем значения сил X и Y .

$$X = -\overline{AN'} \cos \varphi - \overline{AT'} \cos (90^\circ - \varphi),$$

$$Y = \overline{AN'} \cos (90^\circ - \varphi) - \overline{AT'} \cos \varphi.$$

После замены значения $\cos (90^\circ - \varphi) = \sin \varphi$ получим:

$$X = -(\overline{AN'} \cos \varphi + \overline{AT'} \sin \varphi), \quad (31)$$

$$Y = \overline{AN'} \sin \varphi - \overline{AT'} \cos \varphi. \quad (32)$$

Подставив в уравнение (31) вместо выражений

$\overline{AN'}$ и $\overline{AT'}$ их значение из выражений (29) и (30), получаем:

$$X = - \frac{QL \cos(\varphi - \alpha) - F \sin \varphi}{L \cdot \cos \alpha} \cdot \cos \varphi - \\ - \frac{F \cos \varphi + QL \sin(\varphi - \alpha)}{L \cdot \cos \alpha} \cdot \sin \varphi,$$

откуда

$$X = -Q = -a \left(\frac{W_p + W_k}{g} \right) - (b - c) \frac{W_p}{g} \cdot d. \quad (33)$$

Подставим в уравнение (33) вместо a , b и c их значения и сделаем преобразования:

$$X = -\omega^2 r \left(\cos \varphi - \frac{r}{L} \cos 2\varphi \right) \left(\frac{W_p + W_k}{g} \right) - \\ - \left[\frac{\omega^2 r^2 \cos^2 \varphi}{L^2 \cos \alpha} - \frac{\omega^2 r^2 (L^2 - r^2) \sin^2 \varphi}{L^4 \cos^3 \alpha} \right] \frac{W_p}{g} d; \quad (34)$$

$$X = -\omega^2 r \left\{ \left(\cos \varphi - \frac{r}{L} \cos 2\varphi \right) \left(\frac{W_p + W_k}{g} \right) + \right. \\ \left. + \frac{r}{L} \left[\frac{\cos^2 \varphi}{\cos \alpha} - \frac{(L^2 - r^2) \sin^2 \varphi}{L^2 \cos^3 \alpha} \right] \frac{W_p}{g} \cdot \frac{d}{L} \right\} \quad (34a)$$

Множитель в квадратных скобках выражения (34a) после преобразований может быть написан так:

$$\frac{\cos^2 \varphi}{\cos \alpha} - \frac{(L^2 - r^2) \sin^2 \varphi}{L^2 \cos^3 \alpha} = \frac{\cos 2\varphi + \sin^2 \alpha \cdot \sin^2 \varphi}{\cos^3 \alpha}. \quad (35)$$

Обозначим:

$$A = \cos \varphi - \frac{r}{L} \cos 2\varphi, \quad (36)$$

$$B = \frac{r}{L} \left(\frac{\cos 2\varphi + \sin^2 \alpha \cdot \sin^2 \varphi}{\cos^3 \alpha} \right). \quad (36a)$$

Напишем окончательное выражение силы X :

$$X = -\omega^2 r \left[A \left(\frac{W_p + W_k}{g} \right) + B \frac{W_p}{g} \frac{d}{L} \right]. \quad (37)$$

(Коэффициент A для различных отношений $\frac{r}{L}$ подсчитан в табл. 3 стр. 24.)

Преобразуем также значение Y в выражении (32) посредством замены сил AN' и AT' их значениями из выражений (29) и (30); будем иметь:

$$Y = \frac{QL \cos(\varphi - \alpha) - F \sin \varphi}{L \cdot \cos \alpha} \cdot \sin \varphi - \\ - \frac{F \cos \varphi + QL \sin(\varphi - \alpha)}{L \cdot \cos \alpha} \cdot \cos \varphi = Q \operatorname{tg} \alpha - \frac{F}{L \cos \alpha}.$$

Подставив в полученное выражение значения Q и F , получим:

$$Y = -X \cdot \operatorname{tg} \alpha - \frac{a \cdot \sin \alpha \cdot \frac{W_p}{g} d - uJ + W_p \cdot d \cdot \cos \alpha}{L \cos \alpha},$$

или:

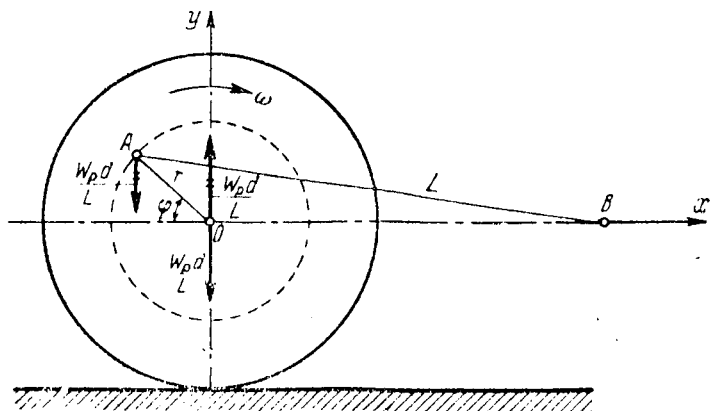
$$Y = -X \cdot \operatorname{tg} \alpha - a \frac{W_p}{g} \cdot \frac{d}{L} \cdot \operatorname{tg} \alpha + \\ + \frac{uJ}{L \cos \alpha} - \frac{W_p d}{L}. \quad (38)$$

В выражении (38) мы видим, что последний член $\frac{W_p d}{L}$ входит со знаком минус и не зависит по величине и направлению действия от изменения угла φ и α . По абсолютной величине $\frac{W_p d}{L}$ представляет часть веса шатуна, приходящуюся на ведущий палец (опору А). Если мы рассмотрим положение механизма в четырех четвертях, то убедимся в том, что последний член в выражении (38) можем отбросить.

Рассмотрим положение механизма в первой четверти (фиг. 30). Приложим в точке O две равные и противоположно направленные силы веса $\frac{W_p d}{L}$. В результате этого получим пару сил

$M = \frac{W_{pd}}{L} \cdot r \cdot \cos \varphi$, действующую на ось в данной четверти в сторону, противоположную вращению колеса, и силу веса $\frac{W_{pd}}{L}$ [кг], действующую вниз и увеличивающую тем самым статическую нагрузку колеса на рельс.

Во второй четверти (фиг. 31) часть веса шатуна $\frac{W_{pd}}{L}$, входящая в выражение (38), также направлена в точке A вниз.

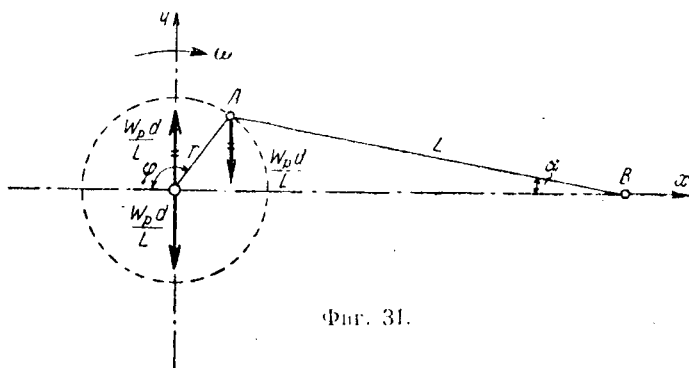


Фиг. 30.

Если поступим таким же образом, как в предыдущем случае, т. е. приложим в точке O две равные и противоположно направленные силы веса $\frac{W_{pd}}{L}$, то получим опять пару сил $M = \frac{W_{pd}}{L} r \cos(180^\circ - \varphi)$, действующую в данной четверти уже в направлении вращения колеса, и силу веса $\frac{W_{pd}}{L}$ в точке O , действующую опять вниз и увеличивающую тем самым стати-

ческую нагрузку колеса на рельс на ту же силу веса $\frac{W_p d}{L}$ [кг].

Рассматривая положение механизма в третьей и четвертой четверти, мы убедимся в том же, что от силы веса $\frac{W_p d}{L}$, приложенной в точке А, будем получать пару сил, действующую скручивающим образом на ось колеса, и силу веса $\frac{W_p d}{L}$ [кг], приложенную в центре оси (в точке О)



Фиг. 31.

и входящую в состав статической нагрузки колеса на рельс. Поэтому в выражении (38), определяющем значение вертикальной составляющей от внешних сил и сил инерции шатуна и поступательно-движущихся масс механизма, т. е. Y , последний член $\frac{W_p d}{L}$ при уравнивании силы Y можем отбросить.

Тогда выражение (38) напомним в таком виде:

$$Y = -X \cdot \operatorname{tg} \alpha - a \frac{W_p}{g} \cdot \frac{d}{L} \operatorname{tg} \alpha + \frac{uJ}{L \cdot \cos \alpha} \quad (39)$$

В уравнение (39) вместо X , a и u подставим их

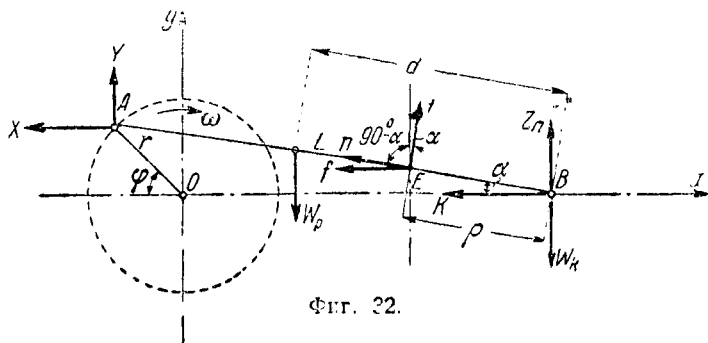
значения, после чего напишем в окончательном виде выражение для определения Y :

$$Y = \omega^2 r \left[A \left(\frac{W_p + W_k}{g} \right) - (A - B) \frac{W_p}{g} \frac{d}{L} + C \frac{J}{L^2} \right] \operatorname{tg} \alpha, \quad (40)$$

где:

$$C = \left(\frac{L}{r} - \frac{r}{L} \right) \frac{1}{\cos^3 \alpha} \quad (40a)$$

Для определения опорной реакции Z_{II} на опоре B от внешних сил и сил инерции шатуна и поступательно-движущихся масс механизма возьмем условие $\Sigma Y = 0$ (сумма проекций всех сил на ось



Фиг. 32.

Y -ков равна нулю), воспользовавшись фиг. 32, где указаны все действующие силы и углы, образованные этими силами с осью Y -ков.

$$\begin{aligned} -Y - W_p + \Sigma \bar{E}n \cdot \cos(90^\circ - \alpha) + \\ + \Sigma \bar{E}t \cos \alpha - W_k + Z_{II} = 0; \end{aligned}$$

отсюда

$$Z_{II} = Y - \Sigma \bar{E}n \sin \alpha - \Sigma \bar{E}t \cos \alpha + (W_p + W_k). \quad (41)$$

Но

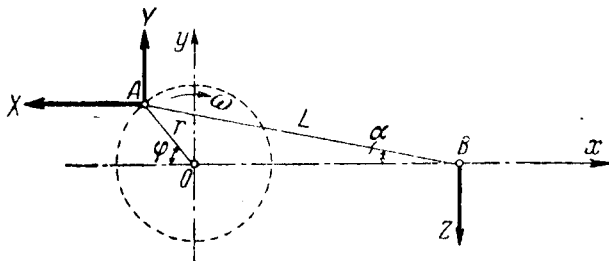
$$\begin{aligned} \Sigma \bar{E}n \sin \alpha &= \Sigma m \cdot \frac{\omega^2 r^2 \cos^2 \varphi}{L^2 \cos^2 \alpha} \cdot \rho \cdot \sin \alpha = \\ &= \frac{\omega^2 r^2 \cos^2 \varphi}{L^2 \cos^2 \alpha} \cdot \sin \alpha \Sigma m \rho = b \operatorname{tg} \alpha \cdot \frac{W_p}{g} d; \end{aligned}$$

$$\Sigma \bar{E} t \cos \alpha = \Sigma m \omega^2 r \frac{(L^2 - r^2) \sin \varphi}{L^3 \cos^3 \alpha} \cdot \rho \cdot \cos \alpha = \\ = \omega^2 r \frac{(L^2 - r^2) \sin \varphi}{L^3 \cos^3 \alpha} \cdot \cos \alpha \Sigma m \rho = u \cos \alpha \frac{W_p}{g} d.$$

Подставим найденные значения $\Sigma \bar{E} n \sin \alpha$ и $\Sigma \bar{E} t \cos \alpha$ в выражение (41):

$$Z_{II} = Y - (b \operatorname{tg} \alpha + u \cos \alpha) \frac{W_p}{g} d + (W_p + W_k). \quad (42)$$

Силу, которая вызвала на опоре B реактивную силу Z_{II} , будем обозначать просто Z . Итак, Z — результирующая сила на опоре B от внешних сил, сил инерции шатуна и поступательно-движущихся масс механизма.



Фиг. 33.

Сила Z по величине равна Z_{II} , но действует в противоположном направлении. Учитывая это положение, будем силу Z в первой четверти направлять вниз (фиг. 33).

Окончательное выражение для определения силы Z с учетом силы $\frac{W_p d}{L}$, не вошедшей в значение силы Y , напишется так:

$$Z = -\omega^2 r \left[A \left(\frac{W_p + W_k}{g} \right) - (A + C) \frac{W_p d}{g L} + C \frac{J}{L^2} \right] \operatorname{tg} \alpha - \\ - \left(W_p + W_k - \frac{W_p d}{L} \right). \quad (43)$$

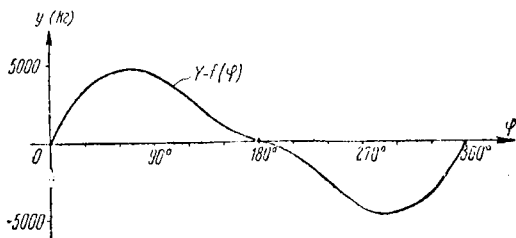
φ	$a = \omega^2 r (\cos \varphi - \frac{r}{L} \cos 2\varphi)$	$b = \omega^2 \frac{r^2}{L^2} \cdot \frac{\cos^2 \varphi}{\cos \alpha}$	$c = \frac{\omega^2 r^2 (L^2 - r^2) \sin^2 \varphi}{L^3 \cos^3 \alpha}$	$u = \frac{\omega^2 r^2 (L^2 - r^2) \sin \varphi}{L^3 \cos^3 \alpha}$	$Q = a \left(\frac{W_p + W_k}{g} \right) + (b - c) \cdot \frac{W_p d}{g}$
(°)	($\frac{M}{\text{сек}^2}$)	($\frac{1}{\text{сек}^2}$)	($\frac{1}{\text{сек}^2}$)	($\frac{1}{\text{сек}^2}$)	(°)
1	2	3	4	5	6
0	268,63	9,997	0,000	0,000	0°
15	272,51	9,334	0,664	34,057	2°13'
30	219,84	7,519	2,464	66,197	4°16'
45	223,18	5,026	4,970	91,402	6°22'
60	181,31	2,520	7,517	116,59	7°24'
75	114,03	0,677	9,409	130,841	8°15'
90	47,0	0,000	10,108	135,762	8°32'
105	— 49,35	0,677	9,409	130,841	8°15'
120	— 134,32	2,520	7,517	116,59	7°24'
135	— 223,18	5,026	4,970	91,402	6°22'
150	— 296,84	7,519	2,464	66,197	4°16'
165	— 337,21	9,334	0,664	34,057	2°13'
180	— 362,63	9,997	0,000	0,000	0°
195	— 337,21	9,334	0,664	— 34,057	— 2°13'
210	— 296,84	7,519	2,464	— 66,197	— 4°16'
225	— 223,18	5,026	4,970	— 91,402	— 6°22'
240	— 134,32	2,520	7,517	— 116,59	— 7°24'
255	— 49,35	0,677	9,409	— 130,841	— 8°15'
270	47,0	0,000	10,108	— 135,762	— 8°32'
285	114,03	0,677	9,409	— 130,841	— 8°15'
300	181,31	2,520	7,517	— 116,59	— 7°24'
315	223,18	5,026	4,970	— 91,402	— 6°22'
330	219,84	7,519	2,464	— 66,197	— 4°16'
345	272,51	9,334	0,664	— 34,057	— 2°13'
360	268,63	9,997	0,000	0,000	0°

$F = a \sin \alpha - d - u \frac{J}{g} + W_p d \cos \alpha$	$AT' = \frac{F \cos \varphi + Q L \sin (\varphi - \alpha)}{L \cos \alpha}$	$M = \overline{AT} \cdot r$	$AN' = \frac{Q L \cos (\varphi - \alpha) - F \sin \varphi}{L \cos \alpha}$	$X = -\omega^2 r \left[A \left(\frac{W_p + W_k}{g} \right) + B \frac{W_p d}{g L} \right]$	$Y = \omega^2 r \left[A \left(\frac{W_p + W_k}{g} \right) - (A - B) \frac{W_p d}{g L} + C \frac{J}{L^2} \right] \text{tg} \alpha$	$Z = -\omega^2 r \left[A \left(\frac{W_p + W_k}{g} \right) - (A + C) \frac{W_p d}{g L} + C \frac{J}{L^2} \right] \text{tg} \alpha - (W_p + W_k - \frac{W_p d}{L})$
($\text{кг} \cdot \text{м}$)	(кг)	($\text{кг} \cdot \text{м}$)	(кг)	(кг)	(кг)	(кг)
8	9	10	11	12	13	14
351	149	52	16 542	— 16 542	0	— 442
— 1 715	3 002	1 051	16 517	— 16 730	1 525	— 737
— 3 729	5 255	1 839	14 659	— 15 233	2 877	— 946
— 5 577	6 816	2 388	12 200	— 13 448	3 958	— 1 020
— 7 173	7 070	2 475	9 247	— 10 745	4 622	— 914
— 8 444	5 148	1 802	6 122	— 6 558	4 730	— 572
— 9 133	2 470	865	4 300	— 2 470	4 450	— 112
— 9 281	— 2 263	— 792	4 215	3 286	3 664	494
— 8 626	— 5 850	— 2 048	6 413	8 271	2 778	930
— 7 369	— 8 282	— 2 899	10 730	13 441	1 828	1 110
— 5 184	— 8 081	— 2 828	15 780	17 703	1 041	897
— 2 556	— 4 873	— 1 706	10 408	20 006	463	322
351	— 149	— 52	21 429	21 490	0	— 442
3 255	4 584	1 604	19 485	20 006	— 1 466	— 1 206
5 884	7 823	2 738	15 929	17 703	— 1 041	— 1 781
8 086	8 071	2 835	10 941	13 444	— 1 828	— 1 994
9 323	5 701	1 895	6 671	8 271	— 2 778	— 1 811
9 977	2 188	765	4 534	3 286	— 3 664	— 1 378
9 827	— 2 470	— 865	4 599	— 2 470	— 4 450	— 772
9 139	— 5 070	— 1 775	6 410	— 6 558	— 4 730	— 312
7 869	— 6 921	— 2 422	9 506	— 10 745	— 4 622	30
6 275	— 6 605	— 2 312	12 400	— 13 448	— 3 958	136
4 429	— 4 968	— 1 739	14 708	— 15 233	— 2 877	55
2 416	— 2 713	— 950	16 594	— 16 730	— 1 525	— 147
351	149	52	16 542	— 16 542	0	— 442

В табл. 5 в гр. 12, 13 и 14 подсчитаны силы X , Y и Z для паровоза серии C^y при движении с максимальной расчетной скоростью v , равной $100 \left[\frac{\text{км}}{\text{час}} \right]$, по прямолинейному участку пути без пара под влиянием одних лишь сил инерции.

Для наглядности изменение силы Y за оборот колеса представим в виде кривой (фиг. 34) в масштабе 4 мм—1 000 кг.

На фиг. 34 мы видим, что характер изменения силы Y при изменении φ от 0 до 360° близок к синусоиде того же периода.



Фиг. 34.

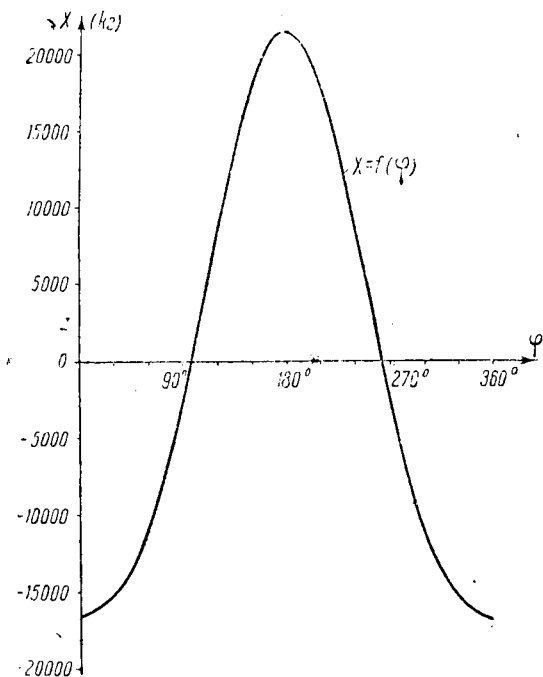
При $\varphi = 0^\circ$ и $\varphi = 180^\circ$ сила Y равна нулю. При φ по значению, близкому к 75° и 285° , сила Y достигает наибольшего значения. Так, при $\varphi = 75^\circ$ сила $Y = 4730$ кг и действует вверх. При $\varphi = 285^\circ$ сила $Y = -4730$ кг и действует вниз.

Таким образом, сила Y в первой и второй четверти при переднем ходе поршня, действуя вверх, разгружает рельс; в третьей и четвертой четверти, что соответствует заднему ходу поршня, сила Y , действуя вниз, увеличивает давление колеса на рельс.

Изменение силы X за оборот колеса представлено в виде кривой на фиг. 35.

Характер изменения силы X при изменении угла φ от 0 до 360° близок к косинусоиде того же периода.

При угле φ , близком к значению 90° и 270° , сила X равна нулю. При $\varphi = 0^\circ$ и $\varphi = 180^\circ$ сила X достигает максимальных значений. Так, при $\varphi = 0^\circ$ сила $X = -16542$ кг. Знак минус указывает на то, что сила X в первой четверти действует в противоположном направлении по отношению к движению поршня.



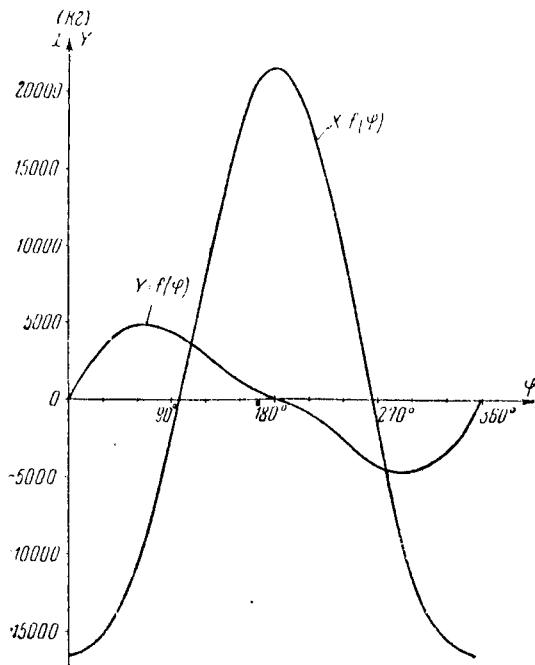
Фиг. 35.

При $\varphi = 180^\circ$ сила $X = 21490$ кг.

Таким образом, в первой четверти сила X , действуя в направлении, противоположном движению поршня, замедляет движение паровоза.

Во второй и третьей четверти оборота колеса, что соответствует примерно второй поло-

вине переднего хода поршня и первой половине заднего хода поршня, сила X действует по направлению движения паровоза и тем самым сообщает ускорение движущемуся паровозу.



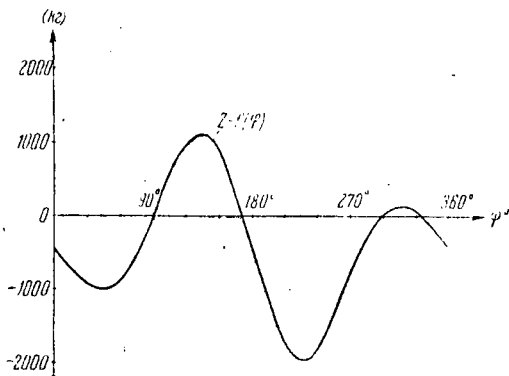
Фиг. 36.

В четвертой четверти, соответствующей примерно второй половине заднего хода поршня, сила X опять оказывает тормозящее влияние на движение паровоза.

Для большей наглядности действия сил Y и X за оборот колеса представим на фиг. 36 совместно кривые этих сил. На фиг. 36 мы видим, что при заднем мертвом положении и переднем мертвом положении механизма сила X имеет максимальные значения, сила $Y = 0$. Когда же сила Y

имеет наибольшее значение ($\varphi \cong 75^\circ$ и $\varphi \cong 285^\circ$), сила X имеет промежуточные значения.

Воспользовавшись гр. 14 табл. 5, представим изменение силы Z за оборот колеса в виде кривой (фиг. 37).



Фиг. 37.

На фиг. 37 мы видим, что сила Z при переднем ходе поршня при повороте кривошипа на угол $\varphi \cong 90^\circ$ давит на нижнюю параллель, при угле от ~ 90 до $\sim 180^\circ$ — давит на верхнюю параллель; при заднем ходе поршня сила Z в основном оказывает давление на нижнюю параллель.

Наибольшее значение сила Z имеет при угле $\varphi \cong 225^\circ$,

где $Z = 1994$ кг.

Выявив все силы инерции, возникающие в движущем механизме паровозной машины при движении, переходим к вопросу уравнивания центробежных сил вращающихся неуравновешенных масс, сил X и Y , оказывающих вредное действие как на строение самого паровоза, так и на верхнее строение пути — на рельсы.

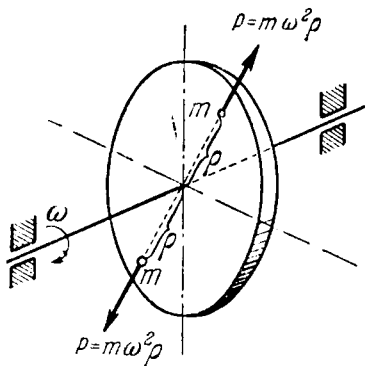
ГЛАВА III

УРАВНОВЕШИВАНИЕ СИЛ ИНЕРЦИИ ДВИЖУЩЕГО МЕХАНИЗМА ПАРОВОЗНОЙ МАШИНЫ

§ 1. Уравновешивание центробежных сил инерции вращающихся масс

а) Основные формулы для уравновешивания центробежных сил

Если однородные тела в виде цилиндра, кольца (тела вращения) будут равномерно вращаться относительно своей оси, то возникающие при вращении центробежные силы $P = -m\omega^2\rho$ у таких тел будут взаимно уравновешены (фиг. 38). Это положение надо понимать так, что центробежная сила массы m , находящейся в какой-либо точке, стремится величиной силы $P = -m\omega^2\rho$ оттянуть ось вращения в сторону своего действия от центра вращения.



Фиг. 38.

Но в это же время центробежная сила другой массы тоже m , находящейся диаметрально противоположно по отношению к первой массе, будет стремиться той же силой

$P = -m\omega^2\rho$ оттянуть ось вращения от центра (от точки O , фиг. 38) в сторону своего действия, препятствуя тем самым действию первой силы. В результате обе силы будут уравновешены, и однородное цилиндрической формы тело будет вращаться строго относительно своей оси, которая, оставаясь неподвижной, будет испытывать только растягивающее усилие, равное $P = m\omega^2\rho$.

В паровозном вращающемся скате, как в сцепном, так и в ведущем, являются уравновешенными следующие части:

- 1) ось, 2) ступица, 3) бандаж, 4) обод.

Спицы также принято считать уравновешенными.

Тогда неуравновешенными частями в сцепном колесе остаются: кривошип, состоящий из мотыля и пальца, и часть веса от сцепных дышел, приходящаяся на палец кривошипа.

В ведущем колесе неуравновешенными частями являются:

- 1) кривошип, состоящий из мотыля и ведущего пальца;

- 2) часть веса от сцепных дышел, приходящаяся на ведущий палец;

- 3) контр-кривошип.

Чтобы лучше усвоить технику уравновешивания центробежных сил от этих неуравновешенных вращающихся масс в колесе, разберем несколько примеров из теории уравновешивания вращающейся системы.

Пример 1. Если на невесомом вращающемся с постоянной угловой скоростью ω диске будет помещена масса M (фиг. 39), центр тяжести которой находится на расстоянии ρ от оси вращения, то возникает центробежная сила неуравновешенной массы M , равная $M\omega^2\rho$. Чтобы устранить действие этой силы на ось вращения, короче, чтобы уравновесить эту центробежную силу, достаточно в этой же плоскости в диа-

метрально-противоположном направлении на расстоянии ϱ' поместить уравнивающую массу M' , центробежная сила которой будет по величине равна первой и направлена в противоположную сторону:

$$M\omega^2\varrho = M'\omega^2\varrho'; \quad (44)$$

отсюда:

$$M\varrho = M'\varrho'$$

и

$$M' = M \frac{\varrho}{\varrho'}. \quad (45)$$

Так как массы M и M' пропорциональны весам своих тел, т. е.

$$M = \frac{G}{g} \quad \text{и} \quad M' = \frac{G'}{g},$$

то можно написать:

$$\frac{G'}{g} = \frac{G}{g} \cdot \frac{\varrho}{\varrho'} \quad (46)$$

или просто:

$$G' = G \cdot \frac{\varrho}{\varrho'}. \quad (47)$$

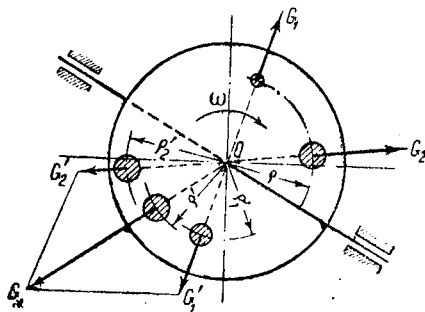
Зная, какой вес G' можем поместить, определяем, на каком расстоянии нужно его поместить:

$$\varrho' = \frac{G\varrho}{G'}. \quad (48)$$

Пример 2. Если на том же вращающемся диске под произвольным углом будут помещены две массы весом G_1 и G_2 на расстоянии ϱ от центра O (фиг. 40), то для уравнивания центробежных сил этих масс мы по формуле (47) должны поместить две массы: массу, вес которой G_1' — на расстоянии ϱ_1' , и вторую массу, вес которой G_2' на расстоянии ϱ_2' . Два вектора $\overline{G_1'\varrho_1'}$ и $\overline{G_2'\varrho_2'}$ по правилу геометрического сложения

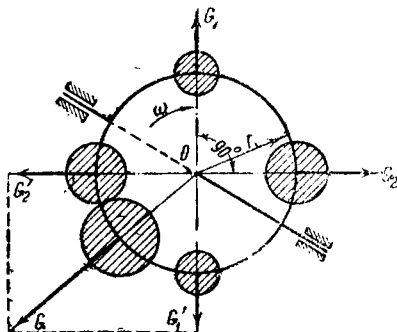
векторов можно заменить одним вектором $G\varrho'$, равным геометрической сумме:

$$G\varrho' = \overline{G_1'\varrho_1'} + \overline{G_2'\varrho_2'}. \quad (49)$$



Фиг. 40.

Задаваясь значением ϱ' , определим величину G , которую необходимо поместить на расстоянии ϱ' от оси вращения по направлению диагонали параллелограмма $OG_2'\varrho_2'OG_1'\varrho_1'$.



Фиг. 41.

Пример 3. Если две неуравновешенные массы весом G_1 и G_2 будут находиться на вращающемся диске под углом 90° друг к другу (фиг. 41) на

расстоянии r от оси вращения, то геометрическая сумма уравнивающих масс, весом G_1' и G_2' , помещенных также на радиусе r , будет определяться значением:

$$\overline{Gr} = \overline{G_1'r} + \overline{G_2'r} \quad (50)$$

или, сокращая на r , можно написать:

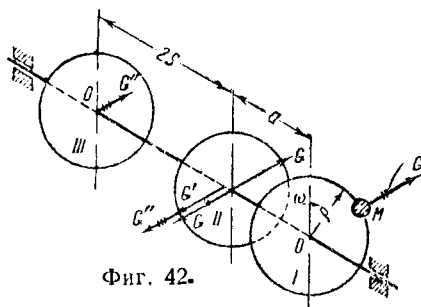
$$G = \overline{G_1'} + \overline{G_2'}. \quad (51)$$

Так как в геометрическом сложении G , являясь диагональю параллелограмма $OG_2'GG_1'O$, в то же время является гипотенузой прямоугольного треугольника OGG_1' , то можно написать, что

$$G = \sqrt{(G_1')^2 + (G_2')^2}. \quad (52)$$

Итак, чтобы уравновесить центробежные силы двух масс весом G_1 и G_2 , надо поместить также на расстоянии r от центра вращения массу тела, вес которого G [кг].

Пример 4. Если по какой-либо причине центробежную силу неуравновешенной массы M ве-



Фиг. 42.

сом G , помещенной на диске I на расстоянии q от оси вращения не представляется возможным уравновесить центробежной силой массы M' , вес которой G' , т. е. не представляется возможным в этой же плоскости I поместить массу M' , то

в этом случае поступаем так (фиг. 42). Переносим силу веса G параллельно из плоскости I в плоскость II . Получаем в плоскости II неуравновешенную силу G и пару сил $G \cdot a$, стремящуюся повернуть вращающуюся систему относительно точки O . Для уравнивания силы G в плоскости II помещаем вес $G' = G$ на расстоянии, равном также a , но направленный в сторону, противоположную неуравновешенной силе G .

Для уравнивания пары сил $G \cdot a$ создаем пару сил, действующую в противоположную сторону, для чего помещаем в плоскости III массу груза весом G'' и в плоскости II также массу груза весом G'' такой величины, чтобы $G'' \cdot 2S = G \cdot a$, откуда:

$$G'' = G \frac{a}{2S}. \quad (53)$$

Окончательно получили, что для уравнивания силы G , действующей в плоскости I , нужно в плоскости III поместить массу груза весом

$$G'' = G \frac{a}{2S}$$

и в плоскости II надо поместить массу груза весом:

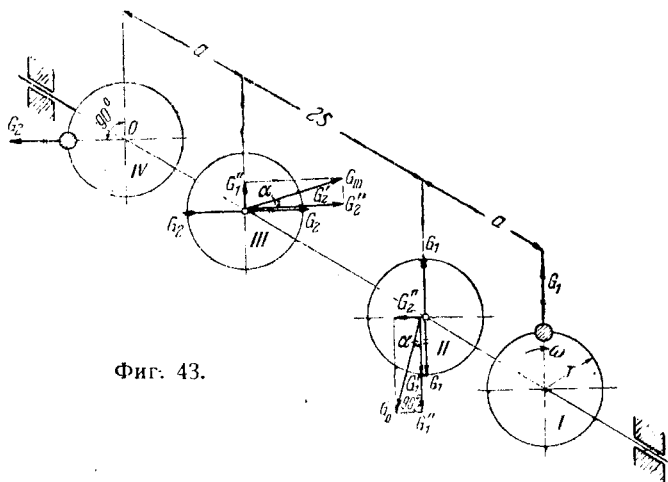
$$G' + G'' = G + G \frac{a}{2S} = G \frac{2S + a}{2S}. \quad (54)$$

Плоскости II и III , в которых мы помещаем противовесы: G'' в плоскости III и $G' + G''$ в плоскости II для уравнивания центробежных сил масс, пропорциональных весам G_1 и G_2 , принято называть плоскостями приведения или плоскостями противовесов.

Пример 5. Если в плоскости I на расстоянии r от оси вращения будет находиться неуравновешенная сила веса G_1 (фиг. 43), а в плоскости IV также на расстоянии r от оси вращения будет находиться неуравновешенная сила веса G_2

под углом 90° по отношению к силе веса G_1 , то эти силы будем уравнивать в плоскости противовесов (пл. II и пл. III) таким порядком.

Прикладываем к оси вращения в плоскости II две равные и противоположно направленные силы G_1 , т. е. обычным приемом переносим в плоскость II параллельно силе G_1 , действующую в плоскости I. От такого переноса силы G_1 по-



Фиг. 43.

лучим в плоскости II неуравновешенную силу G_1 , направленную вверх, и пару сил $G_1 \cdot a$, стремящуюся повернуть вращающуюся систему относительно точки O .

Поступая аналогичным образом с силой веса G_2 , получим в плоскости III неуравновешенную силу G_2 , направленную параллельно силе G_2 , действующей в плоскости IV, и пару сил $G_2 \cdot a$, которая также стремится повернуть систему относительно точки O .

Для уравнивания силы G_1 в плоскости II помещаем вес G_1' , равный G_1 , т. е. $G_1' = G_1$, а для

уравновешивания пары $G_1 \cdot a$ помещаем в плоскости II вес G_1'' и в плоскости III G_1'' такой величины, чтобы $G_1'' \cdot 2S = G_1 \cdot a$.

Отсюда

$$G_1'' = G_1 \frac{a}{2S}.$$

Это же самое значение веса G_1'' мы могли получить по формуле (53).

Для уравновешивания силы G_2 в плоскости III помещаем вес G_2' , равный G_2 , т. е. $G_2' = G_2$, а для уравновешивания пары $G_2 \cdot a$ помещаем в плоскости III вес G_2'' и в плоскости II вес G_2'' , определяемой по формуле (53), т. е. вес

$$G_2'' = G_2 \frac{a}{2S}.$$

В результате всего получили, что для уравновешивания силы веса G_1 , действующей в плоскости I , и силы веса G_2 , действующей в плоскость IV , необходимо в плоскости II на расстоянии r от оси вращения поместить груз G_{II} , определяемый по аналогии с формулой (52):

$$G_{II} = \sqrt{(G_1' + G_1'')^2 + (G_2'')^2}. \quad (55)$$

В плоскости III необходимо также на расстоянии r от оси вращения поместить груз G_{III} , равный:

$$G_{III} = \sqrt{(G_2' + G_2'')^2 + (G_1'')^2}. \quad (56)$$

Если неуравновешенные силы веса G_1 и G_2 равны между собой и равны какому-то весу G , то можно написать следующие равенства:

$$G_1' = G_1 = G_2 = G_2' = G;$$

$$G_1'' = G_1 \frac{a}{2S} = G_2 \frac{a}{2S} = G_2'' = G \frac{a}{2S}.$$

Подставляя эти значения в выражения (55) и (56), получим:

$$G_{II} = \sqrt{\left(G + G \frac{a}{2S}\right)^2 + \left(G \frac{a}{2S}\right)^2}, \quad (55a)$$

$$G_{III} = \sqrt{\left(G + G \frac{a}{2S}\right)^2 + \left(G \frac{a}{2S}\right)^2}. \quad (56a)$$

Мы видим, что в выражениях (55a) и (56a) правые части равны, поэтому и левые части равны,

$$\text{т. е. } G_{II} = G_{III} = G',$$

откуда пишем:

$$G' = \sqrt{\left(G \frac{2S+a}{2S}\right)^2 + \left(G \frac{a}{2S}\right)^2}. \quad (57)$$

Угол α , под которым мы должны в этом случае поместить груз G' в плоскости II, определяем из значения $\operatorname{tg} \alpha$ (фиг. 43), равного:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{G_2''}{G_1' + G_1''} = \frac{G \frac{a}{2S}}{G \frac{2S+a}{2S}} = \frac{a}{2S+a}. \quad (58)$$

Имея значение $\operatorname{tg} \alpha$, по таблице находим угол α .

Таким образом, если равные неуравновешенные силы веса G_1 и G_2 , отстоящие на расстоянии r от оси вращения, находятся за плоскостями противовесов (фиг. 43), то в плоскости II уравновешивающий груз G' помещаем на расстоянии также r от оси вращения под углом α к вертикали влево; в плоскости III уравновешивающий груз G' помещаем также на расстоянии r от оси вращения под углом α к горизонтали вверх.

Пример 6. В плоскости I на расстоянии r от оси вращения находится неуравновешенная сила веса G_1 (фиг. 44), а в плоскости IV также на расстоянии r от оси вращения находится

Для уравнивания силы G_2 в плоскости III на расстоянии r от оси вращения помещаем груз G_2' , равный G_2 , т. е. $G_2' = G_2$.

Для уравнивания пары сил $G_2 \cdot a$ помещаем в плоскости III груз весом G_2'' и в плоскости II груз весом G_2'' , равный по формуле (53):

$$G_2'' = G_2 \frac{a}{2S}.$$

В результате уравнивания сил G_1 и G_2 получили, что в плоскость II на расстоянии r от оси вращения в горизонтальном направлении вправо мы должны поместить груз весом G_2'' и в вертикальном направлении вниз также на расстоянии r от оси вращения мы должны поместить груз, равный:

$$G_1' - G_1'' = G_1 - G_1 \frac{a}{2S} = G_1 \frac{2S - a}{2S}.$$

Эти два груза, расположенные под углом 90° друг по отношению к другу, мы можем по формуле (52) заменить одним грузом G_{II} , расположенным также на расстоянии r от оси вращения:

$$G_{II} = \sqrt{(G_1' - G_1'')^2 + (G_2'')^2}. \quad (59)$$

В плоскость III для уравнивания сил веса G_1 и G_2 мы должны поместить на расстоянии r от оси вращения груз G_1'' , направленный вертикально вниз, и в горизонтальном направлении вправо на расстоянии r от оси вращения должны поместить груз, равный разности:

$$G_2' - G_2'' = G_2 - G_2 \frac{a}{2S} = G_2 \frac{2S - a}{2S}.$$

Эти два груза, расположенные под прямым углом, мы по формуле (52) можем заменить одним грузом G_{III} , расположенным на расстоянии r от оси вращения:

$$G_{III} = \sqrt{(G_2' - G_2'')^2 + (G_1'')^2}. \quad (60)$$

Если неуравновешенные силы веса G_1 и G_2 равны между собой и равны какому-то весу G , то можно написать следующие равенства:

$$G_1' = G_1 = G_2 = G_2' = G;$$

$$G_1'' = G_1 \frac{a}{2S} = G_2 \frac{a}{2S} = G_2'' = G \frac{a}{2S}.$$

Подставляя эти значения в выражения (59) и (60), получим:

$$G_{II} = G_{III} = \sqrt{\left(G \frac{2S-a}{2S}\right)^2 + \left(G \frac{a}{2S}\right)^2} = G',$$

т. е.

$$G' = \sqrt{\left(G \frac{2S-a}{2S}\right)^2 + \left(G \frac{a}{2S}\right)^2}. \quad (61)$$

Угол α , под которым мы должны в этом случае поместить груз G' в плоскости II , определяем из значения $\operatorname{tg} \alpha$, равного:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{G_2''}{G_1' - G_1''} = \frac{G \frac{a}{2S}}{G \frac{2S-a}{2S}} = \frac{a}{2S-a}. \quad (62)$$

Зная значение $\operatorname{tg} \alpha$, по таблице находим угол α .

На фиг. 44 мы видим, что для уравнивания сил веса G_1 и G_2 , действующих в плоскостях, расположенных внутри плоскостей противовесов, в плоскости II уравнивающий груз G' надо поместить под углом α к вертикали уже вправо (в примере 5 помещали влево); в плоскости III груз G' надо поместить под углом α к горизонтали вниз (в примере 5 помещали вверх).

В примерах 4, 5 и 6 обозначали через $2S$ расстояние между плоскостями противовесов, через a — расстояние от центра тяжести неуровновешенного веса G_1 и G_2 до плоскости противовеса.

Разобрав примеры из теории уравнивания вращающейся системы, переходим к уравниванию

ванию центробежных сил неуравновешенных вращающихся масс колес паровоза.

Паровозные скаты представляют ту особенность, что неуравновешенные массы в левом колесе (напр., палец кривошипа, мотыль) смещены по отношению к точно таким же неуравновешенным массам в правом колесе на угол 90° . На практике принято говорить, что кривошип левого колеса отстает от кривошипа правого колеса на угол 90° . Так устанавливаются кривошипы на паровозных скатах для того, чтобы при трогании с места в случае, если одна машина, например правая, находится в мертвом положении, переднем или заднем, другая машина, в данном случае левая, могла бы стронуть паровоз с места. Во время движения механизмы паровозной машины выводятся из мертвых положений благодаря инерции массы паровоза.

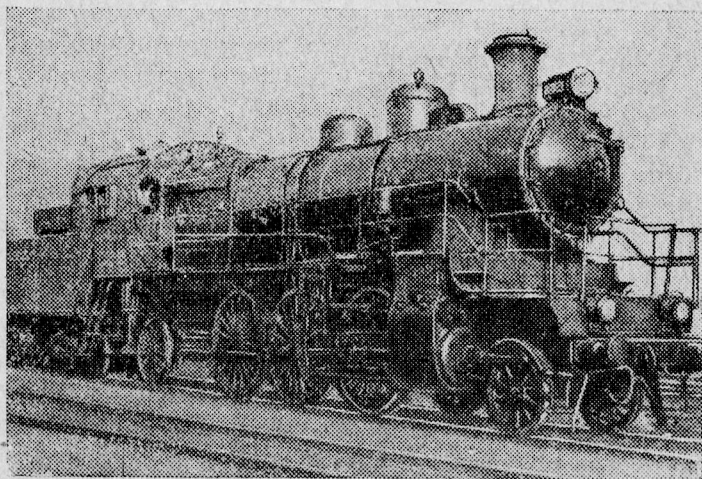
На рассматриваемом нами паровозе серии С^У (фиг. 45) установлены две одинаковые самостоятельные машины простого действия (видим правую машину).

Так как при движении паровоза сцепные дышла правой и левой стороны находятся примерно в одинаковых условиях в смысле передаваемых усилий, то они делаются подобными в конструктивном отношении: вес первого сцепного дышла правой стороны равен весу первого сцепного дышла левой стороны и т. д. Поэтому на палец кривошипа правой и левой стороны в вертикальной плоскости, проходящей через середину головки дышла, приходятся равные нагрузки от веса дышел.

Нужно заметить, что неуравновешенные вращающиеся массы правого и левого колеса по своему действию при вращении подобны неуравновешенным равным между собой грузам G_1 и G_2 в разобранных примерах 5 и 6. Поэтому для уравновешивания центробежных сил неуравновешенных вращающихся масс паровозного ската

мы будем помещать в колесе уравнивающие грузы, определяемые по формулам (57) и (61).

Условимся считать расстояние от центра тяжести неуравновешенного груза до плоскости противовеса положительным расстоянием, если груз находится за плоскостями противовеса (пример 5), т. е. в этом случае a будет иметь знак



Фиг. 45.

плюс; когда же неуравновешенный груз будет находиться внутри плоскостей противовесов (пример 6), то a будет иметь знак минус. Тогда для определения уравнивающего груза G' , который необходимо поместить в колесе, мы будем пользоваться формулами общего вида:

$$G' = \sqrt{\left(G \frac{2S+a}{2S}\right)^2 + \left(G \frac{a}{2S}\right)^2}, \quad (63)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{a}{2S+a}. \quad (64)$$

В выражениях (63) и (64) мы должны уже учитывать знак при a .

Для определения суммарного уравнивающего груза P , который необходимо поместить в правом и левом колесе для уравнивания всех центробежных сил инерции вращающихся неуравновешенных масс ската, составим таблицу 6.

В графе 2 будем записывать наименование неуравновешенной массы.

В гр. 3—вес в кг данной неуравновешенной массы.

В гр. 4—плечо q [мм] центра тяжести данного неуравновешенного груза G от оси вращения колеса.

В гр. 5—неуравновешенный груз G , приведенный к радиусу кривошипа.

Так как мы будем уравнивать грузы G , правой и левой стороны, действующие в вертикальной плоскости, проходящей через центр тяжести данного груза, грузами, помещаемыми в плоскостях противовеса, то необходимо знать расстояние от центра тяжести данного груза G , до плоскости противовеса, т. е. знать значение a [мм]. Если центр тяжести неуравновешенного груза G , правого колеса будет находиться за плоскостью противовеса, то в гр. 6 мы будем ставить, как условились ранее, это расстояние a [мм] со знаком плюс. Если же центр тяжести груза G , будет находиться внутри плоскостей противовесов, то мы будем это расстояние a [мм] в гр. 6 ставить со знаком минус.

Расстояние между плоскостями противовесов или просто между противовесами ($2S$) в паровозных скатах по величине близко к значению расстояния между кругами катания. Каким образом определяется расстояние между противовесами, мы подробно узнаем в отделе „Размещение противовеса в колесе“. В частности для паровоза серии С^У расстояние между противовесами $2S = 1\,590$ мм (расстояние между кругами катания равно 1 580 мм).

Таблица 6

ММ по поряд- ку	Наименование неурав- новешенной массы, относящейся к дан- ному колесу и подле- жащей уравновеши- ванию	Действительн. вес в кг G [кг]	Расстояние от ц. т. до оси вращения e [мм]	Вес, приве- денный на радиусе кривошипа $G_r = G \frac{e}{r}$ [кг]	Расстояние от ц. т. до пло- скости проти- вовеса колеса a [мм]	Значение составляющих уравновешивающ. груза $P = \sqrt{(P')^2 + (P'')^2}$	
						$P' = G_r \frac{2S + a}{2S}$ [кг]	$P'' = G_r \frac{a}{2S}$ [кг]
1	2	3	4	5	6	7	8
1							
2							
n							
						$\Sigma P'$	$\Sigma P''$

В гр. 7 дается значение груза, помещаемого в правом колесе на радиусе кривошипа в плоскости противовеса на вертикальном диаметре внизу, когда кривошип этого колеса будет находиться в верхнем положении. Этот груз определяется из выражения (54):

$$P' = G_r \frac{2S + a}{2S}; \quad (65)$$

здесь:

G_r — груз, действующий на радиусе кривошипа из гр. 5,

$2S$ — расстояние между противовесами в мм,

a — расстояние от центра тяжести груза до плоскости противовеса со знаком плюс или минус; a берется из гр. 6.

В гр. 8 приведены значения груза, который необходимо поместить в правом колесе на радиусе кривошипа в плоскости противовеса на горизонтальном диаметре, когда кривошип этого колеса будет находиться в верхнем положении. Этот груз из формулы (53) равен:

$$P'' = G_r \frac{a}{2S}. \quad (66)$$

В зависимости от знака при a значение P'' может быть или положительным, или отрицательным. Положительное значение P'' будет указывать на то, что центр тяжести неуравновешенного груза G_r находится за плоскостью противовесов, и груз P'' в этом случае надо поместить влево от центра оси, как мы поступали в примере 5 (пл. II). Отрицательное значение P'' из выражения (66) будет указывать на то, что центр тяжести неуравновешенного груза G_r находится между плоскостями противовесов, и груз P'' помещается вправо от центра оси, как в примере 6 (пл. II).

Суммарный противовес P , который необходимо поместить в правом колесе, равен:

$$P = \sqrt{(\Sigma P')^2 + (\Sigma P'')^2}. \quad (67)$$

Знак при $\Sigma P''$ будет указывать на то, в какую сторону от вертикали под углом α (вправо или влево) надо поместить уравнивающий груз P .

При этом:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Sigma P''}{\Sigma P'}. \quad (68)$$

Положительное значение $\Sigma P''$ будет указывать на то, что в правом колесе $\Sigma P''$ направлена по горизонтали влево, и суммарный противовес P , определяемый из выражения (67), надо поместить влево под углом α от вертикали подобно примеру 5.

В левом колесе, следовательно, противовес P надо поместить вправо от горизонтали вверх под тем же углом α .

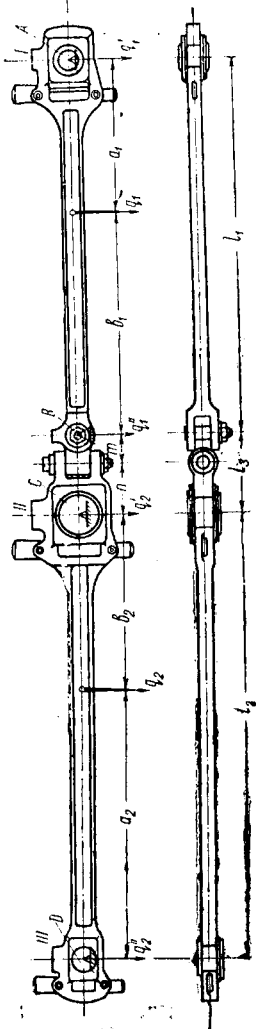
Чтобы можно было приступить к определению уравнивающего груза P , который необходимо поместить в колесе для уравнивания центробежных сил вращающихся неуравновешенных масс колес паровоза серии C^y , узнаем, какая часть веса от сцепных дышел приходится на палец кривошипа каждой оси.

б) Распределение веса от дышел по пальцам паровоза серии C^y

Для определения части веса сцепных дышел, приходящейся на палец кривошипа, необходимо знать: q_1 — вес первого сцепного дышла в кг, q_2 — вес второго сцепного дышла в кг и положение их центра тяжести. На фиг. 46 даны сцепные дышла паровоза C^y .

Наша задача сводится к определению:

1) q_1' — веса, приходящегося на палец 1-й оси от веса q_1 ;

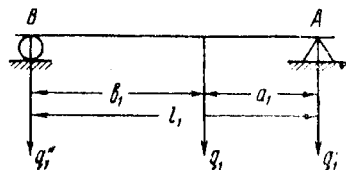


Фиг. 46.

2) q_2' — веса, приходящегося на палец 2-й ведущей оси от веса q_1 и q_2 ;

3) q_2'' — веса, приходящегося на палец 3-й сцепной оси от q_1 и q_2 .

Для определения q_1' считаем, что 1-е сцепное дышло весом q_1 , приложенным в центре тяжести, лежит на двух опорах (фиг. 47): на



Фиг. 47.

опоре А, соответствующей пальцу первой сцепной оси, и на опоре В, соответствующей горизонтальному шарнирному валику. Если мы возьмем сумму моментов всех сил относительно точки В, то можем написать следующее равенство:

$$(\sum_B M = 0).$$

$$q_1' \cdot l_1 = q_1 \cdot b_1,$$

откуда

$$q_1' = q_1 \frac{b_1}{l_1} \text{ [кг]}; \quad (69)$$

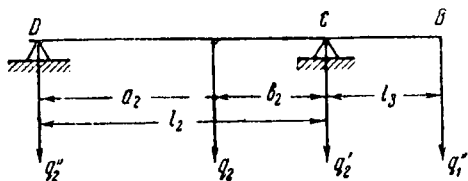
тогда:

$$q_1'' = q_1 - q_1' \text{ [кг]}.$$

Для определения q_2' и q_2'' считаем, что 2-е сцепное дышло лежит на двух опорах C и D (фиг. 48), как балка, на которую действуют две силы q_2 и q_1'' , где:

q_2 — собственный вес 2-го дышла;

q_1'' — часть веса 1-го сцепного дышла, передающаяся на точку B .



Фиг. 48.

Чтобы определить, чему равна сила q_2' , возьмем сумму моментов всех сил относительно точки D (т. е. используем условие $\sum_D M = 0$).

$$q_2' \cdot l_2 = q_1'' \cdot (l_2 + l_3) + q_2 \cdot a_2,$$

откуда:

$$q_2' = \frac{(q_1 - q_1')(l_2 + l_3) + q_2 \cdot a_2}{l_2}. \quad (70)$$

Значение q_2'' найдем как разность весов, т. е.

$$q_2'' = (q_2 + q_1'') - q_2' \text{ [кг]}. \quad (71)$$

Для паровоза C^Y значения q_1' , q_2' и q_2'' , вычисленные по формулам (69), (70) и (71), таковы:

$$q_1' = 68,447 \text{ кг}; \quad q_2' = 181,5 \text{ кг}; \quad q_2'' = 53,10 \text{ кг}.$$

в) Уравновешивание центробежных сил вращающихся неуравновешенных масс первого ската паровоза серии C^Y

Для определения уравновешивающего груза P , который необходимо поместить в колесе на радиусе кривошипа в плоскости противовеса, составим табл. 7. Действительный вес неуравновешенных масс G и расстояния их от центра тяже-

№№ по поряд- ку	Наименование неурав- новешенной массы, относящейся к дан- ному колесу и подле- жащей уравниванию	Действительн. вес в кг G [кг]	Расстояние от ц. т. до оси вращения e [мм]	Вес, приведен- ный на радиусе кривошипа $G_r = G \frac{e}{r}$ кг	Расстояние от ц. т. до пло- скости проти- возеса колеса a [мм]	Значение составляющих уравновешивающ. груза $P = \sqrt{(P')^2 + (P'')^2}$	
						$P' = G_r \frac{2S + a}{2S}$ [кг]	$P'' = G_r \frac{a}{2S}$ [кг]
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Часть сцепного пальца	10,08	350	10,08	170,2	11,159	1,079
2	Мотыль	57,034	329,6	53,71	21,2	54,424	0,714
3	Часть сцепного дышла q^1_1 . .	68,447	350	68,447	165	75,545	7,098
						$\Sigma P' =$ $= 141,128$	$\Sigma P'' = 8,891$

Примечания: 1) Запрессованная часть пальца учитывается вместе с мотылем.

2) Спицы считаем уравновешенными.

сти до оси вращения o и до плоскости противовесов a возьмем из пояснительной записки „Расчет противовесов паровоза серии $C^y-1-3-1$ переделки 1932 г.“ (Коломзавод).

По формуле (67) имеем:

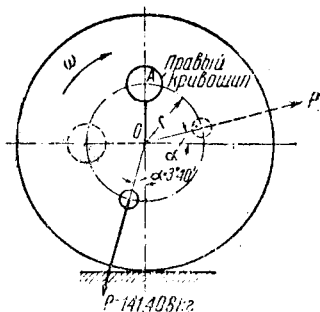
$$P = \sqrt{(\Sigma P')^2 + (\Sigma P'')^2} = \sqrt{141,128^2 + 8,891^2} = 141,408 \text{ кг},$$

при чем:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Sigma P''}{\Sigma P'} = \frac{8,891}{141,128} = 0,063.$$

По таблице тригонометрических величин определяем угол α , который равен: $\alpha = 3^\circ 40'$.

Итак, для уравнивания центробежных сил вращающихся неуравновешенных масс 1-го ската мы должны в правом колесе на радиусе кривошипа в плоскости противовесов поместить уравнивающий груз $P = 141,408 \text{ кг}$ под углом $\alpha = 3^\circ 40'$ к вертикали влево (фиг. 49) ($\Sigma P''$ имеет положительное значение).



Фиг. 49.

В левом колесе мы должны поместить на радиусе кривошипа в плоскости противовесов уравнивающий груз также P (на фиг. 49 показан пунктиром) под углом α к горизонтали вверх.

г) Уравнивание центробежных сил вращающихся неуравновешенных масс третьего ската паровоза серии C^y

Для определения уравнивающего груза P , который необходимо поместить в колесе, поступим так же, как и в предыдущем случае, составим табл. 8.

Таблица 8

№№ по по- рядку	Наименование неурав- новешенной массы, относящейся к дан- ному колесу и подле- жащей уравниванию	Действитель- ный вес в кг G [кг]	Расстояние от ц. т. до оси вращения ρ [мм]	Вес, приведен- ный на ради- усе кривошипа $G_r = G \frac{\rho}{r}$ [кг]	Расстояние от ц. т. до пло- скости проти- вовеса колеса a [мм]	Значение составляющих уравнивающих груза $P = \sqrt{(P')^2 + (P'')^2}$ $P' = G_r \frac{2S + a}{2S}$ [кг] $P'' = G_r \frac{a}{2S}$ [кг]	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Часть сцепного пальца	12,925	350	12,925	191,3	14,430	1,555
2	Мотыль	58,418	330	55,08	21,4	55,818	0,733
3	Часть сцепного дышла q''_2 . .	53,10	350	53,10	165,0	58,606	5,506
						$\Sigma P' = 128,904$	$\Sigma P'' = 7,799$

Определяем P по формуле (67):

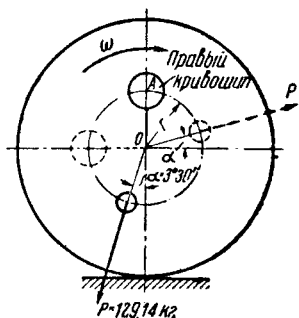
$$P = \sqrt{(\Sigma P')^2 + (\Sigma P'')^2} = \sqrt{128,904^2 + 7,799^2} = 129,14 \text{ кг.}$$

Определяем α по формуле (68):

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Sigma P''}{\Sigma P'} = \frac{7,799}{128,904} \doteq 0,0605; \quad \alpha = 3^\circ 30'.$$

Итак, для уравнивания центробежных сил вращающихся неуравновешенных масс 3-го ската мы должны в правом колесе на радиусе кривошипа в плоскости противовеса поместить уравнивающий груз $P = 129,14 \text{ кг}$ под углом $\alpha = 3^\circ 30'$ к вертикали влево (фиг. 50) ($\Sigma P''$ — опять имеет положительное значение).

В левом колесе мы должны поместить на радиусе кривошипа в плоскости противовеса уравнивающий груз также P (показан пунктиром) под углом α к горизонтали вверх.



Фиг. 50.

д) Уравнивание центробежных сил вращающихся неуравновешенных масс второго ската (ведущего) паровоза серии СУ

Составим табл. 9 для определения уравнивающего груза P , который необходимо поместить в ведущем колесе на радиусе кривошипа в плоскости противовеса для уравнивания центробежных сил от неуравновешенных вращающихся масс. (Уравнивание центробежных сил контр-кривошипа будет рассмотрено особо).

По формуле (67)

$$P = \sqrt{(\Sigma P')^2 + (\Sigma P'')^2} = \sqrt{407,690^2 + 31,590^2} = 408,912 \text{ кг.}$$

Таблица 9

№№ по по- рядку	Наименование неурав- новешенной массы, относящейся к дан- ному колесу и под- лежащей уравнива- нию	Действитель- ный вес в кг G	Расстояние от ц. т. до оси вращения q	Вес, приведен- ный на ради- ус кривошипа $G_r = G \frac{q}{r}$	Расстояние от ц. т. до плос- кости прогиво- веса колеса a	Значение составляющих уравновешивающего груза $P = \sqrt{(P')^2 + (P'')^2}$	
						$P' = G_r \frac{2S + a}{2S}$	$P'' = G_r \frac{a}{2S}$
		[кг]	[мм]	[кг]	[мм]	[кг]	[кг]
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Часть ведущего пальца	65,79	350	65,79	275,9	77,205	11,415
2	Мотыль	120	375,7	128,81	16,7	130,163	1,353
3	Часть веса от цепных дышел q_2	181,5	350	181,5	165	200,322	18,822
						$\Sigma P' = 407,690$	$\Sigma P'' = 31,590$

По формуле (68)

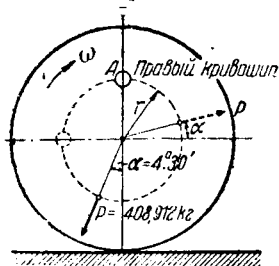
$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Sigma P''}{\Sigma P'} = \frac{31,590}{407,690} = 0,0775; \quad \alpha = 4^{\circ}30'.$$

На фиг. 51 показано как мы должны поместить уравнивающий груз P в правом и левом колесе.

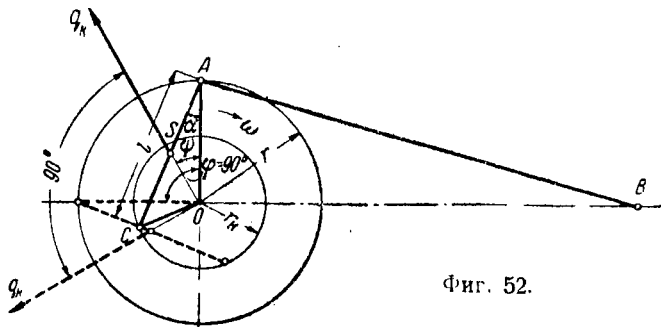
е) Уравнивание центробежной силы контр-кривошипа

На паровозах старых серий (ОВ, ЭУ и даже СУ первого выпуска) контр-кривошипы откованы вместе с ведущим пальцем из одной общей заготовки.

В последнее время контр-кривошипы делаются разъемными, т. е. изготавливаются отдельно от пальца и затем при помощи болтов крепятся на шейке ведущего пальца. На свободный конец контр-кривошипа (к, фиг. 1.) надевается и закреп-



Фиг. 51.



Фиг. 52.

ляется задняя головка эксцентриковой тяги, передний конец которой крепится к кулисе л.

На фиг. 52 контр-кривошип схематически представлен отрезком $AC = l$.

Центр разъемной части контр-кривошипа А при вращении колеса описывает окружность радиуса кривошипа $r = \overline{OA}$.

Центр другого конца контр-кривошипа С при вращении колеса описывает окружность радиуса контр-кривошипа $r_k = \overline{OC}$.

Расстояние \overline{AC} называется длиной контр-кривошипа и обозначается l .

Предположим, что центр тяжести контр-кривошипа находится в точке S, и расстояние \overline{AS} нам известно.

Зная вес контр-кривошипа q_k (кг), мы можем определить его массу. Для определения центробежной силы контр-кривошипа необходимо, кроме его массы, знать нормальное ускорение центра тяжести j_s^n , определяемое по формуле (8):

$$j_s^n = \omega^2 \rho = \omega^2 \cdot OS$$

Определим расстояние OS .

Угол α может быть замерен просто транспортиром, если фиг. 52 вычерчена в определенном масштабе.

Аналитически угол α может быть определен из формулы косоугольных треугольников:

$$\cos \alpha = \frac{b^2 + c^2 - a^2}{2bc}$$

Фиг. 53.

(фиг. 53), когда все три стороны треугольника известны.

Для нашего случая эта формула примет вид.

$$\cos \alpha = \frac{r^2 + l^2 - r_k^2}{2rl} \quad (72)$$

Зная $\cos \alpha$, можем из \triangle -ка ASO определить значение OS :

$$OS = \sqrt{\overline{AS}^2 + \overline{OA}^2 - 2 \cdot \overline{AS} \cdot \overline{OA} \cdot \cos \alpha}$$

Для паровоза серии С^у имеем следующие данные:

$$\begin{aligned} r &= 350 \text{ мм}, & AS &= 135,7 \text{ мм}, \\ r_k &= 150 \text{ мм}, & q_k &= 35,014 \text{ кг}, \\ l &= 405,3 \text{ мм}. \end{aligned}$$

По формуле (72) определяем значение $\cos \alpha$:

$$\cos \alpha = \frac{r^2 + l^2 - r_k^2}{2rl} = \frac{350^2 + 405,3^2 - 150^2}{2 \cdot 350 \cdot 405,3} = 0,93147.$$

Получив значение $\cos \alpha$, определяем значение OS :

$$\begin{aligned} \overline{OS} &= \sqrt{AS^2 + OA^2 - 2 \cdot AS \cdot OA \cos \alpha} = \\ &= \sqrt{135,7^2 + 350^2 - 2 \cdot 135,7 \cdot 350 \cdot 0,93147} = 229 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Итак, мы нашли, что центр тяжести правого контр-кривошипа паровоза С^у при вращении колеса будет описывать окружность радиуса $\overline{OS} = 229 \text{ мм}$. Центр тяжести левого контр-кривошипа также будет описывать окружность радиуса $OS = 229 \text{ мм}$, но центробежная сила, направленная по радиусу OS от центра, будет отставать от центробежной силы правого контр-кривошипа на угол 90° . На фиг. 52 направление центробежной силы левого контр-кривошипа дано пунктиром. Из этой же фигуры мы видим, что центробежная сила контр-кривошипа правого колеса образует угол ψ с радиусом кривошипа OA этого же колеса. Из Δ -ка OSA , зная все его три стороны, можем определить угол ψ из значения $\cos \psi$, определяемого по аналогии с выражением (72):

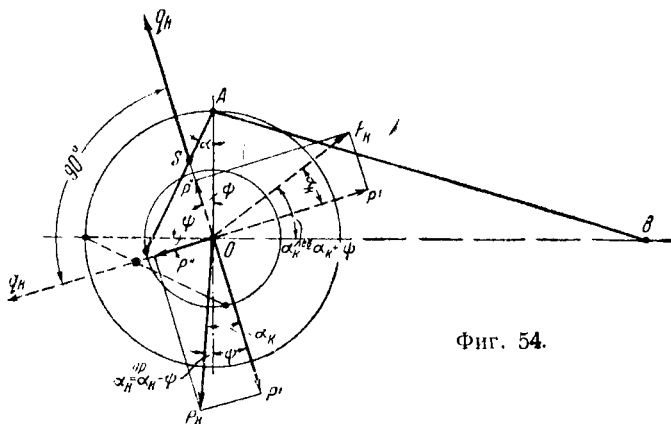
$$\begin{aligned} \cos \psi &= \frac{OA^2 + OS^2 - \overline{AS}^2}{2 \cdot OA \cdot OS} = \frac{350^2 + 229^2 - 135,7^2}{2 \cdot 350 \cdot 229} = \\ &= 0,97645. \end{aligned}$$

Зная $\cos \psi$, по таблице тригонометрических величин находим значение угла ψ ; $\psi = 12^\circ 30'$.

Уравновешивание центробежных сил контр-кривошипов будем производить обычным порядком, т. е. составляем табл. 10.

В гр. 5 этой таблицы мы определяем вес контр-кривошипа q_r , приведенный к радиусу кривошипа.

Поставив в гр. 6 значение a —расстояние от центра тяжести контр-кривошипа до плоскости противовесов, мы в гр. 7 и 8 определяем P' и P'' —составляющие уравновешивающего груза P ,



Фиг. 54.

помещаемого в колесе. Этот уравновешивающий груз P находим по формуле (67):

$$P_k = \sqrt{(P')^2 + (P'')^2} = \sqrt{29,855^2 + 6,955^2} = 30,65 \text{ кг.}$$

Угол α_k (фиг. 54), под которым мы должны поместить уравновешивающий груз P_k , найдем из значения $\text{tg } \alpha_k$:

$$\text{tg } \alpha_k = \frac{P''}{P'} = \frac{6,955}{29,855} = 0,23295.$$

По таблице находим значение α_k :

$$\alpha_k = 13^\circ 10'.$$

На фиг. 54 мы видим, что для уравновешивания центробежных сил контр-кривошипов в правом ведущем колесе паровоза C^y мы должны

Таблица 10

№№ по по- рядку	Наименование неурав- новешенной массы, относящейся к дан- ному колесу и подле- жащей уравнива- нию	Действитель- ный вес в кг G	Расстояние от ц. т. до оси вращения e	Вес, приведен- ный на ради- усе кривошипа $G_r = G \frac{e}{r}$	Расстояние от ц. т. до пло- скости проти- вовеса колеса a	Значение составляющих уравновешивающ. груза $P = \sqrt{(P')^2 + (P'')^2}$	
						$P' = G_r \frac{2S + a}{2S}$	$P'' = G_r \frac{a}{2S}$
1	2	3 [кг]	4 [мм]	5 [кг]	6 [мм]	7 [кг]	8 [кг]
1	Контр-кривошип	35,014	229	22,9	482,9	29,855	6,955

поместить на радиусе кривошипа уравнивающего груз $P_k = 30,65 \text{ кг}$ от вертикали вниз под углом $\alpha_k^{up} = \alpha_k - \psi = 0^\circ 40'$. В левом колесе мы должны поместить уравнивающий груз $P_k = 30,65 \text{ кг}$ от горизонтали вверх под углом:

$$\alpha_k^{lev} = \alpha_k + \psi = 25^\circ 40'.$$

Прежде чем перейти к определению суммарного противовеса, который необходимо поместить в ведущем колесе, надо знать, какой груз еще мы должны поместить в этом же колесе для уравнивания силы Y и X , действующих на ведущем пальце в плоскости шатуна. (На практике уравнивают еще часть центробежных сил от эксцентриковой тяги).

§ 2. Уравнивание силы Y

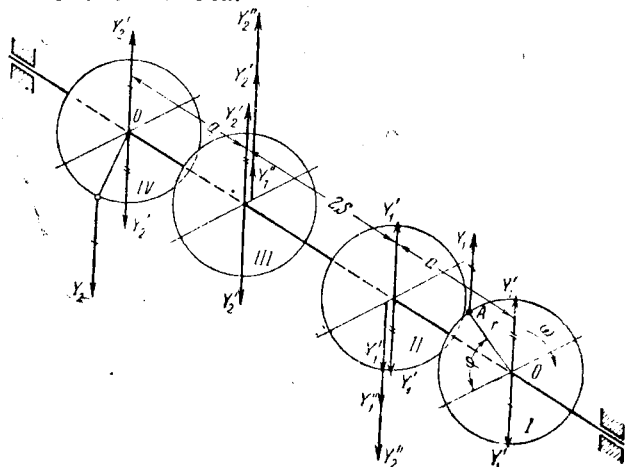
а) Формулы для уравнивания силы Y

В параграфе 4 гл. II мы разобрали влияние изменяющейся по величине и направлению действия за оборот колеса силы Y (фиг. 34), т. е. влияние вертикальной составляющей от внешних сил и сил инерции шатуна и поступательно-движущихся масс механизма на путь и на паровоз.

Сила Y , как мы это уже выяснили ранее, действует в плоскости шатуна; уравнивающий же груз мы можем поместить в другой плоскости—плоскости противовеса, т. е. в той же плоскости, где мы расположили уже грузы P , для уравнивания центробежных сил вращающихся неуравновешенных частей паровозной машины.

Чтобы знать, какой величины уравнивающий груз необходимо поместить в колесе для уравнивания силы Y , действующей на правом и левом пальце ведущей оси паровоза, разберем следующий пример.

Условимся считать, что плоскость *I* (фиг. 55) соответствует плоскости правого шатуна, в которой действует на ведущем пальце сила Y_1 . Плоскость *IV* соответствует плоскости левого шатуна—плоскости действия силы Y_2 на ведущем пальце левого кривошипа. Плоскость *II* соответствует плоскости противовеса правого колеса. Плоскость *III* соответствует плоскости противовеса левого колеса.



Фиг. 55.

Приложим в центре вращения плоскости *I* две равные и противоположно направленные силы Y_1' , равные Y_1 , т. е. $Y_1' = Y_1$. В результате этого мы получили в плоскости *I* пару сил с моментом $M_1 = Y_1 \cdot r \cos \varphi$, действующую скручивающим образом на ось ската, и силу Y_1' , приложенную в центре вращения плоскости *I*. Эта сила Y_1' , направленная от центра, по своему действию может рассматриваться как центробежная сила.

Аналогичным образом поступим и с силой Y_2 , что даст нам в плоскости *IV* скручивающий ось момент M_2 от силы Y_2 и силу Y_2' , направленную

от центра плоскости IV вниз, имеющую также характер центробежной силы.

Для уравнивания силы Y_1' , действующей в плоскости I , поступаем следующим порядком. Прикладываем в плоскости II две равные и противоположно направленные силы Y_1' . Одна из этих двух сил с силой Y_1' , действующей в плоскости I , образует пару, момент которой будет равен: $M = Y_1' \cdot a$. Другая же сила Y_1' , действующая в плоскости II и направленная вверх, будет уменьшать давление правого колеса на рельс.

Точно таким же образом, перенося силу Y_2 , действующую в плоскости IV , параллельно в плоскость III , получим в плоскости III силу $Y_2' = Y_2'$, приложенную в центре плоскости III и направленную вниз, и пару сил $M = Y_2' \cdot a$.

Для уравнивания силы Y_1' , действующей в плоскости II , помещаем в этой же плоскости силу, равную Y_1' и имеющую противоположное направление. Пару сил $M = Y_1' \cdot a$ уравниваем также парой, для чего в плоскости II и в плоскости III помещаем груз Y_1'' , определяемый из условия;

$$Y_1'' \cdot 2S = Y_1' \cdot a,$$

откуда

$$Y_1'' = Y_1' \cdot \frac{a}{2S} = Y_1' \frac{a}{2S}.$$

Для уравнивания силы Y_2' , действующей в плоскости III , помещаем в этой же плоскости силу Y_2' в диаметрально противоположном направлении (т. е. вверх). Для уравнивания пары сил $M = Y_2' \cdot a$ помещаем в плоскости III и в плоскости II груз Y_2'' , определяемый также из условия:

$$Y_2'' \cdot 2S = Y_2' \cdot a,$$

т. е.

$$Y_2'' = Y_2' \cdot \frac{a}{2S} = Y_2' \frac{a}{2S}.$$

Итак, подводя итог, мы можем сказать, что для уравнивания силы Y_1 , действующей в плоскости I , и силы Y_2 , действующей в плоскости IV , нужно в плоскости II иметь силу Y_φ^{Π} , равную:

$$Y_\varphi^{\Pi} = Y_1' + Y_1'' + Y_2''. \quad (73)$$

В плоскости III нужно иметь силу:

$$Y_\varphi^{\Pi} = Y_2' + Y_1'' + Y_2''. \quad (74)$$

Воспользовавшись фиг. 55, можем преобразовать выражение (73) следующим образом.

$$Y_1' = -Y_1; \quad Y_1'' = -Y_1 \frac{a}{2S}; \quad Y_2'' = Y_2 \frac{a}{2S};$$

поэтому:

$$\begin{aligned} Y_\varphi^{\Pi} &= -Y_1 - Y_1 \frac{a}{2S} + Y_2 \frac{a}{2S} = \\ &= -\left[Y_1 + (Y_1 - Y_2) \frac{a}{2S} \right]. \end{aligned} \quad (73a)$$

Преобразуем выражение (74).

$$Y_2' = -Y_2; \quad Y_2'' = -Y_2 \frac{a}{2S}; \quad Y_1'' = Y_1 \frac{a}{2S};$$

поэтому напомним:

$$\begin{aligned} Y_\varphi^{\Pi} &= -Y_2 + Y_1 \frac{a}{2S} - Y_2 \frac{a}{2S} = \\ &= -\left[Y_2 - (Y_1 - Y_2) \frac{a}{2S} \right]. \end{aligned} \quad (74a)$$

Значение силы Y_1 при данном положении кривошипа (фиг. 55) есть не что иное, как значение силы Y_φ , определяемой по выражению (40), изменение которой за оборот колеса для паровоза C^y при $v = 100$ км/час подсчитано в гр. (13) табл. 5.

Имея в виду, что левый кривошип отстает от правого на угол 90° и что W_p и W_κ левой стороны равны W_κ и W_p правой стороны, можем сказать, что Y_2 при повороте правого кривошипа

от массы m_g груза q_g , специально помещенного в колесе. Груз q_g называется вертикально-уравновешивающим противовесом.

Если обозначим угол между радиусом правого кривошипа $r = \overline{OA}$ и направлением центробежной силы $P_g = -\frac{q_g}{g}\omega^2 r$ через γ , то вертикальная составляющая этой центробежной силы q_y^{Π} будет равна:

$$\begin{aligned} q_y^{\Pi} &= -P_g \cos[270^\circ - (\varphi + \gamma)] = P_g \sin(\varphi + \gamma) = \\ &= \frac{q_g}{g} \omega^2 r \sin(\varphi + \gamma), \text{ т. е.} \\ q_y^{\Pi} &= \frac{q_g}{g} \omega^2 r \sin(\varphi + \gamma). \end{aligned} \quad (76)$$

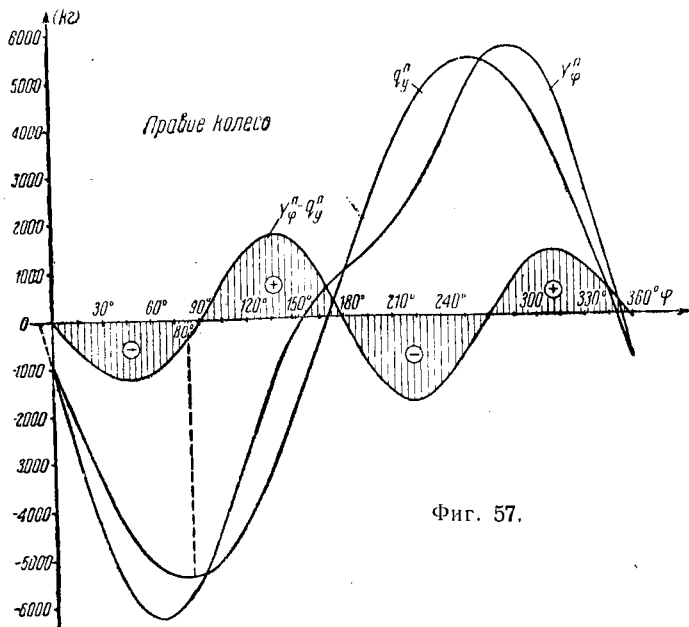
Теперь мы можем сделать такое заключение, что наша задача при уравнивании силы Y , действующей на правом ведущем пальце и на левом, сводится к тому, чтобы выбрать вертикально-уравновешивающий противовес q_g такой величины и под таким углом γ расположить его в колесе, чтобы кривая изменения силы q_y^{Π} в правом колесе была тождественна, или, по крайней мере, близка к изменению уравнивающей силы Y_{φ}^{Π} при изменении угла φ от 0 до 360° . Такой же величины вертикально уравнивающий противовес q_g мы должны поместить в плоскости противовеса левого колеса.

б) Уравнивание силы Y паровоза серии С^У

В гр. 13 табл. 5 для паровоза С^У нами были подсчитаны значения силы Y при изменении угла φ от 0 до 360° через каждые 15° . Воспользовавшись выведенными формулами (73б) и (74б), определим значения сил Y_{φ}^{Π} и Y_{φ}^{Π} при изменении угла φ также через 15° за полный оборот колеса. Вычисление сил Y_{φ}^{Π} и Y_{φ}^{Π} сведем в табл. 11. Для паровоза С^У постоянные величины, входящие

в выражение (736) и (746), таковы: $a = 345$ мм;
 $2S = 1590$ мм; $\frac{a}{2S} = 0,217$.

Чтобы иметь наглядное представление об изменении уравнивающей силы Y_{φ}^{Π} за оборот колеса, по значениям гр. 6 табл. 11 в масштабе 1 мм — 50 кг представим изменение этой силы Y_{φ}^{Π} в виде кривой (фиг. 57). Мы видим на фиг. 57,



Фиг. 57.

что характер изменения силы Y_{φ}^{Π} похож на синусоиду.

В начале этого параграфа мы говорили, что уравнивающую силу Y_{φ}^{Π} можем (см. выражение 76) получить за счет вертикальной составляющей центробежной силы вертикально уравнивающего противовеса.

Это выражение (76) показывает, что q_y^{Π} за оборот колеса будет изменяться по синусоиде и что, следовательно, полного вертикального равновесия паровоза получить нам не удастся. Лучшее, что мы можем сделать, это то, чтобы разность ординат $Y_{\varphi}^{\Pi} - q_y^{\Pi}$ получить как можно меньше.

Это обстоятельство заставляет нас особенно внимательно относиться к выбору веса q_e и к нахождению наивыгоднейшего угла γ .

Отрицательное максимальное значение вертикальная составляющая q_y^{Π} получит, как это видно из выражения (76), при $\sin(\varphi + \gamma) = -1$, а это соответствует углу $\varphi + \gamma = 270^\circ$. (77).

При определенно выбранном весе q_e величина $\frac{q_e}{g} \omega^2 r$ — постоянная и q_y^{Π} за оборот колеса будет изменяться лишь в зависимости от изменения $\sin(\varphi + \gamma)$.

Для ориентировочного определения величины q_e поступим следующим образом. Будем считать, что максимальное значение $\frac{q_e}{g} \omega^2 r$ равно величине $|Y_{\varphi}^{\Pi}|$ при $\varphi = 90^\circ$. Для нашего случая:

$$\frac{q_e}{g} \omega^2 r = |Y_{\varphi=90^\circ}^{\Pi}| = 5416 \text{ кг.}$$

Если мы хотим получить изменение q_y^{Π} в том же масштабе, что и изменение силы Y_{φ}^{Π} , т. е. 1 мм — 50 кг, то для этого надо знать наибольшую ординату $q_y^{\Pi} = \frac{5416}{50} = 108,32$ мм. Умножая эту максимальную ординату на значения синуса угла от 0 до 360° через каждые 10° или 15° , мы получим синусоиду q_y^{Π} . Эту синусоиду q_y^{Π} лучше строить сразу на восковке (на прозрачной бумаге) для того, чтобы ее можно было наложить на кривую уравнивающей силы Y_{φ}^{Π} (фиг. 57) так,

чтобы получить наименьшую разность ординат $Y_{\varphi}^{II} - q_y^{II}$. Угол φ , при котором наложенная синусоида имеет максимальное отрицательное значение, должен быть подставлен в выражение (77) для определения угла γ .

Если мы для паровоза серии С^У оставим наибольшее значение для $\frac{q_s}{g} \omega^2 r$, равное $Y_{\varphi=90^\circ}^{II} = 5416 \text{ кг}$, то вертикально уравнивающий противовес q_s должны взять:

$$q_s = \frac{Y_{\varphi=90^\circ}^{II} \cdot g}{\omega^2 r} = \frac{5416 \cdot 9,81}{315,63} = 168,31 \text{ кг}.$$

(Значение $\omega^2 r = 315,63 \text{ м/сек}^2$ при $v = 100 \text{ км/час}$ взято из табл. 4.)

Максимальная ордината синусоиды q_y^{II} будет равна: $\frac{5416}{50} = 108,32 \text{ мм}$. (Мы эту ординату уже определяли выше.)

Построив на восковке синусоиду q_y^{II} и наложив ее на кривую силы Y_{φ}^{II} (фиг. 57) так, чтобы иметь наименьшее значение разности ординат $Y_{\varphi}^{II} - q_y^{II}$ (определяем это условие внимательным просмотром совмещенных двух кривых Y_{φ}^{II} и q_y^{II}), получим, что наложенная синусоида q_y^{II} имеет максимальное отрицательное значение при угле φ , равном 80° .

Подставив найденное значение угла φ в выражение (77), определяем угол γ , под которым должны поместить в правом колесе вертикально уравнивающий противовес $q_s = 168,31 \text{ кг}$.

$$\gamma + 80^\circ = 270^\circ, \text{ откуда } \gamma = 190^\circ.$$

Итак, для уравнивания силы Y , действующей в плоскости правого и левого шатуна, мы в правом колесе в плоскости противовеса должны

поместить под углом $\gamma = 190^\circ$ вертикально уравновешивающий противовес $q_0 = 168,31$ кг.

Чтобы определить разность ординат $Y_\varphi^\Pi - q_y^\Pi$, в табл. 11 заполняем гр. 8 значений:

$$q_y^\Pi = \frac{q_0}{g} \omega^2 r \sin(\varphi + \gamma) = 5416 \sin(\varphi + 190^\circ)$$

и гр. 9 значений разности ординат: $Y_\varphi^\Pi - q_y^\Pi$.

Таким образом для каждого угла φ разность значений $Y_\varphi^\Pi - q_y^\Pi$ можем определить аналитически.

Из фиг. 57 можем определить эту же разность значений $Y_\varphi^\Pi - q_y^\Pi$ графически таким порядком: замеряем разность ординат $Y_\varphi^\Pi - q_y^\Pi$ и умножим ее на масштаб сил (1 мм — 50 кг). Полученные произведения для соответствующего угла φ заносим в гр. 9.

Мы в гр. 9 табл. 11 будем подставлять значения разности сил Y_φ^Π и q_y^Π , вычисленные аналитически.

Воспользовавшись цифрами гр. 9 табл. 11, построим кривую разности сил $Y_\varphi^\Pi - q_y^\Pi$ на той же фиг. 57.

Отрицательное значение разности сил $Y_\varphi^\Pi - q_y^\Pi$ (направление ординат вниз от оси $O\varphi$) показывает, что рельс испытывает от колеса меньшее давление от силы q_y^Π , чем надо для полного уравновешивания силы Y правой и левой стороны (разгруз).

Положительное значение $Y_\varphi^\Pi - q_y^\Pi$ (направление ординат от оси $O\varphi$ вверх) показывает, что при таких углах поворота кривошипа рельс испытывает от колеса увеличенное давление (перегруз).

В нашем случае наибольший разгруз правого колеса при $\varphi = 225^\circ$ достигает значения $Y_\varphi^\Pi - q_y^\Pi = 1813$ кг.

Наибольший перегруз имеем при $\varphi = 135^\circ$ $Y_\varphi^\Pi - q_y^\Pi = 1740$ кг.

φ	Y_{φ}	$Y_{\varphi+270^\circ}$	$Y_{\varphi} - Y_{\varphi+270^\circ}$	$(Y_{\varphi} - Y_{\varphi+270^\circ}) \frac{a}{2S}$	$Y_{\varphi}^{\text{II}} = - \left[Y_{\varphi} + (Y_{\varphi+270^\circ}) \frac{a}{2S} \right]$	$Y_{\varphi}^{\text{II}} = - \left[Y_{\varphi+270^\circ} - (Y_{\varphi} - Y_{\varphi+270^\circ}) \frac{a}{2S} \right]$
(°)	(кг)	(кг)	(кг)	(кг)	(кг)	(кг)
1	2	3	4	5	6	7
0	0	-4 450	4 450	966	- 966	5 415
15	1 525	-4 730	6 255	1 357	-2 882	6 087
30	2 877	-4 622	7 500	1 627	-4 505	6 250
45	3 958	-3 958	7 915	1 718	-5 675	5 675
60	4 622	-2 877	7 500	1 627	-6 250	4 505
75	4 730	-1 525	6 255	1 357	-6 087	2 882
90	4 450	0	4 450	966	-5 415	966
105	3 664	1 525	2 139	464	-4 128	-1 060
120	2 778	2 877	- 100	- 22	-2 756	-2 899
135	1 828	3 958	-2 129	-1 62	-1 366	-4 420
150	1 041	4 622	-3 581	-777	- 264	-5 399
165	466	4 730	-4 264	-925	460	-5 655
180	0	4 450	-4 450	-966	966	-5 415
195	- 466	3 664	-4 130	-896	1 362	-4 560
210	-1 041	2 778	-3 819	-829	1 870	-3 807
225	-1 828	1 828	-3 657	-793	2 622	-2 622
240	-2 778	1 041	-3 819	-829	3 607	-1 871
255	-3 664	466	-4 130	-896	4 560	-1 362
270	-4 450	0	-4 450	-966	5 415	- 966
285	-4 730	- 466	-4 264	-925	5 655	- 460
300	-4 622	-1 041	-3 581	-777	5 399	264
315	-3 958	-1 828	-2 129	-462	4 420	1 366
330	-2 877	-2 778	- 100	- 22	2 899	2 756
345	-1 525	-3 664	2 139	464	1 060	4 128
360	0	-4 450	4 450	966	- 962	5 415

$q_{\text{II}}^{\text{II}} = 5 416 \sin (190^\circ + \varphi)$	$Y_{\varphi}^{\text{II}} - q_{\text{II}}^{\text{II}}$	$q_{\text{II}}^{\text{II}} = 5 416 \cdot \cos (\varphi - 10^\circ)$	$Y_{\varphi}^{\text{II}} - q_{\text{II}}^{\text{II}}$	$q_{\text{II}}^{\text{II}} = 5 416 \cos (190^\circ + \varphi)$	$q_{\text{II}}^{\text{II}} = 5 416 \sin (\varphi - 10^\circ)$
(кг)	(кг)	(кг)	(кг)	(кг)	(кг)
8	9	10	11	12	13
- 9 0	- 26	5 333	82	5 333	-910
-2 269	- 593	5 394	693	4 908	472
-3 461	-1 021	5 088	1 162	4 148	1 852
-4 435	-1 210	4 435	1 240	3 106	3 106
-5 088	-1 163	3 481	1 024	1 852	4 148
-5 394	- 693	2 289	593	472	4 908
-5 333	- 82	940	26	- 910	5 333
-1 906	780	- 472	- 588	-2 289	5 394
-4 14	1 392	-1 852	-1 047	-3 481	5 088
-3 106	1 740	-3 106	-1 311	-4 435	4 435
-1 852	1 588	-4 148	-1 251	-5 088	3 481
- 47	932	-4 908	- 747	-5 394	2 289
940	26	-5 333	- 82	-5 333	940
2 289	- 927	-5 394	834	-4 908	- 472
3 481	-1 611	-5 088	1 481	-4 148	-1 852
4 435	-1 813	-4 435	1 813	-3 106	-3 106
5 088	-1 481	-3 481	1 611	-1 852	-4 148
5 394	- 834	-2 289	927	- 472	-4 908
5 333	82	- 910	- 26	940	-5 333
4 906	747	472	- 932	2 289	-5 394
4 14	1 251	1 852	-1 588	3 481	-5 088
3 106	1 311	3 106	-1 740	4 435	-1 435
1 852	1 047	4 148	-1 312	5 088	-3 481
42	588	4 908	- 780	5 394	-2 289
-90	-26	5 333	82	5 333	- 940

Отношение наибольшего перегруза ($Y_{\varphi}^{\Pi} - q_y^{\Pi}$) к статической нагрузке¹ колеса Π называется коэффициентом перегруза и обозначается α , т. е.

$$\alpha = \frac{|Y_{\varphi}^{\Pi} - q_y^{\Pi}|}{\Pi}. \quad (78)$$

Коэффициент перегруза α показывает, какую часть от статической нагрузки колеса на рельс (от Π) составляет наибольшая оставшаяся неуравновешенной в колесе сила $|Y_{\varphi}^{\Pi} - q_y^{\Pi}|$, действующая на рельс при движении паровоза. Зная для паровоза величину Π и задаваясь значением α , можем из выражения (78) определить наибольшую допускаемую неуравновешенную силу в колесе $|Y_{\varphi}^{\Pi} - q_y^{\Pi}|$, действующую на рельс при движении паровоза.

Для паровоза C^y коэффициент перегруза α имеет следующее значение для ведущего колеса:

$$\alpha = \frac{|Y_{\varphi}^{\Pi} - q_y^{\Pi}|}{\Pi} = \frac{1813}{9000} = 0,2.$$

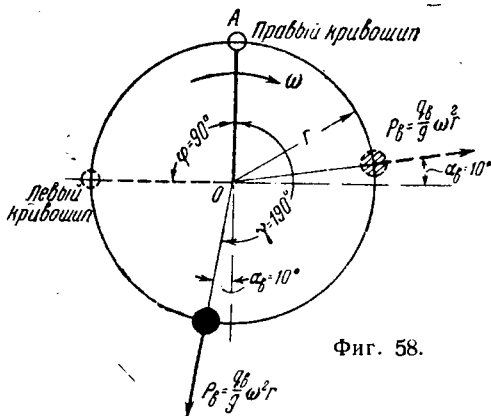
Прежде чем перейти к определению вертикально уравнивающего противовеса q_a , который необходимо поместить в левом колесе,—еще раз скажем, что в правом колесе мы помещаем

¹ Когда паровоз спокойно стоит на рельсах (не движется), то вся сила тяжести от его массы при помощи рессорного подвешивания распределяется между осями. Нагрузка, приходящаяся на ось, колесами данной оси передается на путь. Это давление колеса на рельс при спокойном состоянии паровоза называется статической нагрузкой колеса на рельс. Статическая нагрузка колеса на рельс равна половине нагрузки, приходящейся на ось (Q), т. е. $\Pi = \frac{Q}{2}$.

Так, если для паровоза ИС давление на ось $Q = 20 \text{ т}$, то статическая нагрузка колеса на рельс будет: $\Pi = Q : 2 = 20000 : 2 = 10000 \text{ кг}$. Паровоз C^y имеет нагрузку на ось $Q = 18 \text{ т}$, следовательно, $\Pi = 9000 \text{ кг}$.

груз $q_6 = 168,31$ кг под углом $\gamma = 190^\circ$ (угол γ виден на фиг. 56) по отношению к правому кривошипу. Рассматривая фиг. 58, можем сказать, что в правом колесе этот вертикально уравновешивающий противовес q_6 должны поместить на радиусе кривошипа в плоскости противовеса внизу, когда кривошип находится вверху, под углом α_6 влево от вертикали. Угол α_6 определяется из условия:

$$\alpha_6 = \gamma - 180^\circ. \quad (79)$$



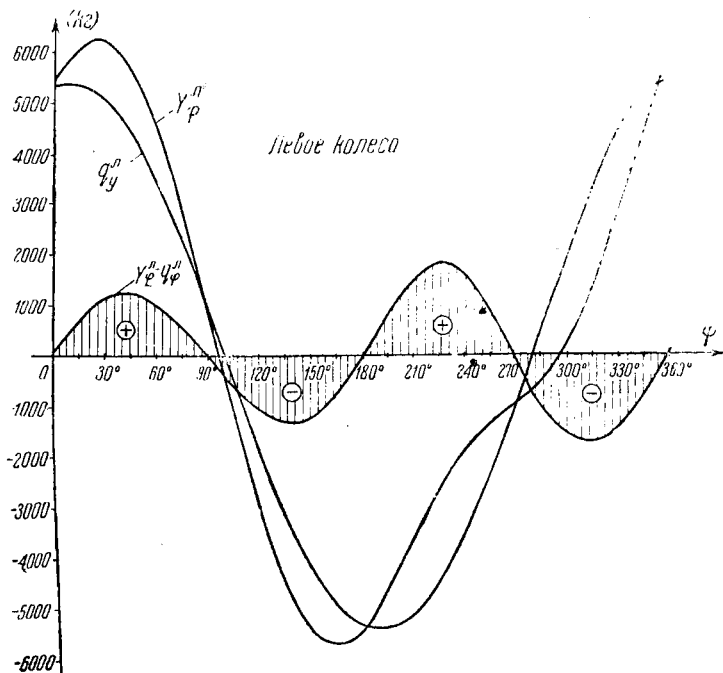
На практике угол α_6 называется углом сдвига противовеса.

Для нашего случая α_6 из выражения (79) имеет значение:

$$\alpha_6 = \gamma - 180^\circ = 190^\circ - 180^\circ = 10^\circ.$$

Желая получить левое колесо ведущей оси, отлитое по той же модели, что и правое, попробуем в левом колесе для получения уравновешивающей силы Y_ϕ^{II} поместить вертикально уравновешивающий противовес той же величины $q_6 = 168,31$ кг, что и в правом (центробежная сила от этого груза q_6 в левом колесе на фиг. 58 показана пунктиром) под углом также $\alpha_6 = 10^\circ$, но

вого колеса $q_0 = 168,31$ кг, помещенный под углом $\lambda_0 = 10^\circ$ от горизонтали вверх (фиг. 58 и 59), построим кривую силы Y_φ^L по данным гр. 7 табл. 11 в масштабе $1 \text{ мм} = 50$ кг (фиг. 60) и в этом же масштабе, воспользовавшись данными гр. 10 той же табл. 11, построим силу $q_y^L = 5416 \cos(\varphi - 10^\circ)$.



Фиг. 60.

Воспользовавшись гр. 7 и 10, определяем значение разности сил $Y_\varphi^L - q_y^L$ за поворот кривошипа на 15° и заносим эти значения в табл. 11.

В графе 11 табл. 11 мы видим, что полученные значения разности сил $Y_\varphi^L - q_y^L$ в левом колесе по

абсолютной величине не превосходят значений $Y_{\varphi}^{\Pi} - q_y^{\Pi}$, подсчитанных для правого колеса, и что эти разности сил $Y_{\varphi}^{\Pi} - q_y^{\Pi}$ имеют те же значения, что $Y_{\varphi}^{\Pi} - q_y^{\Pi}$, только в другие моменты положения механизмов, т. е. при других углах φ .

Указанное выше обстоятельство убеждает нас в том, что для уравнивания силы Y , действующей на правом и левом пальце кривошипа ведущего ската паровоза, достаточно определить значение Y_{φ}^{Π} по формуле (73б) через каждые 15° поворота кривошипа, выбрать вертикально уравнивающий противовес q_e такой величины, чтобы разность сил $Y_{\varphi}^{\Pi} - q_y^{\Pi}$ для правого колеса была наименьшей, и по выражению (77) определить угол γ для правого же колеса. Зная угол γ , по выражению (79) определяем угол сдвига противовеса α_e , под которым и помещаем противовес q_e на радиусе кривошипа в правом колесе от вертикали влево, в левом — от горизонтали вверх (фиг. 58).

На практике, в частности на Коломенском заводе, уравнивание силы Y производят не так, как было разобрано нами. Вертикально-уравнивающий противовес q_e располагают в плоскости действия силы Y под углом $\gamma = 180^\circ$ такой величины, чтобы q_y — вертикальная составляющая центробежной силы противовеса q_e — имела наименьшую разность с силами Y_{φ} и $Y_{\varphi+270^\circ}$, т. е. чтобы разность сил $Y_{\varphi} - q_y^{np}$ (в правом колесе) и $Y_{\varphi+270^\circ} - q_y^{лев}$ (в левом колесе) была наименьшей. Дальше рассматривают, как влияет на рельс в плоскости круга катания оставшаяся неуравновешенная разность сил $Y_{\varphi} - q_y^{np}$ и $Y_{\varphi+270^\circ} - q_y^{лев}$, действующая в плоскости шатунов, т. е. определяют Z_c^{np} (по нашему $Y_{\varphi}^{\Pi} - q_y^{\Pi}$) и $Z_c^{лев}$ (по нашему $Y_{\varphi}^{\Pi} - q_y^{\Pi}$). Мы эту разность сил $Y_{\varphi}^{\Pi} - q_y^{\Pi}$ и $Y_{\varphi}^{\Pi} - q_y^{\Pi}$ получали

сразу, определив Y_{φ}^{II} и Y_{φ}^{III} и определив q_y^{II} — вертикальную составляющую центробежной силы вертикально уравнивающего противовеса q_a , помещенного сразу в плоскости противовесов. (Разностью расстояния между плоскостью круга катания и плоскостью противовеса в колесе пренебрегаем, так как эта разность составляет всего $3 \div 5$ мм). Построив кривые сил Z_c^{np} и $Z_c^{лев}$, противовес q_a , помещенный в плоскости действия сил, Y , переносят в плоскость противовесов.

Итак, уравнивание сил Y мы получаем за счет q_y — вертикальной составляющей центробежной силы противовеса q_a , помещаемого в плоскости противовесов правого и левого колеса.

Горизонтальные же составляющие центробежной силы этого противовеса: q_x^{II} — в правом колесе (фиг. 56) и q_x^{II} — в левом (фиг. 59) стали действовать в плоскости противовеса колеса, как новые неуравновешенные силы в горизонтальном направлении. Выявим изменение этих горизонтальных составляющих центробежной силы вертикально уравнивающего противовеса q_a , т. е. выявим изменение сил q_x^{II} и q_x^{II} для правого и левого колеса при изменении угла φ от 0 до 360° .

Горизонтальная составляющая q_x^{II} для правого колеса определяется таким выражением (см. фиг. 56):

$$\begin{aligned} q_x^{II} &= p_a \sin [270^\circ - (\gamma + \varphi)] = \\ &= - \frac{q_a}{g} \omega^2 r \cos (\gamma + \varphi). \end{aligned} \quad (80a)$$

Подставим постоянные величины, и тогда выражение (80a) примет вид:

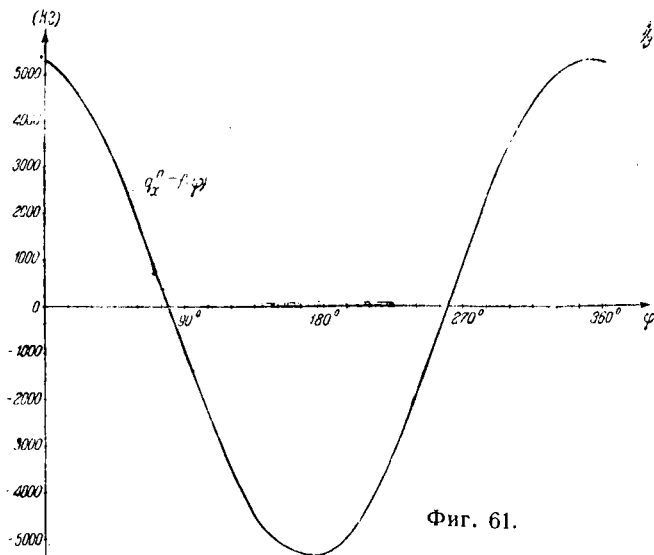
$$q_x^{II} = -5416 \cdot \cos (190^\circ + \varphi). \quad (80б)$$

Изменяя в выражении (80б) угол φ от 0 до 360° через каждые 15° , мы будем получать соответ-

ствующие углу φ значения q_x^L , которые будем заносить в гр. 12 табл. 11. По данным этой графы представляем изменение q_x^L для правого колеса в виде кривой (фиг. 61) в масштабе 1 мм—50 кг.

Значение q_x^L для левого колеса мы можем написать (фиг. 59):

$$q_x^L = p_s \sin(\varphi - \alpha_s) = \frac{q_s}{g} \omega^2 r \sin(\varphi - \alpha_s). \quad (81)$$



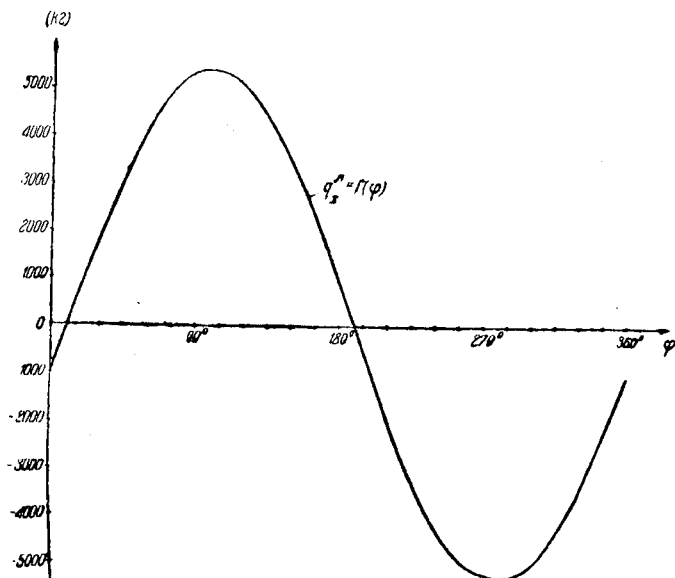
Фиг. 61.

Подставляя постоянные величины, входящие в выражение (81), можем написать:

$$q_x^L = 5416 \cdot \sin(\varphi - 10^\circ). \quad (81a)$$

Изменяя в выражении (81a) угол φ через 15° , будем получать значения q_x^L . Эти значения силы q_x^L при изменении угла φ от 0 до 360° занесены в гр. 13 табл. 11.

Воспользовавшись данными гр. 13 табл. 11, представляем изменение силы q_x^{II} , действующей в левом колесе, в виде кривой (фиг. 62) в масштабе 1 мм — 50 кг.



Фиг. 62.

§ 3. Уравновешивание силы X

а) Формулы для уравновешивания силы X

В § 4 главы II мы разобрали влияние изменяющейся по величине и направлению действия за оборот колеса силы X (фиг. 35), т. е. влияние горизонтальной составляющей от внешних сил и сил инерции шатуна и поступательно-движущихся масс механизма на строение паровоза и на путь. Сила X , как и сила Y , действует также в плоскости шатуна. Уравновешивающие же грузы мы

помещаем в плоскости противовесов. Чтобы знать, какой величины уравнивающий груз необходимо поместить в колесе для уравнивания силы X , действующей на правом и левом пальце кривошипа ведущей оси, воспользуемся выведенными формулами (736) и (746) и по аналогии с этими выражениями напомним:

$$X_{\varphi}^{\Pi} = - \left[X_{\varphi} + (X_{\varphi} - X_{\varphi+270^{\circ}}) \frac{a}{2S} \right] \quad (82)$$

$$X_{\varphi}^{\Pi} = - \left[X_{\varphi+270^{\circ}} - (X_{\varphi} - X_{\varphi+270^{\circ}}) \frac{a}{2S} \right]. \quad (83)$$

Изменяя угол φ в выражениях (82) и (83) от 0 до 360° через каждые 15° , мы можем определить, как должна изменяться уравнивающая сила X_{φ}^{Π} и X_{φ}^{Π} за оборот колеса по величине и направлению действия. Силы X_{φ} и $X_{\varphi+270^{\circ}}$ в выражениях (82) и (83) подставлять надо со своими знаками.

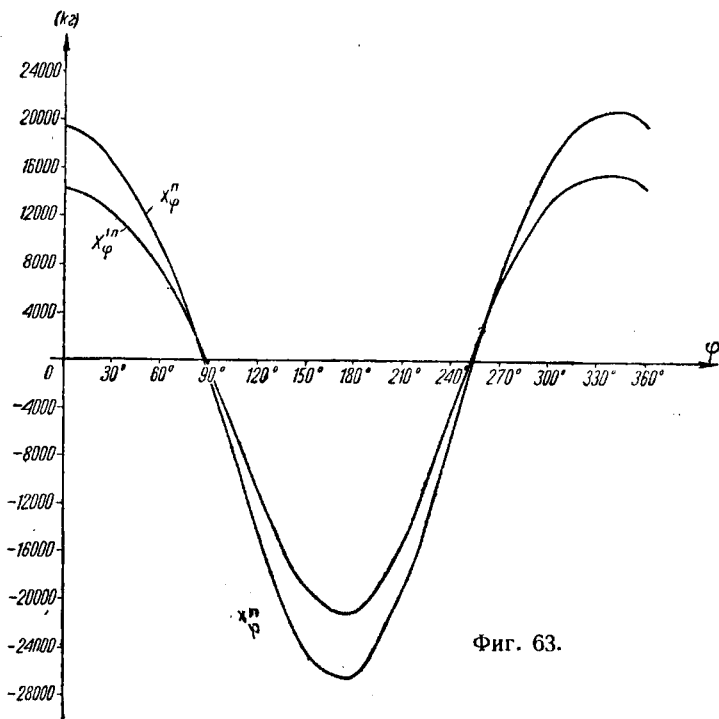
б) Уравнивание силы X паровоза серии С^У

В гр. 12 табл. 5 для паровоза С^У нами были подсчитаны значения силы X при изменении угла φ от 0 до 360° через каждые 15° .

Воспользовавшись выведенными формулами (82) и (83), определим значения сил X_{φ}^{Π} и X_{φ}^{Π} при изменении угла φ также через 15° за полный оборот колеса. Вычисление сил X_{φ}^{Π} и X_{φ}^{Π} сведем в табл. 12. (Для паровоза С^У в выражениях (82) и (83) $a = 345$ мм; $2S = 1590$ мм; $\frac{a}{2S} = 0,217$).

Чтобы иметь наглядное представление об изменении силы X_{φ}^{Π} и X_{φ}^{Π} за оборот колеса, по значениям гр. 6 и 7 табл. 12 представим изменение силы X_{φ}^{Π} и X_{φ}^{Π} в виде кривых в общем масштабе 1 мм — 200 кг (фиг. 63 и 64).

Если мы теперь учтем силы $q_x^П$ и $q_x^Л$, про которые говорили в конце § 2 этой главы, то для уравнивания сил X_φ и $X_{\varphi+270^\circ}$, действующих в плоскости правого и левого шатуна, оказывается, нам нужно в плоскости противовесов правого и



Фиг. 63.

левого колеса иметь уравнивающие силы $X_\varphi^П$ и $X_\varphi^Л$, равные:

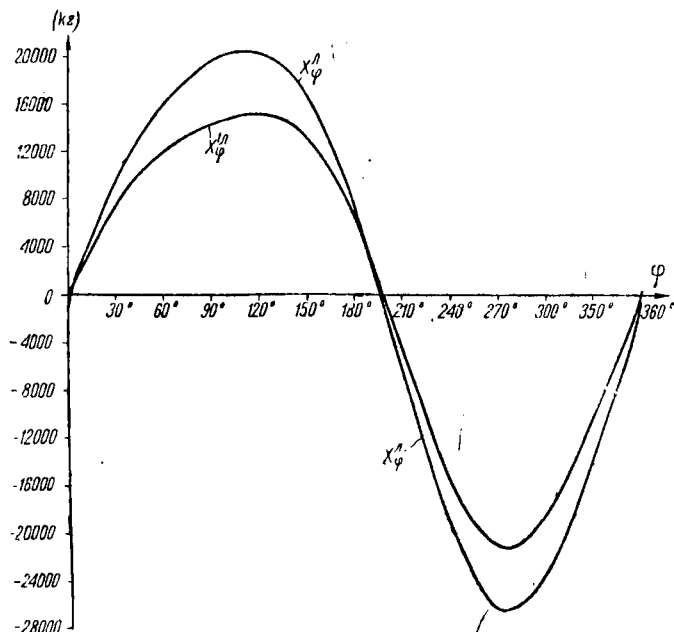
$$X_\varphi^П = X_\varphi^П - q_x^П. \quad (84)$$

$$X_\varphi^Л = X_\varphi^Л - q_x^Л. \quad (85)$$

Значения сил $X_\varphi^П$, полученные из выражения (84)

при изменении в нем угла φ через 15° , для паровоза СУ занесены в гр. 8 табл. 12. (Значения сил X'_{φ}^{II} — в гр. 9 той же таблицы.)

Воспользовавшись гр. 8 и 9, представляем изменение сил X'_{φ}^{II} и X'_{φ}^{LI} за оборот колеса в виде кривых в масштабе 1 мм — 200 кг (фиг. 63 и 64).



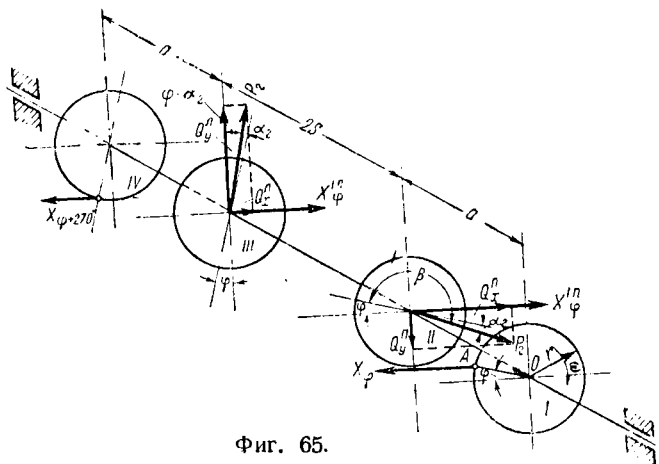
Фиг. 64.

Уравновешивающие силы X'_{φ}^{II} и X'_{φ}^{LI} в плоскости противовесов мы можем получить за счет горизонтальной составляющей центробежной силы от груза Q_s , помещаемого в плоскости противовеса колеса.

Узнаем вперед, какой величины груз Q_s надо поместить в плоскости противовеса правого ко-

леса и под каким углом β должны его поместить (фиг. 65), чтобы за счет горизонтальной составляющей центробежной силы от этого груза, т. е. за счет $Q_x^{\Pi} = -P_s \cos(\beta + \varphi)$ могли получить уравновешивающую силу X'_{φ}^{Π} .

$$\begin{aligned} Q_x^{\Pi} &= -P_s \cos(\beta + \varphi) = \\ &= -\frac{Q_s}{g} \omega^2 r \cos(\beta + \varphi). \end{aligned} \quad (86)$$



Фиг. 65.

Из выражения (86) мы видим, что сила Q_x^{Π} , действующая в горизонтальном направлении, изменяется по косинусоиде. Уравновешивающую же силу X'_{φ}^{Π} нам нужно иметь за оборот колеса, изменяющуюся не по чистой косинусоиде (фиг. 63); поэтому делаем заключение, что полного горизонтального равновесия паровоза мы получить никак не можем.

Для ориентировочного определения груза Q_s и угла β можно предположить, что величина

$$\frac{Q_s}{g} \omega^2 r$$

равна среднему значению из абсолютных наибольших двух значений силы (X'_{φ}^{Π}) , т. е.

$$\frac{Q_s}{g} \omega^2 r = \frac{|X'_{\varphi=0}^{\Pi}| + |X'_{\varphi=180^\circ}^{\Pi}|}{2} \cong 18500 \text{ кг.}$$

Если мы изменяющуюся за оборот колеса по косинусоиде силу Q_x^{Π} построим в том же масштабе, что и силу X'_{φ}^{Π} (фиг. 63), т. е. в масштабе 1 мм — 200 кг, то наибольшую ординату получим путем деления $\frac{18500}{200} = 92,5$ мм. Умножая максимальную ординату 92,5 мм на значение косинуса при изменении угла через каждые 10 или 15°, мы построим на восковке косинусоиду, которую будем накладывать на кривую силы X'_{φ}^{Π} с расчетом, чтобы получить наименьшую разность ординат силы X'_{φ}^{Π} и силы Q_x^{Π} (фиг. 66).

На фиг. 66 видно, что сила Q_x^{Π} получила максимальное положительное значение при $\varphi = -10^\circ$. Из выражения (86) сила Q_x^{Π} получает максимальное положительное значение при

$$\cos(\beta + \varphi) = -1,$$

что соответствует углу:

$$\beta + \varphi = 180^\circ. \quad (87)$$

Подставив в выражение (87) значение угла φ , при котором сила Q_x^{Π} получила максимальное положительное значение, определим угол β :

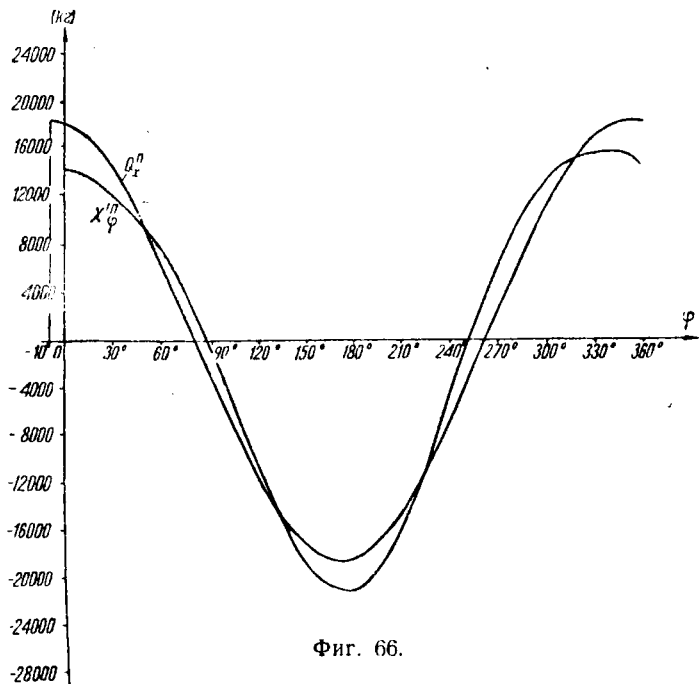
$$\beta - 10 = 180^\circ, \text{ откуда } \beta = 190^\circ.$$

Таким образом, мы получили, что груз Q_s в плоскости противовеса правого колеса надо поместить под углом β , равным углу γ , т. е. $\beta = \gamma = 190^\circ$. Величину груза Q_s определяем из значе-

ния, $\frac{Q_2}{g} \omega^2 r$, принятого равным 18 500 кг (при $v = 100$ км/час, $\omega^2 r = 315,63$ м/сек²).

$$Q_2 = \frac{18\,500 \cdot g}{\omega^2 \cdot r} = \frac{18\,500 \cdot 9,81}{315,63} \cong 575 \text{ кг.}$$

Можем ли мы на радиусе кривошипа в плоскости противовеса правого колеса поместить груз $Q_2 = 575$ кг, узнаем из разбора следующего



Фиг. 66.

обстоятельства. Если мы оставим в плоскости противовеса правого колеса груз $Q_2 = 575$ кг под углом $\beta = 190^\circ$, то получим неуравновешенную силу—вертикальную составляющую центробеж-

ной силы Q_y^{Π} , изменяющуюся за оборот колеса по закону синусоиды (из фиг. 65):

$$Q_y^{\Pi} = P \sin(\beta + \varphi) = \frac{Q_s}{g} \omega^2 r \sin(\beta + \varphi). \quad (88)$$

При угле $\beta + \varphi$, равном 270° , сила Q_y^{Π} , действуя вниз (на рельс), будет иметь максимальное значение, равное $\frac{Q_s}{g} \omega^2 r = 18\,500$ кг. Вполне понятно, что перегруз рельса на 18 500 кг—избыток давления колеса на рельс от центробежной силы груза Q_s , называемого поэтому избыточным противовесом,—мы ни в коем случае допустить не можем.

Выбор величины избыточного противовеса должен производиться в соответствии с прочностью верхнего строения пути.

В паровозостроении коэффициент перегруза α берут для паровозов:

пассажирских

$$\alpha = \frac{|Y_{\varphi}^{\Pi} - q_y^{\Pi}| + Q_y^{\Pi}}{P} = 0,2 \div 0,3. \quad (89a)$$

товарных.

$$\alpha = \frac{|Y_{\varphi}^{\Pi} - q_y^{\Pi}| + Q_y^{\Pi}}{P} = 0,2 \div 0,25^1. \quad (89б)$$

С увеличением конструктивных скоростей как для пассажирских, так и товарных паровозов коэффициент перегруза может быть принят $\alpha = 0,3 \div 0,35$.

Из выражения (89a) и (89б) видно, что чем меньше значение будет иметь α , тем меньшее воздействие на путь будет оказывать паровоз.

При уравнивании силы Y паровоза S_y мы для ведущего колеса получили $\alpha = 0,2$. Если мы не желаем больше увеличивать α для ведущего колеса, то получается, что в плоскости противовесов колес ведущей оси мы не можем поместить даже части груза 575 кг, который не-

¹ См. ИТС, Паровоз, стр. 236.

обходимо поместить в правом и левом ведущем колесе под углом β .

Спрашивается, за счет чего же мы можем получить уравнивающие силы $X'_{\varphi\Pi}$ и $X'_{\varphi L}$ или хотя бы часть этих сил?

На практике часть уравнивающих сил $X'_{\varphi\Pi}$ и $X'_{\varphi L}$ получают за счет горизонтальных составляющих Q_x от центробежных сил избыточных противовесов, помещаемых в сцепные колеса. Величину избыточного противовеса, который можно поместить в плоскости противовеса сцепного колеса правого и левого, определяют из тех соображений, чтобы максимальное значение вертикальной составляющей центробежной силы его, отнесенное к статической нагрузке колеса на рельс, не превосходило значений α , указанных в выражениях (89a) и (89б). Располагать, конечно, этот избыточный противовес в сцепном колесе надо под тем же наивыгоднейшим углом β (для паровоза С^у мы нашли, что $\beta = 190^\circ$). Лучше для сцепных колес α иметь одинаковым по значению с α для ведущего колеса, чтобы одинаковые воздействия на путь оказывались всеми сцепными колесами паровоза при движении.

Принимая для колес 1-й и 3-й сцепных осей паровоза С^у коэффициент перегруза $\alpha = 0,2$, как и для ведущего колеса, наибольший перегруз Q_y от избыточного противовеса, помещаемого в сцепном колесе, определим из выражения (89a):

$$\alpha = \frac{Q_y}{P},$$

откуда

$$Q_y = \alpha \cdot P = 0,2 \cdot 9\,000 = 1\,800 \text{ кг.}$$

Но наибольшее значение Q_y из выражения (88) равно:

$$\frac{Q_c}{g} \omega^2 r.$$

Зная Q_y , мы можем определить величину избыточного противовеса Q_z , который возможно поместить в плоскости противовеса колес 1-й и 3-й сцепных осей паровоза СУ.

$$Q_z = \frac{Q_y \cdot g}{\omega^2 r} = \frac{1800 \cdot 9,81}{315,63} = 56 \text{ кг.}$$

Итак, помещая под углом $\beta = 190^\circ$ в плоскости противовесов сцепных колес 1-й и 3-й осей паровоза СУ избыточный противовес $Q_z = 56 \text{ кг}$, мы будем получать в правых колесах силы, действующие по горизонтали (аналогично выражению 86)

$$\begin{aligned} Q_x^{\Pi} &= - \frac{Q_z}{g} \omega^2 r \cdot \cos(\beta + \varphi) = \\ &= -1800 \cdot \cos(190^\circ + \varphi) \end{aligned} \quad (90)$$

и силы, действующие по вертикали (аналогично выражению 88):

$$\begin{aligned} Q_y^{\Pi} &= \frac{Q_z}{g} \omega^2 r \sin(\beta + \varphi) = \\ &= 1800 \sin(190^\circ + \varphi). \end{aligned} \quad (91)$$

Силы Q_y^{Π} , действующие по вертикали, будут при движении паровоза разгружать и перегружать рельс.

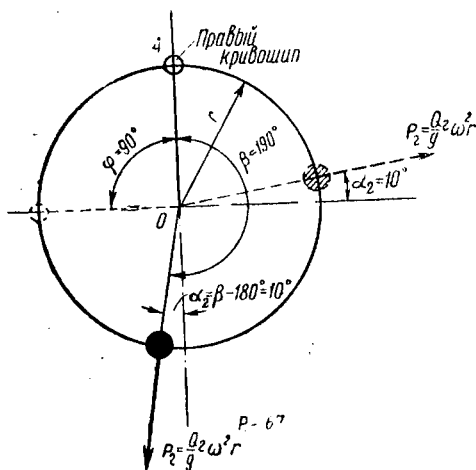
В левом колесе 1-й и 3-й сцепных осей избыточный противовес $Q_z = 56 \text{ кг}$ мы должны поместить под углом $\alpha_z = 10^\circ$ от горизонтали вверх (на фиг. 67 центробежная сила от избыточного противовеса в левом колесе показана пунктиром). В левых колесах от избыточного противо-

веса будем получать силы, действующие в горизонтальном направлении (аналогично выражению 81):

$$\begin{aligned} Q_x^{\Pi} &= P_2 \sin(\varphi - \alpha_2) = \frac{Q_2}{g} \omega^2 r \sin(\varphi - \alpha_2) = \\ &= 1800 \sin(\varphi - 10^\circ) \end{aligned} \quad (92)$$

и силы, действующие в вертикальном направлении (аналогично выражению 80):

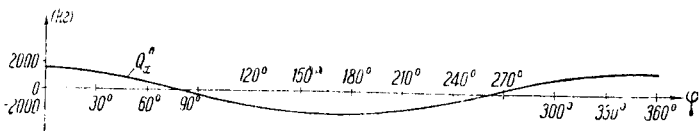
$$\begin{aligned} Q_y^{\Pi} &= P_2 \cdot \cos(\varphi - \alpha_2) = \frac{Q_2}{g} \omega^2 r \cos(\varphi - \alpha_2) = \\ &= 1800 \cos(\varphi - 10^\circ). \end{aligned} \quad (93)$$



Фиг. 67.

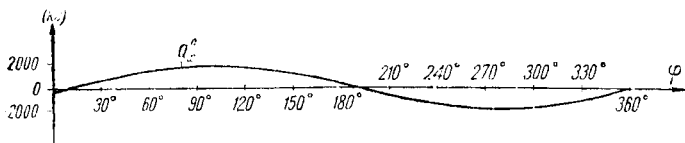
Изменяя через 15° угол φ в выражении (90), будем получать значение силы Q_x^{Π} , действующей в горизонтальном направлении правого сцепного колеса 1-й и 3-й осей. Изменение силы $Q_x^{\Pi} = -1800 \cdot \cos(190^\circ + \varphi)$ за оборот колеса представлено на фиг. 68 в масштабе 1 мм — 200 кг по значениям, взятым из гр. 10 табл. 12.

Изменяя угол φ в выражении (92), будем получать значения силы Q_x^L , действующей в горизонтальном направлении левого колеса. Изменение силы $Q_x^L = 1800 \cdot \sin(\varphi - 10^\circ)$ за оборот колеса представлено на фиг. 69.



Фиг. 68.

Если мы из значений уравнивающей силы X_φ^H , которую необходимо иметь в правом колесе, вычтем значение двух сил Q_x^L (изменение силы Q_x^L мы видели на фиг. 68), то получающаяся разность сил, взятая с обратным знаком (гр. 12 табл. 12), будет представлять оставшуюся неурав-



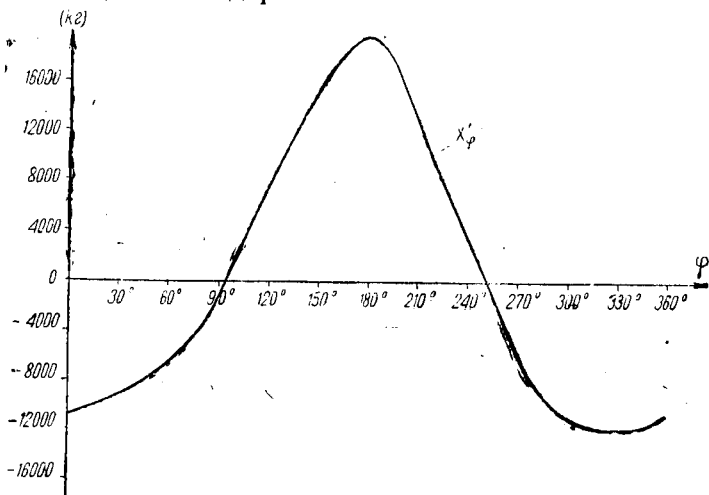
Фиг. 69.

новешенной силу X_φ^H в правом колесе. По значениям гр. 12 табл. 12 на фиг. 70 представляем изменение силы X_φ^H за оборот колеса.

Если мы из значений уравнивающей силы X_φ^H , которую необходимо иметь в плоскости противовеса левого колеса ведущей оси паровоза СУ, вычтем значение двух сил Q_x^L (изменение силы Q_x^L в плоскости противовеса левого колеса представлено на фиг. 69), то получающаяся разность сил, взятая с обратным знаком

(см. гр. 13 табл. 12) будет представлять оставшуюся неуравновешенной силу $X'_{\varphi+270^\circ}$ в левом колесе. Изменение силы $X'_{\varphi+270^\circ}$ за оборот колеса представляем на фиг. 71 в масштабе 1 мм — 200 кг.

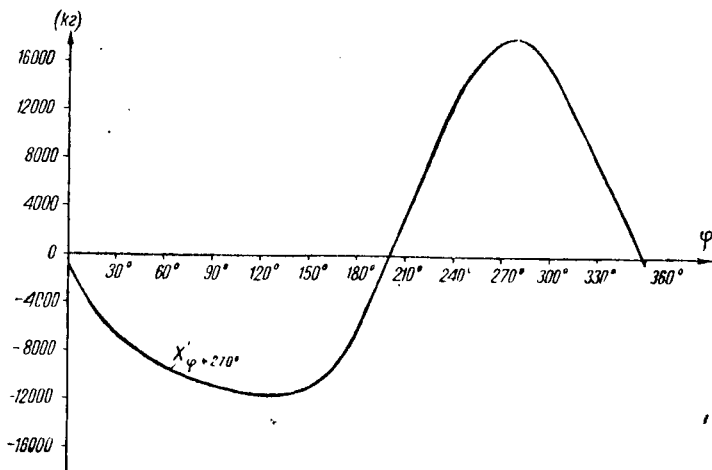
Эти-то оставшиеся неуравновешенными силы X'_φ и $X'_{\varphi+270^\circ}$ и будут в паровозе при движении создавать подергивание и виляние.



Фиг. 70.

Чтобы вывести формулы, по которым можно при любом угле поворота правого кривошипа от неуравновешенных сил X'_φ и $X'_{\varphi+270^\circ}$ получать силу $\Sigma X'$, вызывающую подергивание, и сумму моментов сил $\Sigma M X'$, которая вызывает виляние паровоза, поступим следующим образом. Представим на фиг. 72 в плане скаты паровоза Cy , вращающиеся с максимальной угловой скоростью ω , в тот момент, когда правый кривошип повернулся от заднего мертвого положения на угол φ , меньший 90° . Силы X'_φ и $X'_{\varphi+270^\circ}$ в этот момент действуют в сторону, противоположную

движению паровоза. Если мы в точке O на продольной оси паровоза приложим две равные и противоположно направленные силы X'_φ , то получим силу X'_φ , действующую против направления движения паровоза, и пару сил $M = X'_\varphi \cdot S$, момент которой будем считать положительным. Переноса параллельно силу $X'_{\varphi+270^\circ}$ в ту же точку O , получим силу $X'_{\varphi+270^\circ}$, действующую также против движения паровоза, и пару сил $M = X'_{\varphi+270^\circ} \cdot S$, момент которой должны уже считать отрицательным.



Фиг. 71.

Сумму сил, вызывающих подергивание паровоза, напомним так:

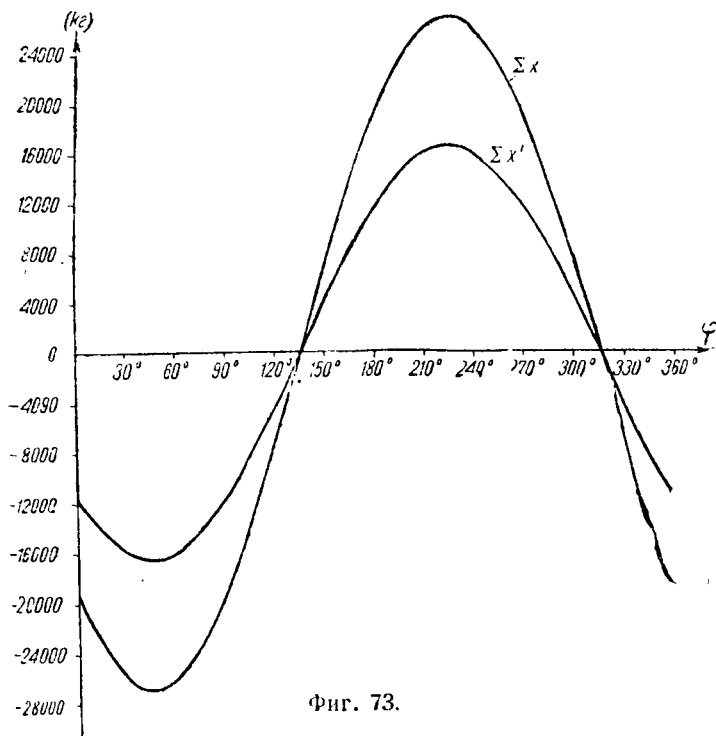
$$\Sigma X' = X'_\varphi + X'_{\varphi+270^\circ}. \quad (94)$$

В выражении (94) силы X'_φ и $X'_{\varphi+270^\circ}$, взятые из гр. 12 и 13 табл. 12, должны подставляться со своими знаками. Положительное значение суммы сил X'_φ и $X'_{\varphi+270^\circ}$ будет указывать на то, что сила $\Sigma X'$ действует в направлении движения па-

(°)	(κ2)	(κ2)	(κ2)	(κ2)	(κ2)	(κ2)	(κ2)	(κ2)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	-16 542	-2 470	-14 072	-3 054	19 596	-584	14 263	356
15	-16 730	-6 558	-10 172	-2 207	18 937	4 351	14 029	3 879
30	-15 233	-10 745	-4 488	-974	16 207	9 771	12 059	7 919
45	-13 448	-13 448	0	0	13 448	13 448	10 342	10 342
60	-10 745	-15 233	4 488	974	9 771	16 207	7 919	12 059
75	-6 558	-16 730	10 172	2 207	4 351	18 937	3 879	14 029
90	-2 470	-16 542	14 072	3 054	-584	19 596	356	14 263
105	3 286	-16 730	20 016	4 343	-7 629	21 073	-5 340	15 679
120	8 371	-15 233	23 504	5 100	-13 371	20 333	-9 890	15 245
135	13 448	-13 448	26 892	5 836	-19 280	19 284	-14 845	14 849
150	17 703	-10 745	28 448	6 173	-23 876	16 918	-18 788	13 437
165	20 006	-6 558	26 564	5 764	-25 770	12 322	-20 376	9 913
180	21 490	-2 470	23 960	5 199	-26 689	7 669	-21 356	6 729
195	20 006	-3 286	16 720	3 628	-23 634	342	-18 726	814
210	17 703	8 271	9 432	2 047	-19 750	-6 224	-15 602	-4 372
225	13 448	13 448	0	0	-13 448	-13 448	-10 338	-10 338
240	8 371	17 703	-4 332	-2 017	-6 224	-19 750	-4 372	-15 602
255	3 286	20 006	-16 720	-3 628	342	-23 634	814	-18 726
270	-2 470	21 490	-23 960	-5 199	7 669	-26 689	6 729	-21 356
285	-6 558	20 006	-26 564	-5 764	12 322	-25 770	9 913	-20 376
300	-10 745	17 703	-28 448	-6 173	16 918	-23 876	13 437	-18 788
315	-13 448	13 448	-26 892	-5 836	19 284	-19 280	14 849	-14 845
330	-15 233	8 271	-23 504	-5 100	20 333	-13 371	15 245	-9 890
345	-16 730	3 286	-20 016	-4 343	21 073	-7 629	15 679	-5 340
360	-16 542	-2 470	-14 072	-3 054	19 596	-584	14 263	356

(κ2)	(κ2)	(κ2)	(κ2)	(κ2)	(κ2)	(κ2)	(κ2)	(κ2)
10	11	12	13	14	15	16	17	18
$Q_X^{II} = -180 \cdot \cos(190^\circ + \varphi)$	$Q_X^{II} = 1800 \cdot \sin(\varphi - 10^\circ)$	$X_\varphi^{II} = -[X_\varphi^{II} - 2Q_X^{II}]$	$X_{\varphi+270}^{II} = -[X_{\varphi+270}^{II} - 2Q_X^{II}]$	$\Sigma X_\varphi = X_\varphi + X_{\varphi+270}$	$X_\varphi' - X_{\varphi+270}'$	$\Sigma MX' = -(X_\varphi' - X_{\varphi+270}') \cdot S$	$\Sigma X = X_\varphi + X_{\varphi+270}$	$\Sigma MX = -(X_\varphi - X_{\varphi+270}) \cdot (S + t)$
1 772	-313	-10 717	-982	-11 699	9 735	7 739	-19 012	16 042
1 631	157	-10 766	-3 565	-14 331	-7 201	5 725	-23 287	11 596
1 379	616	-9 300	-6 687	-15 987	-2 613	2 078	-25 978	5 117
1 032	-1 032	-8 277	-16 554	-16 554	0	0	-16 554	0
6 16	1 379	-6 687	-9 300	-15 987	2 613	-2 078	-25 978	-5 117
1 57	1 631	-3 565	-10 766	-14 331	7 201	-5 725	-23 287	-11 596
-313	1 773	-982	-10 717	-11 699	9 735	-7 739	-19 012	-16 042
-761	1 793	3 819	-12 093	-8 274	15 912	-12 650	-13 441	-22 817
-1 157	1 691	7 576	-11 863	-4 287	19 439	-15 451	-6 962	26 793
-1 474	1 474	11 899	-11 899	0	23 798	-18 917	0	-30 657
-1 691	1 157	15 405	-11 123	4 283	26 528	-21 090	6 958	-32 430
-1 793	761	16 790	-8 422	8 368	25 212	-20 013	13 448	-30 282
-1 77	313	17 811	-6 104	11 707	23 915	-19 012	19 020	-27 314
-1 631	-157	15 463	-1 129	14 334	16 592	-13 190	23 291	-19 061
-1 379	-616	12 643	3 111	15 984	9 702	-7 713	25 974	-10 752
-1 032	-1 032	8 273	8 273	16 546	0	0	26 888	0
-616	-1 379	3 141	12 843	15 681	-9 702	7 713	25 974	10 752
-157	-1 631	-1 129	15 463	14 334	-16 592	13 190	23 291	-19 061
313	-1 773	-6 104	17 811	11 707	-23 915	19 012	19 020	-27 314
761	-1 793	-8 422	16 690	8 368	-25 212	20 013	13 448	-30 282
1 157	-1 691	-11 123	15 405	4 282	-26 528	21 090	6 958	-32 430
1 474	-1 474	-11 899	11 899	0	-23 798	18 917	0	30 657
1 691	-1 157	-11 863	7 576	-4 287	-19 439	15 451	-6 962	26 793
1 793	-761	-12 093	3 819	-8 274	-15 912	12 650	-13 441	-22 817
1 773	-313	-10 717	-982	-11 699	-9 735	7 739	-19 012	16 042

ровоза—увеличивает силу тяги паровоза (заставляет паровоз как бы убежать вперед). Отрицательное значение суммы сил X'_{φ} и $X'_{\varphi+270^\circ}$ будет указывать на то, что сила $\Sigma X'$ действует против



Фиг. 73.

движения паровоза—уменьшает силу тяги паровоза (прижимает паровоз к прицепленным вагонам).

Для паровоза С^у значение силы $\Sigma X'$ из выражения (94) при изменении угла φ через 15° подсчитано в графе 14 табл. 12 и представлено в виде кривой на фиг. 73 в масштабе 1 мм—200 кг.

Сумму моментов сил, вызывающих влияние паровоза при данном угле φ , напомним так:

$$\Sigma MX' = X'_{\varphi} \cdot S - X'_{\varphi+270^{\circ}} \cdot S.$$

Чтобы эта формула была справедлива для любого угла φ , учитывая знак при силе X'_{φ} и $X'_{\varphi+270^{\circ}}$, должны написать ее в таком виде:

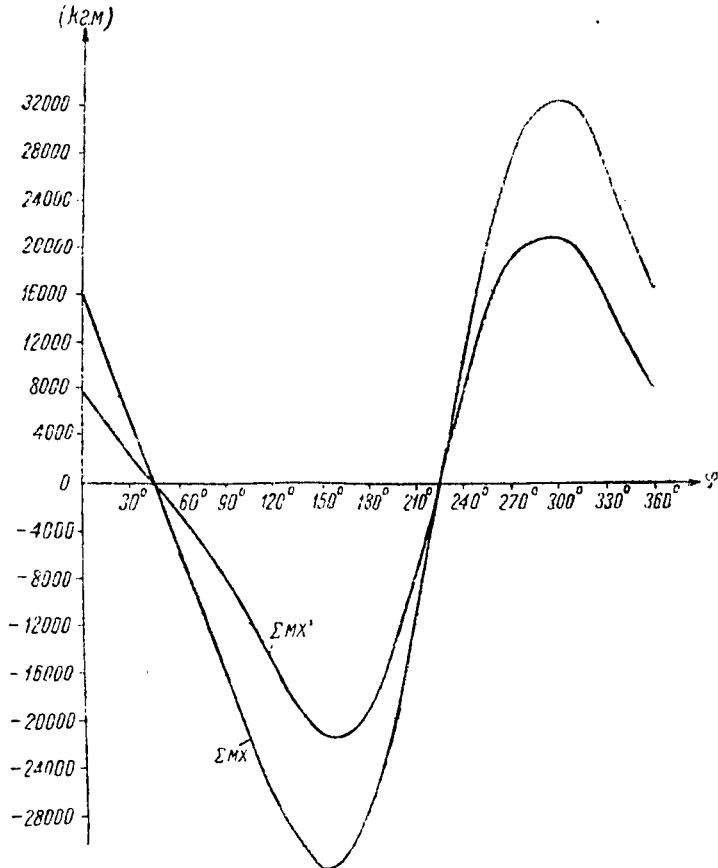
$$\begin{aligned} \Sigma MX' &= -X'_{\varphi} \cdot S + X'_{\varphi+270^{\circ}} \cdot S = \\ &= -(X'_{\varphi} - X'_{\varphi+270^{\circ}}) \cdot S. \end{aligned} \quad (95)$$

Теперь уже в выражение (95) силу X'_{φ} и $X'_{\varphi+270^{\circ}}$ мы должны подставлять со своими знаками. Положительное значение суммы моментов сил X'_{φ} и $X'_{\varphi+270^{\circ}}$ относительно продольной оси паровоза будет указывать на то, что под влиянием момента сил $\Sigma MX'$ паровоз будет отброшен в правую сторону по направлению движения паровоза (при движении паровоза трубой вперед). Отрицательное значение суммы моментов сил X'_{φ} и $X'_{\varphi+270^{\circ}}$ относительно продольной оси паровоза будет указывать на то, что под влиянием момента сил $\Sigma MX'$ паровоз будет отброшен в левую сторону от направления движения паровоза.

Для паровоза С^у значение суммарного момента сил $\Sigma MX'$ из выражения (95) при изменении в нем угла φ через 15° подсчитано в гр. 16 табл. 12 и представлено в виде кривой на фиг. 74 в масштабе 1 мм - 200 кг.

Чтобы судить о том, на сколько процентов мы уравниваем паровоз в горизонтальном направлении от подергивания и влияния, нам нужно знать, какая сила ΣX создавала бы подергивание и какой суммарный момент сил ΣMX создавал бы влияние от сил X_{φ} и $X_{\varphi+270^{\circ}}$, действующих в плоскости правого и левого шатуна (фиг. 72) при условии полной неуравновешенности этих сил.

Силу ΣX будем подсчитывать по той же



Фиг. 74.

формуле (94), по которой подсчитывали суммарную силу $\Sigma X'$, т. е.:

$$\Sigma X = X_{\varphi} + X_{\varphi+270^{\circ}}. \quad (96)$$

Сила ΣX для паровоза С^у из выражения (96) при изменении в нем угла φ через 15° подсчитана

в гр. 17 табл. 12 и представлена в виде кривой на фиг. 73 в масштабе 1 мм — 200 кг.

Для определения суммарного момента сил ΣMX от сил X_φ и $X_{\varphi+270^\circ}$ по аналогии с выражением (95) напишем:

$$\Sigma MX = -(X_\varphi - X_{\varphi+270^\circ})(S + a). \quad (97)$$

Суммарный момент ΣMX от действующих сил X_φ и $X_{\varphi+270^\circ}$ для паровоза С^У из выражения (97) приведен в гр. 18 табл. 12 и представлен в виде кривой на фиг. 74.

Если мы наибольшее значение силы $\Sigma X'$, действующей в паровозе от оставшихся неуравновешенных сил X'_φ и $X'_{\varphi+270^\circ}$, разделим на значение силы ΣX при том же угле φ и умножим эту дробь на 100, получим процент неуравновешенности паровоза от подергивания.

Процент уравниваемости паровоза от подергивания найдем как разность 100% и процента неуравновешенности.

Для паровоза С^У, например, при φ , равном 45° , сила $\Sigma X'$ имеет наибольшее значение, равное 16554 кг (гр. 14 табл. 12). Сила ΣX при этом имеет значение 26896 кг (гр. 17 табл. 12). Процент неуравновешенности:

$$\frac{\Sigma X'}{\Sigma X} \cdot 100 = \frac{16554}{26896} \cdot 100 = 61,55\%.$$

Отношение наибольшего значения действующего в паровозе суммарного момента сил $\Sigma MX'$ от сил X'_φ и $X'_{\varphi+270^\circ}$ к значению момента сил ΣMX при том же угле φ , умноженное на 100, дает процент неуравновешенности паровоза от виляния.

Для паровоза С^У наибольшая $\Sigma MX' = 21\,090$ кгм имеет место при $\varphi = 150^\circ$ и $\varphi = 300^\circ$ (гр. 16 табл. 12).

При этом момент сил $\Sigma MX = 32\,430$ кгм (гр. 18 табл. 12).

Процент неуравновешенности:

$$\frac{\sum MX'}{\sum MX} \cdot 100 = \frac{21\,090}{32\,430} \cdot 100 = 65\%.$$

Силу Z , действующую на параллель (фиг. 37 и гр. 14 табл. 5), на практике ничем не ослабляют.

§ 4. Определение суммарного противовеса в колесе на радиусе кривошипа

а) Предварительные соображения

В колесе сцепной оси суммарный противовес G_r будет складываться из противовеса P , который необходимо поместить для уравнивания центробежных сил вращающихся неуравновешенных масс колеса, и из избыточного противовеса Q_r , помещаемого в колесе для частичного уравнивания сил X_φ и $X_{\varphi+270^\circ}$.

В ведущем колесе суммарный противовес будет складываться из грузов P и Q_r , если помещают в колесе избыточный противовес. Затем составляющими суммарного противовеса еще входят вертикально уравнивающий противовес q_v , помещаемый в колесе для уравнивания силы Y_φ и $Y_{\varphi+270^\circ}$, и противовес q_k , помещаемый в колесе для уравнивания центробежных сил контр-кривошипов правой и левой стороны.

б) Определение суммарного противовеса на радиусе кривошипа в колесе первой сцепной оси паровоза С^у

Мы нашли, что для уравнивания центробежных сил вращающихся неуравновешенных масс первого ската паровоза С^у необходимо поместить противовес $P = 141,408 \text{ кг}$ под углом $\alpha = 3^\circ 40'$ в правом колесе вниз влево от вертикали; в левом колесе—под тем же углом $\alpha = 3^\circ 40'$ от горизонтали вверх, когда правый кривошип находится

в вертикальном верхнем положении (фиг. 49). Избыточный противовес $Q_2 = 56 \text{ кг}$ мы помещали под углом $\alpha_2 = 10^\circ$ в правое колесо 1-й сцепной оси внизу влево от вертикали; в левом колесе — под углом $\alpha_2 = 10^\circ$ от горизонтали вверх (фиг. 67).

Фиг. 75.

$$G_r^2 = Q_r^2 + P^2 - 2Q_r P \cos [180^\circ - (\alpha_r - \alpha)] .$$

$$\cos [180 - (a_s - a)] = -\cos (a_s - a),$$

NOTOMY:

$$G_r = \sqrt{Q_r^2 + P^2 + 2Q_r P \cos(\alpha_r - \alpha)}. \quad (98)$$

Подставляя числовые значения Q_2 , P , α_2 и α , определим величину суммарного противовеса G_x :

$$G = \sqrt{56^2 + 141,408^2 + 2 \cdot 56 \cdot 141,408 \cdot \cos(10^\circ - 3^\circ 40')} = 197,16 \text{ кз.}$$

Угол α_c , под которым мы должны поместить в правом колесе суммарный противовес G_r , равен:

$$\alpha_c = \alpha + \alpha_1. \quad (99)$$

Угол α_1 будем определять из значения $\cos \alpha_1$ для треугольника, в котором известны все три стороны: P , G_r и Q_r (фиг. 75):

$$Q_r^2 = P^2 + G_r^2 - 2P G_r \cos \alpha_1.$$

откуда:

$$\cos \alpha_1 = \frac{P^2 + G_r^2 - Q_r^2}{2P G_r}. \quad (100)$$

Зная $\cos \alpha_1$, определяем по таблице, чему равен угол α_1 , и подставляем значение α_1 в формулу (99) для определения угла α_c .

В нашем случае:

$$\cos \alpha_1 = \frac{141,408^2 + 197,16^2 - 56^2}{2 \cdot 141,408 \cdot 197,16} = 0,99952.$$

Угол $\alpha_1 = 1^\circ 50'$, следовательно:

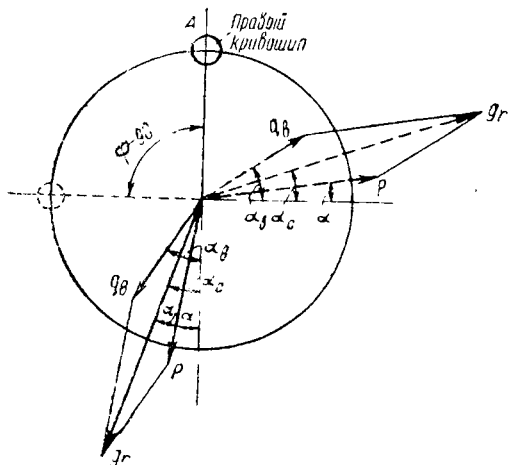
$$\alpha_c = \alpha + \alpha_1 = 3^\circ 40' + 1^\circ 50' = 5^\circ 30'.$$

Итак, в правом колесе 1-й сцепной оси паровоза С^у на радиусе кривошипа суммарный противовес $G_r = 197,16$ кг мы должны поместить внизу, когда кривошип этого колеса находится вверху под углом $\alpha_c = 5^\circ 30'$ от вертикали влево. В левом колесе должны этот же суммарный противовес $G_r = 197,16$ кг поместить под тем же углом $\alpha_c = 5^\circ 30'$ от горизонтали вверх (G_r на фиг. 75 для левого колеса показан пунктиром).

в) Определение суммарного противовеса на радиусе кривошипа колеса ведущей оси паровоза С^у

В колесе ведущего ската суммарный противовес G_r будет складываться: 1) из противовеса $P = 408,912$ кг под углом $\alpha = 4^\circ 30'$ для уравнивания центробежных сил вращающихся не-

уравновешенных масс ската (фиг. 51); 2) вертикально уравнивающего противовеса $q_s = 168,31 \text{ кг}$ под углом $\alpha_s = 10^\circ$ для уравнивания сил Y_φ и $Y_\varphi + 270^\circ$ (фиг. 58) и 3) противовеса $P_k = 30,65 \text{ кг}$, который необходимо поместить в правом колесе под углом $\alpha_k^{np} = 0^\circ 40'$ и в левом колесе под углом $\alpha_k^{лев} = 25^\circ 40'$ для уравнивания центробежных сил контр-кривошипов правой и левой стороны (фиг. 54).



Фиг. 76.

Из фиг. 76:

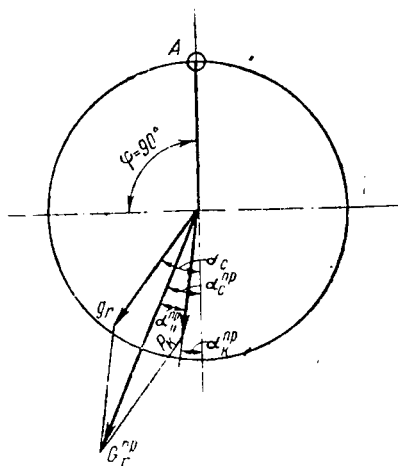
$$\begin{aligned}
 g_r &= \sqrt{q_s^2 + P^2 + 2q_s P \cos(\alpha_s - \alpha)} = \\
 &= \sqrt{168,31^2 + 408,912^2 +} \\
 &\quad + 2 \cdot 168,31 \cdot 408,912 \cdot \cos(10^\circ - 4^\circ 30') = \\
 &= 576,67 \text{ кг}.
 \end{aligned}$$

Воспользовавшись выражением (100), определяем $\cos \alpha_1$:

$$\begin{aligned}\cos \alpha_1 &= \frac{P^2 + g_r^2 - q_s^2}{2Pg_r} = \\ &= \frac{408,912^2 + 576,67^2 - 168,31^2}{2 \cdot 408,912 \cdot 576,67} = 0,99961.\end{aligned}$$

Откуда:

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= 1^\circ 40', \\ \alpha_e &= \alpha + \alpha_1 = 4^\circ 30' + 1^\circ 40' = 6^\circ 10' .\end{aligned}$$



Фиг. 77.

Учитывая противовес $P_k = 30,65 \text{ кг}$, определяем суммарный противовес в правом колесе G_r^{np} (фиг. 77):

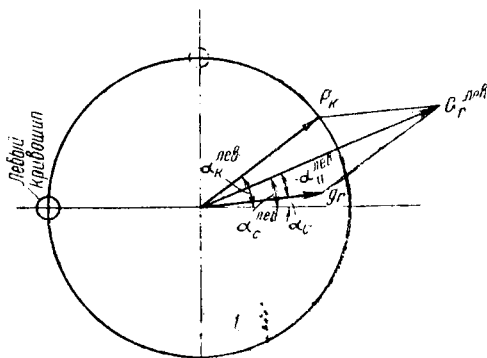
$$\begin{aligned}G_r^{np} &= \sqrt{g_r^2 + P_k^2 + 2g_r P_k \cos(\alpha_e - \alpha_k^{np})} = \\ &= \sqrt{576,67^2 + 30,65^2 + \\ &+ 2 \cdot 576,67 \cdot 30,65 \cdot \cos(6^\circ 10' - 0^\circ 40')} = \\ &= 607,19 \text{ кг}.\end{aligned}$$

Из выражения (100) определяем значение $\cos \alpha_{||}^{np}$:

$$\begin{aligned}\cos \alpha_{||}^{np} &= \frac{P_k^2 + (G_r^{np})^2 - g_r^2}{2P_k G_r^{np}} = \\ &= \frac{30,65^2 + 607,19^2 - 576,67^2}{2 \cdot 30,65 \cdot 607,19} = 0,99584.\end{aligned}$$

По таблице находим, что

$$\alpha_{||}^{np} = 5^\circ 10';$$



Фиг. 78.

тогда:

$$\alpha_c^{np} = \alpha_k^{np} + \alpha_{||}^{np} = 0^\circ 40' + 5^\circ 10' = 5^\circ 50'.$$

Итак, в правом колесе ведущего ската на радиусе кривошипа мы должны поместить суммарный противовес $G_r^{np} = 607,19$ кг под углом $\alpha_c^{np} = 5^\circ 50'$.

Определяем суммарный противовес в левом колесе $G_r^{лев}$ (фиг. 78), учитывая противовес $P_k =$

$= 30,65 \text{ кг}$, расположенный под углом $\alpha_k^{лев} = 25^\circ 40'$ от горизонтали вверх.

$$\begin{aligned} G_r^{лев} &= \sqrt{g_r^2 + P_k^2 + 2g_r P_k \cos(\alpha_k^{лев} - \alpha_c)} = \\ &= \sqrt{576,67^2 + 30,65^2 +} \\ &\quad + 2 \cdot 576,67 \cdot 30,65 \cdot \cos(25^\circ 40' - 6^\circ 10')} = \\ &= 605,65 \text{ кг}. \end{aligned}$$

Из выражения (100) определяем значение $\cos \alpha_{II}^{лев}$:

$$\begin{aligned} \cos \alpha_{II}^{лев} &= \frac{g_r^2 + (G_r^{лев})^2 - P_k^2}{2g_r G_r^{лев}} = \\ &= \frac{576,67^2 + 605,65^2 - 30,65^2}{2 \cdot 576,67 \cdot 605,65} = 0,99986. \end{aligned}$$

В таблице тригонометрических величин находим значение угла $\alpha_{II}^{лев} = 1^\circ$.

Тогда:

$$\alpha_c^{лев} = \alpha_c + \alpha_{II}^{лев} = 6^\circ 10' + 1^\circ = 7^\circ 10'.$$

Итак, в левом колесе ведущего ската на радиусе кривошипа мы должны поместить суммарный противовес $G_r^{лев} = 605,65 \text{ кг}$ под углом $\alpha_c^{лев} = 7^\circ 10'$.

§ 5. Размещение суммарного противовеса в колесе

а) Конфигурация противовесов

В § 1 этой главы при уравнивании центробежных сил вращающихся неуравновешенных масс мы выяснили, что уравнивающий груз в целях экономии металла выгоднее помещать как можно дальше от центра вращения. На практике это обстоятельство используется полностью, что

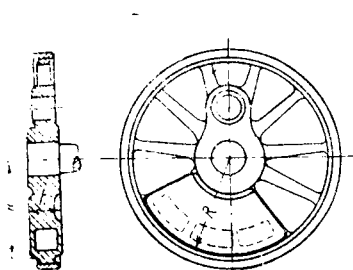
видно из следующего. Действие суммарного противовеса G_p , центр тяжести которого находится в плоскости противовеса на расстоянии радиуса кривошипа r от центра вращения, получают за счет меньшего по величине груза G_e , но более удаленного от центра вращения. Расстояние от центра тяжести груза G_e до центра вращения оси определяют из условия:

$$G_e \cdot \varrho = G_p \cdot r, \quad (101)$$

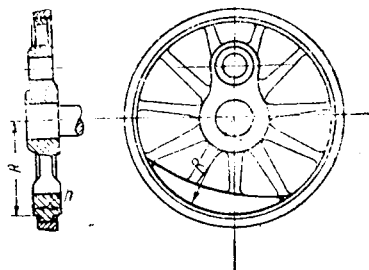
откуда:

$$\varrho = \frac{G_p \cdot r}{G_e}. \quad (101')$$

Груз G_e представляет собой большей частью сплошную отливку, сосредоточенную у обода ко-



Фиг. 79.

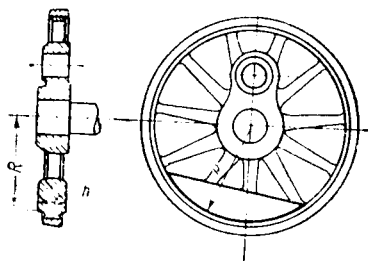


Фиг. 80.

леса в виде кольцевого сектора (фиг. 79), серпа (фиг. 80) или сегмента (фиг. 81). Эта сплошная отлитая в колесе масса груза G_e , центробежная сила которой при движении паровоза уравнивает полностью центробежные силы вращающихся неуравновешенных масс ската и частично уравнивает силы Y_φ и $Y_{\varphi+270^\circ}$ и силы X_φ и $X_{\varphi+270^\circ}$, — называется **противовесом**. Толщина противовеса h , которую в целях уменьшения груза G_e стремятся брать как можно больше, определяется для каждого колеса из конструктивных со-

ображений. Соображения на этот счет таковы: толщина противовеса h должна быть выбрана такой, чтобы был оставлен зазор, с одной стороны, между внешней стороной противовеса и дышлами и с другой---между внутренней стороной противовеса и выступающими частями рамы.

Радиус заливки противовеса R (расстояние от центра колеса до наиболее удаленной точки противовеса) ограничивается условиями безопасного прохода колеса по верхнему строению пути.



Фиг. 81.

Отливка противовеса в виде сектора часто производится в ведущих колесах малого диаметра товарных паровозов. Величину груза G_0 в ведущих колесах малого диаметра получить полностью за счет сплошной стальной отливки противовеса

часто не представляется возможным, почему в таком случае противовес отливают пустотелым и заливают свинцом, удельный вес которого больше удельного веса стали (при расчете противовесов принимают удельный вес стали $\gamma = 7,85 \text{ г/см}^3$; уд. вес свинца $\gamma = 11,3 \text{ г/см}^3$).

На колесах большого диаметра паровозов старых серий имела распространение форма заливки противовесов серпообразного вида (фиг. 80) из соображений постепенного перехода толстых частей противовеса к меньшим у сечения обода. Такая форма заливки противовесов и сейчас имеет распространение в Америке.

Наивыгоднейшей формой противовесов с более удаленным центром тяжести при одной и той же площади [фигуры является заливка сегментом

с хордой l , перпендикулярной к оси симметрии сегмента, на которой (на оси симметрии) на расстоянии q от центра колеса должен лежать центр тяжести груза G_e (фиг. 81).

На паровозах ФД, ПС противовесы в колесах отлиты в виде сегмента. На паровозе СУ тоже в виде сегмента из сплошной стальной отливки.

б) Формулы для размещения противовеса в колесе в виде сегмента

Если мы знаем уд. вес материала, из которого отливается противовес, и знаем толщину противовеса h , то выражение (101) может быть переписано так:

$$v_e \cdot q = v_r \cdot r; \quad \text{или} \quad F_e \cdot q = F_r \cdot r. \quad (102)$$

В выражении (102) произведение $F_r \cdot r$ нам известно (ведь $F_r \cdot h \cdot \gamma = G_r$; G_r — знаем; откуда:

$F_r = \frac{G_r}{\gamma h}$; r — радиус кривошипа); F_e — площадь противовеса сегмента; q — расстояние от центра колеса до центра тяжести сегмента.

В справочниках по математике для сегмента приводится такая формула:

$$q = \frac{l^3}{12 F_e}, \quad (103)$$

где:

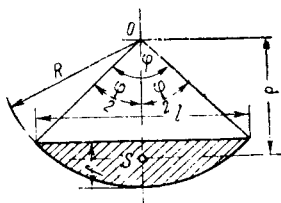
q — расстояние от центра O (фиг. 82) до центра тяжести сегмента;

l — длина хорды;

F_e — площадь сегмента.

Это же выражение (103) можем переписать в таком виде:

$$F_e \cdot q = \frac{l^3}{12} \quad (103a)$$



Фиг. 82.

В нашем случае при равенстве $F_e \cdot \varrho = F_r \cdot r$ выражение (103а) может быть написано так:

$$l^3_{12} = F_r \cdot r,$$

откуда

$$l = \sqrt[3]{12 \cdot F_r \cdot r}. \quad (104)$$

Помимо длины хорды l , определяемой по выражению (104), при определенном радиусе заливки противовеса R предпочитают еще знать центральный угол φ и стрелу сегмента f .

Для определения угла φ , глядя на фиг. 82, напишем следующее равенство:

$$\sin \frac{\varphi}{2} = \frac{l}{2R}. \quad (105)$$

Зная значение $\sin \frac{\varphi}{2}$, определяем угол φ . Стрелу сегмента f будем определять по такой формуле:

$$f = R - R \cos \frac{\varphi}{2} = R (1 - \cos \frac{\varphi}{2}) = 2R \sin^2 \frac{\varphi}{4}. \quad (106)$$

в) Размещение суммарного противовеса в колесе первой сцепной оси паровоза СУ

В § 4 этой главы мы нашли, что в правом и левом колесе первой сцепной оси суммарный противовес G_r на радиусе кривошипа равен 197,16 кг. Противовес, как уже говорилось выше, будет иметь форму сегмента. Из конструктивных соображений берем толщину противовеса $h = 130$ мм и радиус заливки $R = 805$ мм.

Определяем произведение $F_r \cdot r$:

$$F_r \cdot r = \frac{G_r}{\gamma \cdot h} \cdot r = \frac{197,16 \cdot 1000 \cdot 35}{7,85 \cdot 13} = 67\,322 \text{ см}^3.$$

По формуле (104) определяем длину хорды l :

$$l = \sqrt[3]{12 \cdot F_r \cdot r} = \sqrt[3]{12 \cdot 67\,322} = 93,14 \text{ см}.$$

Определим центральный угол сегмента противовеса, определив сначала из выражения (105) значение $\sin \frac{\varphi}{2}$:

$$\sin \frac{\varphi}{2} = \frac{l}{2R} = \frac{93,14}{2 \cdot 80,5} = 0,5785; \quad \frac{\varphi}{2} = 35^{\circ}20';$$

$$\varphi = 70^{\circ}40'.$$

Стрелу сегмента f определяем по формуле (106):

$$f = 2R \sin^2 \frac{\varphi}{4} = 2 \cdot 805 \sin^2 \left(\frac{70^{\circ}40'}{4} \right) = 140 \text{ мм.}$$

Таким образом, получили, что противовес правого и левого колеса первой сценной оси может быть отлит по одной модели.

г) Размещение суммарного противовеса в правом и левом колесе ведущей оси паровоза СУ

В § 4 этой главы мы нашли, что в правом и левом колесе на радиусе кривошипа должны поместить разные по величине суммарные противовесы G_r и под разными углами α_c . Поэтому противовесы правого и левого колеса не могут быть отлиты по одной модели.

Определим вперед размеры противовеса правого колеса ведущей оси. Мы уже знаем, что $G_r^{np} = 607,19 \text{ кг}$. Находим, что $h = 210 \text{ мм}$; $R = 805 \text{ мм}$. Определяем значение $F_r^{np} \cdot r$:

$$F_r^{np} \cdot r = \frac{G_r^{np}}{\gamma \cdot h} \cdot r = \frac{607,19 \cdot 1000 \cdot 35}{7,85 \cdot 21} = 128910 \text{ см}^3;$$

тогда:

$$l^{np} = \sqrt[3]{12 \cdot F_r^{np} \cdot r} = \sqrt[3]{12 \cdot 128910} = 115,6 \text{ см};$$

$$\sin \frac{\varphi}{2} = \frac{l^{np}}{2R} = \frac{115,6}{2 \cdot 80,5} = 0,7174; \quad \varphi = 91^{\circ}40';$$

$$f = 2R \sin^2 \frac{\varphi}{4} = 2 \cdot 805 \sin^2 (22^{\circ}55') = 242,5 \text{ мм.}$$

Определим размеры противовесов левого колеса ведущей оси. Известно, что $G_r^{лев} = 605,65 \text{ кг}$. Значения h и R — те же, что и для правого колеса. Определяем значение $F_r^{лев} \cdot r$:

$$F_r^{лев} \cdot r = \frac{G_r^{лев}}{\gamma \cdot h} \cdot r = \frac{605,65 \cdot 1000 \cdot 35}{7,85 \cdot 21} = 128580 \text{ см}^3;$$

тогда:

$$l^{лев} = \sqrt[3]{12 \cdot F_r^{лев} \cdot r} = \sqrt[3]{12 \cdot 128580} = 115,4 \text{ см.}$$

$$\sin \frac{\varphi}{2} = \frac{l^{лев}}{2R} = \frac{115,4}{2 \cdot 80,5} \cong 0,71677; \varphi \cong 91^\circ 40';$$

$$I_2 = 2R \sin^2 \frac{\varphi}{4} = 2 \cdot 805 \sin^2 (22^\circ 55') \cong 242,5 \text{ мм.}$$

На практике при точном расчете противовесов, если принимали ранее спицы уравновешенными, учитывают центробежные силы части спиц, попавших в противовесы.

Для того, чтобы иметь возможность получать отливку правого и левого колеса ведущей оси по одной модели, в колеса помещают под определенным углом избыточный противовес.

**Литературные источники, которые были
использованы автором при написании
данной книги**

1. Инж.-мех. Яковлев Н. А., Кинематика механизмов. Часть I. Госуд. авиац. и автотракторное изд-во Москва — Ленинград, 1933 г.
 2. Техническая энциклопедия. Том. IX (Инерция)
 3. Проф. д-р Левенсон Л. Б., Действие сил инерции в машинах. „Вестник инженеров и техников“, № 6, 1936 г.
 4. Проф. Дельби, Уравновешивание машин. Перевод с третьего англ. издания.
 5. Инж. Нольтейн Е. Е., Курс паровозов. Выпуск VII. Теория и расчет противовесов.
 6. Проф. Раевский А. С., Незданные записки по уравновешиванию сил инерции движущего механизма машины паровоза (Коломзавод).
 7. Инж.-техн. Колчин Н. И., Силы инерции паровой машины и их уравновешивание при помощи противовесов.
 8. Инж. Ланский В. М., Расчет противовесов. „Локомотивостроение. Научно-технический сборник“, № 3 (12), 1935 г.
 9. ИТС, Паровоз. Глава IV. Уравновешивание сил инерции движущего механизма.
-

Редактор *К. Грикевич*
Техред *П. Хитров*

Уголн. Главлита Б-14467 ЖДИЗ 3122 Ж-16.

Тираж 6 230 экз. Зак. тип. 97.

Разм. бум. 72x105 $\frac{1}{32}$. Объем 4 $\frac{5}{8}$ п. л. 57.728 зн. в п. л.

Сдано в набор 13/XI—36 г.

Подписано к печати 16/III—37 г.

5-я тип. Трансжелдориздата НКПС. Москва, Каланчевский туп., д. 3/5.

ЦЕНА 1 р. 50 к.

Д
7027



**Издания
Трансжелдориздата
высылаются
наложенным платежом
Железнодорожная
„КНИГА—ПОЧТОЙ“
Москва, 9, ул. Горького,
д. 42/2
и продаются в магазинах
Книгообъединения
ОГИЗа**
