

а 82685

СССР — НКПС

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ИНСТИТУТА  
ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

---

*ВЫПУСК VII*

# РАСЧЕТЫ ПО КОНТАКТНОЙ СЕТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

СБОРНИК СТАТЕЙ

~~0.82685~~  
621.33  
P24

Депозитарий

СССР—НКПС

ТРУДЫ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ИНСТИТУТА  
ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

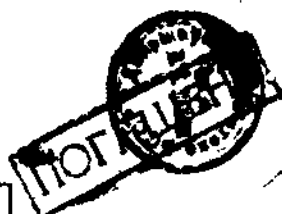
ВЫПУСК VIII

РАСЧЕТЫ  
ПО КОНТАКТНОЙ СЕТИ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

СБОРНИК СТАТЕЙ

11409352  
Изм. 1953 г. 82685

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ  
БИБЛИОТЕКА



Сборник содержит расчетные работы по контактной подвеске электрических ж. д., освещающие такие важные факторы, как ветровые отклонения (для случая бесфиксаторной подвески), расчеты прочности оснований деревянных опор, номографические расчеты состояния цепной подвески при различных температурных и нагрузочных условиях. Исследование взаимодействия токоприемника и контактного провода с точки зрения их наименьшего износа, а в связи с этим вопрос о массе пантографа, его давлении на провод, лыжах и пр. также освещены в настоящем сборнике. Кроме того сборник содержит теоретическое освещение вопроса о защите контактной сети от перенапряжений.

Книга рассчитана на инженерно-технический персонал, проектировщиков и студентов старших курсов вузов, по специальности.

1966

2009

Редактор Я. И. Придорогин

Техн. редактор Ив. Потешулин

Уполн. Главлита Ц-80175

ЖДИЗ 642 Ж-6

Зак. тип. 8370

Тираж 2635 экз.

Размер бум. 62×94  $\frac{1}{16}$

9 п. л. 51200 зн. в п. л.

Сдано в набор 10/III—34 г.

Подписано к печати 11/V—34 г.

5-я тип. «Пролетарское слово» Трансжелдориздата. Москва, Каланчевский туп., д 3/1

## ОГЛАВЛЕНИЕ

---

|                                                                                                                                         | Стр. |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1. От Научно-исследовательского института электрификации ж. д. . . . .                                                                  | 5    |
| 2. Инж. Д. К. Минов. Учет ветрового отклонения при бесфиксаторной цепной подвеске. . . . .                                              | 7    |
| 3. Инж. Д. К. Минов. Расчет прочности оснований опор контактного оборудования жел. дорог (применительно к деревянным опорам). . . . .   | 16   |
| 4. Инж. В. А. Тимофеев. Номограмма для расчета цепной подвески. . .                                                                     | 46   |
| 5. Инж. А. В. Воронин. Распределение давления между лыжами пантографа. . . . .                                                          | 57   |
| 6. Инж. В. В. Спасский. Результаты исследования взаимодействия токоприемника и контактного провода в условиях работы сети на Сев. ж. д. | 63   |
| 7. Инж. А. В. Воронин. Определение приведенной массы пантографа . .                                                                     | 90   |
| 8. Инж. С. М. Сердинов. Перенапряжения в выпрямленных сетях постоянного тока . . . . .                                                  | 102  |

---

## ОТ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ИНСТИТУТА ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Исключительно ответственная роль контактной сети для бесперебойной работы электрических ж. д. требует такого устройства всей сети, работающей без резерва, которое обеспечивало бы надежную работу при разных режимах в различных районах СССР, нередко резко отличающихся между собой. Значительная заграничная практика работы электрических ж. д. не дала, однако, теоретического обобщения и экспериментального освещения ряда важнейших вопросов. К их числу относится в первую очередь вопрос о взаимодействии токоприемника и контактного провода, имеющий большое значение для безыскрового токоснимания, а следовательно для нормальной работы двигателей, коммутационной аппаратуры и удлинения сроков службы как провода, так и токоприемных пластин пантографа.

Этому вопросу посвящены три статьи сборника: две из них принадлежат инж. А. В. Ворониному и одна — инж. В. В. Спасскому.

Стремление удешевить сеть и сократить расход дефицитных в настоящее время материалов привело к применению деревянных опор и поставило под сомнение безусловную необходимость применения фиксаторов. Расчет прочности оснований опор освещает работа инж. Д. К. Минова; другая его работа, помещенная в сборнике, дает метод расчета ветрового отклонения контактного провода при бесфиксаторной подвеске. Как известно, одним из препятствий к отказу от фиксаторов является возможность отклонения контактного провода от оси пути и выход его за габариты пантографа под влиянием ветра.

При проектировании контактной сети механический расчет ее существующими аналитическими методами приводит к решению значительного количества кубических уравнений, на что затрачивается много времени и сил. Предлагаемый инж. В. А. Тимофеевым графический метод расчета с помощью разработанной им номограммы позволит резко сократить затраты на проектирование, заменив все расчеты простым графическим построением по номограмме.

Наконец, очень важен для обеспечения нормальной работы сети вопрос перенапряжений и методов защиты от них. Если для сетей трехфазного тока по этому вопросу имеется большой теоретический и экспериментальный материал, то для сетей постоянного тока

интересующих нас напряжений мировая литература, в том числе и наша, советская, дает очень скудные материалы. В работе инж. С. М. Сердинова впервые сделана попытка теоретического обобщения этого вопроса и дана наметка путей его экспериментальной проработки с тем, чтобы выбрать наиболее совершенную защиту контактной сети от перенапряжений и обеспечить бесперебойное энергоснабжение электрических ж. д. Первым шагом к получению опытных данных является наблюдение за перенапряжениями на Сурамском перевале, поставленное Закавказским филиалом Института электрификации ж. д.

*Начальник Института инж. А. М. Кудряшев*

Декабрь 1933 г.

## УЧЕТ ВЕТРОВОГО ОТКЛОНЕНИЯ ПРИ БЕСФИКСАТОРНОЙ ЦЕПНОЙ ПОДВЕСКЕ

Для удержания контактного провода в пределах рабочей части токоприемника при цепной подвеске применяются, как известно, фиксаторы. На кривых при хордовой подвеске фиксаторы являются абсолютно обязательными (при косой подвеске роль фиксатора могут выполнять струны). На прямых фиксатор позволяет получить значительную длину пролета и, кроме того, обеспечивает равномерный износ токоприемника (зигзаг контактного провода). С другой стороны, устранение фиксаторов на прямых позволяет удешевить стоимость опорного пункта и, кроме того, устраняет из контактной сети элемент, являющийся одной из наиболее частых причин аварий (неисправность фиксатора зачастую вызывает срыв пантографа, а иногда и обрыв контактного провода). Практика электрифицированного участка Северных ж. д. показывает, что 30% аварий контактной сети произошло из-за наличия фиксаторов. Помимо этого, в местах фиксации всегда наблюдается усиленный местный износ контактного провода.

Износ токоприемных пластин пантографа при отсутствии зигзага менее равномерный, чем при зигзаге, все же распространяется на значительную длину пластин вследствие колебания контактного оборудования и самого пантографа, а также прогиба рессор подвижного состава. Что же касается ветрового отклонения, то при скорости ветра 20 м/сек, предусмотренной нормами для защищенных местностей, оно не является значительным. Все это подтверждает полную возможность применения в некоторых случаях "бесфиксаторной подвески" на прямых. Такой тип цепной подвески имеет применение в США. По этому же типу в СССР оборудованы некоторые участки Северных ж. д. и Сурамский перевал.

*Настоящая статья посвящена методологии расчета длины пролета при бесфиксаторной подвеске.* \* В конце дается применение этого метода для фиксаторной подвески.

### 1. Бесфиксаторная подвеска

Для вывода математических зависимостей введем следующие условные обозначения:

- |                                                                                                      |          |                                                                                  |         |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------------------------------------------------------------------------------|---------|
| 1. Стрела провеса несущего троса при горизонтальном контактом проводе при отсутствии ветра . . . . . | $\Phi$ м | 3. То же контактного провода . . . . .                                           | $l_0$ м |
| 2. Горизонтальная составляющая стрелы провеса несущего троса при ветровом режиме . . . . .           | $F_0$ м  | 4. Горизонтальная высота подвески троса . . . . .                                | $l_m$   |
|                                                                                                      |          | 5. Горизонтальная составляющая отклонения точки подвеса несущего троса . . . . . | $b_0$ м |
|                                                                                                      |          | 6. Длина наименьшей струны . . . . .                                             | $K$ м   |
|                                                                                                      |          | 7. Длина пролета . . . . .                                                       | $a$ м   |

\* См. "Электричество" № 15 1931 г.

|                                                                                  |              |                                                                                            |                        |
|----------------------------------------------------------------------------------|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| 8. Расстояние между струнами . . . . .                                           | $t$ м        | 16. Натяжение в несущем тросе . . . . .                                                    | $H$ кг                 |
| 9. Наибольшее отклонение контактного провода от середины токоприемника . . . . . | $\epsilon$ м | 17. Натяжение в контактном проводе . . . . .                                               | $h$ кг                 |
| 10. Удельное ветровое давление на несущий трос . . . . .                         | $W'$ кг/м    | 18. Сечение контактного провода . . . . .                                                  | $S$ мм <sup>2</sup>    |
| 11. Удельное ветровое давление на контактный провод . . . . .                    | $W''$ кг/м   | 19. Модуль нормальной упругости материала контактного провода . . . . .                    | $E$ кг/мм <sup>2</sup> |
| 12. Удельная горизонтальная реакция струя . . . . .                              | $W_3$ кг/м   | 20. То же несущего троса . . . . .                                                         | $E$ кг/мм <sup>2</sup> |
| 13. Вес погонного метра контактного провода . . . . .                            | $g$ кг/м     | 21. Температурный коэффициент линейного расширения материала контактного провода . . . . . | $\alpha$ 1/° C         |
| 14. Вес погонного метра системы цепной подвески . . . . .                        | $P$ кг/м     | 22. Температура . . . . .                                                                  | ° C                    |
| 15. Вес конструкции для подвески несущего троса . . . . .                        | $2p$ кг      |                                                                                            |                        |

### Режимы:

Исходный режим: ветер отсутствует; контактный провод на прямой располагается в вертикальной плоскости, проходящей через ось пути, причем точки его подвеса к струнам находятся на одной горизонтальной прямой.

При ветровом режиме условно принимаем расположение контактного провода также в горизонтальной плоскости.

Величины, относящиеся к исходному режиму, отмечаем индексом „0“, то же к ветровому режиму — оставляем без индексов.

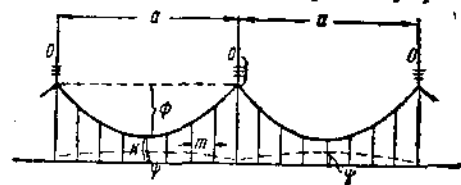


Рис. 1. Боковой вид на фиксаторную подвеску.

При исчислении удельных нагрузок, действующих на несущий трос и на контактный провод, соответствующие нагрузки на струны распределяем между ними поровну.

При выводе математических зависимостей приняты следующие предположки:

1. При ветровом режиме (температура + 5° C) предполагается, что точки подвеса контактного провода к струнам располагаются в одной горизонтальной плоскости. На самом деле контактный провод имеет некоторый провес  $\phi$  с наивысшей точкой в середине пролета (см. рис. 1). Пренебрегая провесом контактного провода в струновом пролете, мы можем считать, что при этом контактный провод расположен целиком в горизонтальной плоскости.

2. Линию отклоненного ветром контактного провода принимаем за параболу с точкой перегиба в месте расположения наиболее короткой струны (см. точку С на рис. 2), играющей роль фиксатора.

3. Тормозящее влияние струн учитывается в виде равномерно распределенной нагрузки ( $W_3$ ), действующей на контактный провод и передаваемой через струны на несущий трос. Эта предположка, применяемая и при расчете косой подвески, справедлива лишь в случае параллельного расположения между собой всех струн при отклоненном контактном проводе. Для бесфиксаторной подвески это положение является приблизительно верным, так как величина отклонения контактного провода от линии СС (рис. 2)

возрастает с увеличением длины струны. Таким образом удельная горизонтальная нагрузка, действующая на контактный провод в пролете СС, равна:  $(W'' - W_3)$ , как это представлено на рис. 3.

4. В соответствии с пунктами 2 и 3 (рис. 3) на несущий трос действуют равномерно распределенная нагрузка  $(W' + W_3)$  и сосредоточенная нагрузка в середине пролета (от средней струны в точке В), равная  $(W'' - W_3) \cdot a$ .

5. Натяжение в несущем тросе при ветровом режиме (при бесфиксаторной подвеске) принимается, исходя из равномерно распределенной нагрузки, действующей на всю систему

$$\sqrt{P_2 + (W' + W'')^2}.$$

Это допустимо в виду небольшого значения величины  $(W'' - W_3) \cdot a$ , по сравнению с другими нагрузками, действующими на систему.

6. Величину удельной реакции струн  $(W_3)$  найдем, согласно способу проф. Шевалина, путем замены системы струн одной эквивалентной струной  $e$  и  $L$  (рис. 2), соединяющей центры тяжести нагрузок, действующих соответственно на несущий трос и на контактный провод. Принимая величину  $(W_3)$  постоянной по длине пролета, будем иметь места нахождения точек  $e$  и  $L$  соответственно в центрах тяжести несущего троса и контактного провода. При этом линию отклоненного несущего троса примем подобно линии контактного провода за параболу.

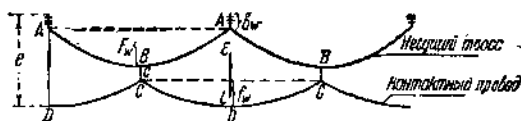


Рис. 2. Горизонтальная проекция отклонений ветра бесфиксаторной цепной подвески.

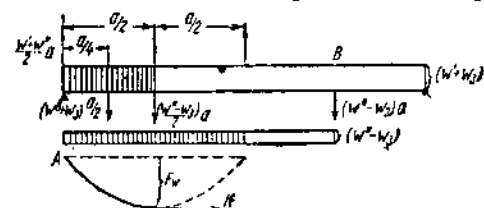


Рис. 3. Горизонтальные усилия, действующие на бесфиксаторную цепную подвеску

$$F_{wc}H \frac{(w' + w_3) a^2}{8} + \frac{(w'' - w_3) a^2}{4}$$

7. Рассматривается, как более общий случай, подвеска на подвесных изоляторах.

Наибольшее отклонение контактного провода от середины токоприемника ( $e$ ) будет иметь место в точке D согласно рис. 2. В таком случае величина этого отклонения равна:

$$e = f_w + F_w + c + b_w \quad (I)$$

где  $c$  — горизонтальная проекция длины наименьшей струны.

Величина горизонтального отклонения контактного провода от линии СС (рис. 2) согласно предпосылкам 1 — 3

$$f_w = \frac{a^2}{8h} (W'' - W_3). \quad (II)$$

Проекцию горизонтального отклонения несущего троса найдем, мысленно рассекая несущий трос посередине пролета и составляя уравнение моментов сил, действующих на отсеченную часть троса. Эти силы: 1) равномерно распределенная нагрузка  $(W' + W_3)$ , дающая равнодействующую  $(W' + W_3) \cdot \frac{a}{2}$ , приложенную посередине полупролета.

2) Сосредоточенная нагрузка  $\left(\frac{W'' - W_2}{2} \cdot a\right)$  от действия половины реакции эквивалентной струны (вторая половина должна быть отнесена к другому полупролету). В таком случае согласно рис. 3 и предпосылки 4 имеем:

$$F_w H = \frac{(W' + W_2)a^2}{8} + \frac{(W'' - W_2) \cdot a^2}{4};$$

$$F_w = \frac{(W' + W_2)a^2}{8H} + \frac{(W'' - W_2)a^2}{4H} = \frac{a^2}{8H} (W' + 2W'' - W_2). \quad (III)$$

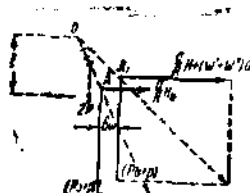


Рис. 4. Отклонение изолятора (величина  $b_w$ ).

Горизонтальное отклонение конструкции для подвески несущего троса (при подвесных изоляторах) найдем, приняв центр тяжести этой конструкции, расположенный приблизительно в середине ее длины. Разлагая вес конструкции (2  $p$ ) на силы, приложенные в точке подвеса троса к конструкции и самой конструкции к опоре, получим величину составляющей в точке подвеса, равную  $p$ .

В таком случае согласно рис. 4 имеем:

$$b_w = l \frac{(W' + W'') + \frac{H}{R}}{\sqrt{\left(P + \frac{p}{a}\right)^2 + \left(W' + W'' + \frac{H}{R}\right)^2}} - \frac{\frac{H_0}{R}}{\sqrt{\left(P_0 + \frac{p}{a}\right)^2 + \frac{H_0^2}{R^2}}}, \quad (IV)$$

где  $R$  — радиус кривой в метрах.

Горизонтальная составляющая отклонения фиксирующей струны найдена согласно рис. 5:

$$C = K \cdot \sin \beta.$$

Величина синуса угла наклона фиксирующей струны найдется, если мы возьмем правильное соотношение между горизонтальной и вертикальной составляющими нагрузок, действующих на эту струну. Первая из них согласно рис. 5 равна  $(W'' - W_2) \cdot a$ . Точное определение второй составляющей затруднительно в виду того, что она зависит не только от длины струнового пролета ( $m$ ), но также и от провеса контактного провода. Дело в том, что боковое отклонение фиксирующей струны вызывает в точках  $C$  подъем контактного провода больше, чем в других его точках, а следовательно в точку  $C$  передается помимо веса струнового пролета ( $mg$ ) вес части остального пролета;  $q$  ( $a = m$ ), причем  $q = \frac{8\psi h}{a^2}$ , где  $\psi$  — вертикальная составляющая стрелы провеса контактного провода. Очевидно, что  $q$  возрастает вместе с  $\psi$ , т. е. вместе с отклонением струны.

В соответствии с этим для фиксирующей струны уместно принять тот же угол отклонения, который имеет эквивалентная струна, т. е.  $< \beta$ . Затем в виду близости между  $W_2$  и  $W''$  примем

$$\sqrt{g^2 + W_2^2} \cong \sqrt{g^2 + W''^2}.$$

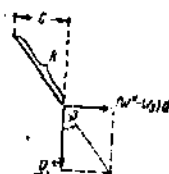


Рис. 5.

В таком случае:

$$C = K \sin \beta_0 = K \frac{W_3}{\sqrt{g^2 + W'^2}}. \quad (V)$$

Переходим к определению величины удельной реакции струн ( $W_3$ ). Согласно предпосылки (6) имеем:

$$W_3 = g \operatorname{tg} \beta_0, \quad (a)$$

где  $\beta_0$  — угол наклона к вертикали эквивалентной струны.

Угол  $\beta_0$  определяется согласно рис. 6 следующей зависимостью

$$\operatorname{tg} \beta_0 = \frac{\lambda}{sL'}, \quad (б)$$

где:

$sL'$  — длина эквивалентной струны,

$\lambda$  — горизонтальная проекция этой струны.

Длину эквивалентной струны согласно рис. 7 примем равной:

$$sL' = \frac{1}{3} \Phi + K. \quad (в)$$

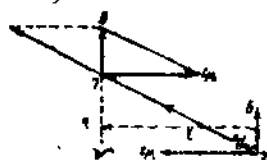


Рис. 6. Усилия, действующие на эквивалентную струну.

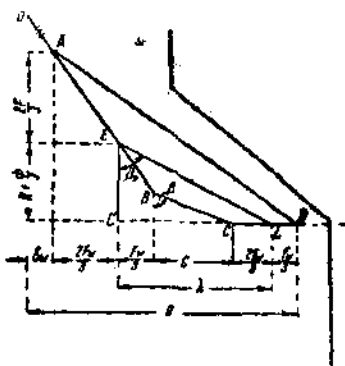


Рис. 7. Боковой вид на отклоненную бесфиксаторную подвеску.

Горизонтальную проекцию эквивалентной струны легко найдем из выведенных уже нами зависимостей (II), (III), (V) и рис. 7.

$$\lambda = \frac{1}{3} F_w + c + \frac{2}{3} f_w.$$

Отсюда имеем

$$\lambda = \frac{a^2}{24H} (w' + 2w'' - w_3) + \frac{2a^2}{24h} (w'' - w_3) + \frac{w^2 K}{\sqrt{g^2 + w'^2}},$$

или

$$\lambda = \frac{a^2}{24} \left[ \frac{w' + 2w''}{H} + \frac{2w''}{h} - w_3 \left( \frac{1}{H} + \frac{2}{h} - \frac{24K}{a^2 \sqrt{g^2 + w'^2}} \right) \right]. \quad (г)$$

Воспользовавшись выражениями а, б, в и г имеем

$$w_3 = \frac{\frac{ga^2}{24} \left[ \frac{w' + 2w''}{H} + \frac{2w''}{h} - w_3 \left( \frac{1}{H} + \frac{2}{h} - \frac{24K}{a^2 \sqrt{g^2 + w'^2}} \right) \right]}{\frac{1}{3} \Phi + K}. \quad (a')$$

Отсюда получаем выражение для  $w_3$ :

$$w_3 = \frac{\frac{w' + 2w''}{H} + \frac{2}{h} w''}{\frac{8\phi}{ga^3} + \frac{24K}{a^3} \left( \frac{1}{g} - \frac{1}{\sqrt{g^2 + w''^2}} \right) + \frac{1}{H} + \frac{2}{h}} \quad (VI)$$

Для определения величины напряжения в контактном проводе ( $h$ ) при бесфиксаторной подвеске, в виду небольшой величины удельного давления ( $w'' = w_3$ ), приходящегося на контактный провод, можно воспользоваться формулой Картера:

$$h = h_0 + a s s (t_0 - t). \quad (VII)$$

Величина тяжения в несущем тросе определяется согласно предпосылке 5. В обоих случаях для определения величины тяжения не требуется знать удельной реакции струи. Таким образом все величины, входящие в формулу (V), могут быть приняты независимыми от  $W_3$ , что значительно упрощает расчет.

*Примерный расчет.*

Дано:

|                               |                          |
|-------------------------------|--------------------------|
| $a = 60 \text{ м}$            | $\Phi = 0,675 \text{ м}$ |
| $W' = W'' = 0,7 \text{ кг/м}$ | $K = 0,5 \text{ м}$      |
| $g = 0,9 \text{ кг/м}$        | $2p = 20 \text{ кг}$     |
| $P_0 = 1,5 \text{ кг/м}$      | $l = 0,5 \text{ м}$      |
| $h = 600 \text{ кг}$          | $R = \infty$             |
| $H_0 = 1000 \text{ кг}$       |                          |

Расчетная удельная нагрузка, действующая на несущий трос при ветровом режиме:

$$Q = \sqrt{P_0^2 + (W' + W'')^2} = \sqrt{1,5^2 + 1,4^2} = 2,05 \text{ кг/м.}$$

Натяжение в несущем тросе при ветровом режиме при температуре  $+5^\circ\text{C}$ :

$$H - \frac{(Qa)^2 ES}{24H^2} = H_0 - \frac{(P_0 a)^2 ES}{24H_0^2} + aEs (t_0 - t).$$

Принимая  $t = t_0$ , имеем:

$$H - \frac{(2,05 \cdot 60)^2 \cdot 21000 \cdot 70}{24H^2} = 1000 - \frac{(1,5 \cdot 60)^2 \cdot 21000 \cdot 70}{24 \cdot 1000^2};$$

$$H - \frac{925 \cdot 10^6}{H^2} = 505; H = 1175 \text{ кг.}$$

Удельная реакция струн:

$$W_3 = \frac{\frac{0,7 + 2 \cdot 0,7}{1175} + \frac{2 \cdot 0,7}{600}}{\frac{8 \cdot 0,67}{0,9 \cdot 60^3} + \frac{240 \cdot 5}{60^3} \left( \frac{1}{0,9} - \frac{1}{\sqrt{0,9^2 + 0,7^2}} \right) + \frac{1}{1175} + \frac{2}{600}} =$$

$$= \frac{0,00179 + 0,00233}{0,00165 + 0,00077 + 0,00085 + 0,00333} = \frac{412}{661} = 0,62 \text{ кг/м; (форм. VI)}$$

$$f_w = \frac{a^2}{8h} (W'' - W_3) = \frac{60^2 \cdot 0,08}{8 \cdot 600} = 0,060 \text{ м; (форм. II)}$$

$$F_w = \frac{a^2}{8H} (W' + 2W'' - W_2) = \frac{60^2 \cdot 1,48}{8 \cdot 1175} = 0,570 \text{ м}; \quad (\text{форм. III})$$

$$\sin \beta = \frac{W_2}{\sqrt{g^2 + W_2^2}} = \frac{0,62}{1,14} = 0,545; \quad (\text{форм. 6})$$

$$C = K \sin \beta = 0,5 \cdot 0,545 = 0,273 \text{ м}. \quad (\text{форм. 5})$$

Отклонение контактного провода при штыревых изоляторах:

$$l_w = 0,903 \text{ м}; \text{ округленно: } l_w = 0,9 \text{ м}.$$

Отклонение подвешенного изолятора

$$b_w = l \frac{W' + W''}{\sqrt{\left(P + \frac{p}{a}\right)^2 + (W' + W'')^2}} = \frac{0,5 \cdot 1,4}{\sqrt{1,67^2 + 1,4^2}} = \frac{0,5 \cdot 1,4}{2,1} = 0,333 \text{ м}. \quad (\text{форм. IV})$$

Отклонение контактного провода при подвесных изоляторах:

$$l_w = 0,903 + 0,333 = 1,236 \text{ м}.$$

Если принять, что контактный провод при отклонении ветром остается прямолинейным, т. е.  $l_w = 0$ , то получим (см. статью проф. Шевалина, „Электричество“ № 15, 1931 г.).

$$l_w = \frac{a^2}{8H} (W' + W'') + K \sin \beta = \frac{60^2}{8 \cdot 1175} \cdot 1,4 + 0,273 = 0,535 + 0,273 = 0,808 \text{ м},$$

т. е. значительно менее более точной величины (0,9 м), подсчитанной выше.

## II. ФИКСАТОРНАЯ ПОДВЕСКА

Точный способ определения отклонения контактного провода ветром при цепной подвеске с фиксаторами\* требует несколько громоздких вычислений. Применяя к этому случаю принцип эквивалентной струны проф. Шевалина\*\*, получим значительные упрощения. Следует заметить, что этот принцип, вполне применимый к бесфиксаторной подвеске, применим к цепной подвеске с фиксаторами лишь с заметным приближением, так как струны при ветровом режиме значительно отходят от параллельности друг другу:  $BC \neq DA$  (рис. 8). Все же результаты по точному и приближенному способу получаются весьма близкими друг другу.

Напряжение в несущем тросе при ветровом режиме находим по удельной нагрузке, являющейся результирующей из веса цепной подвески и ветрового давления только на несущий трос

$$Q = \sqrt{P^2 + W^2}.$$

Натяжение в контактом проводе при системе с сезонной регулировкой определяется согласно формуле:\*\*\*

$$h = \frac{(W'' - W_2) a^2 e s}{24h^2} = h_{min} + a e s (t_{min} - t). \quad (VII')$$

\* См. „Электричество“, 1931 г., № 21.

\*\* См. „Электричество“, 1931 г., № 15.

\*\*\* См. „Электричество“, 1931 г., № 21, стр. 1202, формулы (I) и (I-a)

Для нахождения величины  $W_s$  обратимся к рис. 8 и 9. Здесь  $EL$  — эквивалентная струна, соединяющая центры тяжести несущего троса и контактного провода. Поперечно имеем:

$$W_s = g \operatorname{tg} \beta_0. \quad (a)$$

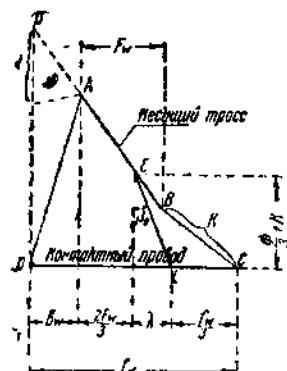


Рис. 8. Боковой вид на отклоненную цепную подвеску с фиксаторами.

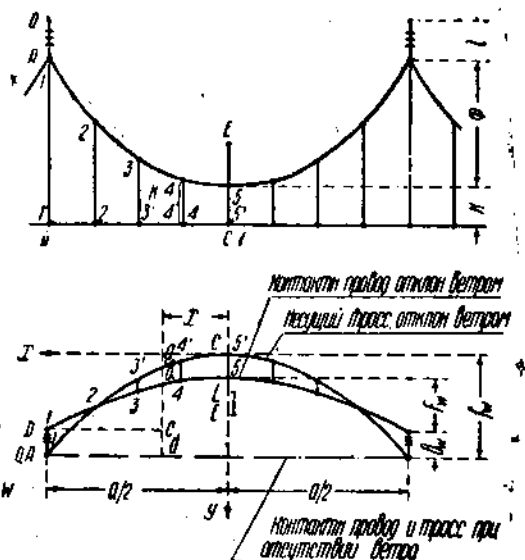


Рис. 9.

Согласно рис. 8

$$\operatorname{tg} \beta_0 = \frac{\lambda}{\frac{1}{3} \Phi + K}, \quad (b')$$

$$\lambda = \frac{2f_w}{3} - b_w - \frac{2F_w}{3}. \quad (z')$$

При этом определяем:

- 1)  $f_w$  — согласно формуле (II)
- 2)  $b_w$  — согласно формуле (IV)
- 3)  $F_w = \frac{(W' + W_s)a^3}{8H}$ . (III')

Подставляя в формулу (z') из формул (II), (IV), (III'), имеем:

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{2}{3} \cdot \frac{a^3}{8} \left[ \frac{W'' - W_s}{h} - \frac{W' + W_s}{H} \right] - b_w = \\ &= \frac{a^3}{12} \left[ \frac{W''}{h} - \frac{W'}{H} - \frac{12b_w}{a^3} - W_s \left( \frac{1}{h} + \frac{1}{H} \right) \right]. \end{aligned} \quad (z'')$$

В таком случае согласно формулам (a) и (b') имеем:

$$W_s = \frac{ga^3}{12 \left( K + \frac{\Phi}{3} \right)} \left[ \frac{W''}{h} - \frac{W'}{H} - \frac{12b_w}{a^3} - W_s \left( \frac{1}{h} + \frac{1}{H} \right) \right]. \quad (a'')$$

Решая это уравнение относительно  $W_s$ , получаем:

$$W_s = \frac{\left( \frac{W''}{h} - \frac{W'}{H} - \frac{12b_w}{a^3} \right)}{\frac{1}{h} + \frac{1}{H} + \frac{12 \left( K + \frac{\Phi}{3} \right)}{ga^3}}. \quad (VI)$$

Величины  $W_s$  и  $h$  находятся путем совместного решения уравнений (VII') и (VI') путем последовательных приближений по следующему плану:

1) принимаем  $W_s = 0$  и определяем  $h$  из уравнения (VII');  
2) полученное значение  $h$  подставляем в уравнение (VI') и определяем  $W_s$ ;

3) это значение  $W_s$  подставляем в уравнение (VII') и определяем  $h$  и т. д. до тех пор, пока получаемые результаты на двух соседних ступенях не будут незначительно отличаться друг от друга.

Примерный расчет произведем по данным, приведенным в „Электричество“ 1931 г., стр. 1204.

Дано:

$$\begin{aligned} a &= 80 \text{ м} & t &= +5^\circ \text{ C}, & P &= 2 \text{ кг/м}, & s &= 100 \text{ мм}^2, \\ \Phi &= 1,6 \text{ м} & t_{\max} &= 10^\circ \text{ C}, & g &= 1 \text{ кг/м}, & s &= 13200, \\ K &= 0,3 \text{ м}, & 2p &= 16 \text{ кг}, & W' &= W'' = 0,7 \text{ кг/м}, & \alpha &= 17 \cdot 10^{-6} \text{ на } 1^\circ \text{ C}, \\ H &= 1100 \text{ кг}, & & & & & h_{\min} &= 400 \text{ кг}; \end{aligned}$$

$$h - \frac{0,7^2 \cdot 80^2 \cdot 13200 \cdot 100}{24h^2} = 400 + 17 \cdot 13200 \cdot 100 (10 - 5) \cdot 10^{-6};$$

$$h = \frac{172 \cdot 10^6}{h^2} = 512; \quad h = 790 \text{ кг};$$

$$W_s = \frac{\frac{0,7}{h} - \frac{0,7}{1100}}{\frac{1}{h} + \frac{1}{1100} + \frac{12(0,3 + \frac{1}{2} \cdot 1,6)}{80^2}} = \frac{\left(\frac{0,7}{h} - 0,00063\right)}{\left(\frac{1}{h} + 0,00247\right)}.$$

Принимая  $h = 790 \text{ кг}$ , имеем  $W_s = \frac{0,000885 - 0,00063}{0,00127 + 0,00247} = 0,068 \text{ кг/м};$

$$W'' - W_s = 0,7 - 0,068 = 0,632 \text{ кг/м};$$

$$h - \frac{140 \cdot 10^6}{h^2} = 512; \quad h = 755 \text{ кг};$$

$$W_s = \frac{0,000923 - 0,00063}{0,00132 + 0,00247} = 0,078 \text{ кг/м};$$

$$W'' - W_s = 0,7 - 0,078 = 0,622 \text{ кг/м};$$

$$h - \frac{137 \cdot 10^6}{h^2} = 512; \quad h = 753 \text{ кг};$$

$$W_s = \frac{0,000935 - 0,00063}{0,00133 + 0,00247} = 0,08 \text{ кг/м}.$$

На этом значении  $W_s$  можно остановиться.

При этом

$$W'' - W_s = 0,7 - 0,08 = 0,62 \text{ кг/м}.$$

По более точному способу автора (см. „Электричество“, 1931 г., № 21, стр. 1295, случай I-a) имеем:  $(W'' - W_s) = 0,585 \text{ кг/м}.$

Таким образом погрешность при определении  $(W'' - W_s)$ , а следовательно и отклонении контактного провода по излагаемому способу в данном случае равна 6%.

# РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ ОСНОВАНИЙ ОПОР КОНТАКТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

(применительно к деревянным опорам)

## Введение

Возможность кратковременного выключения питания отдельных перегонов дороги без нарушения движения позволяет широко пользоваться в качестве опор для контактного оборудования электрических железных дорог *деревом*, сберегая тем самым для более ответственных сооружений ценные материалы: железо и бетон.

В то же время эти опорные конструкции по условиям взаимной работы контактного провода и токоприемника должны обладать весьма малой способностью к отклонению в направлении, нормальном к оси пути. Это требование влечет за собой необходимость применения для заделки деревянных опор в грунт особо надежных конструкций. *Разработке методов расчета этих конструкций и посвящена главным образом настоящая работа.* В целях получения большей полноты сделанные в работе выводы применены и для расчета заделки металлических опор с бетонным фундаментом. Изложение ведется в следующем порядке:

- 1) расчет заделки в грунт оснований, работающих исключительно боковой поверхностью (столбы с лежнями);
- 2) расчет заделки в грунт оснований опорных конструкций, работающих, помимо боковой, также и опорной поверхностью (А-образные опоры);
- 3) расчет бетонных фундаментов.

Будем базироваться на методе расчета основания путем *подбора его основных размеров*. В этом случае мы, задаваясь допустимыми напряжениями в грунте и предельным отклонением основания, определяем реактивный момент для ряда вариантов оснований до тех пор, пока не будет достигнуто преобладания (при этих условиях) реактивного момента ( $M_r$ ) над моментом внешних сил.

$$M_r \geq M$$

## 1. РАСЧЕТ ЗАДЕЛОК В ГРУНТЕ ДЕРЕВЯННОГО СТОЛБА С ЛЕЖНЯМИ

Представим себе деревянный столб, укрепленный в грунте посредством двух лежней согласно рис. 10. Момент внешних сил, действующих на столб, найдем по следующей зависимости:

$$\begin{aligned} M + r_1 v_1 + r_2 v_2 + r_3 v_3 + L_2 Z_2 + L_4 Z_4 + L_6 Z_6 = \\ = \sum_{i=1}^{i=n} r_i v_i + \sum_{i=1}^{i=n} L_i Z_i. \end{aligned} \quad (1)$$

В этой формуле:

$Z_i$  — горизонтальные усилия, действующие на столб (кг),  
 $l_i$  — расстояние точки их приложения до поверхности грунта (м),  
 $x_0$  — глубина точки вращения столба над поверхностью грунта (м),  
 $v_i$  — вертикальные усилия, действующие на столб (кг),  
 $r_i$  — их расстояние до вертикали, проходящей через точку вращения столба (м),  
 $M$  — момент внешних сил, действующих на столб, относительно точки его поворота (кг · м).

Этот момент уравнивается реактивным моментом со стороны грунта, возникающим вследствие следующих трех причин:

- а) реакции грунта на заделанную в нем часть столба ( $P$ ),
- б) реакции грунта  $P_1$  и  $P_2$  на лежни (см. рис. 11),
- в) реакции грунта на подошву опоры.

В виду небольшой подошвенной поверхности у деревянной опоры, создаваемой ею

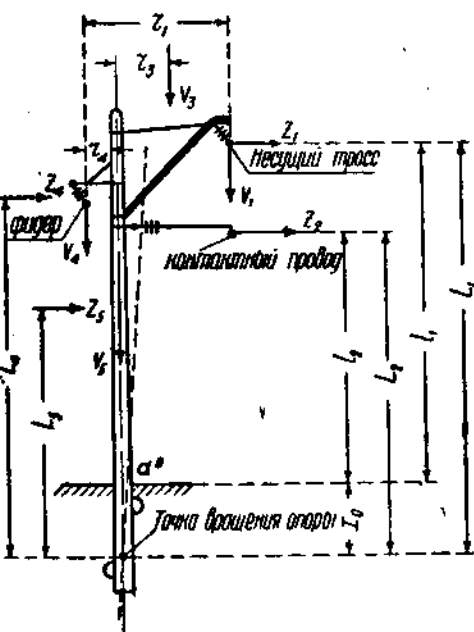


Рис. 10. Схема внешних сил, действующих на опору.

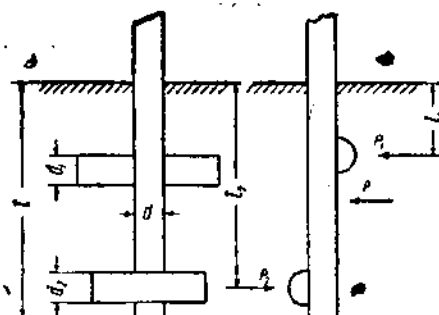


Рис. 11. Схема усилий, противодействующих повороту опоры в грунте.

момент ничтожен и им можно пренебречь, что мы и сделаем при дальнейших рассуждениях.

При этом мы предполагаем, что приняты соответствующие меры к ограничению удельного давления на грунт со стороны опорной поверхности путем прокладки в случае надобности подушки (доска)

## 2. ЭПЮРА РЕАКЦИЙ ГРУНТА

Выражение для реакций грунта  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P$  и создаваемых ими моментов получим из следующих условий. Как уже было отмечено выше, под влиянием моментов внешних сил опора повернется около некоторой точки, находящейся на расстоянии ( $x_0$ ) ниже поверхности грунта, и займет наклонное положение (см. рис. 10 и 12). Пренебрегая при этом изгибом опоры в грунте, мы будем полагать, что ось опоры повернется в грунте относительно этой точки на неко-

торый угол ( $\alpha$ ). В таком случае деформацию грунта можно принять пропорциональной расстоянию рассматриваемой точки грунта до точки вращения опоры. При этом согласно рис. 12 имеем следующее выражение для деформации в грунте на расстоянии  $x$  от его поверхности:

$$\Delta_x = (x_0 - x) \operatorname{tg} \alpha. \quad (\alpha)$$

Грунт, как всякое сыпучее тело, обладает в своей массе упругими свойствами, т. е. между изменением напряжения ( $\sigma_x$ ) в грунте и деформацией, вызывавшей это изменение, существует до некоторого предела пропорциональность

$$\sigma_x = C_x \Delta_x.$$

Эта зависимость подтверждена опытным путем. \* Входящий в эту формулу коэффициент сжатия грунта ( $C_x$ ) зависит от степени рых-

лости грунта, которая уменьшается с глубиной. Поэтому коэффициент ( $C_x$ ) при расчетах обычно принимается изменяющимся пропорционально глубине рассматриваемой точки грунта от его поверхности. Размерность коэффициента: единица силы (кг), деленная на единицу объема ( $\text{м}^3$ ). Обозначив через ( $C$ )

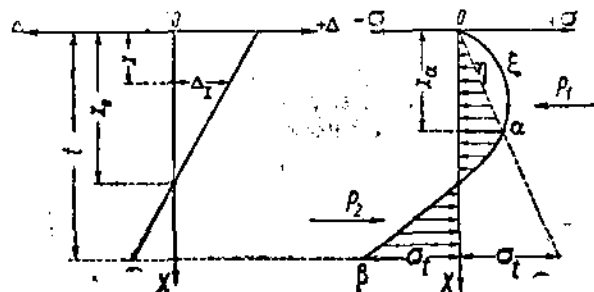


Рис. 12. Упругие деформации и напряжения в грунте при отклонении столба.

значение коэффициента сжатия грунта на глубине ( $t$ ) подошвы основания опоры, будем иметь согласно рис. 11 следующее выражение для значения этого коэффициента на глубине ( $x$ ) метров от поверхности грунта:

$$C_x = \frac{C \cdot x}{t}. \quad (\delta)$$

Удельная реакция в данной точке грунта, находящейся на расстоянии ( $x$ ) от его поверхности, численно равна произведению соответствующих значений коэффициента упругости ( $C_x$ ) и деформации ( $\Delta$ ):

$$\sigma = C_x \Delta_x = \frac{CK(x-x_0)x \operatorname{tg} \alpha}{t}.$$

В этой формуле коэффициент ( $K$ ) зависит от формы поверхности фундамента. Значения этого коэффициента вычислены ниже (см. § 5).

Обозначив реакцию грунта, вызванную отклонением опоры, на глубине подошвы основания, т. е.  $x = t$ , через:  $\sigma_t$ , имеем согласно формуле (2):

$$\sigma_t = CK(t-x_0) \operatorname{tg} \alpha. \quad (2^{bis})$$

В таком случае:

$$\sigma = \sigma_t \frac{(x-x_0)x}{t(t-x_0)}. \quad (2-a)$$

\* См. Прокофьев, Теория сооружений изд. 1925 г., стр. 72 и 78; Terzaghi, Erdmechanik.

Введем обозначение:  $K\sigma_0 = \frac{\sigma_1}{t}$ . При этом имеем:

$$\sigma = K\sigma_0 \frac{x(x-x_0)}{(t-x_0)} \quad (2-б)$$

Формулы (2), (2-а) и (2-б) показывают, что величина удельной реакции изменяется по глубине подземной части столба по закону параболы, причем при переходе через точку поворота столба направление реакции меняется на обратное. Приняв согласно рис. 13 направление отклонения опоры за положительное направление усилий, действующих на нее, мы будем иметь значения реакции грунта: а) отрицательные:  $\sigma < 0$  для всех точек грунта выше точки поворота столба, т. е. при  $x < x_0$ ; б) положительные:  $\sigma > 0$  — для точек грунта, лежащих ниже точки поворота столба, т. е. при  $x > x_0$ . Зависимость (2) и (2-а) представлена в виде кривой  $O\xi aB$  (рис. 12 и 13)

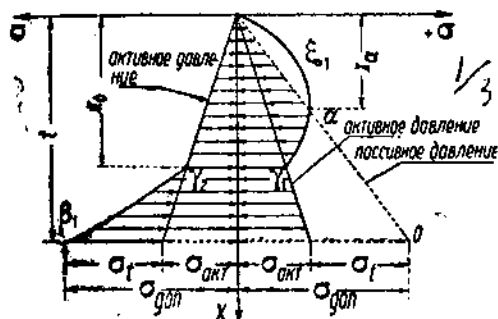


Рис. 13.

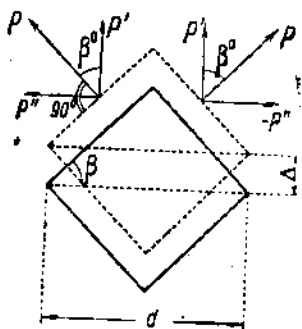


Рис. 14.

Полное удельное давление грунта найдем, если к величине давление, вычисленного по формуле (2), прибавим так называемое *активное* давление грунта на основание опоры, действующее нормально к основанию со всех его сторон и потому взаимно уравновешивающееся.

Если принять, что величина активного давления пропорциональна глубине, то диаграмма давлений грунта на столб изображена в виде кривой  $O\xi_1\gamma_1\gamma_2\beta_1$  (рис. 13).

Удельное давление на грунт не может превзойти величины пассивного сопротивления грунта, играющего в сыпучих телах роль временного сопротивления. Поэтому параболическая зависимость, определяемая формулой (2), справедлива лишь до тех пор, пока имеет место неравенство:  $\sigma < (\sigma_{пас} - \sigma_{акт})$ ; в противном случае автоматически устанавливается  $\sigma = (\sigma_{пас} - \sigma_{акт})$ , что вносит более неблагоприятное распределение реакций грунта на основание столба. Для длинных стенок как пассивное, так и активное сопротивление возрастают пропорционально глубине.

В этом случае имеем:

$$\sigma_{пас} = \gamma x \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right);$$

$$\sigma_{акт} = \gamma x \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right),$$

где:  $\gamma$  — вес единицы объема грунта ( $\text{кг/м}^3$ ),

$\varphi$  — угол внутреннего трения (естественного откоса) грунта.

Для коротких стенок, в виду взаимодействия клина выпирания с окружающим грунтом, имеет место возрастание пассивного сопротивления грунта не по закону прямой линии, справедливому для длинных стенок, а по закону параболы, касательной к этой прямой на поверхности грунта.

Среднее увеличение пассивного сопротивления для участка стенки от  $x = 0$  до  $x = x_0$  может быть принято равным:

$$\left(1 + n \frac{x_0}{b}\right).$$

В этой формуле:

$b$  — ширина стенки,

$n$  — коэффициент, зависящий от свойств грунта (от его угла внутреннего трения).

Для средних грунтов, имеющих угол трения около  $\varphi = 25^\circ$ , по проф. Прокофьеву, коэффициент  $n \cong 0,2$ . Согласно методу проф. Хрущева для этого коэффициента получаются значения большие в  $\left\{\frac{0,25}{\operatorname{tg} \varphi} \operatorname{tg}^2\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right)\right\}$  раза, т. е. для  $\varphi = 25^\circ$  в 1,4 раза, что дает для этого случая  $n = 0,28$ .

Помимо увеличения пассивного сопротивления при коротких стенках, заметна тенденция к уменьшению активного давления грунта.

Таким образом теоретически для коротких стенок можно с запасом принять, что разность между пассивным и активным давлением по сравнению с соответствующим значением этой разности для длинной стенки увеличивается в  $\left(1 + n \frac{x_0}{b}\right)$  раз.

Но в то же время следует отметить, что при коротких стенках проявляется меньшая жесткость и устойчивость сооружения в отношении отклонений и заметнее сказывается неоднородность грунта. Поэтому лучше с этим увеличением ( $\sigma_{\text{пасс}} - \sigma_{\text{акт}}$ ) не считаться и принять прямолинейный закон изменения этой разности в зависимости от глубины в том же виде, в каком мы его имеем для длинных стенок.

Перейдем теперь к выяснению наиболее неблагоприятного для стойкости опоры очертания эпюры реакций грунта на основание опоры.

Для этой цели положим, что на глубине подошвы зарытого в грунт столба, т. е. при  $x = l$ , реакция грунта  $\sigma$ , равна численно разности между пассивным и активным сопротивлениями грунта для этой его точки. В таком случае закон изменения максимального возможного значения реакции грунта на подземную часть столба определится из уравнения:

$$\sigma' = \mp \frac{\sigma_0}{l} x = \mp \sigma_0 x. \quad (3)$$

Знак плюс относится для точек столба, лежащих ниже точки его поворота, т. е. для  $x > x_0$ , и знак минус для точек, имеющих  $x < x_0$ .

Эта зависимость представлена на рис. 13 прямыми  $OO$  и  $O\beta_1$ . Из рис. 13 и сравнения уравнений (2) и (3) очевидно, что при этом для точек, лежащих вблизи поверхности грунта  $x < x_0$ , уравнение (2)

дает значение реакции, превосходящее по абсолютной величине допустимую величину, определяемую уравнением (3). Следовательно в этой части грунта, т. е. при  $x < x_a$ , реакция его определится прямолинейной зависимостью (3) и лишь для точек, имеющих  $x > x_a$ , реакция грунта начнет уменьшаться согласно уравнению (2).

Таким образом эпюра реакции грунта на столб при этом предположении представится в виде комбинированной кривой  $O a \gamma_1 \gamma_2 \beta_1$ , определяемой уравнениями (2-а) и (3). Глубина точки перехода прямолинейной зависимости на параболическую определится из совместного решения уравнений (2-а) и (3):

$$x_a = 2x_0 - l. \quad (4)$$

Получаемый при этом реактивный момент грунта является предельным, при котором начинается выворачивание столба из грунта.

Так как всякое сооружение должно иметь некоторый запас прочности ( $n_{рас}$ ), то очевидно, что для этой цели необходимо уменьшить значение реакций в  $n$  раз. Вследствие этого расчетная эпюра реакций грунта должна быть принята согласно кривой  $O a \eta_1 \eta_2 \beta$  (уравнения (2-а) и (3)), причем реакция у подошвы столба:  $\sigma_0$  должна быть в  $n$  раз меньше разности между пассивным сопротивлением грунта и активным давлением для глубины:

$$x = l, \quad \text{т. е.} \quad \sigma_0 = \frac{\sigma_0'}{n}.$$

Вычисленная согласно этой эпюре зависимость между а) реактивным моментом и б) тангенсом угла отклонения опоры ( $\text{tg } \alpha$ ) или удельной реакцией у подошвы ( $\sigma_0$ ), очевидно, соответствует наиболее неблагоприятному распределению реакций грунта на столб.

Подобную зависимость применяет Зюберкрюб в его статье об основании опор. \* Швейцарские нормы принимают параболическую зависимость по всей высоте основания. \*\*

### 3. ИСХОДНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ

Для определения на основании формул (2), (2-а) и (2-б) величины реактивного давления и момента грунта на столб следует задаться или исходной величиной удельного давления у подошвы основания опоры ( $\sigma_0$ ) или предельным углом поворота опоры в грунте ( $\text{tg } \alpha$ ) и коэффициентом сжатия грунта (С). Для опор контактного оборудования, как имеющих своим назначением фиксирование провода от горизонтальных перемещений, рациональнее исходить из второй величины.

Расчетная величина  $\text{tg } \alpha$  по швейцарским нормам для линий передачи принимается равной 0,01. Опыты Мюллера, а также испытания с опорами союзных установок (Сурамский перевал), ветка к Харьковскому тракторному заводу) показывают, что эта величина является чрезмерной. Для электрических ж. д. следует придерживаться  $\text{tg } \alpha = 0,005$ .

Необходимые для расчета коэффициенты сжатия грунта С могут быть взяты из приведенной ниже таблицы 1, составленной на

\* См. El. Bahn., 1931 г., № 2, стр. 50.

\*\* См. Conference internationale des Grands Reseaux, Session 1925, том I, стр. 916.

Таблица 1

Коэффициент сжатия (С) и допускаемые давления на грунт для глубины 2 м

| № п/п | Род грунта (по швейцарским нормам)                          | С кг/см <sup>2</sup> | Допускаемые давл. по ЕНСП кг/см <sup>2</sup> |                                             | Род грунта (по единым нормам строит. проект. сер. IX, № 8).                               | Мощн. грунта ниже подошвы фунда. не менее | 5 ЕНСП | № п/п |
|-------|-------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|--------|-------|
|       |                                                             |                      | При влажном грунте и морозе                  | При сыром грунте или естественной влажности |                                                                                           |                                           |        |       |
| 1     | Легкий болотистый грунт . . . .                             | 0,5—1,0              | 0,75                                         | 1,0                                         | Песок мелкий со включением ила                                                            | 1                                         | 7      | 1     |
| 2     | Тяжелый болотистый грунт и мелкий береговой песок . . . . . | 1,0—1,5              | 1,0                                          | 1,5                                         | Слабый глинистый грунт, суглинок со включением ила и мелких органических примесей . . . . | —                                         | 1      | 1—2   |
| 3     | —                                                           | —                    | 1,0                                          | 1,5                                         | Песок мелкий, чистый . . . . .                                                            | 1                                         | 8      | 2     |
|       | —                                                           | —                    | 1,5                                          | 2,0                                         | Песок мелкий, плотный . . . . .                                                           | 1                                         | 9      |       |
| 3     | Насыль из перегной, песка и гравия . . . . .                | 1,0—2,0              | 1,0                                          | 1,5                                         | Песок средней плотности и крупности, разрыхленный . . . . .                               | 1                                         | 10     | 3     |
| 4     | Глинозем мокрый . . . . .                                   | 2,0—3,0              | 2,0<br>2,5*<br>3,0**                         | —                                           | Глинистый грунт и суглинок средней плотности . . . . .                                    | 2                                         | 2      | 4     |
| 5     | —                                                           | 4,0—5,0              | —                                            | 2,5<br>3,0*<br>3,5**                        | Плотно сжимающаяся глина и суглинок . . . . .                                             | 2*                                        | 3      | 5     |
| 6     | —                                                           | 6,0—8,0              | (4,0)                                        | 5,0                                         | Особо плотная глина . . . . .                                                             | —                                         | —      | —     |
| 7     | —                                                           | 10,0                 | (4,5)                                        | 6,0                                         | Очень твердый глинистый грунт с каменной подпочвой . . . . .                              | 4                                         | 5      | 6     |
|       | —                                                           | —                    | —                                            | —                                           | (Юрская глина) . . . . .                                                                  | 4                                         | 6      | 7     |

|    |                                                                                          |       |     |     |   |                                                                          |   |    |
|----|------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-----|-----|---|--------------------------------------------------------------------------|---|----|
| 8  | Хорошо слежавшийся перегной с песком, глиной и небольшим количеством камней . . . . .    | 8—10  | —   | —   | — | —                                                                        | — | —  |
| 9  | То же, но с большим количеством камней . . . . .                                         | 10—12 | 3,5 | 4,5 | — | Плотно слежавшаяся глина и суглинок, мергель средней плотности . . . . . | 3 | 4  |
| 10 | Мелкий гравий с большим количеством мелкого песка . . . . .                              | 8—10  | 3,0 | 3,5 | — | Гравелистый грунт . . . . .                                              | 2 | 12 |
| 11 | Средний гравий с большим количеством мелкого песка . . . . .                             | 10—12 | 3,5 | 4,5 | — | Песок крупный, плотно слежавшийся . . . . .                              | 4 | 13 |
| 12 | Мелкий или крупный гравий с крупным песком . . . . .                                     | 12—15 | 4,0 | 5,0 | — | Гравий средней крупности, плотно слежавшийся . . . . .                   | 4 | 14 |
| 13 | Крупный гравий с небольшим количеством крупного песка . . . . .                          | 15—20 | 5,0 | 6,0 | — | Гравий крупный, плотно слежавшийся . . . . .                             | 5 | 15 |
| 14 | Очень хорошо слежавшийся крупный гравий с небольшим количеством крупного песка . . . . . | 20—25 | —   | —   | — | —                                                                        | — | —  |
| 15 | —                                                                                        | —     | 8   | 12  | — | Мягкая скала и сплошные породы слабого камня . . . . .                   | — | 16 |
| 16 | —                                                                                        | —     | 12  | 18  | — | Песчаники известняки средней плотности . . . . .                         | — | 17 |
| 17 | —                                                                                        | —     | 20  | 40  | — | Скальные породы особо твердые, сплошные . . . . .                        | — | 18 |

*Примечание.* При заложении на глубину более 2,0 м от поверхности земли приведенные нормы допускаемого давления на грунт повышаются на величину  $\frac{\gamma}{1000}$  на каждый 1,0 м<sup>3</sup> углубления, где  $\gamma$  — вес 1 м<sup>3</sup> грунта в килограммах.

При заложении на глубину менее 2,0 м от поверхности земли приведенные нормы подлежат снижению на 0,1 кг/см<sup>2</sup> на каждые 0,1 м уменьшения глубины заложения против 2,0 м.

Индексы \* и \*\* относятся к п. 4—5, причем индекс \* относится к мощности слоя 2 м, а индекс \*\* — к мощности слоя 4 м.

основании швейцарских норм. В таблице значения  $C$  приведены для глубины 2 м. Согласно формулы (б) величина  $C$  на глубине  $t$  метров равна:  $C = \frac{C_0}{2} t$ , где  $C_0$  — значение коэффициента  $C$  для глубины 2 м.

Задавшись как исходной величиной тангенсом предельного угла поворота основания опоры в грунте, мы тем, однако, не исключаем возможности пользования формулами (2-а) или (2-б) при условии, что входящие в эти формулы величины  $\sigma_t$  или  $\sigma_0$  должны быть установлены, исходя из предельного  $\operatorname{tg} \alpha$ .

Для этой цели мы воспользуемся равенством (2<sup>bis</sup>), причем, как будет видно из дальнейшего, возможно принять  $x_0 \approx 0,7l$ . В таком случае

$$\sigma_0 = C \frac{t - 0,7l}{t} \cdot 0,005 = 15 C \cdot 10^{-4}. \quad (3-a)$$

Зная  $\sigma_0$ , найдем  $\sigma_t = t \sigma_0$ .

Пример:  $C = 10 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^2$ ,

$$\sigma_0 = 15000 \text{ кг/м}^2.$$

Что касается допустимого вертикального давления на грунт подошвы основания опоры, то оно не должно превосходить величин, предусмотренных в „Единых нормах строительного проектирования“ (Серия IX, № 8, стр. 203, изд. 1931 г.). Выборка из этих норм приведена в упомянутой таблице. Применение одних и тех же норм для горизонтального и вертикального давления неправильно, так как грунт различным образом сопротивляется этим давлениям. Под влиянием горизонтального давления грунт начнет сдавать, если это давление станет равным пассивному сопротивлению грунта, в то время как под влиянием вертикального давления это произойдет лишь тогда, когда создаваемое этим давлением активное давление грунта превзойдет его пассивное сопротивление, что будет иметь место при значительно больших величинах вертикального давления по сравнению с пассивным сопротивлением.\* Таким образом нормы для горизонтальных нагрузок грунта должны давать меньшие величины допустимых нагрузок, чем это предусмотрено в ЕНСП. Это обстоятельство недооценено некоторыми авторами.\*\*

В соответствии с этим мы принимаем следующие положения относительно величины реакций грунта на подземную часть столба:

1) Закон изменения величины реакций грунта на основании опоры определяется уравнениями (2-а) и (3), причем точка перехода с прямой зависимости на параболическую находится из уравнения (4).

2) Значения наибольшей допустимой удельной реакции грунта в горизонтальном направлении у подошвы столба определяются исходя из угла допустимого отклонения опоры в грунте, тангенс которого следует принять  $\operatorname{tg} \alpha = 0,05$ .

3) Допускаемые удельные давления на грунт подошвенной части основания опоры определяются для соответствующих условий согласно единым нормам строительного проектирования.

\* Сравни форм. (14<sup>bis</sup>) ниже, в § 9.

\*\* См. „El. Bahn“. 1931 г., стр. 46. Эти нормы без всякой критики перепечатаны в реферате этой статьи, помещенном в журнале „Электричество“, 1931 г., № 18, стр. 1039—1042.

#### 4. КОЭФИЦИЕНТ ФОРМЫ ОСНОВАНИЯ

Прежде чем перейти к выводу выражения для упругого противодействия грунта отклонению столба, уясним себе влияние на эту величину формы поверхности столба. Рассмотрим отдельно два случая:

1) призму, имеющую в основании ромб, отклоняющуюся в грунте параллельно своей диагональной плоскости, образующей с рабочими поверхностями углы  $\beta$ ;

2) цилиндрическую поверхность.

Длину диагонали в первом случае и диаметр основания во втором случае обозначаем через  $d$ . Трением рабочих поверхностей о грунт пренебрегаем. Это особенно приложимо к деревянным опорам, имеющим в грунте скользкую поверхность. В таком случае реакция грунта и давление столба на грунт должны быть направлены нормально к поверхности опоры.

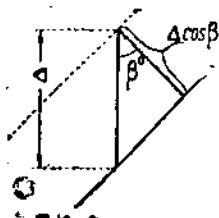


Рис. 15.

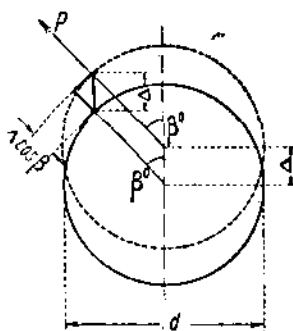


Рис. 16.

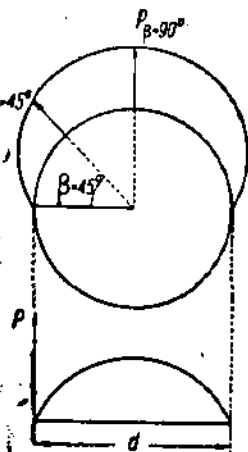


Рис. 17. Диаграмма нормальных давлений грунта при круглом сечении столба.

Будем понимать под коэффициентом формы поверхности фундамента отношение противодействия, оказываемого грунтом перемещению в нем на одинаковую величину ( $\Delta$ ) рассматриваемой поверхности и ее проекций, на плоскость нормальную к перемещению.

Призматическая поверхность опоры изображена на рис. 14. Перемещение диагонали основания равно  $\Delta$ . В таком случае перемещение каждой грани в направлении нормальном к их поверхности согласно рис. 15 равно  $\Delta \cos \beta$ . Обозначив длину диагонали через  $d$ ,

имеем длину ребра:  $\frac{d}{2 \cos \beta}$ . Напряжение в грунте, создаваемое деформацией  $\Delta$ , обозначим через  $\sigma$ . В таком случае нормальное давление на грунт грани призмы, имеющей высоту, равную единице длины, равно  $P = \sigma \cdot \cos \beta \frac{d}{2 \cos \beta} = \frac{\sigma \cdot d}{2}$ . Составляющая этого давления

в направлении перемещения  $P' = \frac{\sigma d \cos \beta}{2}$ , а двух, граней:

$2P' = \sigma d \cos \beta$ . Следовательно коэффициент формы поверхности в этом случае:  $k = \cos \beta$ . В частном случае при квадратном основании:  $k \cong 0,7$ .

Цилиндрическая поверхность изображена на рис. 16. Выделяя часть поверхности высотой равной единице длины, имеем давление

на элемент этой поверхности:  $\frac{d}{2} \phi \beta$ , равное  $p_\beta = \frac{\sigma \cdot d \cdot \cos \beta}{2} \cdot \phi \beta$ , а составляющая этого давления в направлении перемещения  $p'_\beta = \frac{\sigma d}{2} \cos^2 \beta \phi \beta$ . Распределение давлений грунта на цилиндрическую поверхность в направлении, нормальном к этой поверхности, представлено на рис. 17. Диаграмма горизонтальных составляющих этих давлений дана на том же рисунке ниже. Давление на выделенную часть поверхности:

$$P_{\beta'} = 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\sigma \cdot d}{2} \cos^2 \beta \phi \beta = \sigma d \frac{\pi}{4}. \quad (b)$$

Отсюда  $k = \frac{\pi}{4} = 0,785$ . Учитывая влияние трения, можно принять в этом случае  $k = 0,8$ . Согласно электротехническим нормам этот коэффициент может быть принят равным  $k = 0,75$ , что дает запас прочности\*.

## 5. ЦЕНТР ВРАЩЕНИЯ ОСНОВАНИЯ ОПОРЫ

Для нахождения величины реактивного момента грунта необходимо знать глубину  $x_0$  точки поворота столба. Величину  $x_0$  найдем из условия, что сумма горизонтальных проекций всех сил, действующих на столб, равна нулю.

$$P_1 + P_2 + P + \sum_{i=1}^n z_i = 0. \quad (2)$$

При исчислении величины реакции грунта на лежни  $P_1$  и  $P_2$  будем принимать удельную реакцию грунта соответствующей глубине заложения оси рассматриваемого лежня  $t_1$  или  $t_2$ . При этом для верхнего лежня примем величину реакции грунта согласно зависимости (3), а для нижнего лежня—согласно зависимости (2'а).

В таком случае в соответствии с рис. 11 имеем:

$$P_1 = - \frac{kc(b_1 - d)(t - x_0)t_1 d_1 \operatorname{tg} \alpha}{t}; \quad (5')$$

$$P_2 = \frac{kc(b_2 - d)(t_2 - x_0)t_2 d_2 \operatorname{tg} \alpha}{t}. \quad (5'')$$

Реакция грунта на подземную часть столба согласно рис. 13 равна:

$$P = \frac{kc d \operatorname{tg} \alpha}{t} \int_0^x (x - x_0) x dx - \lambda; \\ P = kc d \operatorname{tg} \alpha \left( \frac{t^3}{3} - \frac{x_0 t^2}{2} \right) - \lambda. \quad (5)$$

Величина  $\lambda$  определится, как разность между площадями:  $O \alpha \beta$  и  $O \eta \alpha \beta$  диаграммы рис. 13. В таком случае:

$$\lambda = \frac{kc d \operatorname{tg} \alpha}{t} \left\{ \int_0^{x_0} (x - x_0) x dx + (t - x_0) \int_0^{x_0} x dx \right\} = \\ = \frac{kc d \operatorname{tg} \alpha}{\sigma t} x_0^2 (2x_0 - 3t). \quad (6)$$

\* См. Электротехнические правила и нормы, 1931 г., стр. 99.

Воспользовавшись уравнением (4), имеем:

$$\lambda = \frac{kc d \operatorname{tg} \alpha}{6t} (t - 2x_0)^2. \quad (6a)$$

Ограничиваясь для вычисления величины  $P$  приближенным значением  $\lambda$ , принимаем его равным\*

$$\lambda = -0,067 kc d \operatorname{tg} \alpha (2x_0 - t)^2.$$

В таком случае:

$$P = kc d \operatorname{tg} \alpha (0,4 t^2 - 0,767 x_0 t + 0,267 x_0^2). \quad (5a)$$

Пример.

Определим отдельно  $P$  и  $\lambda$  при заданных  $K=0,75$ ,  $C=10 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^2$

$$t = 2 \text{ м}; x_0 = 1,4 \text{ м}; d = 0,3 \text{ м}; \operatorname{tg} \alpha = 0,005;$$

$$P = 0,75 \cdot 10 \cdot 0,3 \cdot 0,005 \cdot 10^6 \cdot (0,4 \cdot 2^2 - 0,767 \cdot 1,4 \cdot 2 + 0,267 \cdot 1,4^2) = 17600 \text{ кг}.$$

$$\lambda = -0,067 \cdot 0,75 \cdot 10 \cdot 0,3 \cdot 0,005 \cdot 10^6 \cdot 0,8^2 = -480 \text{ кг}.$$

$$\frac{\lambda}{P} \cdot 100 = 2,3\%.$$

Этот подсчет показывает, что сделанное выше предположение о возможности приближенного вычисления  $\lambda$  для подстановки его в формулу (5) вполне оправдывает себя.

Подставляя в формулу (2) выражения для  $P$ ,  $P_1$  и  $P_2$  из формул (5'), (5'') и (5-a), получаем для определения глубины точки поворота столба следующее квадратное уравнение:

$$x_0^2 - \alpha x_0 + \beta = 0. \quad (6)$$

Решая уравнение, имеем:

$$x_0 = \frac{\alpha}{2} \pm \sqrt{\frac{\alpha^2}{4} - \beta}. \quad (7)$$

Коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  уравнения (7) определяются согласно выражениям 7' и 7''. В этих формулах ради упрощения последние члены их числителей, незначительно влияющие на результат, выражены приближенно, приняв  $\frac{(t-x_0)}{t} = 0,3$ .

В таком случае имеем:

$$\alpha = \frac{(b_2 - d_1) t_1 d_2 - (b_1 - d_1) t_1 d_1 + 0,767 dt^2 + \frac{1-n}{\Sigma z_2}}{0,267 dt} \quad (7')$$

$$\beta = \frac{(b_2 - t_1) t_1^2 d_2 - (b_1 - d_1) t_1 d_1 + 0,4 dt^2 + \frac{1-n}{t \Sigma z_1}}{0,267 dt}; \quad (7'')$$

При отсутствии лежней глубина точки вращения столба найдется из уравнения (2), принимая  $P_1 = P_2 = 0$ .

\* Это соответствует  $x=0,7$ .

В этом случае имеем:

$$0,4 - 0,766 \frac{x_0}{t} + 0,267 \left( \frac{x_0}{t} \right)^2 + \gamma = 0, \quad (7^{bis})$$

причем:

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} z_i}{ckdt^2 \operatorname{tg} \alpha}, \quad (7''')$$

Величина  $\sum z_i$  для деревянных опор без оттяжек не превышает 500 кг. Наиболее неблагоприятное значение  $ckdt^2 \operatorname{tg} \alpha$  лежит около  $2 \cdot 0,005 \cdot 10^8 = 10^6 \text{ кг/м}^3$ . При этих условиях значения коэффициента  $\gamma$  не превосходят:  $0,04 = 0,05$ .

Считая величину  $\gamma = 0,06$  как максимум, приведем значение  $\left( \frac{x_0}{t} \right)$  по формуле (7<sup>bis</sup>) для различных  $\gamma$  от 0 до 0,06.

|                 |       |       |       |       |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|
| $\gamma$        | 0     | 0,02  | 0,04  | 0,06  |
| $\frac{x_0}{t}$ | 0,685 | 0,700 | 0,714 | 0,727 |

Зависимость  $\frac{x_0}{t} = \varphi(\gamma)$  нанесена в виде кривой на рис. 18. Из кривой явствует, что при отсутствии лежней глубина точки вращения столба увеличивается с увеличением суммы горизонтальных

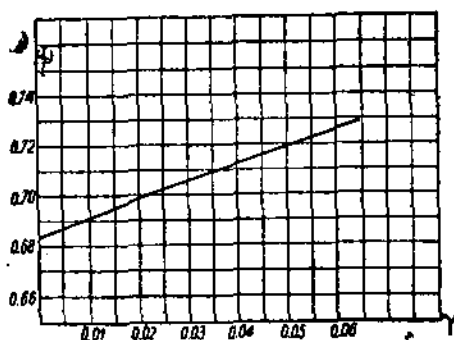


Рис. 18.

усилий  $\sum_{i=1}^{i=n} P_i$ , действующих на столб  $P_0$  прямолинейной зависимости от этой суммы.

Как будет ясно из дальнейшего, реактивный момент, создаваемый лежнем № 1, пропорционален величине:  $t_1(t_1 - x_0)$ .

Таким образом, максимум его значения имеет место при  $t_1 = \frac{x_0}{2}$ .

Очевидно, что в этом случае мы имеем при прочих заданных условиях также максимальный полный реактивный момент грунта.

Величина  $x_0$  найдется при этом согласно уравнению 7, значения  $\alpha$  и  $\beta$  для которого определяются формулами (8') и (8''), полученными путем подстановки в уравнения (7') и (7'') величины  $t_1 = \frac{x_0}{2}$ .

$$\alpha' = \frac{2(b_2 - d_2)d_2t_1 + (b_1 - d_1)d_1t_1 + 1,533 dt^2 + \frac{2 \sum_{i=1}^{i=n} z_i}{0,3ck \operatorname{tg} \alpha}}{b_1d_1 + 0,533 d \cdot t}; \quad (8')$$

$$\beta' = \frac{2(b_2 - d_2)d_2t_1^2 + 0,8 dt^2 + \frac{2t \sum_{i=1}^{i=n} z_i}{0,3ck \operatorname{tg} \alpha}}{b_1d_1 + 0,533 d \cdot t}. \quad (8'')$$

**Пример 1.**

Дано:

$$t = 2,0 \text{ м}; \quad t_1 = \frac{x_0}{2}; \quad t_2 = 1,8 \text{ м};$$

$$b_1 = 0,75 \text{ м}; \quad b_2 = 0,55 \text{ м};$$

$$d = d_1 = d_2 = 0,3 \text{ м};$$

$$\sum_{i=1}^n z_i = 375 \text{ кг}; \quad C = 10 \text{ кг/см}^2 = 10 \cdot 10^6 \text{ кг/см}^2;$$

$$k = 0,75; \quad \operatorname{tg} \alpha = 0,005.$$

Решение: Найти  $x_0$  и  $t_1$ .

$$\alpha = \frac{2 \cdot 0,25 \cdot 0,3 \cdot 1,8 + 0,45 \cdot 0,3 \cdot 2 + 1,533 \cdot 0,3 \cdot 2^2 +}{0,45 \cdot 0,3 + 0,533 \cdot 0,3 \cdot 2} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{2 \cdot 375}{0,3 \cdot 10^2 \cdot 0,75 \cdot 0,005} = 5,37 \text{ м.} \quad (8')$$

$$\beta = \frac{2 \cdot 0,25 \cdot 0,3 \cdot 1,8^2 + 0,8 \cdot 0,3 \cdot 2^2 + \frac{2 \cdot 2 \cdot 375}{0,3 \cdot 10^2 \cdot 0,75 \cdot 0,005}}{0,45 \cdot 0,3 + 0,533 \cdot 0,3 \cdot 2} = 5,43 \text{ м}^2. \quad (8'')$$

$$x_0 = \frac{5,37}{2} - \sqrt{\frac{5,37^2}{4} - 5,43} = 1,35 \text{ м.}$$

$$t_1 = \frac{1,35}{2} = 0,675 \text{ м.}$$

$$x_a = 2x_0 - t = 2 \cdot 1,35 - 2 = 0,7 \text{ м.}$$

## 6. МОМЕНТ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ РЕАКЦИЙ ГРУНТА НА ОСНОВАНИЕ

Зная положение центра вращения опоры, легко написать выражение для реактивных моментов грунта в зависимости от угла поворота столба в грунте.

Реактивный момент грунта, действующий на вертикальную часть опоры согласно рис. 14 равен:

$$M_0 = kd \int_0^t \sigma(x - x_0) dx = \frac{ckd \operatorname{tg} \alpha}{t} \int_0^t x(x - x_0)^2 dx - \lambda \left( \frac{x_a}{2} - x_0 \right). \quad (e)$$

Интегрируя левую часть этого выражения и пользуясь зависимостями (6-а) и (4) имеем:

$$M_0 = \frac{ckd \operatorname{tg} \alpha}{6} \left\{ \frac{x_0^3}{t^3} \left( 9 - 4 \frac{x_0}{t} \right) - \left( 7 \frac{x_0}{t} - 2 \right) \right\}. \quad (8)$$

Воспользовавшись равенством

$$k\sigma_0 = \frac{\sigma_t}{t} = \frac{ck(t - x_0)}{t} \cdot \operatorname{tg} \alpha,$$

сможем переписать уравнение (8) в следующем виде:

$$M_0 = \xi k\sigma_0 t_3 d. \quad (8-a)$$

При этом

$$\xi = \frac{\left\{ \frac{x_0^3}{t^3} \left( 9 - 4 \frac{x_0}{t} \right) - \left( 7 \frac{x_0}{t} - 2 \right) \right\}}{6 \left( 1 - \frac{x_0}{t} \right)}.$$

Значение коэффициента  $\xi$  в зависимости от величины отношения  $\frac{x_0}{t}$  представлено ниже в таблице:

| $\frac{x_0}{t}$ | 0,5    | 0,55   | 0,6    | 0,65   | 0,7    | 0,75   |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $\xi$           | 0,0833 | 0,0762 | 0,0734 | 0,0733 | 0,0767 | 0,0833 |

Зависимость  $\xi = \varphi\left(\frac{x_0}{t}\right)$  представлена в виде кривой на рис. 19.

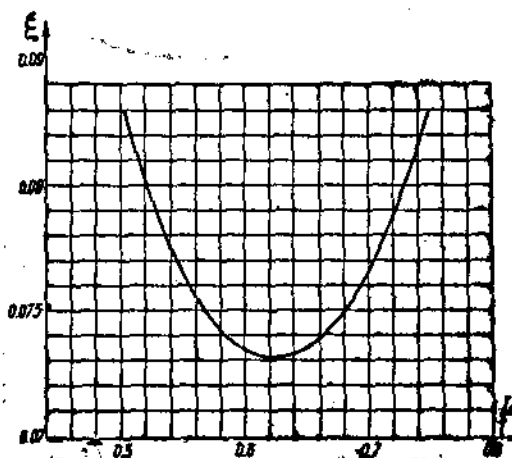


Рис. 19. Зависимость  $\xi = \varphi\left(\frac{x_0}{t}\right)$ .

Подобным образом находим реактивные моменты грунта, действующие на лежни согласно рис. 17.

1) Верхний лежень:

$$M_1 = \frac{ckd_1 \operatorname{tg} \alpha}{t} (b_1 - d_1) (x_0 - t_1) (t - x_0) t_1, \quad (8')$$

2) Нижний лежень:

$$M_2 = \frac{ckd_2 \operatorname{tg} \alpha}{t} (b_2 - d) (t_2 - x_0)^2 t_2. \quad (8'')$$

Введя вместо  $\operatorname{tg} \alpha$  соответствующее значение  $\sigma_0$ , будем иметь эти же зависимости в следующем виде:

1) верхний лежень:

$$M_1 = kd_1 (b_1 - d) (x_0 - t_1) t_1 \cdot \sigma_0; \quad (8'-b(s))$$

2) нижний лежень:

$$M_2 = kd_2 (b_2 - d) \frac{(t_2 - x_0)^2}{(t - x_0)} t_2 \sigma. \quad (8''-b(s))$$

Моменты  $M_1$  и  $M_2$  также могут быть определены формулой, аналогичной 8-а, причем значения коэффициентов  $\alpha$  для них представляются особыми кривыми.

Результирующий реактивный момент

$$M_r = M_0 + M_1 + M_2. \quad (9)$$

Для прочности опоры требуется, чтобы при  $\sigma_0$ , равном допустимому напряжению грунта на соответствующей глубине  $t$ , величина  $M_2$  по формуле (9) была больше внешнего момента, определяемого формулой (7).

Полученные формулы можно представить иначе, если вместо  $\sigma_0$ , зависящего от величины  $t$ , ввести в расчеты  $\sigma_a = [\sigma_0]_{t=2m}$ . В таком случае:  $\sigma_0 = \frac{\sigma_a t}{2m}$  \* и следовательно формулы (8-а), (8'<sup>bis</sup>) и (8''<sup>bis</sup>) представляются в следующем виде:

$$\begin{aligned} M_0 &= 0,5 \xi k \sigma_a t^4 d. & (VIII-a) \\ M_1 &= 0,5 k \sigma_a d_1 (b_1 - d) (x_0 - t_1) t_1 \cdot t & (VIII'-bis) \\ M_2 &= 0,5 k \sigma_a d_2 (b_2 - d) \frac{(t_2 - x_0)^2}{(t - x_0)} t_2 \cdot t. & (VIII''-bis) \end{aligned}$$

Пример 2.

Определим реактивный момент грунта для условий разобранного выше примера № 1, приняв при этом  $\sigma_a = 15000 \text{ кг/м}^2$ .

$$\frac{x_0}{t} = \frac{1,35}{2} = 0,675.$$

Согласно кривой рис. 15 имеем  $\xi = 0,0747$ .  
Отсюда

$$M_0 = \xi k \sigma_a t^4 d = 0,0747 \cdot 0,75 \cdot 15000 \cdot 2^3 \cdot 0,3 = 2020 \text{ м} \cdot \text{кг}; \quad (8-a)$$

$$M_1 = 0,15 \cdot 15000 \cdot 0,3 \cdot 0,45 \cdot 0,675^2 = 695 \text{ м} \cdot \text{кг}; \quad (8')$$

$$M_2 = \frac{0,75 \cdot 15000 \cdot 0,3 \cdot 0,25}{(2 - 1,35)} (1,8 - 1,35)^2 \cdot 1,8 = 475 \text{ м} \cdot \text{кг}; \quad (8'')$$

$$M_r = 2020 + 695 - 475 = 3190 \text{ м} \cdot \text{кг}.$$

## 7. ПРИБЛИЖЕННЫЕ ФОРМУЛЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛУБИНЫ ЗАРЫТИЯ СТОЛБА

Выведенные формулы путем уменьшения их точности можно значительно упростить, приводя их к виду, позволяющему непосредственно определить глубину зарытия столба в грунт по величине момента внешних сил относительно поверхности грунта (опасное сечение столба).

Рассмотрим отдельно случаи: а) столб без лежней и б) столб с лежнями.

а) Столб без лежней и пасынков.

В этом случае реактивный момент грунта определяется из формулы (8-а). Таким образом, воспользовавшись уравнением (7), условие равновесия столба сможем написать в следующем виде:

$$\sum_{i=n}^{i=1} r_i \cdot v_i + \sum_{i=n}^{i=1} z_i (l_i + x_0) \leq M_r = \xi c k t^3 d \operatorname{tg} \alpha. \quad (\text{ж})$$

Величина  $\sum_{i=n}^{i=1} z_i (l_i + x_0)$  может быть при всех условиях приближенно принята кратной величине  $\sum_{i=n}^{i=1} z_i l_i$ . Для контактного оборуду-

\* См. формулы (2) и (3-а).

дования по системе цепной подвески мы имеем по последним нормам НКПС наиминишее положение провода 5,75 м над головкой рельса, что дает высоту точек фиксации его около 6 м над головкой рельса.

В таком случае высота точки приложения горизонтальной реакции провода от поверхности грунта может быть принята 6,75—7 м.

Высота приложения горизонтальной реакции троса при этом зависит, помимо конструктивных данных системы (стрела провеса троса, наименьшая струна, конструкция подвеса троса), также от конструкции кронштейна и может быть принята около 8,5—9,5 метров от поверхности грунта.

Принимая  $x_0 = 1,4$  м имеем, что отношение  $\frac{l_i + x_0}{l_i}$  может быть принято для контактного провода 1,21—1,2, а для троса 1,17—1,15. Таким образом, с запасом это отношение может быть принято равным 1,2.

Это отношение, примерно, сохраняется и для простой подвески, где высота подвеса колеблется от 5,5 м (кронштейны) до 7 м (поперечная) за счет меньшей глубины зарытия, а следовательно и уменьшения величины  $x_0$ .

В соответствии с этим примем:

$$\sum_{i=1}^n r_i v_i + \sum_{i=1}^n z_i (l_i + x_0) = 1,2 M' = M, \quad (10)$$

где

$$M' = \sum_{i=1}^n z_i \cdot l_i + 0,833 \sum_{i=1}^n z_i v_i. \quad (3)$$

Обратимся теперь к коэффициенту  $\xi$ .

Кривая рис. 19 дает нам зависимость величины этого коэффициента от величины  $\left(\frac{x_0}{l}\right)$ , являющейся, в свою очередь, функцией от переменной  $\gamma$ , определяемой графически кривой рис. 15.

Пользуясь этими кривыми, получаем таблицу, в которой под  $\xi_0$  подразумевается  $(\xi)_{\gamma=0}$ :

| $\gamma$ | $\frac{x_0}{l}$ | $\xi$  | $\frac{\xi - \xi_0}{\xi} \cdot 100$ |
|----------|-----------------|--------|-------------------------------------|
| 0        | 0,685           | 0,0755 | 0%                                  |
| 0,02     | 0,700           | 0,0767 | +1,6                                |
| 0,04     | 0,714           | 0,0782 | +4,0                                |
| 0,06     | 0,727           | 0,0800 | +6,0                                |

Из таблицы ясно, что в зависимости от величины  $\gamma$  коэффициент  $\xi$  изменяет свое значение в пределах от 100 до 106%. Приняв  $\xi = 0,0775$ , будем иметь возможную ошибку в этом коэффициенте  $\pm 3\%$ .

Наконец величину  $d$  можно выразить в зависимости от  $M''$  — момента внешних сил у поверхности грунта, где столб имеет опасное сечение.

В таком случае имеем следующий ряд равенств:

$$M'' = \sum_{i=1}^{i=n} z_i l_i + \sum_{i=1}^{i=n} v_i r_i \quad (10-a)$$

$$k_u = \frac{M''}{0,1 d_0^3}; \quad (u)$$

$$\frac{d}{d_0} = \frac{d_0 + \frac{0,01 t}{2}}{d_0} \quad (k)$$

Величина  $K$  допускаемого напряжения на изгиб для полусухой сосны III сорта при незащищенных сооружениях III класса (контактные линии) согласно единым строительным нормам (сер. IX, № 5).

$$k_u = 110 \cdot 1,0 \cdot 0,85 \cdot 0,9 = 85 \text{ кг/см}^3 = 85 \cdot 100 \text{ кг/м}^2.$$

Ориентируясь на величины  $d_0 \cong 0,3 \text{ м}$  и  $t \cong 2 \text{ м}$  отношение среднего подземного диаметра столба ( $d$ ) к его величине у поверхности грунта ( $d_0$ ) согласно равенству ( $k$ ) примем равным 1,03. В таком случае согласно равенствам ( $k$ ) и ( $u$ ) имеем величину среднего подземного диаметра столба в метрах в следующем виде:

$$d = 1,03 \sqrt[3]{\frac{M''}{0,1 \cdot 85 \cdot 100^3}} = 0,0235 \sqrt[3]{M''} \quad (л)$$

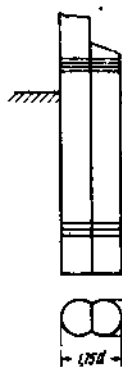


Рис. 20. Опора с одним пасынком.

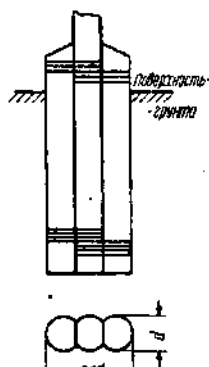


Рис. 21. Опора с двумя пасынками.

Затем выразим величину  $\sigma_0$  в зависимости от  $\sigma_a = [\sigma_0]_{t=2 \text{ м}}$ . В таком случае согласно формулам ( $\delta$ ) ( $3^a$ ) имеем:  $\sigma_0 = \frac{\sigma_a t}{2}$ .

Воспользовавшись полученными зависимостями, имеем:

$$t = \sqrt[4]{\frac{1,2 \cdot 2}{0,0775 \cdot 0,75 \cdot \sigma_a d}} = 2,53 \sqrt[4]{\frac{M''}{\sigma_a d}} \quad (17)$$

или, пользуясь равенством ( $л$ ) и принимая для определения  $t$  в запас прочности  $d = 0,0235 \sqrt[3]{M''}$ \*, имеем.

$$t = 6,5 \sqrt[4]{\frac{M''^{\frac{2}{3}}}{\sigma_a}} \quad (17')$$

Пример 3.

$$M = 2000 \text{ м} \cdot \text{кг}$$

$$\sigma_a = 15000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{м}}$$

$$t = 6,5 \sqrt[4]{\frac{2000^{\frac{2}{3}}}{15000}} = 6,5 \sqrt[4]{\frac{158,5}{15000}} = 2,1 \text{ м}.$$

\* Это повлияет на увеличение  $t$ , не более чем на 1%, полагая, что  $\sum v_i r_i = 0,5 \text{ м}$

б) Столб с пасынками (см. рис. 20 и 21)

В случае усиления столба в его подземной части пасынками, опасное сечение столба лежит выше поверхности земли. Приняв расстояние опасного сечения столба по поверхности грунта около 1 м, имеем:

$$\left(\frac{d}{d_0}\right) = \frac{d_0 + 0,01 \left(1 + \frac{t}{2}\right)}{d_0} \cong 1 + \frac{0,02}{0,3} \cong 1,07.$$

Откуда

$$d = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot 1,07^3 \cdot M''}{85 \cdot 100^3}} = 0,0244 \sqrt[3]{M''}. \quad (17)$$

Ширина рабочей поверхности фундамента должна учитывать пригонку пасынков к столбу и поэтому равна  $md$ , где  $m > 1$ . Коэффициент формы поверхности также изменится. Величину  $kmd$  примем: аа) один пасынок ( $m = 1,75$ )

$$kmd = 0,75d + (1,75 - 1)d = 1,5d.$$

бб) два пасынка ( $m = 2,5$ )

$$kmd = 0,75d + (2,5 - 1)d = 2,25d.$$

Величина  $kmd$  для столба без пасынков равна  $0,75d$ .

В таком случае вместо формул (17) и (17') имеем:

аа) один пасынок

$$t = 2,12 \sqrt[4]{\frac{M'_s}{\sigma_a d}}. \quad (17-a)$$

бб) два пасынка:

$$t = 1,9 \sqrt[4]{\frac{M'_s}{\sigma_a d}}, \quad (17-b)$$

$$t = 5,4 \sqrt[4]{\frac{M'_s}{\sigma_a}}. \quad (17'-a)$$

$$t = 4,82 \sqrt[4]{\frac{M'_s}{\sigma_a}}. \quad (17'-b)$$

Величина  $M'$  определяется при этом из формулы (3), причем под  $l$  подразумевается расстояние от точки приложения горизонтального усилия ( $z$ ) до места укрепления к столбу пасынков.

в) Столб с лежнями без пасынков (рис. 11)

В случае применения лежней центр вращения столба в грунте перемещается, приближаясь к лежню, воспринимающему большую реакцию грунта.

Из рис. 19 явствует, что при заданной глубине зарытия столба ( $t$ ) и его угле отклонения ( $\alpha$ ) наименьший реактивный момент имеет место при  $\frac{x_0}{t} = 0,63$ , тогда как при столбе без лежней это отношение имеет значение от 0,67 до 0,7.

Отсюда ясно, что увеличение размеров верхнего лежня, вызывающее перемещение центра вращения столба в направлении уровня земли, не является желательным и рационально стремиться к тому, чтобы  $P_1 \leq P_2$ .

Имея намерение использовать в качестве лежней нормальные железнодорожные шпалы, имеющие длину 2,7 м, примем:

$$b_1 = 1,35 \text{ м (половина шпалы);}$$

$$b_2 = 0,90 \text{ м (треть шпалы);}$$

$$t_1 \cong \frac{x_0}{2} \cong 0,35 \text{ т;}$$

$$t_2 = 0,9 \text{ т.}$$

Кроме того

$$d = 0,30 \text{ м;}$$

$$x_0 = 0,7.$$

Согласно формулам (5') и (5'') и рис. 11 отношение реакций  $P_1$  и  $P_2$  на лежни 1 и 2 в этом случае равно:

$$P_1 = \frac{(b_1 - d)(t - x_0) \cdot t}{(b_1 - d)(t_2 - x_0) \cdot t_2} = \frac{1,05 \cdot 0,3 \cdot 0,35}{0,60 \cdot 0,2 \cdot 0,9} = 1,02,$$

т. е. практически можно принять:

$$P_1 \approx P_2.$$

Отметим здесь попутно, что согласно американской практике имеем следующие размеры лежней:

$$b_1 = 4' \approx 1,22 \text{ м;}$$

$$b_2 = 2' = 0,61 \text{ м} \quad d_1 = d_2 \geq 4'' = 0,1 \text{ м}^*$$

При этом  $P_1$  значительно больше  $P$  и положение центра вращения столба соответствует минимальным значениям  $\xi$  (см. рис. 19) и  $M_0$  (см. форм. 8-а).

При принятых нами соотношениях:

$P_1 = P_2$ ;  $x_0 = 0,7 \text{ т;}$   $t_1 = 0,35 \text{ т;}$   $b_1 = 1,35 \text{ м;}$   $d = 0,30 \text{ м,}$  воспользовавшись формулой (5') и произведя в ней замену:

$$k\sigma_a = \frac{k\sigma_0 t}{2} = \frac{k c (t - x_0) \operatorname{tg} \alpha}{t} \cdot \frac{2}{t} = \frac{2 k c (t - x_0) \operatorname{tg} \alpha}{t^2},$$

имеем:

$$P_1 = P_2 = \frac{k\sigma_a (b_1 - d) t_1 d_1 t}{2} = 0,5 \cdot 0,75 \cdot (1,35 - 0,30) \cdot 0,35 t^2 \cdot d_1 \sigma_a = 0,137 t^2 \cdot d_1 \sigma_a. \quad (3-bis)$$

Реактивный момент лежней получим, умножив реакцию грунта на каждый из лежней на расстояние между лежнями:

$$(t_2 - t_1) = (0,9 - 0,35) t = 0,55 t.$$

В таком случае:

$$(M_1 + M_2) = 0,075 d_1 \cdot t^3 \sigma_a. \quad (3)$$

Пользуясь формулой (8-а), принимая в соответствии с величиной  $\left(\frac{x_0}{t}\right) = 0,7$  коэффициент  $\xi = 0,0767$ , имеем:

$$M_0 = 0,5 \cdot 0,0767 \cdot 0,75 \cdot \sigma_a t^4 \cdot d = 0,0287 \sigma_a t^4 \cdot d. \quad (VIII-7)$$

Откуда

$$M_1 + M_2 + M_0 = 1,2 M' = 0,0287 \sigma_a t^4 d \left(1 + 2,6 \frac{d_1}{t \cdot d}\right), \quad (9)$$

где  $M'_1$  определяется формулой (3) в § 8.

\* См. AEREA Manual

Для приближенного определения глубины зарытия столба с двумя лежнями (без пасынков) можно пользоваться формулами, аналогичными формулам (11) и (11'), принимая

$$M' = \frac{0,0287}{1,2} \sigma_a t^4 d \left(1 + 2,6 \frac{d_1}{td}\right).$$

Величину  $\frac{d_1}{dt}$  при этом можно определить приблизительно, принимая

$$\frac{d_1}{d} = 0,8$$

и

$$t = 0,7 \text{ м.}$$

В этом случае:

$$\frac{d_1}{d \cdot t} = 0,4$$

и формулы (11) и (11') принимают следующий вид:

$$t = 2,12 \sqrt[4]{\frac{M'}{\sigma_a \cdot d}}; \quad (11-b)$$

$$t = 5,45 \sqrt[4]{\frac{M_1}{\sigma_a}}, \quad (11'-b)$$

т. е. глубина зарытия уменьшается в 1,20 раза по сравнению со столбом без пасынков и равна таковой при столбе с одним пасынком (сравним формулы (19-a) и (19'-a).

Пример 4.

$$M' = 2500 \text{ м кг;}$$

$$\sigma_a = 10000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2}.$$

Диаметр столба у поверхности грунта согласно формуле (а):

$$d = 0,235 \sqrt[3]{M'} = 0,235 \sqrt[3]{2500} \approx 0,32 \text{ м.}$$

Необходимая глубина зарытия столба:

$$t = 5,45 \sqrt[4]{\frac{2500}{\sigma_a}} = 5,45 \sqrt[4]{\frac{2500}{10000}} = 2,02 \text{ м,}$$

округленно 2,00 м.

В случае применения столба без лежней согласно формуле (11') имеем:

$$t = 6,5 \sqrt[4]{\frac{M_1}{\sigma_a}} = 2,42 \text{ м.}$$

Таким образом применение лежней уменьшило необходимую глубину зарытия столба на 0,42 м.

## 8. РЕАКТИВНЫЙ МОМЕНТ ПОДОШВЫ ОСНОВАНИЯ БЕЗ ЛЕЖНЕЙ

Реактивный момент действует не только на боковую поверхность фундамента опоры а, б, в, но также и на его основание.

Для опор, изображенных на рис. 22, этот момент весьма значителен и должен быть обязательно учтен при расчете.

Выведем общее выражение для этого момента, предполагая подошву по типу рис. 22-а и 22-б, т. е. прямоугольную или цилиндрическую длиной  $b_0$  и одинаковой ширины  $d_0$ .

В том случае, если опора не испытывает опрокидывающего момента, основание фундаментов оказывает равномерное давление на грунт. Полная величина этого давления

$$G = G_1 + G_2.$$

Причем, согласно рис. 22-а, б, в,

$$G_0 = \gamma t_0 (b_0 d_0 - S). \quad (12)$$

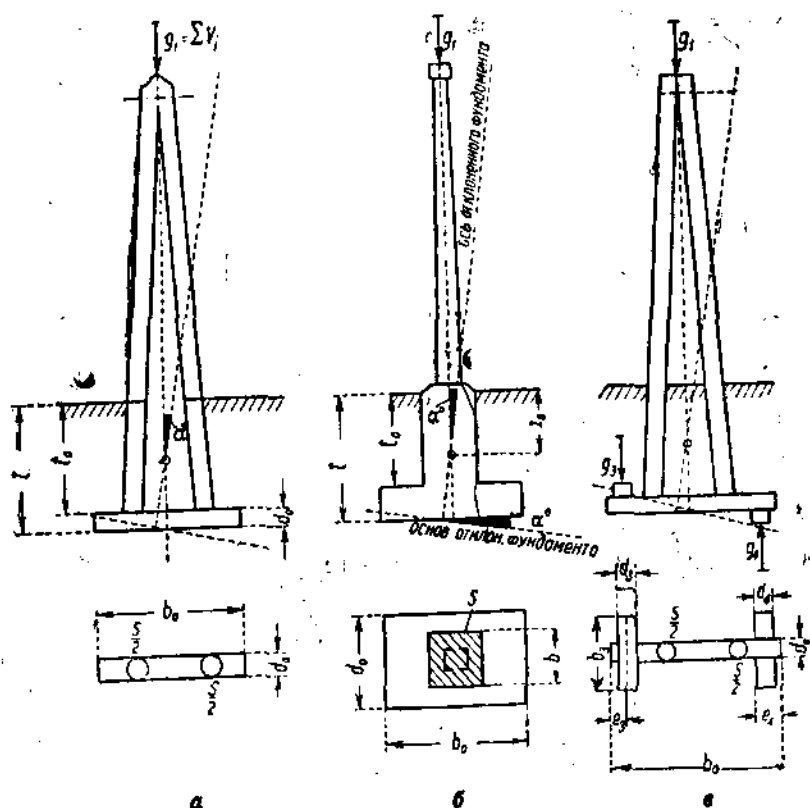


Рис. 22а, б, в. Фундаменты, работающие подошвой своего основания.

В этих формулах:

$G_1$  — вес опоры с поддерживаемым ею оборудованием и фундаментом;

$G_2$  — вес земли, лежащей сверх фундамента;

$\gamma$  — удельный вес грунта;

$b_0$  и  $d_0$  — размеры основания фундамента;

$S$  — поверхность, используемая на сопряжение вертикальной части фундамента с его основанием (см. рис. 22-а).

Противодавление грунта на основание фундамента не может быть меньше некоторой величины  $\sigma''$  (см. рис. 23), обеспечивающей от обрушения грунт, окружающий основание фундамента.

Величина  $\sigma''$  найдется из рассмотрения рис. 24. На этом рисунке  $AB$  — подпорная стенка. Грунт, поддерживаемый этой стенкой на уровне  $cd$ , стремится обрушиться (призма  $ldo$ ). Такому обрушению препятствует выпирание грунта с другой стороны стенки (призма  $l_1 d_1 o$ ).

Очевидно, что вследствие этого обстоятельства высота уровня  $c_1 d_1$  составит лишь часть высоты  $l$  уровня  $c_1 d_1$  и поэтому обозначена нами на рис. 24 через  $mt$ , где  $m \ll 1$ .

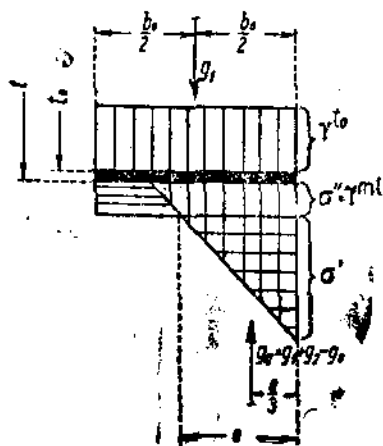


Рис. 23. Распределение давлений на основание фундамента.

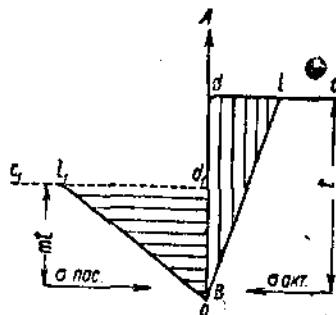


Рис. 24. Распределение давлений на подпорную стенку

$$\begin{aligned} \gamma mt \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) = \\ = \gamma t \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \end{aligned}$$

Соотношение между высотами уровней  $cd$  и  $c_1 d_1$  найдем приравняв активное сопротивление для глубины  $l$  (соответствующей уровню  $lc$ ) пассивному сопротивлению на глубине  $mt$  (соответствующей уровню  $c_1 d_1$ ).

$$\gamma t \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) = \gamma mt \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right). \quad (м)$$

Отсюда:

$$m = \frac{\left( \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \right)}{\left( \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \right)}. \quad (н)$$

Из приведенных рассуждений ясно, что искомая величина должна быть приравнена к весу грунта, имеющего основание, равное единице поверхности и высоте, равную  $mt$ , т. е.

$$\sigma'' = \gamma mt. \quad (о)$$

Величина  $m$ , как явствует из формулы (н), зависит от угла трения грунта. Для обычных грунтов, имеющих  $\varphi$ , равное от 25 до 30°, величина  $m = 0,164$  до 0,111. Вес грунта  $1800 \text{ кг/м}^3$  —  $1600 \text{ кг/м}^3$ .

Для средних условий можно принять

$$\gamma t = 250 \text{ кг/м}^2.$$

Минимальное противодействие грунта на подошву фундамента:

$$G_0 = \gamma mt b_s d_s. \quad (12')$$

Под влиянием опрокидывающего момента основание фундамента повернется около некоторой оси на угол  $\alpha$ , что вызовет появление деформации в грунте, соприкасающемся с подошвой фундамента.

В виду того, что упругость грунта на постоянной глубине можно принять постоянной, а деформации грунта пропорциональны расстоянию рассматриваемой точки грунта от оси вращения, то закон изменения противодействия грунта на подошву фундамента изобразится в виде комбинаций прямоугольника, имеющего высоту  $\gamma t$ , и треугольника, причем их общая площадь, умноженная на ширину подошвы фундамента  $d_0$ , должна быть равна

$$G = G_1 + G_2$$

т. е. собственному весу конструкции ( $G_1$ ) и лежащей над нею земли ( $G_2$ ). Отсюда общее противодействие грунта, изменяющееся по закону треугольника, согласно предыдущим рассуждениям равно:

$$G_2 = G_1 + G_2 - G_0 = G_1 + \gamma t_0 (b_0 d_0 - S) - \gamma t b_0 d_0. \quad (12)$$

Основание треугольника давлений  $e$  найдем из следующих двух уравнений, ясных из рис. 23.

$$G_2 - \frac{\sigma' \cdot e \cdot d_0}{2} = 0; \quad (п)$$

$$\sigma' = c k_0 e \operatorname{tg} \alpha, \quad (р)$$

где  $k_0$  — коэффициент формы подошвы основания.

Откуда:

$$e = \sqrt{\frac{2G_2}{c k_0 d_0 \operatorname{tg} \alpha}}. \quad (13)$$

При этом реактивный момент грунта на подошву основания определится согласно тому же рисунку (рис. 23) следующим образом:

$$\begin{aligned} M_2 &= G_2 \left( \frac{b_0}{2} - \frac{e}{3} \right) = \\ &= G_2 \left\{ 0,5 b - \frac{1}{3} \sqrt{\frac{2G_2}{c k_0 d_0 \operatorname{tg} \alpha}} \right\}. \end{aligned} \quad (14)$$

Вспоминая, что

$$c \cdot \operatorname{tg} \alpha \frac{l - x_0}{t} = \sigma_0$$

и принимая

$$\frac{l - x_0}{t} = 0,3,$$

имеем

$$c \cdot \operatorname{tg} \alpha = \frac{10 \sigma_0}{3}.$$

Подставляя это выражение в формулу (14), получаем выражение для  $M_2$  в зависимости от  $\sigma_0$ :

$$M_2 = G_2 \left\{ 0,5 b - 0,258 \sqrt{\frac{G_2}{k_0 d_0 \sigma_0}} \right\}. \quad (14-a)$$

Предварительно, прежде чем применить формулу (14), следует проверить допустимость получаемого максимального давления подошвы основания на грунт по формуле:

$$\sigma' \leq \sigma_{\text{доп}} - \gamma \gamma t. \quad (14-b)$$

При этом в большинстве случаев последним членом этого неравенства можно пренебречь в виду его малой величины и считать:

$$\sigma' \leq \sigma_{\text{дон.}}$$

В этой формуле  $\sigma'$  определяется равенством (р),  $\sigma_{\text{дон.}}$  — «Единными нормами строительного проектирования».

Если неравенство (14<sub>в.а</sub>) не соблюдено, то потребуется уменьшить длину подошвы  $b_0$  или перейти к основаниям типа, изображенного на рис. 22-б.

## 9. РЕАКТИВНЫЙ МОМЕНТ ПОДОШВЫ ОСНОВАНИЯ С ЛЕЖНЯМИ

Для уменьшения давления подошвы основания на грунт могут быть применены специальные подкладки, как это показано на рис. 22-в и 25. Этот случай отличается

от только-что разобранных появлением двух добавочных усилий:  $G_3$  и  $G_4$  — реакции подошвенных лежней, из которых одна ( $G_3$ ) направлена вниз, а другая ( $G_4$ ) — вверх.

Приняв для верхних поверхностей лежней одну и ту же высоту  $t_0$  и соот-

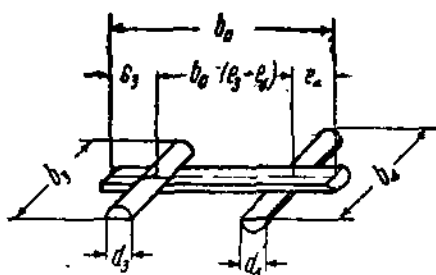
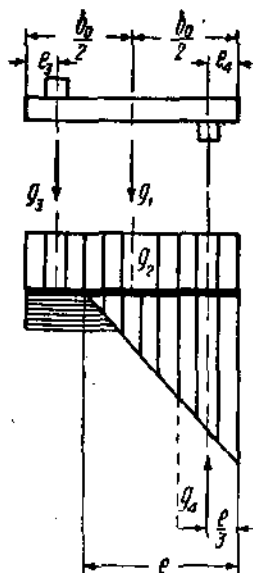


Рис. 25.

ветственно для нижних —  $t$ , подобно предыдущему, получим согласно рис. 22-б и 25:

реакция верхнего упора

$$G_3 = \gamma t_0 d_3 b_3; \quad (15)$$

реакция нижнего упора, направленная вверх,

$$G_4 = eck_0 \lg ad_4 (b_4 - d_0) - e_4 ck_0 \lg ad_4 (b_4 - d_0) + m\gamma t b_4 d_4. \quad (16)$$

\*  $\sigma_0$  может быть заменено  $\sigma_a$ , исходя из равенства:

$$\sigma_0 = \frac{2\sigma_a}{t}.$$

В этом случае

$$M_a = G_a \left\{ 0,5b - 0,183 \sqrt{\frac{G_a \cdot t}{b_0 d_0 \sigma_a}} \right\}. \quad (14-а \text{ вв})$$

Вводя эти члены добавочными слагаемыми в уравнение (п), ( $G_3$  с плюсом и  $G_4$  с минусом), получаем квадратное уравнение для определения  $e$ :

$$ue^2 + ye - Z = 0.$$

Откуда имеем

$$e = \frac{-y + \sqrt{y^2 + 4uZ}}{2u}. \quad (17)$$

В этом уравнении:

$$u = \frac{ck_0 \operatorname{tg} \alpha d_0}{2}. \quad (17')$$

$$y = ck_0 \operatorname{tg} \alpha d_0 (b_4 - d_0);$$

$$y = \frac{2ud_0(b_4 - d_0)}{d_0}. \quad (17'')$$

$$Z = G_1 + \gamma t_0 (b_0 d_0 + d_3 b_3 - S) + e_4 ck_0 \operatorname{tg} \alpha d_4 (b_4 - d_0) - \\ - \mu \gamma t (b_0 d_0 + b_4 d_4 + b_3 d_3). \quad (17''')$$

Реактивный момент грунта, действующий на подошву основания, в этом случае равен:

$$M_a = G_3(b_0 - e_3 - e_4) + (G_4 - G_2)(0,5b_0 - e_4) + \\ + [G_1 - (G_4 - G_2)] \left(0,5b_0 - \frac{e}{3}\right).$$

При этом  $G_3$ ,  $G_4$ ,  $G_1$  и  $e$  определяются соответственно формулам (15), (16), (12) и (17).

Как и в предыдущем случае, предварительно должна быть произведена проверка допустимого давления на грунт со стороны подошвы, пользуясь формулой (14<sub>пл</sub>).

Примечание. В формулах (17'), (17''), (17''') величина  $e$  должна быть приведена к глубине заложения основания  $t$ .

Пример 5 к § 10.

Определим реактивный момент подошвы основания опоры согласно рис. 22-б для следующих заданных величин:

Дано:

$$d_0 = d_3 = d_4 = 0,25 \text{ м};$$

$$b_3 = b_4 = 0,50 \text{ м};$$

$$b_0 = 1,25 \text{ м};$$

$$S = 0,15 \text{ м}^2;$$

$$t = 2,0 \text{ м};$$

$$l_3 = l_4 = 0;$$

$$\sigma_{\text{дон}} = 30\,000 \text{ кг/м}^2;$$

$$c = 10,10^6 \text{ кг/м};$$

$$\operatorname{tg} \alpha = 0,005;$$

$$k_0 = 0,75;$$

$$\gamma = 1\,800 \text{ кг/м}^3;$$

$$\mu \gamma = 250 \text{ кг/м}^2;$$

$$G_1 = 1\,000 \text{ кг}.$$

Решение:

$$u = \frac{10^7 \cdot 0,75 \cdot 0,005 \cdot 0,25}{2} = 4\,670 \text{ кг/м}^2; \quad (17'')$$

$$y = 2 \cdot 4\,670 (0,5 - 0,25) = 2\,320 \text{ кг/м}; \quad (17''')$$

$$Z = 1\,000 + 1\,800 \cdot 2 (1,25 \cdot 0,25 + 0,25 \cdot 0,5 - 0,15) - 250 \cdot 2 (1,25 \cdot 0,25 + 2 \cdot 0,5 \cdot 0,25) = 1\,000 + 1\,030 - 266 = 1\,764 \text{ кг}; \quad (17''')$$

$$e = \frac{-2\,320 + \sqrt{2\,320^2 + 4 \cdot 4\,670 \cdot 1\,764}}{2 \cdot 4\,670} = 0,416 \text{ м}; \quad (17)$$

$$G_s = 1\,000 + 1\,800 \cdot 2 (1,25 \cdot 0,25 - 0,15) - 250 \cdot 2 \cdot 1,25 \cdot 0,25 = 1\,000 + 585 - 155 = 1\,430 \text{ кг}; \quad (12)$$

$$G_3 = 1\,800 \cdot 1,75 \cdot 0,25 \cdot 0,5 (1 - 0,139) = 340 \text{ кг}; \quad (15)$$

$$G_4 = 0,416 \cdot 2 \cdot 4\,670 (0,5 - 0,25) - 250 \cdot 2 \cdot 0,5 \cdot 0,25 = 970 - 62,5 = 907 \text{ кг}; \quad (16)$$

$$G_4 - G_3 = 907 - 340 = 567 \text{ кг};$$

$$M_s = 340 \cdot 1,25 + 567 \cdot 0,625 + (1\,430 - 567) \cdot \left(0,625 - \frac{0,416}{3}\right) = 425 + 354 + 420 = 1\,200 \text{ кг/м}. \quad (18)$$

Проверяем величину  $\sigma_s$  по формуле (р) для глубины  $t = 2 \text{ м}$ .

$$\sigma_s = 10^7 \cdot 0,75 \cdot 0,005 \cdot 0,416 = 15\,600 \text{ кг/м}^2$$

$$\sigma_{\text{ср}} - \text{мрт} = 30\,000 - 250 \cdot 2 = 29\,500 \text{ кг/м}^2$$

Пример 6 к § 9.

Продолжаем тот же расчет для основания по рис. 22-б, т. е. без лежней у подошвы. Найдено:

$$G_s = 1\,430 \text{ кг}.$$

Отсюда:

$$M_s = 1\,430 \left(0,625 - \frac{1}{3} \sqrt{\frac{2 \cdot 1\,430}{10^7 \cdot 0,75 \cdot 0,25 \cdot 0,005}}\right) = 630 \text{ кг} \cdot \text{м}.$$

Таким образом введение лежней в подошву основания при данных условиях увеличивает момент на 90%.

## 10. ПОЛНЫЙ РЕАКТИВНЫЙ МОМЕНТ ГРУНТА

Зная боковой и подошвенный реактивные моменты, найдем результирующий реактивный момент. При этом следует иметь в виду, что для неглубоких фундаментов с опорной плитой преобладающим является подошвенный момент, для глубоких же фундаментов наоборот превалирует боковой реактивный момент —  $M_0$ . Уменьшая постепенно глубину, мы перейдем, наконец, к поверхностным подушкам или плитам, для которых

$$M_1 = M_0.$$

Для этого случая цитированные выше швейцарские нормы рекомендуют ввести коэффициент надежности, равный 1,5, так как наклонение фундамента, в случае если внешний момент станет больше подошвенного  $M_1 < M_0$ , здесь ничем не ограничено.

Чтобы избежать скачка в размерах фундамента при переходе от обычных фундаментов к плитам, швейцарские нормы предписывают вводить переменный коэффициент надежности ( $S$ ) для всех случаев, когда  $M_a > (M_0 + M_1 + M_2)$ , деля на этот коэффициент величину подошвенного момента  $M_a$ . При  $M_a \leq (M_0 + M_1 + M_2)$  коэффициент

$$S = 1.$$

В таком случае результирующий реактивный момент грунта

$$M_r = M_0 + M_1 + M_2 + \frac{M_a}{S}. \quad (9-bis)$$

Величина коэффициента  $S$  для различных отношений  $\left(\frac{M_0 + M_1 + M_2}{M_a}\right)$  приведена на рис. 26.

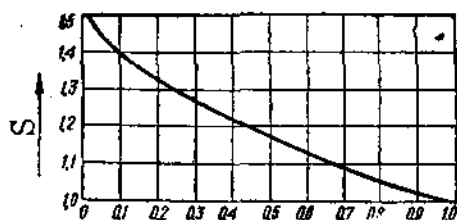


Рис. 26. Коэффициент надежности  $S$ .

## 11. ПРИБЛИЖЕННАЯ ФОРМУЛА ДЛЯ РАСЧЕТА ГЛУБИНЫ ЗАРЫТИЯ А-ОБРАЗНЫХ ДЕРЕВЯННЫХ ОПОР С ЛЕЖНЯМИ

Для приблизительного определения глубины зарытия опоры с реактивным подошвенным моментом и с лежнями можно вывести формулу, подобную (11). Будем подразумевать под  $M_2$  реактивный момент, создаваемый вертикальной частью столба и лежнями.

В таком случае, согласно предыдущему, имеем  $M_a = 1,2 M$  (форм. 10). С другой стороны

$$M_r = (M_0 + M_1 + M_2) - \frac{M_0}{S}.$$

В виду того, что нормы (см. таблицу § 5) предусматривают небольшое отклонение величины допустимого удельного давления на грунт при изменении глубины зарытия против 2,0 м, которую можно принять средней для оснований опор, то величину  $M_a$  можно считать постоянной, не зависящей от глубины зарытия опоры.

Таким образом за счет глубины зарытия может быть покрыт лишь суммарный момент боковой реакции грунта (столб и лежни), равный:

$$(M_0 + M_1 + M_2) = 1,2 M' - \frac{M_a}{S}.$$

Введение лежней равнозначно увеличению диаметра столба в  $\vartheta$  раз, причем  $\vartheta$  определяется формулой (9). Таким образом, при

$$S = 1.$$

$$\vartheta M_0 = 1,2 M' - M_a.$$

Обращаясь теперь к формуле (XIII-a), имеем:

$$t = \sqrt[4]{\frac{1,2 M' - M_a}{0,5 \xi k \sigma_a d \cdot \vartheta}}. \quad (M)$$

Приняв попрежнему,

$$\xi = 0,0775;$$

$$k = 0,75;$$

имеем:

$$l = 2,53 \cdot \sqrt[4]{\frac{M' - 0,835 M_a}{\vartheta d \sigma_a}} \quad (19)$$

Формула (19) является универсальной приближенной формулой, обнимающей все случаи, причем при отсутствии лежней следует принимать  $\vartheta = 1$ , а для обычных лежней (верхний из полушпалы, а нижний из трети шпалы)  $\vartheta \cong 2,00$  (точнее 2,04). Наконец в случае пасынков, как это ясно из сравнения формул (11), (11-а) и (11-б),

а) один пасынок  $\vartheta \cong 2$ ;

б) два пасынка  $\vartheta \cong 3,1$ .

Лучше, однако, величину  $\vartheta$  определить из формулы (9).

Пример 7.

$$M = 5000 \text{ кг} \cdot \text{м};$$

$$M_a = 1200 \text{ кг} \cdot \text{м};$$

$$\sigma_a = 15000 \text{ кг/м}^2;$$

$$d = 0,35 \text{ м};$$

$$\vartheta = 2,25.$$

$$l = 2,53 \sqrt[4]{\frac{(7000 - 0,835 \cdot 1200)}{2,25 \cdot 0,35 \cdot 15000}} = 2,13 \text{ м}.$$

При отсутствии подошвенного момента:

$$l = 2,53 \sqrt[4]{\frac{7000}{2,25 \cdot 0,35 \cdot 15000}} = 2,2 \text{ м}.$$

Отсюда ясно, что влияние подошвенного момента в деревянных опорах вообще ничтожно. Переход к А-образным опорам диктуется прочностью самой опоры, а не прочностью ее укрепления в грунте.

## 12. РАСЧЕТ ФУНДАМЕНТОВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОПОР

Рассмотренные случаи расчета оснований деревянных опор позволяют разрешить также вопрос о расчете заделки в грунт металлической опоры с бетонным блок-фундаментом или ступенчатым фундаментом.

В первом случае (блок-фундамент) центр вращения опоры и реактивный момент боковой поверхности ее основания определяется по формулам, выведенным в § 6 и 7, в предположении полного отсутствия лежней. Реактивный момент подошвы основания определяется по формулам § 9.

При ступенчатом фундаменте (см. рис. 22-в) боковой реактивный момент определяется в предположении отсутствия верхнего лежня и наличия нижнего, имеющего форму подошвы фундамента.

Таким образом, для основания, изображенного на рис. 13-в, имеем:

$$b_1 = d_1 = 0;$$

$$b_2 = d_0;$$

$$d_2 = (t - t_0);$$

$$t_2 = \frac{t + t_0}{2}.$$

Глубина центра вращения опоры определяется из формулы (7). Боковой реактивный момент складывается из двух величин  $M'_r = M_0 + M_2$ , так как  $M_1 = 0$ . Общий реактивный момент определяется формулой (9-<sup>ва</sup>).

Подобным образом можно рассчитать фундамент любой формы для металлических опор, что придает выведенным формулам полную универсальность.

---

## НОМОГРАММА ДЛЯ РАСЧЕТА ЦЕПНОЙ ПОДВЕСКИ

Для расчета цепной подвески на изменение температуры и вертикальной нагрузки (гололедом) приходится производить довольно большое количество вычислений, которые, если и не являются очень сложными для лиц опытных в этом деле, все же отнимают время и труд, что при большом объеме вариантов, во-первых, может повести к досадным ошибкам, во-вторых, — отвлекает внимание проектировщика от гораздо более важных вопросов принципиального характера.

С целью избежать подобного рода фактов в данном вопросе, а также, чтобы несколько упростить и рационализировать работу проектировщика, автором была произведена попытка применить номографический метод к решению задачи о состоянии цепной подвески при различных температурных и нагрузочных условиях.

В основе своей номограмма будет базироваться на соображениях, уже излагавшихся автором в работе, посвященной теоретическим основаниям цепной подвески на температуру и гололед,\* но для сохранения связности изложения необходимо хотя бы вкратце остановиться на самом существенном из общих вопросов проблемы — деформации цепной подвески под влиянием указанных условий.

Как было доказано автором в указанной работе, величина напряжения материала несущего троса  $\sigma_1'$ , сечением  $\omega_1$ , при любой температуре и нагрузке  $q_1$  килограммов на погонный метр системы, связана с величиной стрелы провеса  $f_1'$  несущего троса следующим выражением:

$$\sigma_1' = \frac{q_1 l^3}{8 \omega_1 f_1'} - \frac{f_1' - f_0'}{l_1} \sigma'' \frac{\omega''}{\omega'} \xi, \quad (7)$$

где:

$l$  — величина пролета в метрах;

$\sigma''$  — напряжение материала контактного провода в  $\text{кг/мм}^2$ ;

$\omega''$  — сечение контактного провода в кв. миллиметрах;

$f_0'$  — стрела провеса несущего троса в метрах при горизонтальности контактного провода, принимаемого нами в этом случае при начальном состоянии;

$\xi = \left(1 - \frac{\lambda}{l}\right)^2$  — коэффициент, учитывающий ослабление влияния тяжения контактного провода на тяжение несущего троса и зависящий от расстояния между струнами  $\lambda$ .

Для удобства пользования им уравнение (7) может быть переписано несколько в ином виде, а именно, если вместо абсолютных

\* „Известия Ленинградского электротехнического института“, 1931 г.

значений стрел провеса ввести относительные, выраженные в долях длины пролета, т. е. положить

$$\varphi = \frac{f}{l},$$

то выражение (7) может приобрести следующий вид:

$$\sigma_1' = \frac{q \cdot l}{8 \omega' \varphi} - \frac{\varphi - \varphi_0}{\varphi} \sigma'' \frac{\omega''}{\omega'} \xi, \quad (2)$$

в котором длина пролета входит не во второй, а уже лишь в первой степени, что, как мы увидим ниже, весьма существенно для построения номограммы.

Очевидно, что, пользуясь одним из вышеприведенных выражений, мы можем для любого случая, т. е. для заданных известных значений  $q$ ,  $l$ ,  $\omega'$ ,  $\omega''$ ,  $\xi$  и  $\varphi_0$  получить зависимость напряжения в материале несущего троса  $\sigma_1'$  от удельной или относительной стрелы  $\varphi$ .

$$\sigma_1' = F_1(\varphi),$$

или обратную

$$\varphi = F_2(\sigma_1'),$$

что, по существу, безразлично.

При этом, если известно, что данная система цепной подвески имеет при температуре  $\tau_0$  значение относительной стрелы провеса  $\varphi_0$ , чему соответствует напряжение несущего троса  $\sigma_0$ , равное, как известно,

$$\sigma_0' = \frac{q_0 \cdot l}{8 \omega' \varphi_0}.$$

(иначе говоря, известно начальное состояние системы),—то при новой температуре  $t$  будет иметь место какая-то новая стрела  $\varphi$ , при новом значении напряжения  $\sigma_1'$ , которое явится причиной так называемого упругого удлинения несущего троса, которое будет равно

$$\Delta L_s = \frac{\sigma_1' - \sigma_0'}{E'} l,$$

где  $E'$  — модуль упругости материала несущего троса.

Известно также, что если обозначить коэффициент термического удлинения материала троса через  $\alpha$ , то можно написать выражение для „термического“ изменения длины троса из-за одного лишь изменения температуры от  $t_0$  до  $t_1$  в таком виде:

$$\Delta L_t = \alpha_1 l (t - t_0).$$

Принимая кривую провеса несущего троса за параболу, имеем возможность написать выражение для длины ее через известные уже нам параметры  $f_1$  (или  $\varphi$ ) и  $l$ , вывод какового выражения мы по общезвестности его и ради экономии места опускаем.

$$L = l \left( 1 + \frac{8}{3} \frac{f_1^2}{l^2} \right),$$

или, что для наших целей удобнее,

$$L = l \left( 1 + \frac{8}{3} \varphi^2 \right).$$

Полагая, что парабола несущего троса при начальной температуре  $t_0$  имела длину  $L_0$ , а при конечной (новой) температуре  $t_1$  — длину  $L_1$ , имеем при прежних обозначениях выражение для чисто геометрического, по существу говоря, изменения длины несущего троса

$$\Delta L = L - L_0 = \left( \frac{8}{3} \varphi^2 - \frac{8}{3} \varphi_0^2 \right) l.$$

Это последнее, очевидно, по принципу наложения деформаций равно алгебраической сумме упругой и термической деформаций, т. е.

$$\Delta L = \Delta L_e + \Delta L_t.$$

Откуда, подставив вместо приращений длин их выражения через интересующие нас параметры, мы можем получить уравнение состояния несущего троса в виде уравнения.

$$\frac{9}{3} \varphi^2 - \frac{8}{3} \varphi_0^2 = \frac{\sigma_1' - \sigma_0'}{E'} + \alpha (t_1 - t_0),$$

или переводя члены с индексами, соответствующими начальному состоянию системы в одну сторону, а искомые, неизвестные — на другую, — получим:

$$E' \frac{8}{3} \varphi^2 \sigma_1' = \frac{8E'}{3} \varphi_0^2 - \sigma_0' + \alpha E' (t_1 - t_0). \quad (3)$$

Это уравнение содержит в своей левой части, как видно, два неизвестных, а именно  $\varphi_1$  и  $\sigma_1'$ , почему определение их может быть совершено помощью найденного уравнения состояния (3) совместно с уравнением (2), связывающим величину искомого напряжения  $\sigma_1'$  материала несущего троса с величиной искомой относительной стрелы  $\varphi$ .

Решение данной задачи непосредственной подстановкой значения  $\sigma_1'$  или  $\varphi$  в уравнении состояния (3) приведет к кубическому уравнению, что практически неудобно, и гораздо проще и нагляднее задача решается нижеследующим приемом.

Решим уравнение (2) относительно величины  $\varphi$ , что приведет нас к следующей зависимости, несколько, на первый взгляд, громоздкой:

$$\varphi = \varphi_0 \frac{\frac{q l}{8 \omega_1 \varphi_0} + \sigma'' \frac{\omega''}{\omega'} \xi}{\sigma_1 + \sigma' \frac{\omega''}{\omega'} \xi}, \quad (4)$$

и вычислим по найденной формуле значения  $\varphi$  для любых значений  $\sigma_1'$ , которыми мы, попросту говоря, задаемся в пределах, практических нас интересующих.

Допустим, что существует простой, легкий и удобный способ нахождения стрелы провеса в долях от пролета  $\varphi$  для различных  $\sigma_1'$  и что мы имеем таблицу этих величин; тогда без всякого затруднения мы можем найти для каждого значения величины  $\sigma$  величины функции

$$\Phi = \frac{8E'}{3} \varphi^2,$$

или, иначе говоря, зависимости

$$\Phi = F(\sigma_1').$$



Если известно, что температура повысилась или понизилась на величину  $t - t_0$  по отношению к начальной, то по температурной диаграмме можно без всяких затруднений найти величину отрезка, соответствующую значению данного изменения температуры и представляющую в том же масштабе величину

$$E' \alpha (t - t_0).$$

Вычтя из отрезка  $BD$  эту величину  $XU = BC$ , мы получим отрезок  $CD$ , равный, как не трудно сообразить, всей правой части уравнения состояния.

$$CD = \frac{8E'}{3} \varphi_0^2 - \sigma'_0 + E' \alpha (t - t_0).$$

Если провести через точку  $C$  прямую  $CK$ , параллельную прямой  $OD$ , до пересечения с кривой  $BKI$  в точке  $K$ , то очевидно, что найденная точка  $K$  будет иметь ординату, равную искомому новому напряжению материала несущего троса  $\sigma'_*$ , которое удовлетворяет уравнению состояния

$$\frac{8E'}{3} \varphi_*^2 - \sigma'_* = \frac{8E'}{3} \varphi_0^2 - \sigma'_0 + E' \alpha (t - t_0),$$

так как отрезок  $CD$  уложился между кривой  $\frac{8E'}{3} \varphi^2$  и прямой  $\sigma'_*$ .

Таким образом отрезок  $OD$  представит нам величину искомого напряжения несущего троса, по которому, подставив его значение в уравнение (4), легко можно найти и новую относительную стрелу. Удобнее заранее в левом координатном углу построить зависимость  $\varphi = F_2(\sigma')$  с тем, чтобы при нахождении величины  $\sigma'_*$  сразу же отсчитать значение удельной стрелы провеса несущего троса  $\varphi$ .

Если бы температура не повысилась, а понизилась на величину  $t - t_0$ , то отрезок  $XU$  мы нашли бы по верхней части температурной диаграммы — он был бы отрицателен, и его по сути дела пришлось бы прибавить к отрезку  $BD$ , т. е. отложить от точки  $B$  влево, так что точка  $C$  получилась бы левее и прямая, пересекающая кривую  $BKI$ , встретила бы с этой кривой выше точки  $B$ , т. е. тяжение бы возросло, что и должно иметь место по физической сущности дела.

Способ этот весьма нагляден, прост и универсален, так как для другой нагрузки (скажем гололедом) требует лишь наличия на том же плане новой кривой  $\sigma'KI'$ , соответствующей другой погонной нагрузке системы цепной подвески (см. рис. 28). Построение ясно из самого чертежа и не требует пояснений, так же как и результат его, дающий увеличение напряжения при гололеде, при увеличившейся стреле, что и должно быть.

Таким образом единственное затруднение представляет получение характерных кривых  $BKI$ , изображающих зависимость величины  $\frac{8E'}{3} \varphi^2$  от  $\sigma$ .

Вообще говоря, пользуясь формулой (4), можно вычислить эту величину для любых комбинаций, пролета тяжения в контактном проводе, сечений провода и троса, их погонной нагрузки и т. п. Но желательно избавить проектировщика по возможности даже и от таких вычислений. Поэтому автором и предлагается ниже сле-

дующая номограмма, обнимающая практически все интересующие нас случаи и комбинации параметров цепной подвески и требующая от проектирующего лишь некоторых операций перекладывания линейки и затем — записи результатов.

Номограмма эта основана на нижеследующих простых соображениях.

Представим формулу (4), выражающую зависимость удельной стрелы от напряжения:

$$\varphi = \varphi_0 \frac{\frac{ql}{8\omega_1\varphi_0'} + \sigma'' \frac{\omega''}{\omega'} \xi}{\sigma_1' + \sigma'' \frac{\omega''}{\omega'} \xi}$$

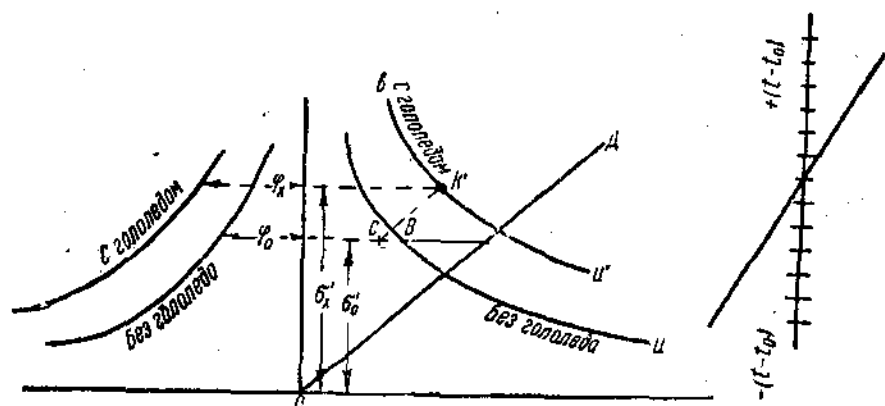


Рис. 28.

в таком виде, что все члены кроме  $\varphi_1$ ,  $\varphi_0$  и  $\sigma_1'$  известны, т. е.

$$\varphi = \varphi_0 \frac{M_1 + N}{\sigma_1' + N},$$

где

$$N = \sigma'' \frac{\omega''}{\omega'} \xi;$$

$$M'' = \frac{ql}{8\omega_1\varphi_0'}.$$

тогда искомую величину  $\varphi$  для данного  $\sigma_1'$  и постоянных значений параметров  $M$  и  $N = \text{const}$  можно выразить следующим геометрическим построением (см. рис. 29).

Отложим влево от некоторой точки  $O$  в некотором масштабе отрезок  $ob$ , равный величине  $N = \text{const}$ , вправо от этой же точки отложим отрезок  $oa$ , равный величине  $M = \text{const}$ , проведем из точки  $a$  перпендикуляр  $ax$ , который, как будет ясно впоследствии, даст шкалу для ответов.

По той же оси  $oa$  (и в том же, конечно, масштабе, что и величина  $M$  и  $N$ ) отложим отрезок  $oc$ , представляющий значение напряжения материала несущего троса  $\sigma_1'$ , из точки  $c$  опустим перпендикуляр  $cd$  и отложим величину  $cd = \varphi_0 = \text{const}$ . Если мы теперь соединим





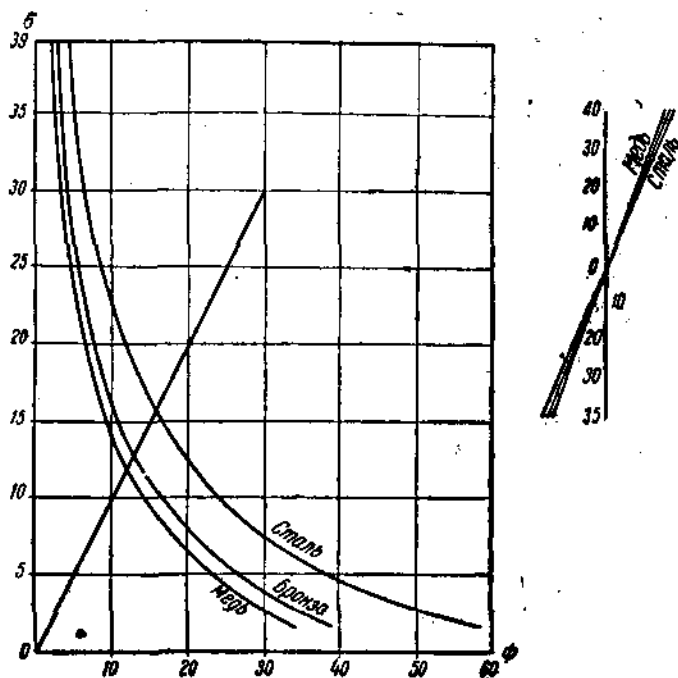


Рис. 31.

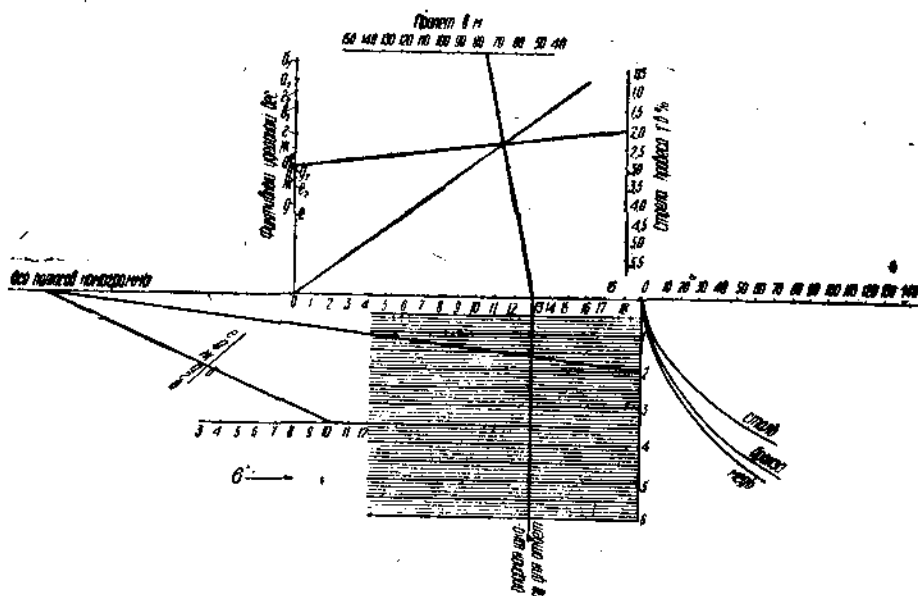


Рис. 32. Номограмма для расчета полукompенсированной цепной подвески.

г—бронза  $w'=120 \text{ мм}^2$ ; медь  $w''=110 \text{ мм}^2$ ,  
 д—бронза  $w'=120 \text{ мм}^2$ ; медь  $w''=100 \text{ мм}^2$ ,  
 жс—бронза  $w'=120 \text{ мм}^2$ ; медь  $w''=2+100=200 \text{ мм}^2$ ,  
 в—сталь  $w'=59 \text{ мм}^2$ ; медь или железо  $=100 \text{ мм}^2$ ,  
 а—сталь  $w'=35 \text{ мм}^2$ ; медь  $w''=80 \text{ мм}^2$ ,  
 з—сталь  $w'=10 \text{ мм}^2$ ; медь или железо  $w''=200 \text{ мм}^2$ ,  
 б—сталь  $w'=50 \text{ мм}^2$ ; медь  $w''=2+80=180 \text{ мм}^2$ .

по записанным значениям  $\varphi$  сразу записать значения  $\Phi = \frac{8E'}{3} \varphi$  для каждого из интересующих нас значений напряжения несущего троса  $\sigma'$ .

Для практического пользования при расчетах на большом вкладном листе нанесена номограмма (рис. 32), пользование которой,

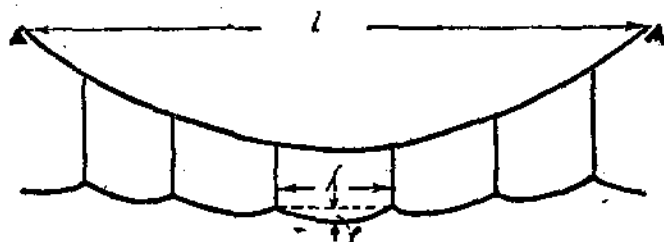


Рис. 33.

автор надеется, ясно на основании предыдущего текста и примера на ней нанесенного.

Вышеприведенные рассуждения относились к случаю постоянства тяжения в контактом проводе при различных изменениях состояния окружающей среды; иначе говоря, разбирался случай полукompенсированной цепной подвески, когда  $\sigma'' \omega'' = \text{const}$ .

Однако подобным же путем решается задача и для другого, более сложного случая расчета, а именно для вполне некомпенсированной цепной подвески, когда не имеется компенсаторов ни в несущем тросе, ни в контактом проводе, т. е. не только  $\sigma'' \omega''$ , но и  $\sigma'' \omega'' = \text{variable}$ . Основную номограмму можно использовать и в этом случае, если принять во внимание нижеследующее.

Цепная подвеска, как известно, заключается в подвешивании контактного провода к несущему тросу нитями большой или малой жесткости (так называемыми струнами), расположенными на расстоянии  $\lambda$  метров друг от друга.

Выделим один из таких местных пролетов  $\lambda$  и именно тот, который расположен посередине главного пролета  $l$ , и характеризуется

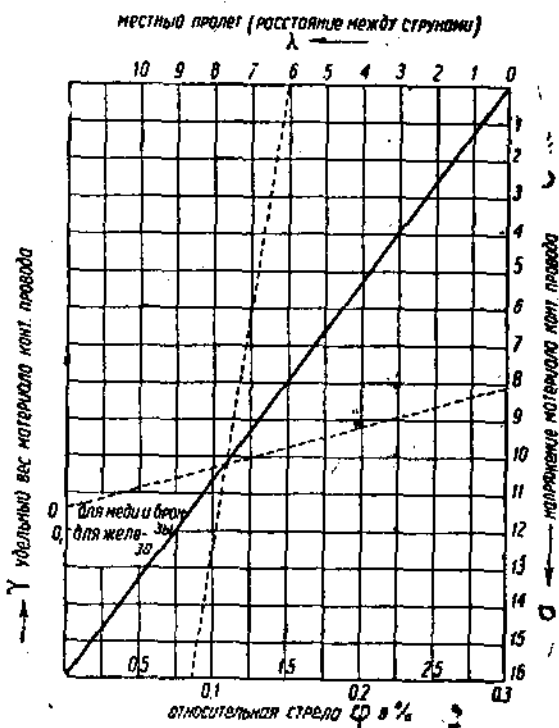


Рис. 34.

тем, что обе точки подвеса контактного провода находятся на одной высоте (см. рис. 33). Тогда относительно этого малого пролета  $\lambda$ , имеющего абсолютную величину стрелы провеса  $f''$  и относительную величину  $\frac{f''}{\lambda} = \varphi$ , — мы имеем те же зависимости: во-первых, уравнение провеса контактного провода

$$\sigma'' = \frac{q'' \lambda}{8 \omega'' \varphi''};$$

и, во-вторых, уравнение состояния

$$\frac{8 E''}{3} \varphi'' - \sigma'' = \frac{8 E''}{3} \varphi_0 - \sigma_0'' + \alpha_2 \cdot E'' (t - t_0).$$

Уравнение состояния для местного пролета  $\lambda$  совершенно идентично с уравнением состояния для несущего троса с пролетом  $l$  (рис. 34). Поэтому, решая его для данного изменения температуры указанным уже выше способом, мы можем получить величину нового изменившегося напряжения материала контактного провода  $\sigma_1''$ , которое и следует подставить в уравнение (4) или откладывать по нижней левой шкале  $Z$ -номограммы. Таким образом при расчете цепной некомпенсированной подвески будут иметь место три кривые, по одной для начального состояния для повышенной и для пониженной температуры. Нет надобности, конечно, делать эти кривые такими же длинными, как в случае расчета полукомпенсированной подвески, и достаточно для понижения температуры взять несколько точек напряжения больших начального состояния, а для повышенной температуры — меньших.

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ МЕЖДУ ЛЫЖАМИ ПАНТОГРАФА

Рассмотрим распределение давления пантографа на контактный провод между накладками каждой из лыж.

На рис. 35 показаны верхний шарнир пантографа и схематические лыжи с накладками, которые укреплены на рычагах, вращающихся вокруг точки  $M$ . Эти рычаги стремятся повернуться вокруг точки  $M$  благодаря действию пружины, заняв при этом положение близкое к вертикальному. В другом своем конце рычаги шарнирно соединены с лыжами, что дает возможность лыже с равным усилием прижиматься обеими накладками к контактному проводу. Таким образом суммарное усилие  $P$ , с которым пантограф давит на контактный провод, распределяется поровну между отдельными пластинами лыж, и на каждую пластину приходится давление, равное  $1/2 P$ , что следует из условия симметрии.

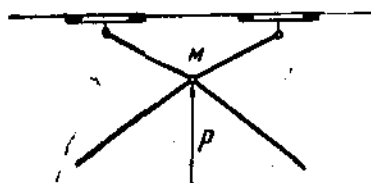


Рис. 35.

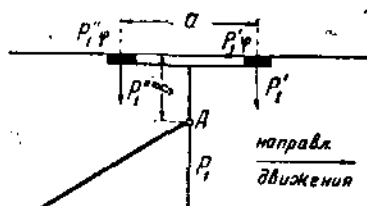


Рис. 36.

Это положение остается справедливым лишь до тех пор, пока пантограф находится в покое. Как только лыжи начинают скользить по контактному проводу, появляется дополнительное усилие, горизонтально направленное вследствие трения накладок лыж о контактный провод. Дополнительное усилие от трения вызывает перераспределение нагрузок между отдельными пластинами лыж.

Наибольшее давление приходится на первую пластину по ходу пантографа и наименьшее — на последнюю.

Определим давление каждой из пластин на контактный провод при движении пантографа.

Обозначим через  $\phi$  коэффициент трения токособирающих пластин о контактный провод, через  $P_1$  — суммарное давление обеих накладок лыжи на контактный провод (см. рис. 36), через  $P_1'$  — давление приходящееся на первую накладку по ходу пантографа, и через  $P_1''$  — на вторую.

Горизонтальные усилия от трения соответственно будут  $P_1' \phi$  и  $P_1'' \phi$ .

Беря сумму моментов относительно точки А, получим

$$p_1'' \varphi b + p_1' \varphi b - p_1' \frac{a}{2} + p_1'' \frac{a}{2} = 0. \quad (1)$$

Возьмем сумму проекций сил на вертикальную ось

$$P_1 = p_1' + p_1'';$$

из уравнения (1) следует

$$p_1 \varphi b = (p_1' - p_1'') \frac{a}{2}.$$

Таким образом получим два уравнения, из которых определяем  $p_1'$  и  $p_1''$

$$p_1' = \frac{P_1}{2} \left( 1 + \frac{2\varphi b}{a} \right)$$

и

$$p_1'' = \frac{P_1}{2} \left( 1 - \frac{2\varphi b}{a} \right).$$

Отношение  $\frac{b}{a}$  является мерилом неравномерности загрузки пластин и зависит от конструкции лыжи. Для того, чтобы получить более равномерное распределение нагрузок между пластинами одной лыжи, следует стремиться к уменьшению отношения  $\frac{b}{a}$ , которое мы обозначим через  $k$  и назовем коэффициентом неравномерности загрузки пластин лыж.

Данные значений  $k$  для пантографа ДЖ-3 и пантографа электровоза С-1003 приведены в следующей таблице:

| № п/п. | Показатели                           | $a_{\text{пл}}$ | $b_{\text{пл}}$ | $k$   |
|--------|--------------------------------------|-----------------|-----------------|-------|
| 1      | Пантограф ДЖ-3 зав. Динамо . . . . . | 110             | 45              | 0,403 |
| 2      | • электровоза С-1003 . . . . .       | 105             | 30              | 0,285 |

Из приведенных значений  $k$  видно, что на пантографе электровоза С-1003 более равномерно распределяется давление между накладками, чем на пантографе ДЖ-3. Значительное уменьшение коэффициента  $k$  встречает трудности, так как, идя по пути уширения лыж, последние будут утяжеляться и соответственно увеличиваться приведенная масса пантографа, что вызовет увеличение динамических усилий и соответственно ухудшит условия токоснимания. Что касается вертикального расстояния от оси шарнира лыжи до контактного провода, то последнее по конструктивным соображениям не может быть намного понижено по сравнению с этим расстоянием на пантографе электровоза С-1003.

Далее мы видим, что неравномерность загрузки увеличивается также с увеличением коэффициента трения. Здесь может стать вопрос о выборе смазки, которая давала бы минимальный коэффициент трения накладок пантографа о контактный провод без ущерба для токо-

снятия. Определение коэффициента трения на Сураме показало высокие значения.

При этом было установлено, что:

- 1) при сухой и пыльной поверхности накладок лыжи  $\varphi = 0,325$ ;
- 2) при сухой поверхности накладок лыжи по удалении пыли  $\varphi = 0,254$ ;
- 3) при старой смазке (после месячного бездействия электровоза)  $\varphi = 0,225$ ;
- 4) при лыжах непосредственно после смазки  $\varphi = 0,215$ .

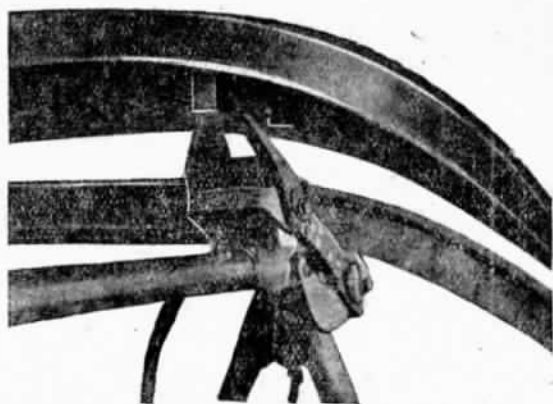


Рис. 37.

При работе пантографа смазка нагревается, и в этом случае следует ожидать снижения коэффициента трения. В последующих подсчетах по этим соображениям примем коэффициент трения  $\varphi = 0,2$ ,

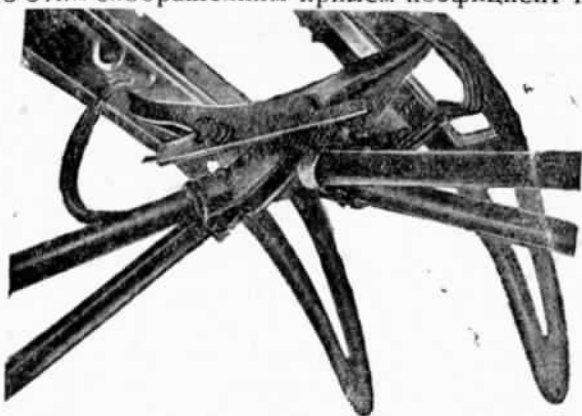


Рис. 38.

В начале эксплуатации, когда контактная сеть еще не „обкатана“,  $\varphi$  имеет более высокое значение, и в этом случае получается сильное искрение на второй накладке задней лыжи, которая с наименьшим усилием прижимается к контактному проводу.

Обозначая через  $p_2$  усилие, с которым вторая лыжа давит на контактный провод, получим для нее, а логично предыдущему, значения давлений обеих накладок лыжи.

Для передней накладки

$$p_2' = \frac{p_2}{2} \left( 1 + \frac{2\varphi b}{a} \right)$$

и для задней накладки

$$p_2'' = \frac{p_2}{2} \left( 1 - \frac{2\varphi b}{a} \right).$$

На рис. 37 показан снимок места крепления рычага к лыже пантографа ДЖ-3, а на рис. 38 то же для пантографа электровоза С-1003.

Рассмотрим теперь *распределение давления между лыжами*.

При горизонтально расположенной контактной подвеске углы  $\alpha'$  и  $\alpha$  будут равны между собою (см. рис. 39); рассмотрим сначала этот случай. Вывод для усилий, приходящихся на каждую из лыж, будет аналогичен выводу распределения нагрузок между накладками одной лыжи.

$$\frac{a_1}{2} = C \sin \alpha \quad \text{и} \quad b_1 = C \cos \alpha.$$

Подставляя полученные значения в ранее выведенные соотношения для усилий, приходящихся на каждую накладку одной лыжи, получим

$$p_1 = \frac{p}{2} \left( 1 + \frac{\varphi}{\operatorname{tg} \alpha} \right)$$

и

$$p_2 = \frac{p}{2} \left( 1 - \frac{\varphi}{\operatorname{tg} \alpha} \right).$$

Из полученных соотношений видно, что для более равномерного распределения давления между лыжами следует стремиться к увеличению угла  $\alpha$ .

Если выразим давление на каждую накладку через общее давление  $p$ , то получим:

для передней накладки первой лыжи

$$p_1' = \frac{p}{4} \left( 1 + \frac{\varphi}{\operatorname{tg} \alpha} \right) \left( 1 + \frac{2\varphi b}{a} \right);$$

для задней накладки первой лыжи

$$p_1'' = \frac{p}{2} \left( 1 + \frac{\varphi}{\operatorname{tg} \alpha} \right) \left( 1 - \frac{2\varphi b}{a} \right);$$

для передней накладки второй лыжи

$$p_2' = \frac{p}{4} \left( 1 - \frac{\varphi}{\operatorname{tg} \alpha} \right) \left( 1 + \frac{2\varphi b}{a} \right);$$

для задней накладки второй лыжи

$$p_2'' = \frac{p}{4} \left( 1 - \frac{\varphi}{\operatorname{tg} \alpha} \right) \left( 1 - \frac{2\varphi b}{a} \right).$$

Если просуммируем давления отдельных накладок, то получим общее давление пантографа на контактный провод  $p$ , т. е.

$$p_1' + p_1'' + p_2' + p_2'' = p.$$

У пантографа ДЖ-3 угол  $\alpha$  при одной и той же нагрузке является функцией высоты пантографа, так как натяжение пружин, поднимающих рычаги, меняется при опускании и поднятии пантографа, что несомненно следует отнести к недостаткам конструкции. Пантограф электровоза С-1003 свободен от этого недостатка. На

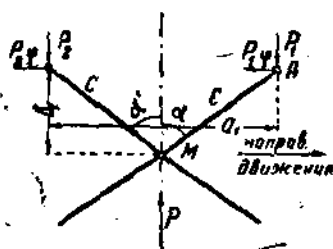


Рис. 39.

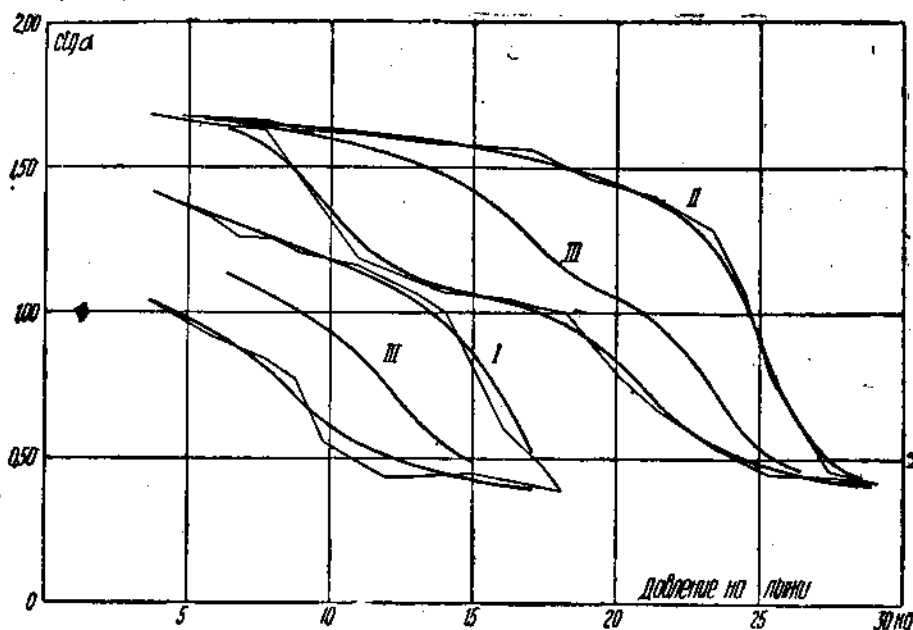


Рис. 40. Кривая изменения  $ctg \alpha$  в зависимости от вертикальной нагрузки пантографа.

I—Кривые нагрузки и разгрузки лыж на высоте пантографа  $H=2,25$  мм; II—Кривые нагрузки и разгрузки лыж на высоте пантографа  $H=0,7$  мм; III—Кривые силы нажатия пружин при высоте  $H=2,25$  и  $H=0,7$  мм.

Примечание. Шарниры и пружины перед опытом были смазаны

кривых рис. 40 дается зависимость  $ctg \alpha$  от вертикального давления на лыжи для пантографа ДЖ-3 при двух высотах лыж над верхом воздушного цилиндра  $H=0,7$  м и  $H=2,25$  м. Из кривых видно, насколько меняется  $ctg \alpha$  при указанных двух высотах. Далее эти кривые наглядно показывают недостаточно тщательное выполнение деталей пантографа, так как кривые загрузки и разгрузки имеют вид ломаной линии, что указывает на заедание. Сильное расхождение между кривыми нагрузки и разгрузки указывает на недопустимо большое трение.

Приводим распределение усилий между накладками лыж пантографа ДЖ-3, причем дается давление на каждую из накладок в пределах от общего давления пантографа на контактный провод.

| № п/п. | $\varphi$ | $P_{кг}$ | Высота пантографа $H$ в м | $tg \alpha$ | Давление накладок в процентах от общего давления $P$ |                 |                 |                 |
|--------|-----------|----------|---------------------------|-------------|------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|        |           |          |                           |             | первая лыжа                                          |                 | вторая лыжа     |                 |
|        |           |          |                           |             | первая пластина                                      | вторая пластина | первая пластина | вторая пластина |
| 1      | 0,2       | 10       | 0,7                       | 1,06        | 34,5                                                 | 25              | 23,5            | 17              |
| 2      | 0,2       | 10       | 2,25                      | 0,625       | 38,3                                                 | 27,7            | 19,7            | 14,3            |

По этому пункту в заключение можно отметить что при конструировании пантографа следует учитывать неравномерность распределения нагрузок между отдельными лыжами и накладками, сводя последние до минимума за счет уменьшения  $\frac{b}{a}$  и увеличения  $\alpha$ , а так же путем изменения конструкции угол  $\alpha$  сделать независимым от высоты лыж пантографа при постоянной нагрузке на лыжи. За счет более тщательного выполнения отдельных частей необходимо устранить заедание и снизить величину трения в шарнирах. Подобными мероприятиями можно будет избежать значительной неравномерности распределения нагрузок и соответственно улучшить условия токоснимания.

Здесь еще раз следует отметить, что весьма важным вопросом является подбор состава смазки для лыж, и при правильно выбранной смазке снизится коэффициент трения  $\phi$ , что улучшит распределение нагрузок и токоснимание. Этот вопрос нуждается в дополнительной проработке.

---

# РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТОКОПРИЕМНИКА И КОНТАКТНОГО ПРОВОДА В УСЛОВИЯХ РАБОТЫ СЕТИ НА СЕВЕРНЫХ Ж. Д.

## 1. ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель исследования—найти зависимость между характеристиками контактной подвески и токоприемника и определить оптимальные данные этих характеристик для удовлетворительного токоснимания при различных условиях эксплуатации (скорость, температура и т. д.).

## 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве прибора, записывающего поведение контактного провода и токоприемника в их взаимодействии при движении электропоезда, был применен кимограф. Конструкция кимографа и работа с ним описаны в выпуске 2 трудов Института „Исследование контактной сети на электрических ж. д.“ (1932 г.) в статьях инж. Во-

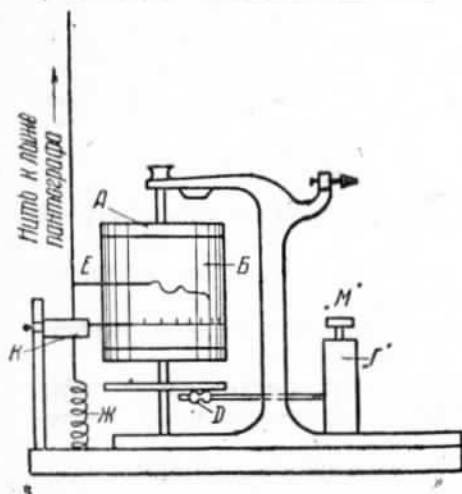


Рис. 41.

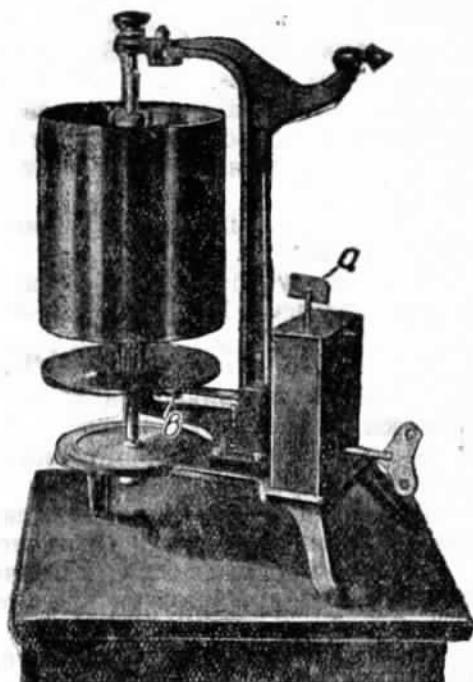


Рис. 42.

ронина („Описание приборов, примененных при исследовании контактной сети Сурамского перевала“, стр. 72) и бригады ЦЭН

(„К исследованию контактной сети на Сурамском перевале при помощи кимографа“).

В основном устройство кимографа заключается в следующем.

На барабан *A* (рис. 41) наклеивается, после закапчивавия, бумага *B*. Барабан приводится во вращение часовым механизмом *Г* через посредство фрикционной передачи *Д*. К закопченной бумаге (ленте) прикасается указатель *Е*, который закреплен на нити, связанной с лыжей пантографа. [Нить поддерживается в натянутом состоянии пружиной *Ж*].

Соответственно колебаниям лыж токоприемника колеблется указатель *Е*, записывая на ленте кривые этих колебаний. Скорость вращения барабана регулируется модератором *М* и фрикционной передачей *Д*. Время в секундах (при желании через  $\frac{1}{4}$  секунды) записывается также на ленте кимографа регистратором времени *К*.

Фотография кимографа показана на рис. 42.

### 3. МЕСТО ИССЛЕДОВАНИЯ

С целью исключения влияния побочных факторов испытание проводилось на одних и тех же заранее выбранных пролетах. Для каждого типа подвески, примененной на Северных ж. д., были выбраны следующие участки по три пролета в каждом.

I. Третий главный путь между станциями Москва-6 и „Северянин“ с мачтами № 92—94—96 (подвеска на гибких поперечинах).

II. Между станциями Мытищи—Подлипки нормальная полуконпенсированная подвеска с одиночным проводом, мачты № 5—8 на кривой и 8—11 на прямом участке.

III. Между станциями Болшево—Загорянская компаундная подвеска, мачты № 28—31.

IV. Между станциями Соколовская—Воронок подвеска с двойным контактным проводом, мачты № 85—88.

V. Между станциями Воронок—Щелково косая подвеска, мачты № 11—114.

VI. Между станциями Пушкино—„Правда“. Пролеты I—100 м. Мачты № 50—56.

VII. Между станциями „Правда“—Зеленоградская. Бесфиксаторная подвеска. Мачты № 42—46.

### 4. ОПИСАНИЕ ОПЫТОВ

Экспериментальную часть исследований можно разделить на следующие операции:

а) запись подъемов контактного провода и троса под давлением статически приложенных грузов;

б) испытания во время движения секции с установкой записывающих приборов внутри моторного вагона;

в) съемка статических и динамических характеристик пантографов с установкой приборов внутри моторного вагона, во время отстоя секции в депо;

г) испытания с неподвижной точки—с установкой записывающих приборов на линии жел. дороги;

д) запись провесов свободно подвешенного (без воздействия токоприемника) контактного провода с установкой кимографа на дрезине.

## А. Запись подъемов контактного провода и несущего троса под давлением статически приложенных грузов

Измерение подъемов контактного провода проводилось при помощи следующего приспособления. На крыше вагона устанавливалась стойка А (рис. 43) с роликами Б. Через ролики перекинута нить, с одного конца имеющая крючок В для захвата контактного провода, а с другого чашу С для грузов.

Чтобы исключить трение в роликах около крючка, подхватывающего контактный провод, включен динамометр Д, по которому и определено приложенное усилие. Крючок В имеет указатель, который скользит по шкале, нанесенной на стойке, и дает величину подъема контактного провода под действием той или иной нагрузки. Измерения (отсчеты) делались при грузах 5, 10, 15, 20 кг. Рядом со стойкой подвешивался на трос (над поднимаемой точкой контактного провода) легкий железный стержень, снабженный также указателем. Этот указатель скользил по второй

рейке и давал величину подъема троса при подъеме контактного провода под тем или иным усилием. При помощи этого приспособления были измерены подъемы контактного провода и троса на участке Ленинград—Лигово Октябрьских ж. д. на 1-м главном пути между мачтами № 7—8. Подвеска полукompенсированная, с тяжением в контактном проводе 900 кг, с фиксаторами, но без зигзагов в плане. Температура во время замера равна — 2° С. Аналогичные измерения подъемов контактного провода проведены на участке Мытищи—Подлипки Северных ж. д. при температуре равной + 5° С. Подвеска та же полукompенсированная с тяжением в контактном проводе 900 кг. Контактный провод в плане подвешен зигзагообразно. Результаты измерений на участке Ленинград—Лигово приведены в таблице 1. Графические построения подъемов троса и провода по всему пролету и для каждой точки измерения приведены на рис. 44 и 45. Величины подъемов троса откладывались от условной горизонтальной линии. Результаты измерений на участке Мытищи—Подлипки приведены в таблице 2, а графическое построение осуществлено на рис. 46.

Рассмотрение указанных таблиц и графических построений дает следующее:

1) Зависимость подъема контактного провода под фиксаторами (кривые рис. 44, 45 и 46) от приложенного груза в пределах от 0 до 20 кг дает кривую, близкую к параболе, причем ветви параболы обращены вверх, т. е. с увеличением грузов подъем провода нарастает быстрее, чем в первых интервалах между заданными нагрузками.

Из рассматриваемых кривых следует, что характер зависимости подъема провода над фиксаторами от приложенного груза сохраняется для фиксаторов, работающих как на сжатие, так и на растяжение, в том числе и для случая беззигзаговой подвески. Различие состоит лишь в большей или в меньшей величине наклона кривых, причем короткий, работающий на растяжение, фиксатор дает

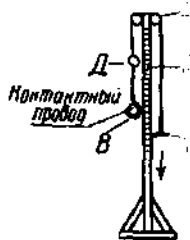


Рис. 43.

Измерения подъемов контактного провода и троса под давлением статически приложенных грузов (уч-к Ленинград—Литово)

| № измерения | Г р у з ы                                                             | 0                |        |        | 5 кг             |        |        | 10 кг            |        |        | 15 кг            |        |        | 20 кг            |        |        |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------|--------|--------|------------------|--------|--------|------------------|--------|--------|------------------|--------|--------|------------------|--------|--------|
|             |                                                                       | Контактн. провод |        | Трос   | Контактн. провод |        | Трос   | Контактн. провод |        | Трос   | Контактн. провод |        | Трос   | Контактн. провод |        | Трос   |
|             |                                                                       | в мм             | подъем |        | в мм             | подъем |        | в мм             | подъем |        | в мм             | подъем |        | в мм             | подъем |        |
|             |                                                                       | отсчет           | отсчет | отсчет | отсчет           | отсчет | отсчет | отсчет           | отсчет | отсчет | отсчет           | отсчет | отсчет | отсчет           | отсчет | отсчет |
| 1           | Под фиксатором мачты № 6                                              | 104              | 0      | —      | 106              | 2      | —      | 120              | 16     | —      | 154              | 50     | —      | 184              | 80     | —      |
| 2           | Под 1-й струной . . . . .                                             | 106              | 0      | 430    | 126              | 20     | 455    | 138              | 32     | 460    | 166              | 60     | 475    | 178              | 72     | 480    |
| 3           | Между 1-й и 2-й струной<br>(в середине струнового) . .                | 40               | 0      | 10     | 70               | 30     | 28     | 18               | 80     | 48     | 177              | 137    | 70     | 228              | 178    | 85     |
| 4           | Под 2-й струной . . . . .                                             | 40               | 0      | 55     | 78               | 38     | 95     | 140              | 100    | 145    | 176              | 136    | 155    | 220              | 180    | —      |
| 5           | В середине пролета между<br>мачтами, струны № 3 и 4                   | 30               | 0      | 380    | 86               | 56     | 410    | 146              | 116    | 450    | 204              | 174    | 485    | 268              | 238    | 525    |
| 6           | Под 3-й струной . . . . .                                             | 66               | 0      | 345    | 104              | 38     | 385    | 172              | 106    | 445    | 220              | 154    | 485    | 280              | 226    | 540    |
| 7           | Между 3-й и 4-й струной<br>(в среднем струнового<br>пролета). . . . . | 25               | 0      | 340    | 88               | 53     | 360    | 152              | 127    | 395    | 214              | 189    | 425    | 300              | 275    | 480    |
| 8           | Под 4-й струной . . . . .                                             | 12               | 0      | 315    | 54               | 42     | 355    | 94               | 82     | 390    | 146              | 124    | 420    | 192              | 180    | 465    |
| 9           | Под 5-й струной . . . . .                                             | 580              | 0      | 220    | 75               | 17     | 235    | 92               | 34     | 250    | 118              | 60     | 255    | 142              | 84     | 260    |
| 10          | Под фиксатором мачты № 7                                              | 38               | 0      | —      | 45               | 7      | —      | 52               | 14     | —      | 75               | 38     | —      | 106              | 68     | —      |

Таблица 2

Измерения подъемов контактного провода под давлением статически приложенных грузов (уч. к Мытаци—Подлипки)

| № измерений | Г р у з ы<br>Место измерения                | 0 кг                      |             | 2 кг                      |             | 5 кг                      |             | 10 кг                     |             | 15 кг                     |             | 20 кг                     |             |
|-------------|---------------------------------------------|---------------------------|-------------|---------------------------|-------------|---------------------------|-------------|---------------------------|-------------|---------------------------|-------------|---------------------------|-------------|
|             |                                             | Отсчет по рей-<br>ке в мм | Подъем в мм | Отсчет по рей-<br>ке в мм | Подъем в мм | Отсчет по рей-<br>ке в мм | Подъем в мм | Отсчет по рей-<br>ке в мм | Подъем в мм | Отсчет по рей-<br>ке в мм | Подъем в мм | Отсчет по рей-<br>ке в мм | Подъем в мм |
| 1           | Короткий фиксатор у мачты № 17 . . . .      | 260                       | —           | 263                       | 3           | 268                       | 8           | 391                       | 31          | 327                       | 67          | 374                       | 114         |
| 2           | Длинный фиксатор у мачты № 18 . . . .       | 288                       | —           | —                         | —           | 296                       | 8           | 300                       | 12          | 309                       | 21          | 340                       | 52          |
| 3           | 1-я струна от мачты № 18 к № 19 . . . .     | 304                       | —           | 324                       | 20          | 344                       | 40          | 374                       | 70          | 472                       | 98          | 436                       | 132         |
| 4           | В 1-й четверти пролета от мачты № 18 к № 19 | 301                       | —           | 321                       | 20          | 348                       | 47          | 388                       | 87          | 428                       | 127         | 472                       | 170         |
| 5           | 2-я струна от мачты № 18 к № 19 . . . .     | 314                       | —           | 334                       | 20          | 362                       | 48          | 405                       | 91          | 477                       | 133         | 488                       | 174         |
| 6           | Средина пролета между мачтами № 18 к № 19   | 367                       | —           | —                         | —           | 410                       | 43          | 461                       | 94          | 507                       | 140         | 553                       | 184         |
| 7           | 2-я струна от мачты № 19 к № 18 . . . .     | 330                       | —           | —                         | —           | 374                       | 44          | 425                       | 95          | 468                       | 138         | 512                       | 182         |
| 8           | 1-я струна от мачты № 19 к № 18 . . . .     | 302                       | —           | —                         | —           | 330                       | 28          | 358                       | 56          | 390                       | 88          | 431                       | 128         |
| 9           | Короткий фиксатор у мачты № 19 . . . .      | 276                       | —           | —                         | —           | 302                       | 6           | 318                       | 22          | 345                       | 49          | 386                       | 90          |

более крутой подъем кривой, чем фиксатор, работающий на сжатие. Среднее положение между ними занимает подъем под фиксатором при безизгазовой подвеске.

2) Зависимость подъема провода под действием грузов под струнами и между струн выражается прямой линией (рис. 45 и 46).

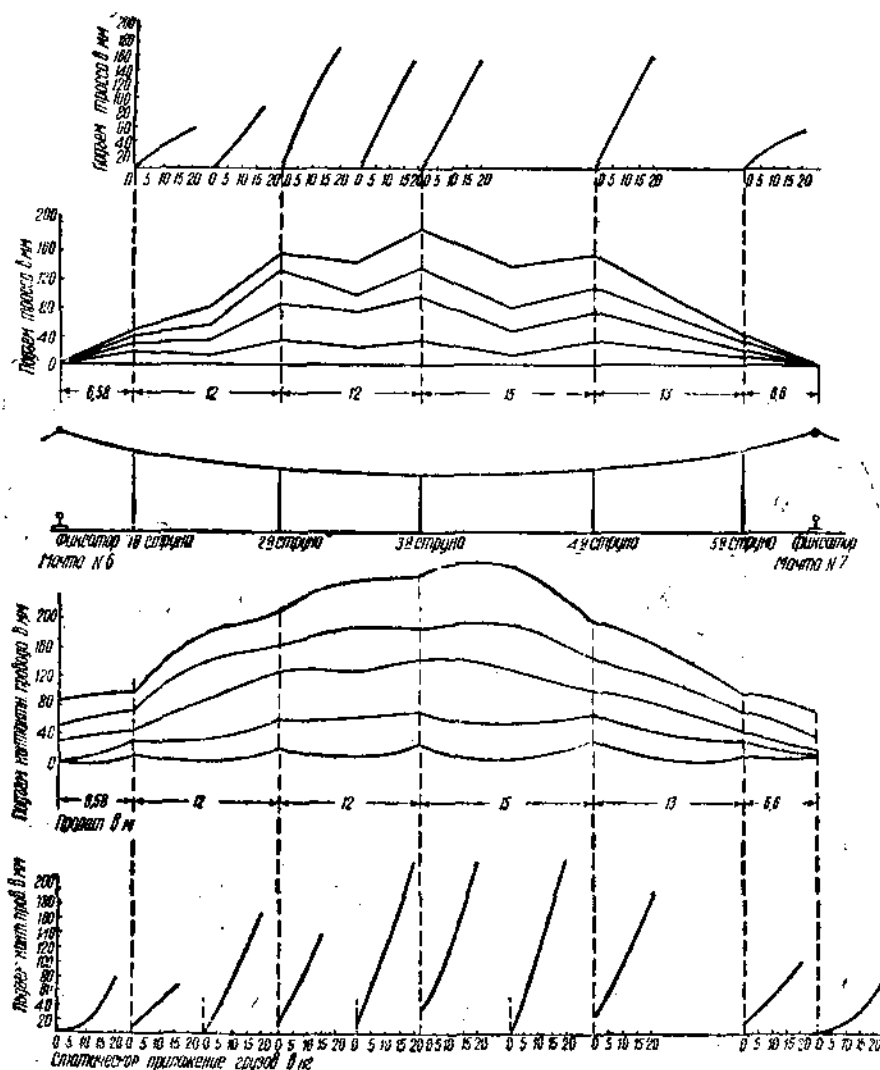


Рис. 44 и 45.

Величина подъема провода увеличивается по мере приближения к середине пролета. При рассмотрении кривых положения контактного провода по пролету (рис. 44 и 45) при статическом отжати его различными грузами видно, что под давлением груза в 5 кг полного уничтожения стрелы провеса между струнами еще нет (при этом рассматривается приподнятое положение провода пантогра-

фом как под струнами, так и между ними). С другой стороны, если точки струновых зажимов предположить неподвижными, то пантограф, будучи помещен в середине струнового пролета ( $l=12$  м), воспримет на себя половину веса провода в этом пролете (что составит для медного провода диам. 100 мм<sup>2</sup>—5,3 кг), а провод поднимется на уровень струнового зажима (рис. 47).

Схема пролета между мачтами № 18 и 19 на участке Мытищи—Подлипки Сев. ж. д.

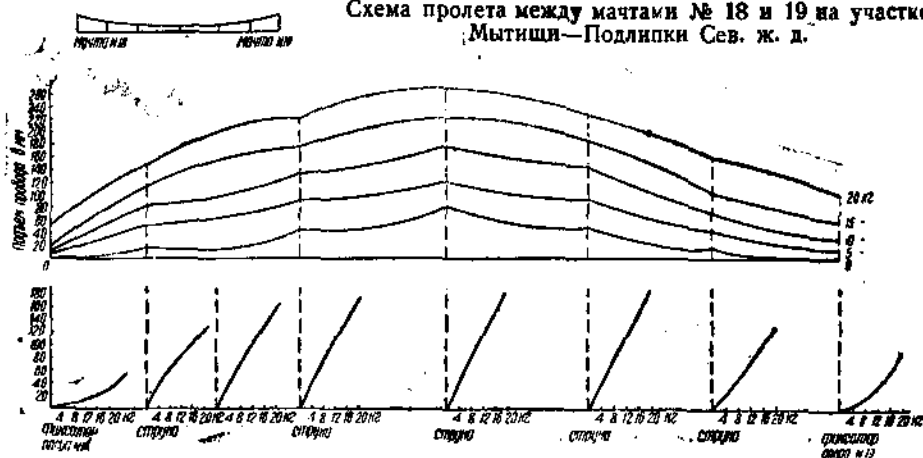


Рис. 46. Подъем контактного провода под давлением статически приложенного груза.

Благодаря тому, что в рассматриваемом случае струны также поднимаются вследствие подъема троса, разгруженного давлением пантографа (5 кг), незначительный местный провес провода между точкой приложения пантографа и соседними струнами все же будет иметь место.

Под давлением груза в 10 кг этот провес получается еще меньшей величины, и практически им можно пренебречь (2—3 мм лежат в пределах точности измерений). При 15 кг давления весь провод выгибается вверх, т. е. расстояние контактного провода в середине струнового пролета от головки рельса больше, чем соответствующее расстояние от струновых зажимов. Под давлением 20 кг отрицательный прогиб провода между струнами достигает уже 18 мм. Следовательно подъем контактного провода в середине струнового пролета больше, чем под струной. Объяснить это явление можно следующим.

Вес контактного провода на протяжении половины струнового пролета воспринимается сосредоточенной силой. Трос, разгруженный на этот вес, под влиянием упругих сил материала троса поднимается, увлекая за собой соседние с сосредоточенной силой струны, как бы помогает контактному тросу подниматься. В случае приложения сосредоточенной силы под струной это явление сказывается в меньшей степени, так как сосредоточенная сила в этом случае воспринимает на себя полный струновой пролет и еще вес струнового зажима с частью веса самой струны.



Рис. 47.

Интерполируя расстояние между кривой положения контактного провода под давлением 10 и 15 кг, можно найти такое давление, при котором провод в отжатом положении между струнами не будет давать ни положительного, ни отрицательного провеса и, следовательно, центр тяжести пантографа в струновом пролете будет иметь минимальные перемещения по вертикали. Графический анализ показывает, что такое давление находится ближе к 10 кг (10,5 кг). Если соединить полученные точки подъема провода для давления 10,5 кг плавной кривой, то эта кривая приобретает параболический вид. Следовательно, если токоприемник с давлением в 10,5 кг будет двигаться с очень малой скоростью (условия, близкие к статическому положению грузов), то траектория движения верхней части токоприемника будет близка к параболе, что в значительной степени обеспечивает провод от точек перегиба, ухудшающих условия токоснимания.

Обратимся далее к рассмотрению подъемов несущего троса. Если взять величину этих подъемов в точках крепления струн, расположенных близ фиксаторов (например, струны 1-я и 5-я рис. 45-б), и графически изобразить зависимость этих подъемов от величины приложенного груза, то получается некоторая кривая (рис. 45), показывающая, что по мере увеличения груза мы имеем все уменьшающуюся величину подъема. Уже после подъема, соответствующего давлению в 10 кг, — трос сильно разгружается и в дальнейшем дает незначительные подъемы.

Исследование подъемов троса и контактного провода в точках, расположенных ближе к середине мачтового пролета (удаленных от фиксаторов не менее чем на 6 м), показывает, что в этих точках зависимость между приложенным к контактному проводу грузом и величиной подъема троса и контактного провода выражается прямой линией. Если груз приложен к контактному проводу под струной, то подъем троса больше, чем при приложении груза к середине струнового пролета (рис. 45). Можно заключить далее, что несущий трос в точках, удаленных от фиксаторов не менее чем на 6 м, и в пределах грузов от 0 до 20 кг, полностью не разгружается.

*Б. Запись на регистрирующей ленте положения контактного провода в пролете под давлением пантографа движущегося с нормальной скоростью поезда*

В том случае, когда лыжа пантографа скользит без отрыва по контактному проводу, траектория движения лыжи представляет собой кривую положения контактного провода, отжатого движущимся при различных скоростях пантографом. Следовательно, если записать путь лыжи токоприемника (ее положение по высоте от головки рельса) как функцию от времени на регистрирующей ленте кимографа, то полученные кривые и будут изображать положение контактного провода, отжатого движущимся пантографом. Для осуществления этой записи была применена следующая установка: к лыже пантографа А (рис. 48) была прикреплена шелковая нить Б (шелковая нить применена для того, чтобы иметь возможность проводить испытания с пантографом, находящимся под напряже-

нием). С целью увеличения надежности работы под напряжением верхний конец нити был подвязан к бакелитовому ушку, жестко укрепленному на лыже пантографа. Внутри мотор-вагона (секция № 404 Северных. ж. д.) нить пропусклась через бакелитовую трубку диаметром в 20 мм, вставленную в потолок вагона под лыжами. Другой конец шелковой нити подвязывался к стержню В, последний связывался пружиной Г со стойкой Д. Стержень В в пределах растяжения пружины С перемещается вдоль своей оси в направляющих е. Сравнительно небольшая высота барабана кимографа (200 мм) и необходимость вести запись на ленте других факторов, связанных с испытанием (отметки времени, мачты и т. д.), оставляли небольшую полезную ширину кимографической ленты, и поэтому передача движения стержня В на ленту осуществлена посредством рычага Ж, дающего уменьшение перемещения стержня В в 4,17 раза.

Посредством рычага движение стержня В передавалось стержню 3. Чтобы избежать искажения, получающегося при движении по окружности концов рычага, — эти концы имели прорезы, в которых могли перемещаться вдоль оси рычага специальные штифты, укрепленные на обоих стержнях.

Благодаря этому устройству и направляющим И стержень 3 мог совершать только вертикальные перемещения. К стержню 3 был прикреплен регистратор К, который и записывал на ленте Л кимографа все колебания системы лыжи до регистратора. К ленте дополнительно были подведены:

1) Регистратор времени М, отсекающий на ленте отметку через 1 (или  $\frac{1}{8}$ ) секунду.

2) Регистратор от электромагнитного сигнала Н.

Посредством последнего наблюдателем отмечались на ленте моменты прохождения пантографа под соседними мачтами.

3) Для того, чтобы отметить на ленте кимографа влияние тряски вагона, к ленте был подведен еще один регистратор О, связанный стальной тонкой проволокой П через блоки Р с буксой вагона.

Регистратор О аналогично основному регистратору К оттягивался пружиной С. Пружина в данном случае была помещена сверху стержня, к которому крепился регистратор. Этот стержень также скользил по направляющим и мог совершать только вертикальные колебания.

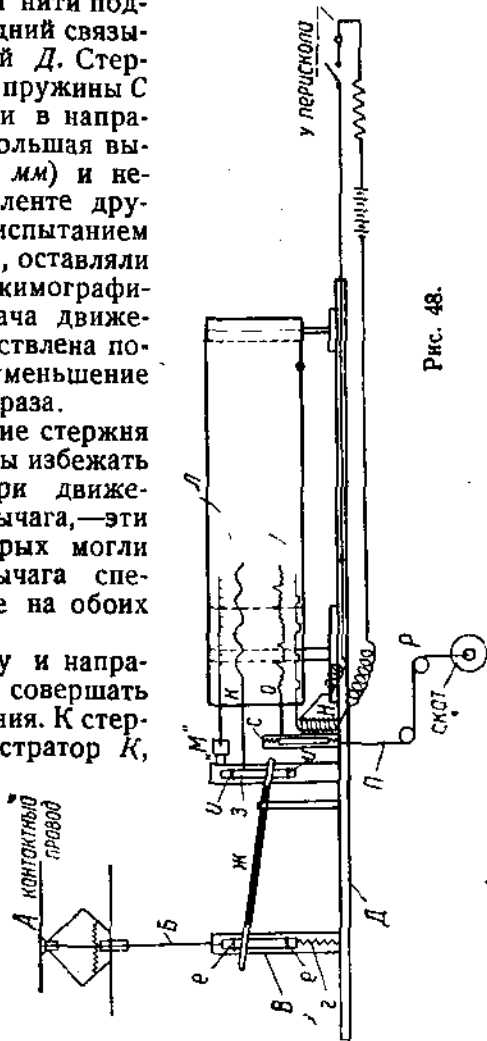


Рис. 48.

Для наблюдения за работой пантографа в противоположном конце вагона был установлен перископ (см. рис. 49).

При помощи вышеописанной установки была сделана 51 запись по 3 пролета в каждой. Характеристика каждой записи отмечалась в специальной ведомости (§ 1).

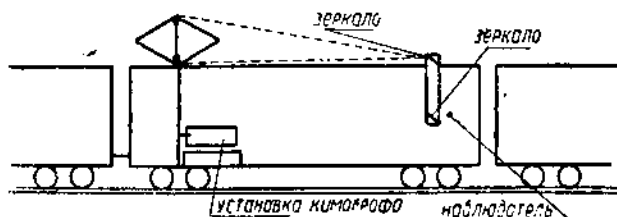


Рис. 49.

Как видно из журнальной записи, испытания проводились в пределах температуры от  $+5^{\circ}\text{C}$  до  $+25^{\circ}\text{C}$  и только 3 кривые были засняты при температуре  $+33^{\circ}\text{C}$ .

Рассматривая кривые записей на лентах, можно видеть:

1) На основную конфигурацию отжатого пантографом провода тряска вагона не имеет существенного влияния: большая, сравнительно, частота колебания кузова по отношению к оси ската не дает искажения основной кривой изменения положения контактного провода, и для любой кривой всегда можно найти некоторую среднюю линию, близкую к истинной кривой положения провода (см. рис. 50).

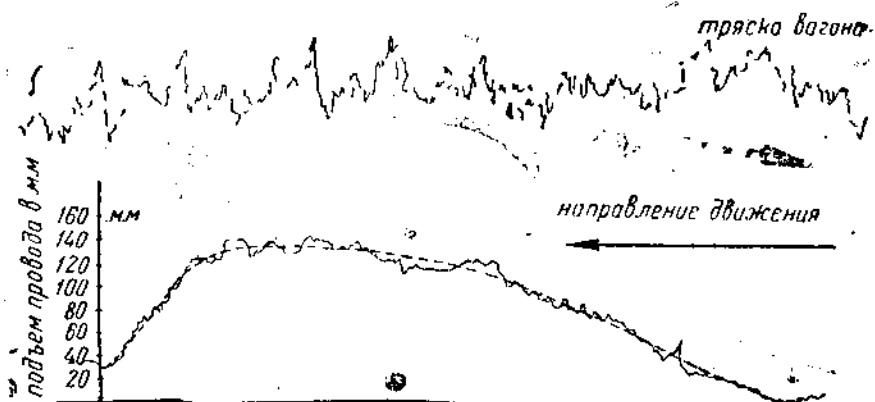


Рис. 50.

2) Во всех кривых, снятых в условиях контактной сети Северных ж. д., получены отрицательные прогибы; несмотря на высокие температуры ( $+33^{\circ}$ ), контактный провод отжимается пантографом на 33—110 мм выше того положения фиксатора, при котором последний также был приподнят под давлением проходившего пантографа.

3) Величина подъема зависит при прочих равных условиях от температуры (например, записи № 2, 14, 49, где скорости близки между собой) и от скорости (например, 3, 6, 13, см. таблицу 3).

Таблица 3

| № по порядку | № записи | № участка | Превышение над фиксатором | Скорость | Температура |
|--------------|----------|-----------|---------------------------|----------|-------------|
| 1            | 14       | П         | 95                        | 48       | + 7°        |
| 2            | 2        | П         | 50                        | 40       | +11°        |
| 3            | 49       | П         | 33                        | 61       | +33°        |
| 4            | 3        | Ш         | 205                       | 72       | +11°        |
| 5            | 6        | Ш         | 89                        | 36       | +11°        |
| 6            | 13       | Ш         | 74                        | 15       | +11°        |

4) В характере прогиба для всех кривых при скоростях более 15 км/час можно заметить явление „набегания“.

Вместо кривой отрицательного прогиба, по форме близкой к параболе (рис. 51а), которая получилась при статических подъемах или при следовании пантографа с малыми скоростями, контактный провод принимает положение, представленное на рис. 51-б. На рис. 51-б видно, что вершина отрицательного прогиба смещена со середины пролета по направлению движения. При этом нараста-

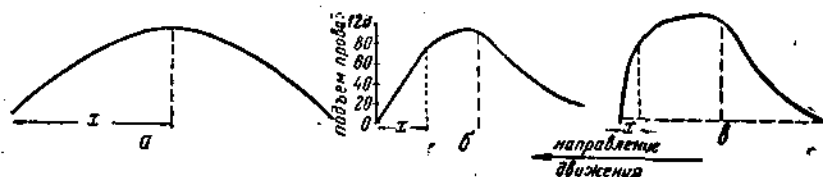


Рис. 51.

ние подъема в первой половине пролета (по направлению движения) идет по пологой кривой, а убывание—наоборот, по более крутой кривой, образуя у 2-го по направлению движения фиксатора более острый угол перегиба. При больших скоростях это явление сказывается сильнее (рис. 51-б).

5) По мере возрастания скорости участки кривой с более резким наклоном во 2-й части пролета смещаются ко второму фиксатору (т. е. расстояние  $X$  от точки перегиба до фиксатора, как видно из рис. 51, с увеличением скорости уменьшается).

Так, для записей № 3, 6 и 13, имеющих соответственно скорости 72, 36, 15 км/час, расстояние будет соответственно (приблизительно):

$$X = \frac{l}{8}, \quad \frac{l}{4}, \quad \frac{l}{3,4}, \quad \text{где } l \text{ — длина пролета.}$$

Следовательно, чем больше скорость движения поезда, тем большие ускорения получает токоприемник по вертикали вниз во 2-ой половине пролета при проходе ко 2-му фиксатору.

6) Волнообразность кривой подъема провода в 1-й части пролета показывает, что пантограф поднимается, совершая некоторые промежуточные колебания (вибрирует).

## В. Снятие статических и динамических характеристик пантографа

Для того, чтобы определить статическое давление пантографа, его трение в шарнирах и ускорения под влиянием различных приложенных грузов, были проделаны следующие испытания:

1) Определение статического давления и трения в шарнирах. Для этой цели (см. схему на рис. 52) на лыжи А пантографа накладывался деревянный брусок В. К бруску закреплялся крюк динамометра В. С противоположной стороны к динамометру прикладывалось усилие О. По динамометру делался отсчет в тот момент, когда под влиянием усилия О пантограф начинал опускаться (ход вниз). И обратно, при уменьшении усилия О— по динамометру делался отсчет в тот момент, когда пантограф начинал подниматься (ход вверх). Среднее из этих отсчетов принималось за статическое давление пантографа на провода, а раз-

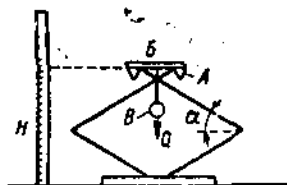


Рис. 52.

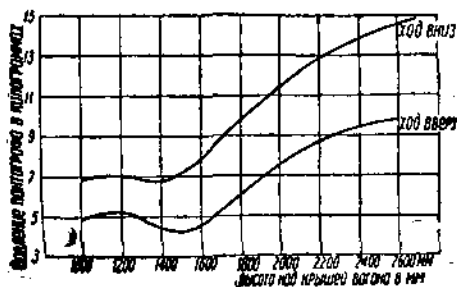


Рис. 53. Статическая характеристика пантографа № 2 секции № 40 Сев. ж. д.

Примечание: Высота крыши вагона над головкой рельса=4070 мм.

ность между этим средним отсчетом и одним из крайних представляло собою усилие, которое пошло на преодоление трения в шарнирах пантографа.

Отсчеты величин приложенных грузов, вызвавших трогание пантографа (вверх, вниз), были приведены в зависимости от положения (высоты) лыжи пантографа по вертикали. Для этого по установленной близ пантографа специальной рейке Н (рис. 52) в момент трогания пантографа (вниз, вверх) записывались соответствующие расстояния; всего было произведено 9 записей, находившихся в пределах 1600 мм. Результаты этих испытаний приведены в таблице 4.

Графическое изображение изменения статического давления, в зависимости от высоты поднятия пантографа над головкой рельса, приведено на рис. 53.

Для снятия динамической характеристики была использована установка, показанная на схеме рис. 48. Самый опыт, проводившийся в момент отстоя секции в электродепо, заключался в следующем: пантограф, находившийся в рабочем состоянии (соответственное давление воздуха, пружин и пр.), удерживался на определенной высоте. Далее по сигналу одновременно освобождался пантограф и приводился во вращение барабан кимографа внутри вагона. Пантограф под влиянием приложенных к нему усилий начинал двигаться в вертикальном направлении, имея определенное ускорение.

Таблица 4

Статическая характеристика пантографа № 2, секции № 404 Северных ж. д.  
(Среднее показание из 3 отсчетов)

| Высота над головкой рельса<br>в мм | Давление в килограммах |           |
|------------------------------------|------------------------|-----------|
|                                    | ход вниз               | ход вверх |
| 5 050 . . . . .                    | 6,9                    | 4,9       |
| 5 250 . . . . .                    | 7,1                    | 5,3       |
| 5 450 . . . . .                    | 6,7                    | 4,5       |
| 5 650 . . . . .                    | 7,8                    | 4,6       |
| 5 850 . . . . .                    | 9,8                    | 7,1       |
| 6 050 . . . . .                    | 11,3                   | 7,5       |
| 6 250 . . . . .                    | 13,0                   | 8,7       |
| 6 450 . . . . .                    | 13,8                   | 9,4       |
| 6 650 . . . . .                    | 14,8                   | 9,7       |

Наиболее интересным с точки зрения взаимодействия контактного провода и пантографа является начало движения пантографа в пределах до 150—200 мм, т. е. его ускорение в начальные моменты. В этих пределах движущимся вместе с пантографом регистратором на ленте кимографа записывались кривые перемещения пантографа по вертикали в функции времени  $h = f(t)$ . Время (в секундах) при этом отсекалось на ленте специальным регистратором. Таким образом были сделаны 25 записей для положений 5 250, 5 850 и 6 050 мм над головкой рельса при свободном перемещении пантографа по вертикали с грузами 3, 5, 11, 15, 20, 25 и 30 кг.

Данные снятых динамических характеристик сведены в ведомости № 2.

Из полученных результатов съемки статической и динамической характеристики пантографа № 2 секции № 404 можно установить следующее:

1) Пантограф в зависимости от высоты его над головкой рельса имеет значительные изменения статического давления: во время хода вверх от 5 до 9,5 кг и хода вниз от 6,5 до 14,8 кг при соответственном изменении высоты пантографа над головкой рельса—от 5 050 до 6 650 мм. На наиболее часто встречающейся рабочей высоте контактного провода на Северных ж. д. (участок Мытищи—Подлипки) это давление при ходе вниз равно 12,8 кг и при ходе вверх 8,2 кг, среднее—10,5 кг.

2) Разность давления при ходе вверх и вниз также имеет значительную величину (для вышеприведенного случая 12,8—8,2 = 4,6 кг).

3) Трение в шарнирах порядка 2,3 кг (4,6:2).

4) Из динамических характеристик (см. записи № 2 и 5 из ведомости № 2, а также рис. 54) можно установить, что кривая перемещения пантографа по вертикали  $h = f(t)$  в первой части имеет параболический характер и ускорение при свободном подъеме вверх со средней высоты (5 850 мм над головкой рельса) составляет в среднем 1,2 м/сек<sup>2</sup>.

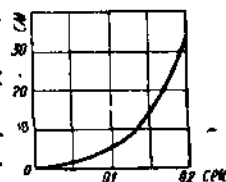


Рис. 54.

5) Пантограф при 3 и 5 кг груза поднимается вверх, а при 11 кг и более опускается вниз. Когда груз близок к величине статического давления, пантограф имеет очень незначительное перемещение по вертикали (см. записи № 10 и 14 из ведомости № 2).

### Г. Запись подъемов контактного провода в неподвижной точке

С целью исследования поведения отдельных точек контактного провода под давлением пантографа была применена установка, схематически представленная на рис. 55. Когда эта установка располагалась около мачты, то использовались ее консоль и фиксатор; для точек контактного провода в середине и четверти пролета были установлены специальные деревянные мачты с легкими деревянными консолями.

Через ролики А рис. 55 была перекинута нить В, изготовленная из шелка, благодаря чему возможно было вести испытания с кон-



Рис. 55.

тактным проводом, находящимся под напряжением. Одним концом нить подвешивалась к контактному проводу, а другим концом к стержню В, оттягиваемому пружиной Г. На этом стержне был укреплен регистратор. Колебания контактного провода через нить, стержень и регистратор передавались на ленту кимографа Д; последний устанавливался на подставке близ мачты. Для отметки времени, как и в предыдущих установках, применялся регистратор времени, а для отметки местонахождения пантографа по пролету — электромагнитный сигнал. На ленту кимографа наносились таким образом моменты прохода пантографа под фиксаторами соседних (с записываемой точкой контактного провода) мачт. Для этой цели от электромагнитного сигнала были отведены провода к соседним мачтам, и наблюдатели замыкали цепь в момент прохода пантографа под фиксатором. Схематически сигнализация представлена на рис. 56.

При записи подъемов провода в четверти и в середине пролета применялся рычажный уменьшитель вследствие значительной амплитуды подъемов. При записи подъемов провода у фиксатора передача колебания провода производилась непосредственно на ленту кимографа (подъемы в натуральную величину).

Описанным выше способом была сделана 61 запись: в середине и четверти пролета между мачтами № 18 и 19, 10 и 11 участка II, у мачт № 17 и 18 этого же участка, у мачты № 25 участка № III, № 44 участка VII, № 87 участка IV и на участке V. Условия опытов и результаты их приведены в ведомости № 3. У пантографов секций, которые проходили под испытываемой точкой контактного провода, предварительно были проверены статические характеристики. Результаты этой проверки изложены в ведомости № 4.

Рассматривая полученные данные, можно заключить следующее:

1) Подъемы короткого фиксатора (работающего на растяжение) под давлением движущего токоприемника в условиях Северных ж. д.

находятся в пределах 50—80 мм (средн. 65 мм); эти подъемы зависят от характеристики пантографа (давление, трение и скорости движения поезда при температуре, близкой к 0° С (—2° С).

2) Подъемы фиксатора, работающего на сжатие, находятся в пределах от 20 до 30 мм при температуре, близкой к 0° С (—2° С).

3) Подъемы в  $\frac{1}{4}$  пролета составляют 90—120 мм при температуре = —2° С и до 200 при температуре, равной +12° С, причем наибольшие цифры относятся к тем случаям прохода поездов, при которых направление движения было от середины пролета к  $\frac{1}{4}$ , т. е. можно заметить уже выше отмеченное явление „набегания“—большой подъем провода во 2-й четверти пролета, считая по направлению движения.

4) В середине пролета цифры подъема колеблются в пределах 80—160 мм.

5) В большинстве случаев, чем больше скорость движения поезда, тем больше подъемы контактного провода под фиксатором.

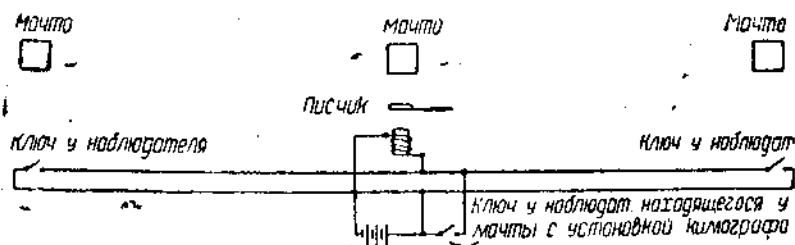


Рис. 56.

6) Статическое давление пантографов Северных ж. д. на различных положениях пантографа по вертикали изменяется в значительных пределах. Так, например, при разности высот пантографа от 1600 до 2200 мм над крышей вагона статическое давление в большинстве случаев изменялось более, чем на 4—5 кг.

7) Давление пантографов на высоте 62—70 мм от головки рельса при ходе вниз для 18 случаев (из 22 измерений) более 12 кг. Давление в 14 кг имеют 4 пантографа, 15 кг—2 пантографа и 16—2 пантографа.

8) Разность давлений пантографа при ходе вверх и вниз у большинства пантографов более 2 кг и для некоторых пантографов достигает 3 и 4 кг (пантографы 413-й, 426-й, 421-й и 403-й секций).

*Д. Запись естественных провесов контактного провода (без воздействия на него токоприемника)*

Записи естественных провесов были проведены при помощи следующего приспособления.

На выдвижном лейтере автодрезины устанавливалась рамка А рис. 57, одним концом шарнирно укрепленная на верхней части лейтера, а вторым концом свободно поднимающаяся под давлением пружины Б. К свободному концу рамки В укреплена нить Г, натягиваемая книзу пружиной Д. Соотношение пружин Д и Б подоб-

рано таким образом, что часть рамки *В* слегка может касаться контактного провода, не поднимая его. При медленном движении дрезины часть рамки *В* скользит по проводу и регистратор, связанный с нитью, записывает кривую естественного провеса контактного провода. При помощи этого приспособления были засняты провесы

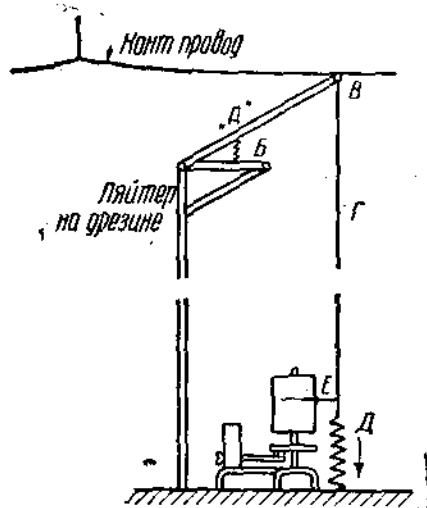


Рис. 57.

на участках II, III, IV и V, причем на участке I менялось тяжение контактного провода: существующие 900 кг понижались до 600 и 450 кг. Сравнивая записи на кимографических лентах для этих тяжений, можно видеть, что при понижении тяжений провесы между струнами увеличиваются и точки подвеса струн понижаются. Если представить себе плоскость, проведенную через два соседние фиксатора, то некоторые точки контактного провода в месте крепления струновых клемм оказывались выше этой плоскости, а у других струн того же самого пролета эти точки расположены ниже указанной плоскости. Однако отмеченные на I участке отклонения контактного провода от этой плоскости весьма

незначительны (порядка  $\pm 5$  мм) и могут быть объяснены главным образом недостаточно точным подбором длин струн. Вследствие сказанного практически возможно было считать контактный провод I участка находящимся в беспровесном состоянии.

Так как измерения производились при  $C = +7^\circ \text{C}$ , то для I участка (с гибкой поперечной подвеской) имеет место подтверждение расчетных данных, согласно которым при  $t = 10^\circ \text{C}$  провесы равны нулю.

С целью регистрации искрения при записи положения отжатого пантографом провода — к ленте кимографа подведен, кроме упомянутых выше и указанных на рис. 48, еще один регистратор от электромагнитного сигнала. Цепь с этим электромагнитным сигналом замыкалась ключом, хранившимся в распоряжении наблюдателя у перископа (см. рис. 48). Однако это приспособление не было использовано, так как искрения на выбранных участках за период испытаний не обнаружено. Период испытаний, как было указано выше, захвативший колебания температуры от  $+5^\circ \text{C}$  до  $+33^\circ \text{C}$ , дает на Северных ж. д. вообще наиболее благополучную работу пантографов в смысле искрения. Отдельные небольшие и редкие искры можно было заметить на участках (для которых опыты не ставились) у фиксаторов, но, как правило, искрение не всегда возникало в одних и тех же местах; приготовить же все приборы для любого случая не представлялось возможным из-за ограниченного размера

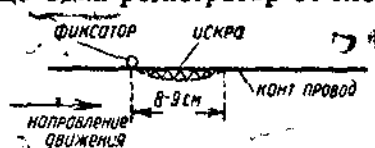


Рис. 58.

Период испытаний, как было указано выше, захвативший колебания температуры от  $+5^\circ \text{C}$  до  $+33^\circ \text{C}$ , дает на Северных ж. д. вообще наиболее благополучную работу пантографов в смысле искрения. Отдельные небольшие и редкие искры можно было заметить на участках (для которых опыты не ставились) у фиксаторов, но, как правило, искрение не всегда возникало в одних и тех же местах; приготовить же все приборы для любого случая не представлялось возможным из-за ограниченного размера

лент кимографа. Несколько случаев искрения при наблюдении с земли можно было отметить под фиксатором у мачты № 26 по Щелковской ветке с компаундной системой подвески контактного провода. Одновременно двумя наблюдателями был установлен момент искрения у фиксатора этой мачты вечером 19 июня (температура  $+15^{\circ}\text{C}$ , скорость секции 45—50 км/час). Характер искрения был следующий (наблюдение в бинокль): искра была видна тотчас же после прохода пантографом фиксатора (см. схематически на рис. 58), причем по пути движения пантографа искру можно было заметить продолжавшейся на протяжении 8—9 см. Позднее у этой мачты был установлен кимограф (согласно схеме на рис. 55) и записаны кривые подъемов фиксатора (записи № 56—59, ведомость № 3). Но во время записей искрения обнаружено не было.

### ВЫВОДЫ

1) В условиях электрифицированного участка Северных ж. д. кривые положения контактного провода, отжатого пантографом, имеют отрицательные прогибы между фиксаторами (т. е. провод в пролете приподнимается пантографом выше, чем фиксатор) даже при температуре до  $+33^{\circ}\text{C}$ , когда в свободно подвешенном состоянии контактный провод имеет положительные провесы. При этом пантограф, подходя к фиксатору, подбрасывает (подбивает) последний. Явление подбивания фиксатора тем резче выражено, чем больше контактный провод в пролете прогибается вверх над фиксатором и чем больше при подходе к фиксатору тангенс угла наклона кривой отжатого пантографом провода к горизонту. При низких температурах, когда провод и в свободно подвешенном состоянии имеет отрицательный провес, давлением пантографа этот провес увеличивается, создавая ухудшенные условия подхода пантографа к фиксатору. Наоборот, при значительных положительных провесах контактного провода, под давлением пантографа, провод приподнимается, приближаясь к уровню положения фиксатора.

До настоящего времени в расчетах цепной подвески, при выборе температуры беспровесного состояния контактного провода, обычно сравниваются между собой те положения контактного провода, которые он занимает при свободно подвешенном состоянии при крайних (положительных и отрицательных) значениях температуры; при этом не исследуются положения контактного провода, отжатого пантографом, при наличии указанных значений температур. Таким образом для Северных ж. д., имея в виду крайние температуры в условиях электрифицированного участка  $-30^{\circ}\text{C}$  и  $+40^{\circ}\text{C}$ , была принята температура беспровесного состояния контактного провода  $+10^{\circ}\text{C}$ ; это обосновывалось главным образом тем, что провод в свободно подвешенном состоянии должен иметь, примерно, одинаковые провесы, как положительные, так и отрицательные, даже с некоторым превышением в отрицательную сторону, для предотвращения образования острого угла под фиксатором, при больших положительных провесах провода. Основным недостатком такого построения является предположение, что пантограф при своем движении следует кривой провода, которую последний имеет будучи в свободно подвешенном состоянии. Опыты показали, что в усло-

виях Северных ж. д. (давление, масса пантографов и др.) пантограф подходит к фиксатору сверху вниз даже при  $+33^{\circ}\text{C}$  благодаря тому, что в любой точке пролета (и под фиксатором) имеет место явление, схематически показанное на рис. 59. Эта схема основана на записях положения провода с движущегося вагона и с неподвижной точки на линии.

Нанесём ряд положений контактного провода для температур  $+40^{\circ}\text{C}$  и  $-30^{\circ}\text{C}$ , какие он должен иметь в свободно подвешенном состоянии при соответственно заданных температурах беспровесного положения провода  $+10^{\circ}$ ,  $0^{\circ}$ ,  $-10^{\circ}$  и  $-20^{\circ}\text{C}$ . К каждому из полученных расчетных положений будем прикладывать подъемы контактного провода в различных точках, полученные из экспериментальных данных. Для тех температур, которые

не были охвачены опытными поездками, подъемы изменены пропорционально некоторому фиктивному тяжению, подсчитанному по формуле

$$H_{\phi} = H_m \left( 1 + \frac{H_x}{H_m} \right),$$

где:

$H_m$  — тяжение в тросе,

$H_x$  — тяжение в контактом проводе.

На рис. 60 сплошными линиями нанесены положения контактного провода в свободно-подвешенном состоянии для температур

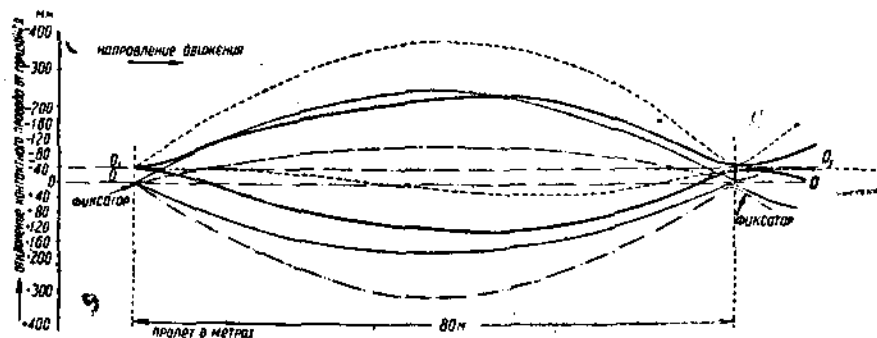


Рис. 60. Кривые подъемов контактного провода под влиянием движущегося токоприемника.

#### УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ.

- Положение контактного провода в свободно-подвешенном состоянии при температурах:  $+40^{\circ}\text{C}$  (положительные значения) и  $-30^{\circ}$  (отрицательные значения). Температура беспровесного состояния провода принималась  $+10^{\circ}\text{C}$ .
- То же для температуры беспровесного состояния  $-10^{\circ}\text{C}$ .
- Положение контактного провода по пролету при воздействии на провод пантографа при температурах:  $+40^{\circ}$  (положительные значения) и  $-30^{\circ}$  (отрицательные значения).
- Температура беспровесного состояния провода  $+10^{\circ}\text{C}$ .
- То же для температуры беспровесного состояния провода  $-10^{\circ}\text{C}$ .

$+40^{\circ}$  и  $-30^{\circ}\text{C}$ , исходя из различных температур беспровесного положения  $+10$  и  $-10^{\circ}$ , при движении электропоезда со средней скоростью 50—60 км/час, наиболее часто встречающейся в опытах

(черные утолщенные сплошные линии рис. 60 соответствуют беспровесному состоянию провода при  $-10^{\circ}\text{C}$ , пунктирные — при  $+10^{\circ}\text{C}$ ).

Рассматривая рис. 60 можно видеть, что в условиях Северных ж.д. (температура беспровесного состояния  $+10^{\circ}\text{C}$ ) наиболее благоприятные условия прохода пантографа мы имеем при положительных температурах и особо неблагоприятные условия работы подвески и пантографа получаем при крайних отрицательных температурах ( $-30^{\circ}\text{C}$ ), что действительно и соответствует практике Северной ж.д., имеющих наибольшее число аварий и искрения при токоосъеме в зимних (отрицательные температуры) условиях и сравнительно удовлетворительную работу в летних условиях. Исходя из изложенного, нужно считать, что температуру беспровесного положения контактного провода по сравнению с примененной при расчетах 1-х участков контактной сети Северных ж. д. нужно изменить в сторону ее понижения.

Рассматривая далее положения контактного провода (рис. 60), отжатого пантографом при других заданных температурах беспровесного состояния провода, можно определить такое положение, когда цепная подвеска (в условиях Северных ж. д.) будет иметь одинаковые амплитуды кривых провода (при движении пантографа) как для  $-30^{\circ}$ , так и для  $+40^{\circ}\text{C}$ ; такая температура находится в пределах от  $-10^{\circ}$  до  $+15^{\circ}$  и близка к  $-12^{\circ}\text{C}$ .

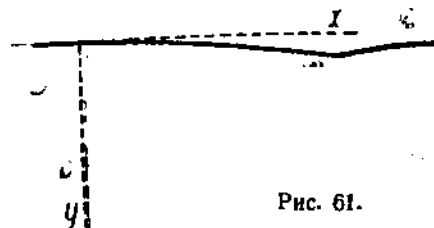


Рис. 61.

С целью выяснения влияния на контактный провод массы и ускорения пантографа остановимся на следующих предварительных замечаниях.

а) Рассматривая кривые положения контактного провода в отжатом состоянии, при статически приложенных грузах можно установить, что провод принимает форму параболы с вершиной в середине пролета (см. рис. 61). Расположив оси координат, как указано на рис. 61, мы получим уравнение параболы следующего вида:

$$x^2 = 2py.$$

Нужно заметить, что усилие  $f$  пантографа на контактный провод или, что то же, реакция провода на пантограф выражается формулой:

$$f = Q_{\text{статич}} \pm m\omega \cdot \pm k,$$

где:

$Q_{\text{статич}}$  — давление пантографа на провод в статическом состоянии,

$m$  — масса пантографа и

$\omega$  — ускорение пантографа в вертикальном направлении, диктуемое ему контактным проводом в различных точках пролета, и

$k$  — трение в шарнирах рамы пантографа.

Принимая траекторию движения лыжи пантографа, как выше сказано, за параболу, будем иметь, что ускорение пантографа в вертикальной плоскости в зависимости от скорости движения поезда

будет равно второй производной (см. уравнение параболы) по времени, т. е.

$$\frac{d}{dt} \frac{dy}{dt}$$

Из уравнения параболы имеем

$$J = \frac{x^2}{2p},$$

но

$$x = vt,$$

поэтому

$$J = \frac{v^2 t^2}{2p};$$

$$\frac{dy}{dt} = \frac{v^2}{2p} \cdot 2t;$$

$$\frac{d}{dt} \frac{dy}{dt} = \frac{v^2}{p} = w,$$

т. е. ускорение имеет постоянную величину при данной скорости и параметре параболы. Диаграмма усилия по пролету, согласно выражению

$$f = Q_{\text{статич}} \pm mw \pm k,$$

будет иметь вид рис. 62.

При значительных массах токоприемника и значительных ускорениях величина  $mw$  может достигнуть и даже превысить значения  $Q_{\text{статич}}$ ; при этом наступает отрыв токоприемника от контактного провода, образуется искра, или во всяком случае будет иметь место ухудшенное токоснимание вследствие слабого контакта между проводом и лыжей. Таким образом при заданной массе токоприемника последнему должно быть сообщено помощью пружин такое ускорение  $a$ , которое обеспечивало бы безотрывное следование лыж токоприемника по проводу, невзирая на различные ускорения  $w$ , получаемые токоприемником от провода; иначе говоря—должно существовать неравенство  $a > w$ .

Подсчитаем усилие в пролете для случая провода отжатого статически приложенными грузами (из опыта, поставленного на электрифицированном участке Октябрьских ж. д.) с длиной пролета  $l = 70$  м и высотой подъема провода в середине пролета 120 мм (давление пантографа было отрегулировано на 10 кг)

$$x^2 = 2py;$$

$$y = \frac{x^2}{2};$$

$$\frac{(35)^2}{2} = 0,12;$$

$$p = \frac{35^2}{2 \cdot 0,12} = \frac{1125}{0,24} = 5100.$$

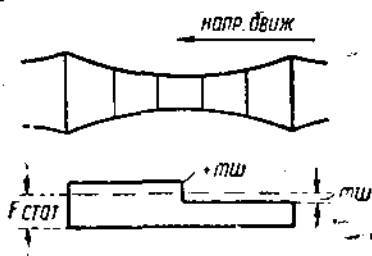


Рис. 62.

Следовательно для скорости 100 км/час (или 27,8 м/сек) имеем

$$w = \frac{v^2}{\rho} = \frac{27,8^2}{5100} = 0,15 \text{ м/сек}^2.$$

По данным завода „Динамо“ вес подвижной части пантографа типа „Метровиккерс“ составляет приблизительно из следующих величин (см. рис. 63):

$$P = P_1 + 2P_2 + 2P_3 + 2P_4 = 30 + 2 \cdot 4,2 + 2 \cdot 6 + 2 \cdot 7 = 64,2 \text{ кг.}$$

Таким образом вес подвижной части пантографа с лыжами равен 64,2 кг, а без лыж 64,2 — 30 = 34,2 кг.

Однако при точных вычислениях массы пантографа нельзя ограничиться простым суммированием веса его отдельных частей. Необходимо подсчитать так называемую „приведенную массу“ пантографа.

Для определения приведенной массы (экспериментальным путем) у пантографа фирмы Метровиккерс, находившегося в нерабочем состоянии (без воздуха), были ослаблены пружины и сняты лыжи. К кареткам пантографа вместо лыж укреплялась горизонтально деревянная штанга. При помощи динамометра и этой штанги пантограф приподнимался таким образом, что каретки находились на том же уровне, на каком они находятся в рабочем положении пантографа, динамометр при этом давал приведенный вес пантографа (без лыж).

Отсчеты по динамометру показали, что на средней рабочей высоте вес подвижной части пантографа (без лыж) равен 27 кг массы — вместо 34,2 кг полного веса, полученного нами выше. Имея в виду очень малое плечо поворота лыжи вокруг шарнира в каретке, вес лыжи принимаем далее полностью.

Приведенная масса всего пантографа для данного случая будет:

$$\frac{27 + 30}{9,81} = 5,8 \frac{\text{кг} - \text{масса сек.}^2}{\text{м}}.$$

Резльтирующее давление пантографа на провод

$$F = Q \pm m \cdot w \pm k,$$

составится из следующих данных:

$$F = 10 \pm 5,8 \cdot 0,15 \pm 1 = 10 \pm 1,87 \sim 10 \pm 2,$$

где принимаем  $k = 1 \text{ кг.}$

Поэтому, если бы пантограф следовал по параболе ( $x, y$ ) и имел заданные величины ( $m, w, v, k$ ), то давление пантографа на провод в первой половине пролета было бы равно 8 кг, а во второй половине (по направлению движения) 12 кг. Следует отметить, что подсчет приведенной массы может быть сделан не только экспериментально, но и теоретически; такой теоретический метод расчета достаточно разработан (см., напр., „Electrische Bahnen“, № 1 и 2, 1933 г.). Ниже печатается статья инж. Воронина „Определение приведенной массы пантографа эл-ва С-1000“ (из работ Закавказского филиала ЦЭН), в которой выведены формулы подсчета приведенной массы, достаточно удобные для практического пользования.

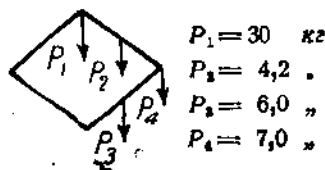


Рис. 63.

Исследование положения контактного провода под давлением пантографа в динамике, т. е. при движении поезда, показали, что заданные характеристики параболы нужно значительно изменить. Кривые, полученные на ленте кимографа, показывают, что траекторию движения точки соприкосновения лыж пантографа и контактного провода можно разделить на следующие части (см. фиг. 64, части I, II и III).

1) Полупарабола, обращенная ветвями вверх, с вершиной у первого, по направлению движения, фиксатора.

2) Парабола с ветвями, обращенными вниз с большим  $p$  (т. е. очень пологий наклон ветвей) и вершиной близ середины пролета.

3) Полупарабола с ветвями вниз и очень крутым наклоном к горизонту этих ветвей (малое  $p$ ), причем расстояние вершины этой полупараболы от второго фиксатора зависит от скорости движения поезда и характеристики токоприемника (массы и ускорения).

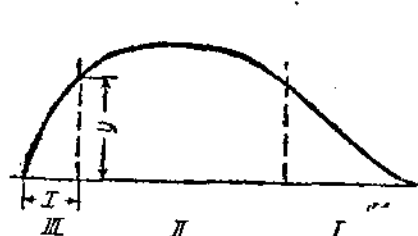


Рис. 64.

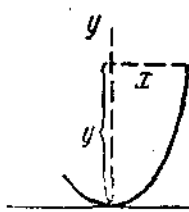


Рис. 65.

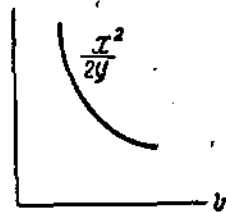


Рис. 66.

Для случая отрицательного прогиба контактного провода наиболее важной частью упомянутой траектории является часть III параболы. Для пантографа типа Метровиккерс (с которым и были проведены все испытания) в зависимости от скорости движения поезда имеем следующие значения  $x$  и  $y$  (рис. 64):

Таблица 2

| № записи | Место записи                           | Скорость поезда в км/час | Значения |     |
|----------|----------------------------------------|--------------------------|----------|-----|
|          |                                        |                          | $x$      | $y$ |
|          |                                        |                          | м        | мм  |
| 1        | 1 Компондная подвеска матч № 29 и № 30 | 14,4                     | 18,0     | 72  |
| 2        | То же . . . . . » » »                  | 36,0                     | 22,5     | 80  |
| 3        | » . . . . . » » »                      | 52,5                     | 20,0     | 83  |
| 4        | » . . . . . » » »                      | 72,0                     | 10,0     | 88  |

С целью определения ускорения пантографа экспериментальным путем был применен также метод кимографа, аналогично вышеизложенному (см. определение динамических характеристик пантографа). Пантограф с рабочей высоты отпускался и под влиянием пружин шел вверх; перо регистратора на ленте кимографа чертило

линию (рис. 65), которую также в начальной стадии движения можно принимать за параболу.

$$y = \frac{x^2}{2p};$$

в данном случае

$$x = t \text{ и } y = \frac{t^2}{2p},$$

поэтому

$$\frac{dy}{dt} = \frac{t}{p} \text{ и } \frac{d\left(\frac{dy}{dt}\right)}{dt} = \frac{1}{p} = a$$

(ускорение, сообщаемое пантографу пружинами).

Для записи № 5

$$\left. \begin{array}{l} x = 0,2 \text{ см, } y = 3 \text{ см} \\ \text{Для записи № 2} \\ x = 0,15 \text{ см, } y = 3 \text{ см} \end{array} \right\} \text{ среднее } x = 0,18 \text{ см, } y = 3 \text{ см.}$$

Значение

$$p = \frac{x^2}{2y} = \frac{0,22}{2 \cdot 3} = \frac{0,04}{6} = 0,0067.$$

Ускорение

$$a = \frac{1}{p} = \frac{1}{0,0067} = 1,50 \text{ м/сек}^2.$$

Из данных, полученных в таблице 4, для скорости 72 км/час имеем:

$$p = \frac{10^2}{2 \cdot 0,083} = \frac{100}{0,166} = 602.$$

Ускорение

$$w_{72 \text{ км/час}} = \frac{20^2}{602} = \frac{400}{602} = 0,662 \text{ м/сек.}$$

Вычислим далее значение ускорения для скорости 100 км/час. Примем для этого прежнее (приближенное) значение  $P$  (вообще при увеличении скорости значение  $P$  будет возрастать и может быть найдено по кривой рис. 66).

Тогда для скорости 100 км/час (или 27,8 м/сек).

$$w_{100 \text{ км/час}} = \frac{27,8}{602} = \frac{774}{602} = 1,285 \text{ м/сек}^2.$$

Скорость и ускорения обратного знака, приобретаемые пантографом, после прохождения фиксатора, по своей абсолютной величине должны превышать соответствующие значения до момента прохождения пантографом фиксатора. Это необходимо для обеспечения хорошего контакта и безыскрового токосъема непосредственно после указанного момента прохождения фиксатора лыжами пантографа. Исходя из оценки величины углов наклона контактного провода к горизонтали до фиксатора и после него, можно в первом приближении принять абсолютную величину нового ускорения равной 1,3.

Поэтому для части I (рис. 64) следующего пролета (после второго фиксатора) будем иметь для скорости 100 км/час:

$$w = 1,285 \cdot 1,3 = 1,67 \text{ м/сек}^2.$$

Из статической характеристики испытуемого пантографа величину  $k$  определяем в 2 кг, тогда

$$F = Q_{\text{стат}} \pm m \cdot w \pm k = 10 + 5,8 \cdot 1,67 + 2 = 10 + (9,7 + 2) = 10 + 11,7 \text{ кг},$$

т. е. при описанных условиях для данной подвески получается отрыв токоприемника от контактного провода. Это видно также и из того, что требуется ускорение в  $1,67 \text{ м/сек}^2$ , а испытывавшийся пантограф фирмы Метровиккерс дает ускорение только  $1,5 \text{ м/сек}^2$ .

Здесь необходимо повторить, что приведенные расчеты являются только примерными, показывающими всю важность рассмотрения положения контактного провода, приподнимаемого движущимся токоприемником.

Более подробное математическое исследование траектории движения лыжи токоприемника, скользящей по контактному проводу с учетом тяжения в тросе и контактном проводе, массы подвески, массы токоприемника, трения в шарнирах токоприемника и лыжи по проводу, скорости движения поезда и других факторов, влияющих на взаимодействие токоприемника и провода, должно явиться следующим этапом настоящей работы.

Оптимальное давление пантографа должно обеспечивать безыскровое токоснимание для имеющих место в данных условиях сил токов.

Принятое среднее статическое давление на Северных ж. д. в 4,5 кг на лыжу в средней части полета, когда на пантограф приходилось нормально 400 А, а при пусковом токе 800 А, почти всегда (исключая период гололеда) обеспечивало безыскровое токоснимание.

ЦЭН были предприняты опытные поездки сдвоенных секций при съемке тока с одного пантографа. Для питания энергией моторов второй секции по крыше вагонов был протянут кабель от работающего пантографа первой секции. При этом во время движения поезда снималась сила тока порядка 800 А, при трогании с места—до 1600 А.

Искрения в средних частях подвески также обнаружено не было.

Исследование подъемов контактного провода при статически приложенных грузах показало, что при 10,5 кг давления токоприемника на провод, центр тяжести токоприемника имеет минимум перемещений по вертикали за время прохождения струнового пролета. Следовательно для условий Северных ж. д., если исходить из наиболее благоприятного прохода токоприемника по струновому пролету, среднее статическое давление токоприемника на провод следовало бы установить в 10,5 кг, как наиболее целесообразное.

Между тем, сравнивая кривые рис. 45 и 60, можно видеть, что изменение величины статического давления в пределах от 5 до 15 кг вызывает меньшие наклоны контактного провода к горизонту, чем это имеет место при динамическом (во время хода поезда) воздействии пантографа на провод, хотя пантограф в последнем случае регулировался на те же 5—15 кг давления.

На практике искрение и наиболее часто встречающиеся аварии происходят почти исключительно на так называемые „жесткие точки“—

перегибы контактной подвески. Поэтому решающее влияние на выбор статического давления должно оказывать положение контактного провода, поднятого токоприемником близ фиксатора, а это положение вызывается, как было ранее указано, результирующим давлением, находящимся из уравнения

$$F_{результ} = Q_{статич} \pm mw \pm k.$$

Для данного типа токоприемника с постоянными  $m$  и  $k$   $F_{рез}$  зависит от  $w$  куда входит величина подъема  $u$  провода, вызванного тем или иным давлением. Частный случай решения этого уравнения дает ответ на выбор давления для условий Северных ж. д. Во всяком случае для принятой до сих пор температуры беспровесного состояния контактного провода  $+10^\circ \text{C}$  и получающихся значительных отрицательных прогибов провода при низких температурах необходимо снизить статическое давление токоприемника на провод на 1—2 кг. При этом следует отметить, что снижение статического давления ( $Q_{статич}$ ) при проходе пантографом фиксатора может и не вызвать уменьшения результирующего давления ( $F_{результ}$ ), вследствие того, что уменьшение ускорения ( $w$ ) вызывает и уменьшение вычитаемого в разности

$$Q_{статич} - m \cdot w$$

вышеприведенного уравнения.

Более точный ответ может быть получен только после вывода зависимости общего вида с учетом динамической слагающей.

Вышеприведенные подсчеты и рассуждения позволяют сделать следующие заключения:

а) Явление набеганий при динамическом воздействии токоприемника на провод, т. е. смещение вершины кривой геометрического места точек, описываемого лыжей движущегося пантографа от середины пролета к фиксатору по направлению движения, создает неблагоприятные условия работы пантографа у фиксатора.

б) Смещение этой точки по направлению к фиксатору тем больше, чем больше скорость движения поезда, чем больше трение в шарнирах, чем больше масса токоприемника.

в) Полученные данные показывают, что при проектных расчетах подвески для токоприемников, близких по характеристике к подвергнутым испытаниям пантографам типа ДЖ-4 фирмы Метровиккерс, надлежит производить расчетную проверку на поведение контактного провода под давлением токоприемника при различных скоростях движения поезда.

г) В конструкции токоприемников необходимо идти по линии уменьшения массы токоприемника. Опыт определения приведенной массы (работы Закавказского филиала института по этому вопросу) показывает, что, примерно, 50% массы подвижной части пантографа падает на лыжи; поэтому уменьшение массы токоприемника целесообразнее всего проводить в виде создания конструкций однолыжных токоприемников.

Кроме того за переход от двухлыжного токоприемника к однолыжному еще говорят и следующие соображения:

- 1) Пантограф возможно получить более легкой конструкции.
- 2) Меньшая стоимость.

3) Большие производственные возможности изготовления, так как при однолыжном пантографе могут ставиться пружины с меньшим давлением (одним из главных затруднений при производстве двухлыжного пантографа является изготовление сильных пружин из высококачественных сталей, дающих минимум остаточных деформаций).

4) При сохранении одного и того же давления на лыжу на контактный провод будет передаваться меньшее давление (для двухлыжного пантографа, при 5 кг давления на лыжу, на контактный провод передается сосредоточенное давление в 10 кг), благодаря чему будет достигнуто более благоприятное условие работы контактного провода.

5) Две лыжи токоприемника обычно ставятся из тех соображений, что если одна лыжа будет отрываться, то вторая будет в этот момент продолжать контакт с проводом и обеспечивать безыскровое токоснимание. Практика показала, что в так называемых „жестких точках“ (у фиксаторов) при эксплуатационных скоростях для двухлыжного пантографа большей частью происходит отрыв токоприемника от провода и искрение, т. е. при эксплуатационных скоростях в указанных точках имеет место ухудшение токоснимания, несмотря на наличие двух лыж, что можно объяснить близким расположением одной лыжи от другой. В этом вопросе применение одного однолыжного пантографа еще не улучшает процесса токоснимания в „жестких точках“. Наиболее целесообразным мероприятием в этом направлении может быть установка двух одновременно работающих однолыжных пантографов облегченного типа. В качестве примера может быть приведена работа Баку-Сабунчинской электрической ж. д., на которой мотор-вагоны работают с двумя однолыжными пантографами облегченного типа („Элли-а“); стоимость обоих пантографов не превосходит 1 000 рублей, в то же время двухлыжный пантограф производства завода „Динамо“ стоит 4,5—5 тысяч рублей. При двухлыжных пантографах мы имеем следующую картину работы их: когда один пантограф находится в неблагоприятной по токосниманию точке пролета (у фиксатора); второй пантограф работает в наиболее благоприятных условиях (близ середины пролета). К этому нужно добавить, что фирма Метровиккерс также перешла на изготовление однолыжных пантографов (The Metropolitan Vickers Gazette, т. II 1933 г., стр. 40).

В качестве замечаний практического характера по работе пантографов на Северных ж. д. следует отметить:

1) Регулировка давления у большинства пантографов проведена неудовлетворительно. Пантографы имеют большую разницу давления в различных положениях по высоте.

2) Значительная разность давления при ходе вверх и при ходе вниз указывает на большое трение в шарнирах токоприемника.

3) Искусственное повышение давления токоприемника в зимних условиях, как это имело место на Северных ж. д., усугубляет и без того достаточно большие отрицательные прогибы провода под влиянием токоприемника и создает еще более ухудшенные условия токоснимания в точках перегиба провода.

При наличии гололеда на проводах целесообразнее идти по пути применения обесточенного механического очистителя, чем по

линии повышения давления у рабочего токоприемника, так как такое повышение давления, как показывает практика эксплуатации Северных ж. д., не избавило от искрения в гололедный период, и токоприемники в этот период зачастую приходили в электродепо с прожженными не только накладками, но и лыжами.

4) Одним из главных недостатков нужно считать проверку давления пантографа на высоте 5700 мм от головки рельса (в депо проверка давления пантографа при отрыве его от головки рельса). Между тем наиболее часто встречающаяся высота контактного провода на линии составляет 6250—6300 мм; на этой высоте пантографы имеют повышенное давление. Как было ранее указано, это давление для некоторых секций доходит 14—16 кг. Необходимо проверять давление пантографа минимум в двух-трех точках, захватывая рабочую высоту контактного провода на линии.

---

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИВЕДЕННОЙ МАССЫ ПАНТОГРАФА ЭЛЕКТРОВОЗА СЕРИИ С-1000

При движении электровоза лыжи пантографа перемещаются в вертикальном направлении, в зависимости от высоты контактной подвески. В каждый данный момент лыжи, перемещаясь, имеют определенное ускорение, которое зависит от скорости движения электровоза, с одной стороны, и изменения высоты контактной подвески,—с другой. Динамическое усилие, которое оказывает масса  $M_1$ , двигаясь с ускорением  $w$ , равно  $M_1 \cdot w$ . В этом случае предполагается, что все точки тела, имеющего массу  $M_1$ , движутся с одинаковым ускорением. Переходя к случаю пантографа, не трудно видеть, что отдельные элементы пантографа обладают различными ускорениями. Поэтому для получения динамического усилия между лыжами и контактным проводом приходится или разбивать пантограф на отдельные мелкие элементы, считая при этом, что каждый из них движется с некоторым ускорением и это ускорение одинаково для всех точек элемента, или же,—что некоторая масса движется с ускорением, равным ускорению лыж пантографа: эта масса определяется путем подсчетов и называется приведенной массой.

Последний метод наиболее удобен; поэтому он получил широкое распространение, причем задача определения динамических усилий в каждой точке контактной подвески распадается на определение приведенной массы пантографа, построение кривой ускорений и перемножение полученных значений.

Определяя приведенную массу, предполагаем, что лыжи движутся в вертикальном направлении с некоторой скоростью  $v$ , находим живую силу отдельных частей пантографа. Суммируя живые силы частей, получим общую живую силу, приравнявая которую  $\frac{v^2}{2}$ , находим значение приведенной массы  $M_1$ .

В дальнейшем при определении динамических усилий пантограф будет рассматриваться как система с двумя степенями свободы, т. е. будет учитываться изменение динамической составляющей вследствие колебаний верхнего шарнира пантографа. Поэтому приведенная масса определяется отдельно для ножиц и лыж пантографа. Кроме того в конце производится подсчет приведенной массы лыж и балансиров, поддерживающих лыжи, по отношению к верхнему шарниру пантографа.

Для определения приведенной массы,—ножиц в первую очередь, установим зависимость между высотой лыжи пантографа и углами  $\varphi$  и  $\psi$  (см. рис. 67) наклона рам  $l_1$  и  $l_2$ .

Проектируя на ось  $h$  длины рам  $l_1$  и  $l_2$ , получаем:

$$h = l_2 \cdot \cos \psi + l_1 \cdot \cos \varphi. \quad (1)$$

Проектируя на ось  $x$ , имеем:

$$l_2 \cdot \sin \psi = e + l_1 \cdot \sin \varphi,$$

откуда:

$$\sin \psi = \frac{e + l_1 \cdot \sin \varphi}{l_2};$$

$$\sin \varphi = \frac{l_2 \cdot \sin \psi - e}{l_1};$$

$$\cos \psi = \frac{1}{l_2} \sqrt{l_2^2 - (e + l_1 \cdot \sin \varphi)^2}; \quad (2)$$

$$\cos \varphi = \frac{1}{l_1} \sqrt{l_1^2 - (l_2 \cdot \sin \psi - e)^2}. \quad (3)$$

Подставляя в уравнение (1) значение  $\cos \psi$  из уравнения (2), получим:

$$h = \sqrt{l_2^2 - (e + l_1 \cdot \sin \varphi)^2} + l_1 \cdot \cos \varphi. \quad (4)$$

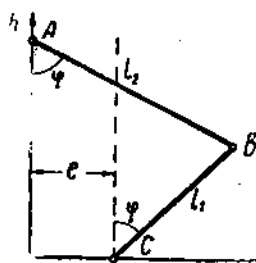


Рис. 67.

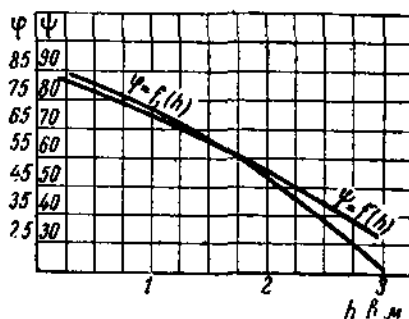


Рис. 68.

Подставляя в уравнение (1)  $\cos \varphi$  из уравнения (3), имеем:

$$h = \sqrt{l_1^2 - (l_2 \cdot \sin \psi - e)^2} + l_2 \cdot \cos \psi. \quad (5)$$

Подсчитываем соотношения (4) и (5), дающие зависимость между  $h$  и  $\varphi$ ,  $h$  и  $\psi$ .

Согласно примерам для рассматриваемого пантиграфа величины, входящие в уравнения (4) и (5), имеют следующие значения:  $l_1 = 1,375$  м,  $l_2 = 1,985$  м и  $e = 0,61$  м (см. протокол); угол  $\varphi$  изменяется в пределах  $16^\circ 10'$  до  $84^\circ 30'$ , а угол  $\psi$  — в пределах от  $30^\circ 40'$  до  $87^\circ 10'$ .

Кривые приведены на рис. 68.

Для определения зависимости между угловой скоростью и линейной, берем производную по времени:

$$v = \frac{dh}{dt} = \left[ \frac{(e + l_1 \cdot \sin \varphi) l_1 \cdot \cos \varphi}{\sqrt{l_2^2 - (e + l_1 \cdot \sin \varphi)^2}} - l_1 \cdot \sin \varphi \right] \frac{d\varphi}{dt} = k \frac{d\varphi}{dt}. \quad (6)$$

Коэффициент  $k$  зависит от высоты лыж пантографа. Подсчет значений  $k$  дан в таблице 3. Аналогично получим выражение:

$$v = \left[ \frac{(l_2 \sin \varphi - e) l_2 \cdot \cos \varphi}{\sqrt{l_1^2 - (l_2 \cdot \sin \varphi - e)^2}} - l_2 \cdot \sin \varphi \right] \frac{d\varphi}{dt} = k_1 \frac{d\varphi}{dt};$$

$k_1$  зависит также от высоты лыж пантографа. Подсчет этой зависимости дан в таблице 4.

На рис. 69 показана зависимость  $k$  и  $k_1$  от  $h$ . Переходя к определению приведенной массы ножиц, последнюю можно разбить на следующие элементы (рис. 70):

1) Коробка с пружинами для крепления балансиров, поддерживающих лыжи. Массу этой коробки обозначим через  $m_1$ .

2) Рама  $l_2$ ; массу этой рамы обозначим через  $m_2$ .

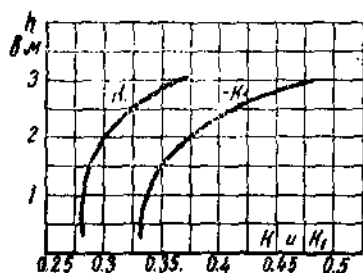


Рис. 69.

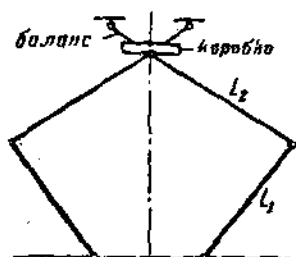


Рис. 70.

При рассмотрении рамы  $l_2$ , движение последней разлагалось на вертикальное, причем полагаем, что рама движется параллельно самой себе и вращается вокруг точки  $A$  (рис. 67). Живая сила подсчитывается отдельно для каждого из этих движений и берется разность, что является лишь приближенно правильным.

3) Рама  $l_1$ . Массу этой рамы обозначим через  $m_3$ ; через  $\omega_1$  и  $\omega_2$  обозначим угловые скорости рам  $l_1$  и  $l_2$  и через  $J_1$  и  $J_2$  — их моменты инерции относительно осей вращения.

Уравнение живых сил для ножиц пантографа будет:

$$\frac{(Mv)^2}{2} = 2 \left( \frac{m_1 v^2}{2} + \frac{m_2 v^2}{2} - \frac{\omega_2^2}{2} J_2 + \frac{\omega_1^2}{2} J_1 \right). \quad (8)$$

Подставляя в уравнение (8)  $\omega_2 = \frac{v}{k_1}$  и  $\omega_1 = \frac{v}{k}$ , получаем:

$$M = 2 \left( m_1 + m_2 - \frac{J_2}{k_1^2} + \frac{J_1}{k^2} \right). \quad (9)$$

В виду того, что  $k_1$  и  $k$  являются функциями высоты лыж пантографа, величина приведенной массы  $M$  меняется и зависит от высоты контактной подвески.

Следует отметить, что уравнение (9) справедливо при любой скорости лыж в вертикальном направлении. Если полагать последнюю равной нулю, уравнение (9) также остается в силе. Таким образом, если отсоединить пружины от ножиц пантографа и про-

## Подсчет зависимости

$$y = h = \sqrt{l_2^2 - (e + l_1 \sin \varphi)^2 + l_1 \cos \varphi},$$

где  $l_2 = 1,985 \text{ м}$ ,  $l_1 = 1,375 \text{ м}$ ,  $e = 0,61 \text{ м}$

| $\varphi$<br>в град.                      | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-------------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|
| $\sin \varphi$                            |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |
| $\cos \varphi$                            |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |
| $l_1 \sin \varphi$                        |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |
| $e + l_1 \sin \varphi$                    |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |
| $(e + l_1 \sin \varphi)^2$                |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |
| $l_2^2$                                   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |
| $l_2^2 - (e + l_1 \sin \varphi)^2$        |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |
| $\sqrt{l_2^2 - (e + l_1 \sin \varphi)^2}$ |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |
| $l_1 \cos \varphi$                        |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |
| $y = h$                                   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |

## ПОДСЧЕТ ЗАВИСИМОСТИ

$$y = \sqrt{l_1^2 - (l_2 \sin \psi - e)^2} + l_3 \cos \psi,$$

где  $l_2 = 1,985$  м,  $l_3 = 1,375$  м,  $e = 0,61$  м.

| $\frac{\psi}{\text{град.}}$ | $\psi$ | $\sin \psi$ | $\cos \psi$ | $l_2 \sin \psi$ | $l_2 \sin \psi - e$ | $l_1^2$ | $l_1^2 - (l_2 \sin \psi - e)^2$ | $\sqrt{l_1^2 - (l_2 \sin \psi - e)^2}$ | $l_3 \cos \psi$ | $y \approx h$ |         |
|-----------------------------|--------|-------------|-------------|-----------------|---------------------|---------|---------------------------------|----------------------------------------|-----------------|---------------|---------|
| 1                           | 2      | 3           | 4           | 5               | 6                   | 7       | 8                               | 9                                      | 10              | 11            | 12      |
| 1                           | 30°40' | 0,51004     | 0,86015     | 1,012429        | 0,40242             | 0,16194 | 1,89062                         | 1,72868                                | 1,31479         | 1,70739       | 3,02218 |
| 2                           | 40°    | 0,64279     | 0,76604     | 1,27593         | 0,66590             | 0,44342 | 1,89062                         | 1,44720                                | 1,20299         | 1,52058       | 2,72357 |
| 3                           | 50°    | 0,76604     | 0,64279     | 1,52058         | 0,91058             | 0,82915 | 1,89062                         | 1,06147                                | 1,03027         | 1,27593       | 2,30600 |
| 4                           | 60°    | 0,86603     | 0,50000     | 1,71906         | 1,10906             | 1,23001 | 1,89062                         | 0,66061                                | 0,81280         | 0,99250       | 1,80530 |
| 5                           | 70°    | 0,93969     | 0,34202     | 1,86528         | 1,28528             | 1,54572 | 1,89062                         | 0,31490                                | 0,56120         | 0,67890       | 1,24010 |
| 6                           | 80°    | 0,98481     | 0,17365     | 1,95484         | 1,34484             | 1,80859 | 1,89062                         | 0,08203                                | 0,28641         | 0,34469       | 0,63110 |
| 7                           | 87°10' | 0,99878     | 0,04943     | 1,98257         | 1,37257             | 1,88394 | 1,89062                         | 0,00668                                | 0,08173         | 0,09811       | 0,17984 |
|                             |        |             |             |                 |                     |         |                                 |                                        |                 |               | *       |

Подсчет зависимости  $K = \varphi(h)$  $l_2 = 1,985 \text{ м}$ ,  $l_1 = 1,375 \text{ м}$ , и  $l = 0,61 \text{ м}$ .

| $\frac{h}{\text{м}}$ | $\varphi$<br>в град. | $e + l_1 \cdot \sin \varphi$ | $l_1 \cdot \cos \varphi$ | $\sqrt{l_2^2 - (e + l_1 \cdot \sin \varphi)^2}$ | $\frac{3 \cdot 4}{5}$ | $l_1 \cdot \sin \varphi$ | $k$    | $h$     |
|----------------------|----------------------|------------------------------|--------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------|--------------------------|--------|---------|
| 1                    | 2                    | 3                            | 4                        | 5                                               | 6                     | 7                        | 8      | 9       |
| 1                    | 16°10'               | 0,99284                      | 1,32063                  | 1,71885                                         | 0,7628                | 0,38284                  | 0,3800 | 3,03948 |
| 2                    | 25°                  | 1,19110                      | 1,24618                  | 1,58790                                         | 0,9347                | 0,58110                  | 0,3536 | 2,83408 |
| 3                    | 35°                  | 1,39867                      | 1,12633                  | 1,40843                                         | 1,1185                | 0,78867                  | 0,3298 | 2,53476 |
| 4                    | 45°                  | 1,58228                      | 0,97228                  | 1,19849                                         | 1,2836                | 0,97228                  | 0,3113 | 2,17077 |
| 5                    | 55°                  | 1,73633                      | 0,78867                  | 0,96700                                         | 1,4161                | 1,12633                  | 0,2897 | 1,75567 |
| 6                    | 65°                  | 1,85618                      | 0,58110                  | 0,70327                                         | 1,5337                | 1,24618                  | 0,2875 | 1,28437 |
| 7                    | 75°                  | 1,93815                      | 0,35588                  | 0,42836                                         | 1,6151                | 1,32815                  | 0,2869 | 0,78424 |
| 8                    | 84°30'               | 1,97863                      | 0,13179                  | 0,15764                                         | 1,6542                | 1,36868                  | 0,2855 | 0,28943 |

Подсчет зависимости  $K_1 = \psi(h)$  $l_2 = 1,985 \text{ м}, l_1 = 1,375 \text{ м}, \text{и } e = 0,61 \text{ м},$ 

| № п/п | $\psi$<br>в градусах | $l_2 \sin \psi - e$ | $l_1 \cos \psi$ | $\sqrt{l_1^2 - (l_2 \sin \psi - e)^2}$ | $\frac{3 \cdot 4}{5}$ | $l_2 \sin \psi$ | $K_1$    | $h$     |
|-------|----------------------|---------------------|-----------------|----------------------------------------|-----------------------|-----------------|----------|---------|
| 1     | 2                    | 3                   | 4               | 5                                      | 6                     | 7               | 8        | 9       |
| 1     | 30°40'               | 0,40242             | 1,70739         | 1,31479                                | 0,52257               | 1,01242         | -0,48985 | 3,02218 |
| 2     | 40°                  | 0,66590             | 1,52058         | 1,20299                                | 0,8500                | 1,27593         | -0,42593 | 2,72357 |
| 3     | 50°                  | 0,91058             | 1,27593         | 1,03027                                | 1,1276                | 1,52058         | -0,39298 | 2,30600 |
| 4     | 60°                  | 1,10906             | 0,99250         | 0,81280                                | 1,3540                | 1,71906         | -0,36506 | 1,80530 |
| 5     | 70°                  | 1,25528             | 0,67890         | 0,56120                                | 1,5185                | 1,86528         | -0,34678 | 1,24010 |
| 6     | 80°                  | 1,34484             | 0,34469         | 0,28641                                | 1,6184                | 1,95484         | -0,33644 | 0,63110 |
| 7     | 87°10'               | 1,37257             | 0,09811         | 0,08173                                | 1,64760               | 1,98257         | -0,33497 | 0,17984 |

Таблица 5

## Подсчет приведенной массы

| № п/п | h   | k <sub>1</sub> | k <sub>1</sub> <sup>2</sup> | k     | k     | $\frac{7,04}{k_1^2}$ | $\frac{3,72}{k^2}$ | M     |
|-------|-----|----------------|-----------------------------|-------|-------|----------------------|--------------------|-------|
| 1     | 2   | 3              | 4                           | 5     | 6     | 7                    | 8                  | 9     |
| 1     | 0,3 | 0,335          | 1,122                       | 0,286 | 0,818 | 0,626                | 0,455              | 2,572 |
| 2     | 0,5 | 0,335          | 1,122                       | 0,286 | 0,818 | 0,626                | 0,455              | 2,572 |
| 3     | 1,0 | 0,3405         | 1,159                       | 0,287 | 0,824 | 0,607                | 0,452              | 2,610 |
| 4     | 1,5 | 0,354          | 1,253                       | 0,289 | 0,835 | 0,551                | 0,446              | 2,684 |
| 5     | 2,0 | 0,375          | 1,406                       | 0,303 | 0,918 | 0,501                | 0,405              | 2,722 |
| 6     | 2,5 | 0,406          | 1,648                       | 0,328 | 1,076 | 0,427                | 0,346              | 2,752 |
| 7     | 3,0 | 0,482          | 2,323                       | 0,371 | 1,376 | 0,303                | 0,270              | 2,848 |

Таблица 6

Подсчет зависимости  $M_2 = f(\varphi_1)$ 

| № п/п | $\varphi_1$ | $\sin \varphi_1$ | $\operatorname{tg} \varphi_1$ | $\frac{1}{\sin^2 \varphi_1}$ | $\frac{1}{\operatorname{tg}^2 \varphi_1}$ | $\frac{4 I_3}{c^3}$ | $2 m_{\text{расе}}$ | $\frac{4 I_3}{c^2 \sin \varphi_1}$ | $\frac{2 m_{\text{расе}}}{\operatorname{tg}^2 \varphi_1}$ | $M_2$ |
|-------|-------------|------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------------------|---------------------|---------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------|
| 1     | 2           | 3                | 4                             | 5                            | 6                                         | 7                   | 8                   | 9                                  | 10                                                        | 11    |
| 1     | 20          | 0,342            | 0,364                         | 8,55                         | 7,580                                     | 0,228               | 2,34                | 1,95                               | 17,76                                                     | 1,971 |
| 2     | 39          | 0,500            | 0,577                         | 4,09                         | 3,000                                     | 0,228               | 2,34                | 0,91                               | 7,01                                                      | 7,92  |
| 3     | 40          | 0,643            | 0,839                         | 2,42                         | 1,420                                     | 0,228               | 2,34                | 0,55                               | 3,32                                                      | 3,87  |
| 4     | 50          | 0,766            | 1,192                         | 1,70                         | 0,704                                     | 0,228               | 2,34                | 0,387                              | 1,65                                                      | 2,04  |
| 5     | 60          | 0,866            | 1,732                         | 1,33                         | 0,334                                     | 0,228               | 2,34                | 0,303                              | 0,781                                                     | 1,084 |

мерить динамометром вертикальное усилие, необходимое для поддержания ножиц на различной высоте верхнего шарнира, то получим для каждой высоты  $P = Mg$ , т. е., деля на ускорение силы тяжести усилие  $P$ , получим приведенную массу ножиц. Таким образом приведенная масса может быть определена просто экспериментальным путем.

Моменты инерции  $J_1$  и  $J_2$  можно найти по экспериментально найденному значению времени полного качания (в одну и другую сторону)  $T$  вокруг оси вращения рамы.

Время качания для математического маятника:

$$T = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}, \quad (10)$$

где  $l$  — длина маятника.

Для случая физического маятника должна быть определена длина фиктивного математического маятника, время качаний которого равно времени качания физического маятника, причем эта длина может быть определена из соотношения:

$$l = \frac{J}{M\xi}, \quad (11)$$

где  $\xi$  — расстояние от оси вращения до центра тяжести.

Из уравнений (10) и (11) находим:

$$J = \frac{Mg\xi T^2}{\pi^2}.$$

Для рассматриваемого пантографа получаем следующие значения:

$$m = \frac{P}{g} = \frac{2 \cdot 0,1 + 0,8}{9,81} = 0,102 \text{ кг};$$

$$m_2 = \frac{P}{g} = \frac{13,3}{9,81} = 1,355 \text{ кг};$$

$$J_1 = \frac{m_2 g \xi T_2^2}{\pi^2} = \frac{63 \cdot 0,17 \cdot 1,85^2}{3,14^2} = 3,72 \text{ кг м}^2$$

$$J_2 = \frac{m_2 g \xi T_2^2}{\pi^2} = \frac{13,3 \cdot 0,92 \cdot 2,38^2}{3,14^2} = 7,04 \text{ кг м}^2.$$

Подставляя в уравнение (9), получаем:

$$M = 2 \cdot \left( 1,457 - \frac{7,04}{k^2} + \frac{3,72}{k^2} \right).$$

Подсчет приведенной массы ножиц дан в таблице 5 и кривая зависимости  $M = f(k)$  дана на рис. 71.

*Приведенная масса лыж и балансиров, поддерживающих лыжи*

Если считать, что угол (см. рис. 72) не меняется при движении пантографа, получим значение масс:

$$M = \frac{2 \cdot 11,5 + 4 \cdot 0,4}{9,81} = 2,54 \text{ кг}.$$

Это значение массы соответствует случаю, когда пантограф рассматривается как система с одной степенью свободы.

Переходя к случаю системы с двумя степенями свободы, приходится считаться с изменением угла  $\varphi_1$ . Приведенная масса системы

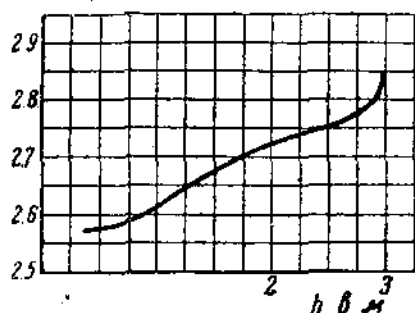


Рис. 71.

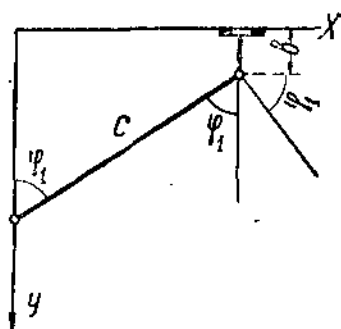


Рис. 72.

(лыжи + балансиры), воздействующая на верхний шарнир ножиц, будет (см. рис. 74):

$$y = c \cdot \cos \varphi_1 + b$$

и

$$\frac{dy}{dt} = -c \cdot \sin \varphi_1 \frac{d\varphi_1}{dt};$$

$$\frac{M_2 v_1^2}{2} = \frac{4 J_2 v_1^2}{2c^2 \cdot \sin^2 \varphi_1} + \frac{2 v^2 m_{\text{лиж}}}{2 \lg^2 \varphi_1},$$

откуда получим значение  $M_2$ :

$$M_2 = \frac{4 J_2}{c^2 \cdot \sin^2 \varphi_1} + \frac{2 m_{\text{лиж}}}{\lg^2 \varphi_1},$$

где для нашего случая:

$$J_2 = \frac{0,4 \cdot 0,65 \cdot 0,58^2}{3,14^2} =$$

$$= 0,00089 \text{ кгм}^2;$$

$$c = 0,125 \text{ м};$$

$$m_{\text{лиж}} = \frac{11,5}{9,81} = 1,17 \text{ кг}.$$

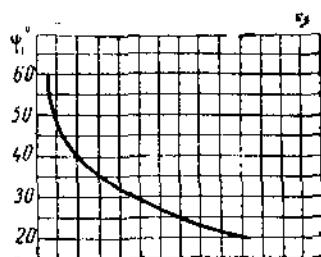


Рис. 73.

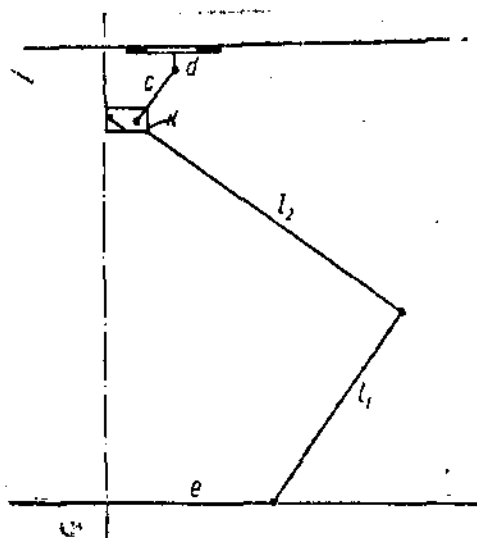


Рис. 74. Схема пантографа.

Подсчет значений  $M_2$  в зависимости от  $\phi_1$  дан в таблице 6. Кривая зависимости показана на рис. 73.

Полученная приведенная масса входит в расчеты при рассмотрении равновесия верхнего шарнира пантографа.

#### Приложение

Протоколы промеров основных размеров пантографа, определения положения центра тяжести отдельных частей по отношению к оси вращения, веса отдельных частей и периода качаний.

Промеры производились на пантографе № 2 электровоза С-1007.

Ст. Хашури. Закавк. ж. д.

3 апреля 1933 г.

#### РАМА $I_1$

Длина рамы  $I_1$  между осями шарниров—1,375 м.

Вес рамы  $I_1$  с осью в нижнем шарнире—63 кг.

Расстояние от нижнего шарнира до центра тяжести— $\xi_1=0,17$  м.

Далее промерялось время десяти качаний рамы с осью, причем рама  $I_1$  раскачивалась вокруг нижнего шарнира.

#### ПОЛУЧЕНЫ СЛЕДУЮЩИЕ ДАННЫЕ

| № промера   | Число качаний | Время,                       |
|-------------|---------------|------------------------------|
| 1 . . . . . | 10            | 18,4 сек                     |
| 2 . . . . . | 10            | 18,5 "                       |
| 3 . . . . . | 10            | 18,6 "                       |
| 4 . . . . . | 10            | 18,6 "                       |
|             |               | Среднее время . . . 18,5 сек |

Отсюда время одного полного качания  $T=1,85$  сек.

#### РАМА $I_2$

Длина рамы  $I_2$  между осями шарниров—1,985 м.

Вес рамы  $I_2=13,3$  кг.

Расстояние центра тяжести от верхнего шарнира пантографа— $\xi_2=0,92$  м.

Определение времени, потребного на одно полное качание рамы  $I_2$  относительно верхнего шарнира пантографа:

| № наблюд.   | Число качаний | Время                   |
|-------------|---------------|-------------------------|
| 1 . . . . . | 5             | 11,5 сек                |
| 2 . . . . . | 5             | 12,0 "                  |
| 3 . . . . . | 5             | 12,0 "                  |
| 4 . . . . . | 5             | 12,0 "                  |
|             |               | Среднее . . . 11,88 сек |

Время одного полного качания—2,38 сек.

#### РЫЧАГИ, ПОДДЕРЖИВАЮЩИЕ ЛЫЖИ

Расстояние между центрами шарниров  $a=0,125$  м.

Расстояние между нижним шарниром и центром тяжести рычага  $\xi=0,065$  м.

Вес одного рычага—0,4 кг.

Время качания рычага относительно нижнего шарнира:

| № промера   | Число качаний | Время                     |
|-------------|---------------|---------------------------|
| 1 . . . . . | 10            | 6 сек                     |
| 2 . . . . . | 10            | 5,5 "                     |
| 3 . . . . . | 10            | 6 "                       |
|             |               | Среднее . . . . . 5,8 сек |

Время одного полного качания:  $T=0,58$  сек.

### ПРУЖИНЫ ВЕРХНЕЙ КАРЕТКИ

Вес каждой пружины — 0,1 кг.

### КАРЕТКА

Вес каретки 0,8 кг.

### ЛЫЖИ

Вес лыжи 11,5 кг.

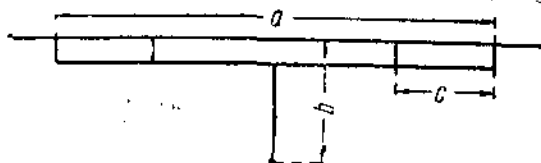


Рис. 75.

### СХЕМА ЛЫЖИ (рис. 75)

Промеры основных размеров:

$$a = 0,125 \text{ м};$$

$$b = 0,016 \text{ м};$$

$$c = 0,03 \text{ м у края лыжи};$$

$$c = 0,05 \text{ м в середине лыжи.}$$

Расстояние между вертикальной осью пантографа и нижним шарниром рамы по направлению горизонтальной оси электровоза

$$c = 0,61 \text{ м.}$$

## ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В ВЫПРЯМЛЕННЫХ СЕТЯХ ПОСТОЯННОГО ТОКА\*

### 1. ВИДЫ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ

Источниками перенапряжений в сетях выпрямленного постоянного тока, в частности в контактной сети электрических железных дорог, могут быть как внешние факторы, так и процессы в самой сети. Основными источниками перенапряжений можно считать:

1. Явления, связанные с изменениями электрического поля земной атмосферы.
2. Непосредственные удары основного ствола или ветвей молнии в установку.
3. Влияние соседних цепей высокого напряжения.
4. Изменение режима сети (включения, выключения, дуговые явления в сети и на подвижном составе).
5. Нарушение нормальной работы выпрямительных агрегатов (обратное зажигание ртутных выпрямителей, круговой огонь, ненормальные условия работы).

Основной вопрос, который должен лечь в основу всей дальнейшей работы, заключается в анализе того, какие из видов перенапряжений являются опасными, т. е. могут быть причиной нарушения нормальной работы контактной сети электрических железных дорог и для защиты от которых потребуются применение специальных устройств, и какие перенапряжения являются „безопасными“, т. е. величина и время действия которых лежат в пределах, абсолютно безопасных для данной системы.

Говоря об „опасных“ и „безопасных“ перенапряжениях, необходимо отметить, что значение этих терминов не поддается точному определению. Действительно, одно и то же по своим параметрам перенапряжение может быть в одном случае „опасным“, в другом случае „безопасным“, в зависимости от различных факторов (величины коэффициента электрического запаса и т. д.).

По формулировке проф. Сиротинского, „граница опасного и безопасного перенапряжений перемещается непрерывно в сторону расширения „безопасных“ повышений напряжений за счет „опасных“ в связи с успехами техники изоляции и лучшего понимания явлений перенапряжения“.

Мы будем считать „опасным“, как указывалось выше, повышение напряжения до величин, могущих разрушить целостность изоляции

\* Помещаю в настоящем сборнике работу инж. Сердинова С. М. „Перенапряжения в выпрямленных сетях постоянного тока“, институт отмечает важность и своевременность постановки данной темы, весьма слабо освещенной на страницах советской и зарубежной технической литературы. Выводы г. Сердинова, в особенности в части, касающейся разрядников, подлежат дальнейшей углубленной проработке.

частей установки, считая, что установка не оборудована аппаратами, могущими обезопасить ее от перенапряжений или предотвратить их, т. е. рассматриваем устройство, не имеющее защиты от перенапряжений.

Для определения „опасности“ перенапряжения перейдем к анализу каждого из видов их, найдем величины этих перенапряжений и проанализируем изоляционные характеристики устройств контактной сети.

## 1. ЯВЛЕНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ИЗМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ

Среднее значение напряженности поля земной атмосферы на уровне моря по данным измерений геофизических станций равно  $120 \text{ В/м}$ .

При хорошей, ясной погоде электрическое поле направлено нормально, а эквипотенциальные поверхности — параллельно земной поверхности.

Величина градиента поля атмосферы подвержена различного рода изменениям, в зависимости от времен года и состояния погоды с резким увеличением градиента при грозах.

Постепенное изменение поля земной атмосферы является источником накопления статических зарядов в электрических сетях, причем потенциал этого градиента может быть очень незначителен.

Однако для контактной сети электрических железных дорог, как и для линии электропередач с заземленной нейтралью, статические заряды не представляют никакой опасности, так как отводятся через рельс в землю.

Контактная сеть электрических железных дорог присоединена к рельсу на тяговой подстанции через выпрямляющий агрегат и кроме того на ртутновыпрямительных подстанциях через так называемое „балансное сопротивление“. Кроме того контактная сеть присоединяется к рельсу каждый раз при проходе электрического поезда через систему силовой цепи электровоза или моторвагона.

С рельса потенциал стекает в землю через переходное сопротивление „рельс-грунт“, которое в лучшем случае имеет величину порядка  $2—2,5 \text{ }\Omega/\text{км}$  для одной нитки, в нормальных условиях эксплуатации это сопротивление уменьшается до  $1,6—2 \text{ }\Omega/\text{км}$ .

Учитывая несколько рельсовых ниток и „растекание“ статического заряда, перешедшего из контактной сети в рельс на некоторое расстояние, можно утверждать, что переходное сопротивление „рельс-грунт“ приблизительно равно или немного отличается от переходного сопротивления хорошего заземления, установленного на подстанции и имеющего сопротивления порядка  $0,5—0,4 \text{ }\Omega$ .

Таким образом отвод статических перенапряжений в рельс совершенно аналогичен отводу в землю и целиком обеспечивает нормальную работу контактной сети как электрической системы.

Очевидно, что этим самым перенапряжения, вызванные статическими зарядами, не являются опасными, и в дальнейшем мы не будем их касаться при анализе перенапряжения. Перейдем к рассмотрению так называемых индуктированных ударов молнии.

Линия передачи, находящаяся в электрическом поле грозового облака, стоящего над ней, получает связанный индуцированный заряд.

Плотность этого заряда в проводе такова, чтобы дать потенциал, равный по величине и противоположный по знаку потенциалу земного поля на высоте подвески провода.

Наложение этих потенциалов (поля и провода) дает нулевой потенциал (если не считать рабочего потенциала данной сети).

До тех пор, пока заряды облака сконцентрированы, заряды, индуцированные в проводе, являются связанными.

В тот момент, когда облако разряжается на землю, связанные заряды проводника освобождаются и создаются потенциалы определенной величины.

Величина появившегося потенциала в проводе зависит от времени разряда облака на землю. При мгновенном разряде возникают потенциалы, равные по величине потенциалу электрического поля облака.

При медленном разряде, вернее при постепенном изменении электрического поля облака, заряды будут освобождаться постепенно. Свободные заряды, перемещаясь в обе стороны, распределяются на всю емкость сети и стекают через заземления системы (аналогично описанным выше статическим зарядам).

Очевидно, что в этом случае нельзя ожидать значительного повышения потенциала системы проводов.

Какой же величины могут достигнуть перенапряжения, вызванные ударом молнии? Очевидно, что величина этого перенапряжения целиком зависит от времени разряда.

При анализе и разработке этого вопроса различные исследователи дают различные величины как времени разряда, так и величины перенапряжения. В своей работе Бьюли (Bewleg) показал, что увеличение времени разряда свыше  $5 \mu$  сек. ведет к значительному уменьшению амплитуды потенциала волны (до 15% первоначальной величины); поэтому сторонники теории больших индуктивных перенапряжений считают время разряда молнии  $2-5 \mu$  сек.

Большинство исследователей считают, что перенапряжения, создаваемые путем индукций, не выходят за пределы  $100-120 \text{ kV}$  (Симсон, Нориндер, Фортескую, Бергер). Это отчасти подтверждается тем, что катодные осциллографы и клидографы не давали указаний на повышение потенциала при разрядах вблизи линии, если рабочие потенциалы этих линий были порядка  $100-150 \text{ kV}$ .

Другие исследователи считают возникновение перенапряжений значительно большие, чем указано выше, основываясь на опытных данных, полученных на американских линиях. Однако эти перенапряжения могли быть следствием как индуктивных, так и прямых ударов молнии. Фронт волны перенапряжения по наблюдениям на линиях США при индуктивных перенапряжениях достигает значения порядка  $100 \frac{\text{kV}}{\mu \text{ сек.}}$ ; в большинстве случаев величина фронта волны меньше этого значения.

На основании работ, проведенных по анализу перенапряжений, вызванных индуктивными ударами молний, наиболее вероятным можно считать мнение, что величина потенциалов этих перенапряжений лежит в пределах  $100 \text{ kV}$ , что для линии с рабочим напряжением порядка единиц киловольт безусловно является опасным.

## 2. НЕПОСРЕДСТВЕННЫЕ УДАРЫ МОЛНИИ В УСТАНОВКУ

Непосредственные удары молнии в установку вызывают чрезвычайно сильное повышение потенциала и колоссальные силы тока.

Грубо говоря, потенциалы достигают величины тысяч киловольт, а сила тока—сотен тысяч ампер, что подтверждается опытными данными (экспериментальные работы на высоковольтных линиях в США).

Существует мнение, что при прямых ударах молнии в установку эти удары обладают такой колоссальной силой, что практически невозможно отвести эти удары в землю и предотвратить повреждение установки.

С другой стороны, применение защитного троса, как показывают опытные данные, уменьшает число перенапряжений в два раза, т. е. половина всех прямых ударов молнии отводится в землю без всякого ущерба для установки.

Многочисленные данные наблюдений над эксплуатируемыми высоковольтными и низковольтными сетями, а также опыты, производимые в Германии и США, доказывают, что прямой удар молнии в проводе линии является почти во всех случаях перекрывающим и весьма часто разрушающим изоляцию линии (наблюдения велись на сетях 220 kV).

Защита линии от прямых ударов сводится к устройству приспособления, которое приняло бы на себя грозовой разряд и тем самым предоохранило провода линии.

Для низковольтных сетей, где не применяется защитный трос, в частности для контактной сети электрических ж. д., нас главным образом интересует вопрос о поражаемости прямыми ударами молнии проводов и столбов, поддерживающих провода.

При попадании грозового разряда в провод (см. рис. 76) неизбежно будет перекрыт изолятор и разряд уйдет в землю через опору; при попадании разряда в опору, разряд уходит через нее в землю непосредственно, но в некоторых случаях может попасть в провод. Этот вопрос детально освещен проф. Matthias в докладе на II энергетическом конгрессе в Берлине. По его мнению происходит следующее: сила тока удара молнии в большинстве случаев имеет порядок 10 000 А и больше, доходя до 50—100 тыс. ампер.

При ударе молнии в провод в первый момент распространение волны, а следовательно и отвод энергии в обе стороны по проводу, ограничен волновым сопротивлением линии, имеющим значительную величину, что приводит к пробое близлежащих изоляторов.

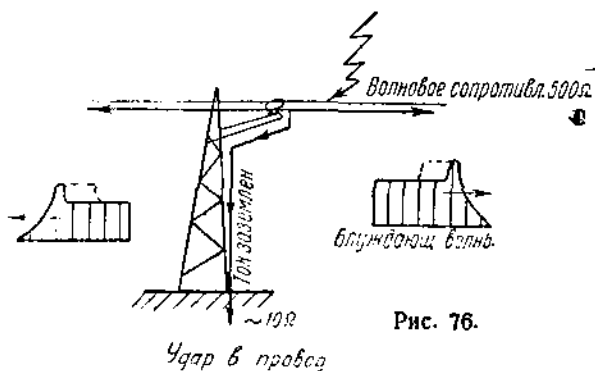


Рис. 76.

Благодаря разряду „на землю“, происшедшему через металл опоры или через заземление опоры, изменяется форма волны, попавшей в линию.

При ударах молнии в металлические опоры или опоры с недостаточным сопротивлением заземления, падение напряжения тока разряда может достигнуть такого значения, что возможно обратное перекрытие изолятора от мачты к проводу. Этот случай представлен на рис. 77.

При этом получаем в проводе двигающуюся волну, амплитуда которой обусловлена падением напряжения в заземлении.

Если мачты соединены заземляющим тросом соответствующей проводимости, то напряжение распространяется на соседние опоры, причем утечка тока на соседние опоры определяется волновым сопротивлением заземляющего троса.

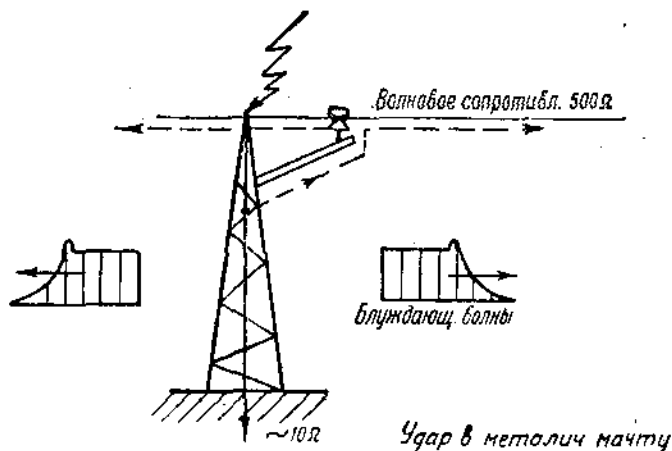


Рис. 77.

Применение деревянных или бетонных опор, обладающих высоким сопротивлением, уменьшает градиент напряжения на изоляторе, но может привести к расщеплению самой опоры при прямом ударе, что подтверждается многочисленными случаями из практики. При ударе в провод, подвешенный на деревянных или бетонных опорах, падение напряжения, благодаря небольшой величине тока, текущего по опоре в землю, настолько мало, что высокое напряжение может распространиться на соседние опоры и также привести их к разрушению.

Из вышесказанного следует, что прямой удар молнии в контактную сеть опасен как для случая попадания в провод, так и при попадании в мачту; и при том и при другом случае возникают в контактном проводе очень высокие потенциалы, разрушительно действующие на изоляцию линии.

Отдельно нужно рассматривать вопрос о возможности попадания молнии в провод или в опору. Данные опытных наблюдений как на линиях передачи, так и на сетях электрических железных дорог приводят к заключению, что удары в провод значительно более редки, чем удары в опоры (особенно металлическую).

Это объясняется тем, что разряд всегда происходит с наиболее возвышенной и наилучшим образом заземленной точки, каковой является опора по отношению к проводу.

С другой стороны, эти соображения о попадании молнии в опору или в провод могут быть отнесены только к слабым разрядам, так как разряды большей силы обыкновенно имеют разветвленный характер и поражают при этом целую группу предметов, иногда находящихся на значительном удалении друг от друга.

При этом могут быть поражены как опоры, так и непосредственно провод, что возможно при сильных грозовых разрядах на открытых участках электрических железных дорог.

На лесных участках вероятность попадания разряда в провод гораздо меньше, так как в большинстве случаев удары будут восприниматься окружающими деревьями и только в редких случаях опорами контактной сети. Величина фронта волны для непосредственных ударов по опытным данным в среднем  $150-200 \frac{\text{kV}}{\mu\text{сек}}$ , но могут достигнуть значения  $1500 \frac{\text{kV}}{\mu\text{сек}}$ .

Контактная сеть может быть приравнена к линиям связи и низковольтным распределительным сетям, где распределение ударов в сеть, опору и окружающие предметы, изложенное выше, целиком подтвердилось.

### 3. ВЛИЯНИЕ СОСЕДНИХ ЦЕПЕЙ

Различные формы перенапряжений могут возникать в контактной сети при наличии близко расположенных линий передач высокого напряжения.

Эти перенапряжения могут возникнуть благодаря наличию гальванической, индуктивной или емкостной связи между линией передач и контактной сети.

Сюда входит, во-первых, влияние проводов сильного тока, достигающее очень больших размеров при коротких замыканиях в них.

Контактная сеть электрических ж. д. в этом отношении находится в особо неблагоприятных условиях. Действительно при электрификации района линии передач с точки зрения эксплуатационных удобств (обслуживание, осмотр) будут транслироваться в непосредственной близости линии электрических ж. д. Кроме того в большинстве случаев вдоль трассы железных дорог будут проходить линии передач для питания тяговых подстанций.

При электрификации длинных участков электрических ж. д. с большим расстоянием между подстанциями напряжение линий передач, питающих тяговые подстанции, будет часто достигать 110 kV. Примеры таких устройств мы видим на Сурамском перевале (линия передачи ЗАГЭС—РИОНГЭС), на Пермской ж. д. (на участке Кизел—Чусовская), на большинстве магистральных электрических ж. д. Америки и Зап. Европы.

Стремление к созданию объединенных подстанций с районной и тяговой нагрузкой, которые будут служить центрами питания

электрифицированного района, предопределяет трассирование основных линий передач вдоль трассы железных дорог.

Это значит, что при создании единой высоковольтной сети вдоль линии электрических ж. д. могут быть трассированы линии передач с напряжением 220—380—440 кВ.

При расположении в непосредственной близости эти линии передач могут быть источниками очень больших перенапряжений в контактной сети.

Подсчитаем возможные перенапряжения при коротком замыкании в линии передач. Для систем с незаземленной нейтралью напряжение, индуцированное в линии при замыкании на землю одного из проводов линии передач, может быть определено по формуле (СЭТ):

$$E_1 = 0,35 \frac{E \cdot b \cdot c}{a^2 + b^2 + c^2} p \cdot q \cdot r, \quad (7)$$

где:  $E$ —напряжение линии передачи в вольтах;  $p=0,75$ —коэффициент, учитывающий экранирующее действие заземляющего троса на линии передачи;  $r$  и  $q=0,7$ —коэффициенты, учитывающие экранирующее действие сплошного ряда деревьев, соответственно *близки линии передачи и контактной сети*; если деревья отстоят дальше, чем на 3 м, коэффициенты  $r$  и  $p$  принимаются равными 1;  $a$ —среднее расстояние между линией передачи и контактной сетью;  $b$ —средняя высота подвески проводов линии передач;  $c$ —средняя высота подвески контактного провода в м.

Найдем перенапряжение в контактной сети при замыкании в линии передачи 220 кВ, проходящей в непосредственной близости от линии электрических ж. д.

Принимаем:  $a = 25$  м,

$b = 10$  м,

$c = 6$  м,

$q = r = 1$ .

$$E_1 = 0,35 \cdot 0,75 \frac{220000 \cdot 10 \cdot 6}{100 + 36 + 625} \cong 5300 \text{ В.}$$

Для линии передачи 110 кВ и тех же условий перенапряжение будет порядка 2600—2700 В.

Если принять линию передачи, питающую тяговые подстанции, подвешенные на опорах контактной сети, то большая величина индуцированного перенапряжения возможна и в случае более низкого напряжения в линии передач.

*Пример.* Питающаяся сеть напряжения 33000 В подвешена на опорах контактной сети: для этого случая можно принять:

$$a = 3 \text{ м, } b = 8 \text{ м, } c = 6 \text{ м, } q = r = 1.$$

Находим значение перенапряжения при замыкании одного провода с учетом экранирующего действия заземляющего троса

$$E = 0,35 \cdot 0,75 \frac{330000 \cdot 8 \cdot 6}{64 + 36 + 9} = 3850 \text{ В.}$$

При отсутствии заземляющего троса перенапряжение возрастает до 5050 В.

Для линии с заземленной нейтралью напряжение, индуктированное в линии связи при замыкании на землю одного из проводов трехфазной линии передачи, может быть определено по формуле

$$E_{II} = 0,7 \omega I_n M \quad (2)$$

0,7—коэффициент экранирующего действия заземленных проводов и тросов,

$\omega = 2\pi f$  — круговая частота,

$I_n$  — ток короткого замыкания,

$M$  — коэффициент взаимоиנדукции, определенный опытным путем,

$l$  — длина сближения линии в километрах.

Значения  $M$  могут быть определены в зависимости от расстояния между линией передачи и линией связи по следующей таблице:

Таблица 1

| $a$ . . . . .        | 5    | 10  | 20   | 50   | 100  | 500  | 1000 |
|----------------------|------|-----|------|------|------|------|------|
| $M$ . . . . .        | 13,5 | 10  | 8    | 5,8  | 4,5  | 2,2  | 1,4  |
| $\omega M$ . . . . . | 0,42 | 0,3 | 0,24 | 0,18 | 0,13 | 0,05 | 0,03 |

где  $a$  — сближение линии в метрах.

Подсчитаем перенапряжение, возникающее в линии передачи при замыкании одного провода линии с заземленной нейтралью по условиям, приводимым выше.

В первом случае  $a = 25$  м,

$$I_n = 200 \text{ А},$$

$$l = 30 \text{ км (расстояние между подстанциями)}.$$

Подставляем в формулу (2)

$$E = 0,7 \cdot 0,2 \cdot 200 \cdot 30 = 840 \text{ В}.$$

Для второго случая—подвески на опоры контактной сети прием

$$I_n = 600 \text{ А},$$

$$l = 30 \text{ км}.$$

$$E = 0,7 \cdot 0,6 \cdot 600 \cdot 30 = 7600 \text{ В}.$$

Т. е. для случая с заземленной нейтралью более низкое напряжение линии передачи, проходящей около контактной сети, является более опасным, так как увеличивается сила тока короткого замыкания.

Наибольшие перенапряжения могут возникнуть при замыкании на земле в линии с глухим заземлением нейтрали как на генераторной, так и на приемной станции, наименьшее — в линии с изолированной нейтралью.

На последних под действием дуговых перенапряжений может произойти замыкание на земле второй фазы, так называемое „двойное замыкание на землю“, действие которого на соседнюю линию немногим меньше, чем действие замыкания в линии с глухим заземлением.

Заземленные нейтрали через трансформатор или катушку Петерсена дают уменьшение возможных перенапряжений в соседних линиях.

При выключении разомкнутой линии передачи, принимая во внимание явление отражения волны напряжения от разомкнутого конца, в соседних линиях возникают перенапряжения, которые могут быть вычислены по формуле

$$E_{III} = 1,5 \cdot E_1, \quad (3)$$

где  $E_1$  —индуктированное напряжение, подсчитанное по формуле (7).

Отсюда следует, что включение разомкнутой линии дает значительные перенапряжения. Для наших примеров при выключении линии получаем значения:

в первом случае

$$E_{III} = 1,5 \cdot 5300 = 8000 \text{ V},$$

во втором случае

$$E_{III} = 1,5 \cdot 3850 = 5650 \text{ V}.$$

Значительные перенапряжения могут возникнуть при наличии высоковольтных линий, пересекающих линию электрических ж. д. под малым углом.

Подвеску высоковольтных линий, питающих тяговые подстанции, на опорах контактной сети мы встречаем на ряде дорог Зап. Европы и США.

Примером могут служить Виргинские электрические ж. д., где подвешена линия 88 000 V, участок Детройт—Тоledo—Айронтон, с подвеской на опорах контактной сети линии 44 000 V, электрические ж. д. во Франции с подвеской линий в 66 000 V, Пенсильванские электрические ж. д. с подвешенной линией 132 000 V. Очевидно и в системе электрификации железных дорог нашего Союза использование сети для подвески линии передачи является возможным.

Отсюда является необходимость предусмотреть защиту от перенапряжений, могущих возникнуть при нарушении режима этих линий передач.

Нами были разобраны на примере наиболее невыгодные случаи взаимного расположения линии передачи и контактной сети. Подсчет показал, что наибольшее перенапряжение, могущее возникнуть при этом, не превышает 10 000 V. Принимаем эту цифру, как максимум возможного перенапряжения, возникающего благодаря влияниям линий передач.

Какова может быть продолжительность этих перенапряжений? Продолжительность перенапряжений зависит от времени отключения линии при коротком замыкании. Это время зависит от „установок“ масляных выключателей на подстанциях, определяемых в зависимости от системы применяемой защиты и от конфигурации сети. Обыкновенно эта величина порядка 1—2 сек, но в исключительных случаях может доходить до 3—3,5 сек. В новейших системах защиты при коротком замыкании на землю выключение происходит в очень короткий срок: 0,1—0,25 сек.

Более длительные перенапряжения возможны при нарушении защиты линии и невыключении соответствующего масляного выключателя.

Кроме перенапряжений, появляющихся в результате влияния линии передачи, возможен непосредственный переход высокого напряжения в контактную сеть. Это возможно при обрывах линии передач, пересекающих линию электрических ж. д., при различного рода набросах и т. п.

Величина этих перенапряжений очевидно зависит от рабочего напряжения высоковольтной сети и в наших условиях может достигать величины 220 kV. Время действия зависит от того, вызвало ли повреждение короткое замыкание или нет; в первом случае произойдет отключение масляного выключателя на высоковольтной линии, во втором случае (особенно для линии до 33 kV) может не произойти отключения, и тогда контактная сеть может попасть под высокое напряжение на довольно продолжительный период времени.

Нужно отметить, что такие случайные соединения контактной сети электрических ж. д. с проводами линии передачи являются мало вероятными в действительности.

#### 4. ИЗМЕНЕНИЕ РЕЖИМА СЕТИ

Перенапряжения могут возникнуть в сети при различном нарушении режима работы сети и подвижного состава (короткое замыкание через дугу, переброс по коллектору, отключение максимальных реле).

Рассмотрим процесс выключения. Опасным в смысле возникновения перенапряжений является выключение с разрывом вольтовой дуги. Выключение такого рода мы имеем во всех контурах сильного тока при отключении от полного напряжения. Появление и угасание дуги на контактах выключателя характеризуют начало и конец выключения.

Величина перенапряжений полностью зависит от режима горения дуги, но процесс горения и его динамика трудно поддаются теоретическому анализу.

Анализ дуговых выключателей проф. Рюденберг делает исходя из заданной характеристики дуги, не зависящей от времени ее угасания.

Чем длиннее дуга, тем больше ее напряжение и тем выше расположена ее характеристика. Ход кривой напряжения дуги может быть выражен уравнениями Айртона (Ayrton), Штейнметца или Ноттингема. Возьмем уравнение Айртона в простейшей форме

$$e_s = \frac{a}{i} + b,$$

где постоянные  $a$  и  $b$  находятся в линейной зависимости от длины дуги:

$$a = \alpha + \gamma l$$

$$b = \beta + \delta l.$$

Коэффициенты  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  зависят от материала электродов и от свойств веществ, в которые погружены контакты (воздух, масло). Соотношение Айртона дает действительные величины при больших силах тока, но для угасающей дуги дает бесконечно большое на-

пряжение, что является неверным. Поэтому в основу анализа должна быть принята действительная характеристика дуги, устанавливаемая экспериментально для каждого выключателя. Далее Рюденберг делает предположение, что выключение цепи сильного тока происходит настолько быстро, что контакты достигают своего конечного положения до того, как ток изменится заметным образом. В этом случае дуга за весь период горения имеет определенную длину, а стало быть определенную характеристику, как например представлено на рис. 78.

Зная напряжение дуги  $e_d$ , зависящее от тока  $i$ , получим следующее дифференциальное уравнение контура постоянного тока с индуктивностью, питаемого напряжением  $E$

$$L \frac{di}{dt} + Ri + e_d = E, \quad (4)$$

где  $e_d$  — есть напряжение, зависящее от  $i$ ; переписываем уравнение

$$L \frac{di}{dt} = \Delta e - E - Ri - e_d.$$

В правой части все напряжения, зависящие только от тока, объединены в общее разностное напряжение. Чтобы найти изменение тока по времени, мы должны решить уравнение

$$L \frac{di}{dt} = \Delta e.$$

Это уравнение может быть преобразовано

$$dt = L \frac{di}{\Delta e}.$$

Интегрируя получаем:

$$t = L \int \frac{di}{\Delta e}.$$



Рис. 78.

Величину этого интеграла легко получить графически. Построение представлено на рис. 79. Рюденберг, стр. 199, „явления неустановившегося режима“.

На фигуре А от напряжения дуги  $e_d$  отнята величина установившегося напряжения  $E - Ri$ , которые в виде обратной величины представлены на фигуре В. Интегрирование этой кривой по  $i$  дает на фигуре С кривую выключения тока. Каждому мгновенному значению тока соответствует определенное напряжение дуги  $e_d$ , а также определенное напряжение у отключаемого контура, которое определяется выражением:

$$e_L + e_R = E - e_d.$$

Анализируя полученную кривую, находим, что напряжение у размыкаемого контура ( $e_L + e_R$ ) уменьшается скачкообразно на величину напряжения дуги, проходит в процессе выключения через нулевую линию и под конец достигает высокого отрицательного значения, таким образом напряжение дуги сильно возрастает только к концу выключения.

Максимальное значение напряжения в конце выключения совсем не зависит от свойства контура, а определяется только напряже-

нием сети и напряжением угасания дуги. Индуктивность и сопротивление контура не влияют на перенапряжение при выключении, а определяют только продолжительность и характер процесса выключений.

Теорию Рюденберга в том виде, как она изложена выше, подтверждают многие исследователи, однако она нуждается в некоторой корректировке.

В анализе вопроса характеристики выключения проф. Рюденберг берет заданную характеристику дуги, не зависящую от динамики угасания самой дуги, и на основании этого строит вывод о независимости „перенапряжения“ выключения от индуктивности контура.

В то же время процесс угасания дуги зависит от индуктивности контура, который определяет характер и время процесса выключения. Опытные данные все же говорят, что перенапряжение не зависит от индуктивности цепи (например, опыты Ботса).

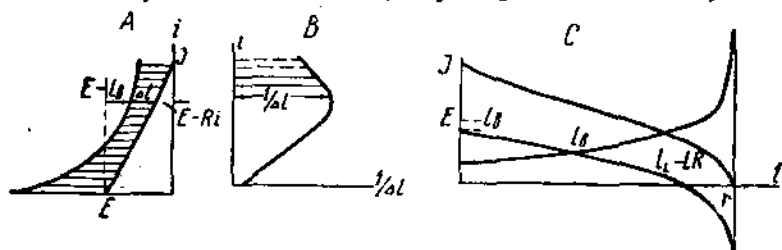


Рис. 79.

Очевидно, что результат, полученный проф. Рюденбергом, очень близко совпадает с действительностью и может быть рассматриваем, как правильный вывод; те условия, которые он вводит, являются допустимыми, так как дуга в выключателе существует очень короткое время и скорость изменения тока чрезвычайно мала.

На электрических ж. д. в цепях постоянного тока применяются исключительно быстродействующие автоматические выключатели. Время выключения их колеблется от 0,03 до 0,006 сек., в зависимости от конструкции и мощности выключателя.

Для достижения быстрого перерыва тока всюду применяется магнитное дутье очень большой интенсивности. Короче говоря, конструкция всех элементов быстродействующего выключателя должна обеспечивать минимальное время для перерыва тока в цепи, но в то же время это очевидно приведет к увеличению возникающих перенапряжений.

Определение абсолютной величины перенапряжений математическим путем чрезвычайно затруднительно, благодаря ряду факторов, влияющих на процесс выключения — факторов, трудно поддающихся анализу.

Поэтому здесь мы перейдем к анализу опытных данных, что даст более яркую картину перенапряжений.

Отсюда можно заключить, что перенапряжения при выключении могут достигать 2—4-кратной величины рабочего напряжения. Перенапряжения большей величины в практике электрических ж. д. постоянного тока не наблюдались. При применении выключ-

**Перенапряжения при выключении постоянного тока быстродействующего автомата**

| N . . . . .        | 1    | 2    | 3    | 4    | 5   | 6    | 7    | 8   | 9    | 10  | 11  |
|--------------------|------|------|------|------|-----|------|------|-----|------|-----|-----|
| $E_{норм}$ . . . . | 1500 | 1500 | 790  | 440  | 660 | 600  | 660  | 600 | 800  | 440 | 300 |
| $E_{макс}$ . . . . | 2260 | 1900 | 1380 | 1000 | 920 | 1517 | 1020 | 988 | 1510 | 580 | 930 |
| % . . . . .        | 150  | 126  | 172  | 228  | 140 | 253  | 170  | 182 | 190  | 129 | 310 |

чателей в масле или интенсивном охлаждении контактов перенапряжения могут достигать 5- и 6-кратной величины, однако выключатели такого типа на электрических ж. д. не применяются.

Наиболее опасным для контактной сети является отключение быстродействующего автомата контактной будки, когда волна перенапряжения проходит по линии.

Выключение быстродействующего автомата на подстанции при разрыве короткого замыкания может привести к очень высоким перенапряжениям между нулевой точкой трансформатора и катодом выпрямителя (как следствие постепенного восстановления напряжения при ухудшившемся вакууме); этот вопрос нами будет рассмотрен дальше.

Приходится констатировать, что отключение короткого замыкания приводит к появлению значительных перенапряжений, что также должно быть учтено при расчете изоляции линии.

Необходимо отметить очень незначительную продолжительность перенапряжений, которое носит импульсный характер с продолжительностью порядка нескольких тысячных секунды ( $5 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-3}$ ). Перенапряжения, появляющиеся при резких толчках тока, при сбросе нагрузки (например, выключение моторов) значительно меньше перенапряжений при отклонении „короткого“.

Мы рассмотрели случай нарушения равновесия в электрической системе, что вызвало процессы, имеющие „уравнительный“ характер и приводящие к кратковременным перенапряжениям и сверхтокам.

Рассмотрим случай длительных вольтовых дуг, например при сгорании плавких предохранителей, перекрытии рогов разрядников тяговым током с последующим выдуванием дуги, переброса по коллектору на машинах подвижного состава. При этом процесс горения дуги может продолжаться до нескольких секунд.

Еще более опасные перенапряжения могут возникнуть при неполных коротких замыканиях вдали от подстанции, выражающиеся в форме длительной вольтовой дуги, когда возможны неотключения быстродействующего автомата на подстанции или контактной будке. В этом случае теоретически время горения дуги может быть каким угодно, и ее потухание зависит только от местных условий и состояния цепи.

Не рассматривая детально теории явлений в контурах с установившейся вольтовой дугой, что детально разработано проф. Рюденбергом, укажем, что величина перенапряжений, возникающих в контуре, зависит от его электрических характеристик.

При коротком замыкании в контактной сети между двумя подстанциями, работающими параллельно, распределение электрических характеристик может быть представлено следующей схемой (после отключения ближайшей подстанции, рис. 80).

Мы предполагаем наиболее невыгодный случай неполного короткого замыкания и установившейся вольтовой дуги при автоматическом выключении одной из подстанций, при котором выключатели удаленной подстанции не выключают.

Приняты следующие обозначения:

$L_1$  — индуктивность рельсовой цепи,

$L_2$  — индуктивность контактного провода,

$C_1$  — емкость контактного провода (включая несущий трос и фидер) относительно земли,

$C_2$  — емкость питательных фидеров на подстанции.

В этом случае максимальное напряжение, могущее возникнуть на концах емкости, знать которое нам необходимо для суждения о явлениях перенапряжения, при синусоидальных колебаниях равно:

$$E_n = J'' \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (5)$$

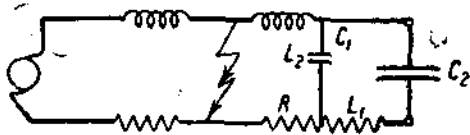


Рис. 80.

где  $J''$  есть предельное значение свободного тока, который может возникнуть в любом колебательном контуре без того, чтобы дуга угасла; величина  $J''$  определяется силой нормального тока  $J'$  дуги. Мы всегда имеем:

$$J'' \leq J';$$

отсюда

$$E_n = J'' \sqrt{\frac{L}{C}} \leq J' \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Подставляя значения для принятой нами схемы и принимая емкость контактного провода относительно земли сосредоточенной в одном месте, а именно в месте присоединения емкости питательных фидеров, получаем:

$$E_n \leq J' \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{C_1 + C_2}} = k J'. \quad (6)$$

Таким образом мы видим возможность возникновения самовозбужденных напряжений, способных достигать больших значений при значительных самоиндукциях, особенно в слабо успокаиваемых контурах, каковыми как-раз является контактная сеть электрических ж. д.

Особенно опасным этот процесс становится тогда, когда собственная частота колебательного контура невелика и дуга горит между металлическими электродами; в этом случае напряжение дуги

следует за колебаниями тока, что сохраняется до частоты порядка 1000 пер/сек.

При увеличении частоты колебаний напряжение дуги все больше приближается к неизменному значению, так как способность ее порождать незатухающие собственные колебания ослабевает.

Вследствие этого максимально возможное напряжение по уравнению (5) не возрастает до бесконечности по мере убывания емкости, так как по мере этого убывания возрастает собственная частота контура и вследствие этого теряет свою способность возбуждать колебания.

Собственная частота контура определяется по уравнению:

$$f = 2\pi \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (7)$$

где:

$f$  — собственная частота контура в периодах в секундах,  
 $L$  — индуктивность контура,  
 $C$  — емкость контура.

Согласно теории, при частотах, больших 100 пер/сек., величина возможного перенапряжения определяется из формулы (5) путем введения коэффициента меньшего единицы, определить величину которого теоретически не представляется возможным.

Опытные данные заставляют заключить, что контур с собственной частотой больше 10 000 пер/сек. не дает повышения напряжения при установившейся вольтовой дуге.

Подсчитаем величину перенапряжения, могущего возникнуть при появлении устойчивой вольтовой дуги в контактной сети. Найдем параметры сети. Емкость контактного провода относительно земли:

$$C_1 = \frac{1}{9 \cdot 10^{11}} \cdot \frac{l}{2 \ln \frac{2h}{r}},$$

где:

$h$  — высота подвеса провода = 600 см,  
 $r$  — радиус провода = 0,56 см,  
 $l$  — длина = 1 км =  $10^5$  см.

$$C_1 = \frac{10^5}{9 \cdot 10^{11} \cdot 4,6 \lg \frac{1200}{0,56}} = 0,7 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/км.}$$

Емкость фидерных кабелей в среднем равна

$$C_2 \cong 0,2 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{км.}}$$

Индуктивность рельсовой нитки (тип 11-а).

$$L_1 \cong 0,2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Н}}{\text{км}}$$

Индуктивность контактного провода

$$L_2 \cong 0,14 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Н}}{\text{км.}}$$

Нормально принимаем подвешенным кроме цепной подвески фидер, поэтому получаем включенные параллельно следующие провода—контактный провод, несущий трос и фидер. Принимая условия подвески одинаковыми, получим

$$L_2 = \frac{0,14 \cdot 10^{-2}}{3} = 0,045 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Н}}{\text{км}};$$

$$C_1 = 3 \cdot 0,7 \cdot 10^{-8} = 2,1 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Ф}}{\text{км}}.$$

Индуктивность рельсовой цепи для двух ниток

$$L_1 = \frac{0,2 \cdot 10^{-2}}{2} = 0,1 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Н}}{\text{км}};$$

для четырех ниток

$$L_1 = \frac{0,2 \cdot 10^{-2}}{4} = 0,05 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Н}}{\text{км}}.$$

Берем двойной питающий фидер длиной 250 м:

$$C_2 = 0,5 \cdot 0,2 \cdot 10^{-4} = 0,1 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Ф}}{\text{км}}.$$

Найдем коэффициент  $K$  для однопутного участка

$$K = \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{C_1 + C_2}} = \sqrt{\frac{0,145 \cdot 10^{-2} \cdot l}{2,1 \cdot 10^{-8} l + 0,1 \cdot 10^{-4}}} = \sqrt{\frac{1,45 l}{2,1 \cdot l \cdot 10^{-8} + 1}}.$$

Подставляя различные значения  $l$ , получаем  $K$

|                |   |    |    |    |    |
|----------------|---|----|----|----|----|
| $l \text{ км}$ | 0 | 5  | 10 | 15 | 30 |
| $K$            | 0 | 27 | 97 | 45 | 61 |

Находим коэффициент  $K$  для двухпутного участка с параллельным соединением путей:

$$L_1 = 0,05 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Н}}{\text{км}};$$

$$L_2 = \frac{0,045 \cdot 10^{-2}}{2} = 0,0225 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Н}}{\text{км}};$$

$$C_1 = 2 \cdot 2,1 \cdot 10^{-8} = 4,2 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Ф}}{\text{км}};$$

$$C_2 = 2 \cdot 0,1 \cdot 10^{-4} = 0,2 \cdot 10^{-4} \text{ Ф};$$

$$K = \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{C_1 + C_2}} = \sqrt{\frac{0,0725 \cdot 10^{-2} \cdot l}{4 \cdot 2 l \cdot 10^{-8} + 0,2 \cdot 10^{-4}}} = 10 \sqrt{\frac{0,725 l}{4,2 \cdot 10^{-3} \cdot l + 2}}.$$

Подставляя различные значения  $l$ , получаем  $K$ .

|                |   |      |      |      |    |
|----------------|---|------|------|------|----|
| $l \text{ км}$ | 0 | 5    | 10   | 15   | 30 |
| $K$            | 0 | 13,5 | 19,8 | 23,5 | 32 |

Строим по полученным значениям  $K$  кривую (рис. 81).  
Находим собственные частоты контуров при тех же условиях

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_1 + L_2)(C_1 + C_2)}}$$

Для однопутного участка получаем

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{0,145 \cdot 10^{-2}l(2,1 \cdot 10^{-8}l + 0,1 \cdot 10^{-4})}} =$$

$$= \frac{1}{2\pi\sqrt{0,304l^2 \cdot 10^{-10} + 0,0145l \cdot 10^{-6}}}$$

Подставляя различные значения  $l$ , получаем /

|     |          |     |     |     |
|-----|----------|-----|-----|-----|
| $l$ | 0        | 5   | 10  | 10  |
| $f$ | $\infty$ | 590 | 414 | 231 |

Для двухпутного участка

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{0,0725 \cdot 10^{-2}l(4,2 \cdot 10^{-8}l + 0,2 \cdot 10^{-4})}} =$$

$$= \frac{1}{2\pi\sqrt{0,305 \cdot 10^{-10}l^2 + 0,0145 \cdot 10^{-6} \cdot l}}$$

т. е. двухпутные участки значения собственных колебаний такие же, как и для однопутного участка. Наносим значения  $f$  на график (рис. 81).

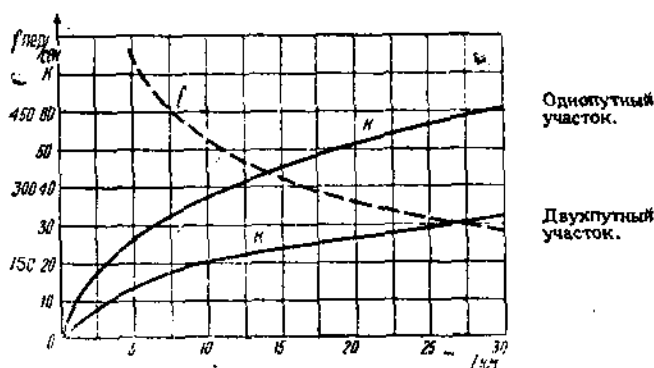


Рис. 81.

Указанные подсчеты показывают, что колебания в системе почти при всех условиях ниже 1000 периодов, что дает максимальное перенапряжение, определяемое формулой (5).

Считая, что сила тока установившейся вольтовой дуги не может превышать 300—500 А, ориентировочно подсчитаем возможные перенапряжения для наиболее неблагоприятного случая, без учета влияния высокой частоты контура.

$$E_n < 500 \cdot 60 = 30\,000 \text{ V.}$$

Очевидно, что при всех других случаях перенапряжения будут значительно меньше.

При уменьшении емкости питающих фидеров (укорочение фидеров, применение воздушных фидеров) собственные колебания контура значительно увеличиваются (до 1000—2000 пер/сек.), что исключает возможность возникновения значительного перенапряжения.

Резюмируя все вышеизложенное, принимаем максимальное перенапряжение, могущее возникнуть при установившейся вольтовой дуге в контактной сети порядка 30 kV.

Источником возникновения перенапряжений являются также включенные линии, концы которых разомкнуты. Такой процесс мы всегда будем иметь в практике электрических ж. д. при включении участка контактной сети.

Действительно представим себе одиночную, бегущую по однородной линии, волну. Эта волна выражает общее напряжение и токи. В тот момент, когда волна встречает разомкнутый конец линии, там возникает напряжение, зависящее от перепада тока. Легко может быть доказано, что напряжение в этом случае удваивается. Отраженная волна от разомкнутого конца линии, бегущая обратно по линии, имеет двойное напряжение; благодаря этому вся линия оказывается под двойным рабочим напряжением.

Волны с пологим фронтом демпфируются при движении вдоль провода и благодаря этому дают меньшее перенапряжение и практического значения не имеют.

#### **5. НАРУШЕНИЕ НОРМАЛЬНОЙ РАБОТЫ ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ**

Возникновение перенапряжений может быть вызвано нарушением нормальной работы выпрямительных агрегатов.

Сложность процессов в агрегатах при различных явлениях нестационарного режима не дает возможности заняться теоретическим анализом величин перенапряжений.

Рассмотрим перенапряжение в системе ртутно-выпрямительного агрегата. При обратном зажигании возможно попадание переменного тока в цепь постоянного тока; кроме того обратное зажигание может вызвать дуговое перенапряжение.

В некоторых случаях при отключении короткого замыкания напряжение между нулем трансформатора и катодом выпрямителя возрастает не сразу, особенно при ухудшившемся вакууме. Благодаря этому между нулем трансформатора и катодом ртутного выпрямителя могут возникнуть перенапряжения, превышающие напряжение эксплуатации в 10—20 раз, что даст напряжение порядка 50—60 kV для ртутного выпрямителя с рабочим напряжением 3 000 V. Эти перенапряжения легко могут вызвать обратное зажигание и благодаря этому могут попасть в цепь постоянного тока.

Возникают перенапряжения также при работе выпрямителя в холодном помещении или при внезапном охлаждении (Гюнтер-Шюльце), характеризующиеся очень крутым фронтом.

Величина этих перенапряжений достигает 10—15-кратной величины рабочего напряжения.

При одноякорных преобразователях возможно только попадание переменного тока в цепь постоянного при круговом огне по коллектору, напряжение которого не намного разнится от напряжения постоянного тока.

При мотор-генераторных преобразователях попадание переменного тока на сторону постоянного тока совершенно исключается, остаются только перенапряжения, возникающие при образовании кругового огня по коллектору генератора, который может быть рассматриваем как генерирующая дуга.

Необходимо указать, что вся эта группа перенапряжений, источником которых является агрегат, установленный на подстанции, не должна выйти за пределы подстанции и не должна попасть на контактную сеть. Эти перенапряжения должны быть локализованы мерами защиты, которые установлены на самой подстанции и будут рассмотрены особо.

В действительности благодаря неправильной установке защитных приспособлений эти перенапряжения приводят к пробитию выводных кабелей или перекрытию изоляторов самого выпрямительного агрегата.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В предыдущих параграфах нами были разобраны возможные случаи возникновения перенапряжений.

При анализе работ разрядника и анализе изоляционных характеристик контактной сети нам необходимо определить опасность тех или других видов перенапряжений.

Для облегчения этой задачи сводим полученные теоретические результаты и данные наблюдения над перенапряжениями с помощью клейдонографов и катодных осциллографов в таблицу:

Таблица 3

|   | Причины перенапряжения                                           | Наибольшее напряжение волны      | Крутизна фронтов волны                                       |
|---|------------------------------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 1 | Явления, связанные с изменениями поля земной атмосферы . . . . . | $\approx 100 \text{ kV}$         | макс. $\approx 100 \frac{\text{kV}}{\mu \text{ сек.}}$       |
| 2 | Непосредственные удары молнии в установку . . . . .              | $\approx 1000 - 5000 \text{ kV}$ | сред. $\approx 150 - 200 \frac{\text{kV}}{\mu \text{ сек.}}$ |
| 3 | Влияние соседних цепей высокого напряжения . . . . .             | макс. 10 kV                      | тар. $1500 \frac{\text{kV}}{\mu \text{ сек.}}$<br>небольшая  |
| 4 | Перемена режима сети . . . . .                                   | макс. 30 kV                      | небольшая                                                    |
| 5 | Нарушение нормальной работы выпрямительных агрегатов . .         | макс. $20 E_n$                   | небольшая                                                    |

Примечание  $E_n$  — рабочее напряжение в контактной сети.

Данные, приведенные в таблице, есть исходный материал, на основании которого мы будем производить анализ работы изоляции и защитных приспособлений.

## II. РАЗРЯДНИКИ В КОНТАКТНОЙ СЕТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Проблема защиты контактной сети от перенапряжений до сих пор почти не изучена и очень мало освещается в иностранной и нашей литературе.

Различные страны, различные фирмы—каждая по-своему—решают вопрос защиты от перенапряжений, не давая в то же время достаточных теоретических обоснований выбору данной системы защиты.

Как правило, нужно указать, что американская практика совершенно отказывается от применения разрядников в контактной сети, обращая главным образом внимание на повышение изоляционной крепости сооружения. Например, на железных дорогах „Лаккована“ в США усилена изоляция анкерных изоляторов по сравнению с фиксаторными и подвесными для гарантии от их повреждения.

Европа, и главным образом Германия, до последнего времени практиковала установку в контактной сети грозовых разрядников.

Примером таковых могут служить участки Москва—Щелково—Пушкино, оборудованные контактной системой фирмы BBC, причем установлены разрядники на каждом анкерном участке, т. е. приблизительно каждые 1,5 км.

Гамбургский Stadtbahn оборудован разрядниками, установленными на каждом воздушном промежутке, через каждые 5—7 км.

На дорогах Германии, электрифицированных в последние годы, разрядники не применяются.

Однако главное внимание защиты от перенапряжений как в Европе, так и в Америке обращают на защиту подстанций и подвижного состава. На этих элементах электрических ж. д. мы встречаем наиболее совершенные приборы и аппараты защиты от перенапряжений. Вопросы защиты детально проработаны теоретически, в то время как защита контактной сети как бы совершенно исчезает из поля зрения.

Контактная сеть нуждается в наиболее совершенной защите, так как не имеет резерва и в случае какого-либо повреждения выбывает из строя, в то время как на подвижном составе и на подстанциях мы всегда имеем возможность включения резервных устройств или перехода на работу частью оборудования.

Поэтому игнорирование вопроса защиты контактной сети как наиболее ответственного элемента является недопустимым, и необходима серьезная постановка вопроса о наиболее совершенной форме защиты.

### 1. ОБЩАЯ ТЕОРИЯ РАБОТЫ РАЗРЯДНИКА

Задачей разрядника, установленного на линии, является защита изоляции участка, на котором находится разрядник, точнее—той части участка, которая находится позади разрядника, если считать по направлению продвижения волны.

При наличии участка линии с установленными на некотором расстоянии двумя разрядниками и определенной величины возрастания напряжения волны—решение проблемы состоит в определении защитной зоны.

Величину этой зоны определяют три фактора: скорость возрастания напряжения фронта волны, напряжение импульсного перекрытия изоляции линии и напряжение, до которого разрядник ограничивает напряжение волны.

Рассмотрим теорию работы разрядника, изложенную Э. Бекком и которую в настоящее время можем считать классической (статья Э. Бекка в El. W., октябрь и ноябрь 1930 г.).

$e_a$  — напряжение, при котором происходит „пробой“ разрядника,

$e_p$  — напряжение в точке  $P$ ,

$e_i$  — импульсное напряжение,

$d$  — расстояние от разрядника до точки  $P$ ,

$N$  — крутизна фронта в  $\frac{kV}{\mu \text{сек}}$ .

Как указано на рис. 82, случайная волна с напряжением  $e_i$  ограничена разрядником до значения  $e_a$ . Благодаря этому возникает волна противоположного знака, имеющая значение  $e_i - e_a$ . Мгновенное результирующее напряжение показано на чертеже сплошной линией.

В точке  $P$ , находящейся на расстоянии  $d$  от разрядника (9), напряжение определяется по формуле:

$$e_p = e_a + 2N\tau, \quad (9)$$

где  $\tau$  есть время прохождения волны от точки  $P$  до места установки разрядника.

Принимаем скорость распространения волны в одну микросекунду на 300 м, или 0,3 км. Переходя от

времени распространения волны к пройденному пути, переписываем формулу (9) следующим образом:

$$e_p = e_a + \frac{2 \cdot N \cdot d}{0,3} = e_a + 6,7 N \cdot d, \quad (10)$$

где  $d$  расстояние между точкой  $P$  и разрядником в километрах.

Рассмотрим процесс прохождения блуждающих волн при грозовом разряде, происшедшем между установленными на линии разрядниками.

На рис. 83 и 84 представлены разряды в середину участка и около одного из разрядников для клинообразных волн.

Из рассмотрения этих чертежей следует, что наибольшее напряжение в линии получается при разряде в середину участка, находящегося между разрядниками.

В этом случае расстояние между разрядниками может быть определено по формуле Бекка (10) как двойное расстояние от разрядника до точки с наибольшим повышением напряжения.

$$d = 2 \frac{e_p - e_a}{6,7N} = \frac{e_p - e_a}{3,3N} \quad (11)$$

Клинообразную форму в первом приближении имеют волны как прямых, так и индуктивных ударов молнии в контактную сеть,

Волны других перенапряжений не отличаются сильно по форме от клинообразных волн и могут быть заменены ими.

Форма волн перенапряжений, появляющихся при освобождении связанных зарядов, и анализ их образования приведены в книге инж. Стекольниковой „Перенапряжение и борьба с ним“.

Путем анализа рис. 83 и 84 мы видим, что наибольшее напряжение появляется в середине участка между разрядниками при разряде в эту же точку.

Все другие точки линии независимо от места разряда получают меньшее напряжение.

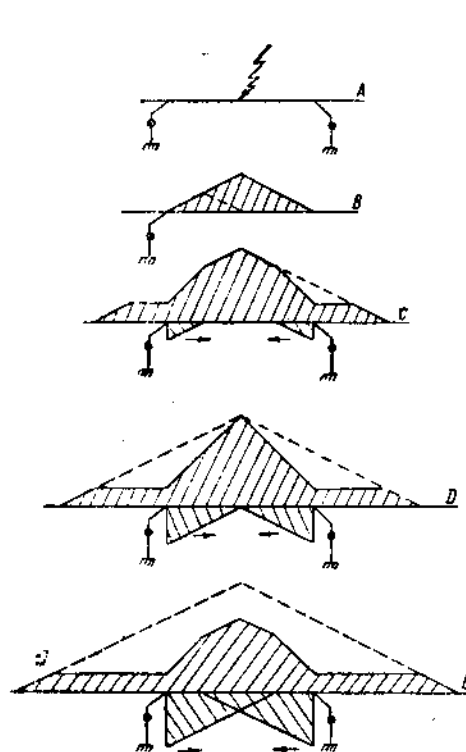


Рис. 83.

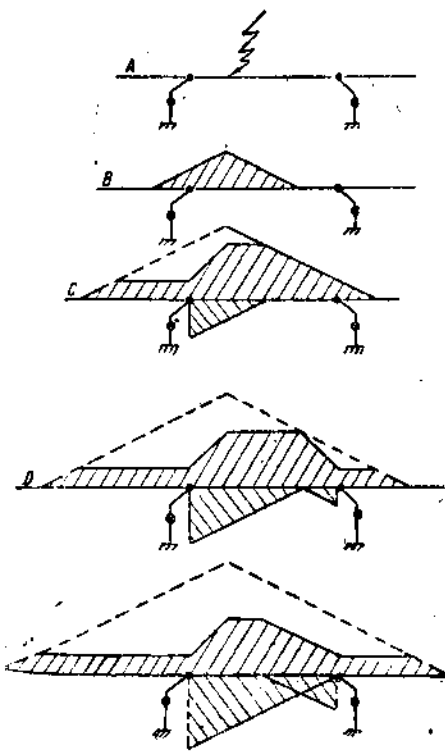


Рис. 84.

Так как этот вопрос будет играть для нас чрезвычайно большое значение при координации изоляции на протяжении участка между разрядниками, то строим кривую максимального возможного напряжения в любой точке между разрядниками при наиболее неблагоприятном случае разряда в линию (рис. 85).

Напряжение в любой точке (например, А) может быть подсчитано по следующей формуле:

$$e_x = \frac{(e_p - e_a) \cdot 2x}{d} + e_a, \quad (12)$$

где  $e_x$  — напряжение в заданной точке,

$x$  — расстояние от точки А до ближайшего разрядника, остальные обозначения — те же, что и для формул (9) и (10).

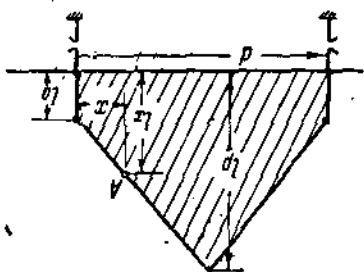
Если принять, что цепь разрядника обладает значительным сопротивлением, то значение напряжения повышается на величину  $IR$ , где  $I$  — ток через разрядник,  $R$  — сопротивление цепи разрядника. Для этого случая получаем (Э. Бекк)

$$e_p = \left[ e_a + (e_i - e_a) \frac{2R}{Z + 2R} \right] + \left( 1 + \frac{Z}{Z + 2R} \right) N\tau,$$

где все обозначения приведены выше, а  $Z$  — волновое сопротивление линии (приблизительно 500 Ом); отсюда

$$\tau = \frac{e_p - \left[ e_a + (e_i - e_a) \frac{2R}{Z + 2R} \right]}{\left( 1 + \frac{Z}{Z + 2R} \right) N};$$

переходя от времени к расстоянию между разрядниками в километрах, получаем:



$$d = \frac{e_p - \left[ e_a + (e_i - e_a) \frac{2R}{Z + 2R} \right]}{3,3N \left( 1 + \frac{Z}{Z + 2R} \right)}. \quad (13)$$

Рис. 85.

Таким образом заключаем, что для определения расстояния между разрядниками нам необходимо знать основные параметры изоляции, волны перенапряжения и разрядника.

Необходимо также проанализировать вопрос о включении сопротивления в цепь разрядника с искровым промежутком. Как указано было выше, это сопротивление уменьшает расстояние между разрядниками.

Применение разрядников без сопротивления дает при разряде полное короткое замыкание, что создает способность нового перенапряжения при разрыве этого короткого замыкания. Для предупреждения этого необходимо последовательно с искровым промежутком включить некоторое сопротивление, удовлетворяющее условиям отсутствия колебательного разряда в цепи.

Такое условие выражается формулой:

$$R \geq 2 \sqrt{\frac{L}{C}},$$

где  $L$  и  $C$  индуктивность и емкость сети.

При этом условии аperiodического разряда через роговой разрядник, последний может отвести в землю только одну треть возникшего перенапряжения, причем эта цифра является для него предельной (этот вопрос детально разработан Г. Л. Элштейном).

Это свойство является недостатком рогового разрядника при включении сопротивления, удовлетворяющего условию аperiodического разряда; правда, этого можно избежать путем параллельного включения нескольких разрядников.

Другими исследователями отрицается необходимость получения аperiodического разряда, а включение сопротивления они рассматривают, как средство демпфирования колебательных процессов.

По их мнению величина сопротивления должна удовлетворять условию:

$$R = \sqrt{\frac{L}{C}} = W.$$

При этом роговой разрядник не может явиться опасным местом возникновения перенапряжений. Однако отсутствие аperiodического разряда при условии  $R = W$  является несколько произвольным и не имеет соответствующего теоретического обоснования.

Рассмотрим вначале установку разрядников, не ограниченных сопротивлением (включенных непосредственно на землю). Для решения этого вопроса перейдем к нахождению параметров волны перенапряжения и изоляции линии.

Для анализа вопроса расстановки разрядников вдоль линии примем, что характеристика разрядников и изоляторов является идеальной, т. е. оба эти элемента не имеют запаздывания разряда по времени, и разряд начинается в тот момент, когда напряжение, приложенное к ним, достигает определенной величины.

В этом случае процессы в разрядниках будут вполне соответствовать теории Э. Бекка и будут следовать по законам, изложенным выше.

В дальнейшем, зная приблизительно расстояния между разрядниками, необходимо будет проанализировать влияние времени запаздывания.

## 2. ИМПУЛЬСНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИЗОЛЯТОРОВ

В практике электрифицированных железных дорог нашего Союза мы имеем следующие три типа изоляторов, применяемых в контактной сети:

1. Трехреберный натяжной или подвесной изолятор.
2. Тарелочный натяжной или подвесной изолятор.
3. Штыревой изолятор. См. рис. 86, 87 и 88.

Основные характеристики этих изоляторов приведены в таблице 4.

Таблица 4

| Тип изолятора | Сухоразрядное напряжение в кВ | Мокроразрядное напряжение в кВ | Разрядное напряжение под тающим снегом в кВ |
|---------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------------|
| Трехреберный  | 56                            | 20                             | 10                                          |
| Тарелочный    | 50                            | 33                             | не производилось                            |
| Штыревой      | 57                            | 20                             | не производилось                            |

Исследование изоляторов производили ОБНА ВЭИ.

Импульсные характеристики изоляторов не снимались. Имея основные электрические характеристики, возможно построить импульсную характеристику изолятора.

Рассмотрим импульсную характеристику различных высоковольтных изоляторов (рис. 89).

Кривые для различных изоляторов мало отличаются друг от друга. Это дает возможность построить, пользуясь средними величинами коэффициентов, импульсную характеристику изоляторов, применяемых в контактной сети.

Следующая кривая (рис. 90) дает построенную таким методом импульсную характеристику тяговых изоляторов.



Рис. 86.



Рис. 87.



Рис. 88.

Эта характеристика не является точной, последняя может быть построена только опытным путем; однако для подсчетов, не требующих большой точности, она является приемлемой. Можно грубо считать, что точность этой кривой лежит в пределах 10—15%.

Импульсное разрядное напряжение не зависит от состояния поверхности изолятора (лаборатория Вестингауза) при очень коротких

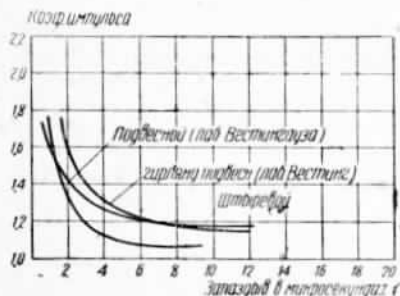


Рис. 89. Импульсная характеристика изоляторов.

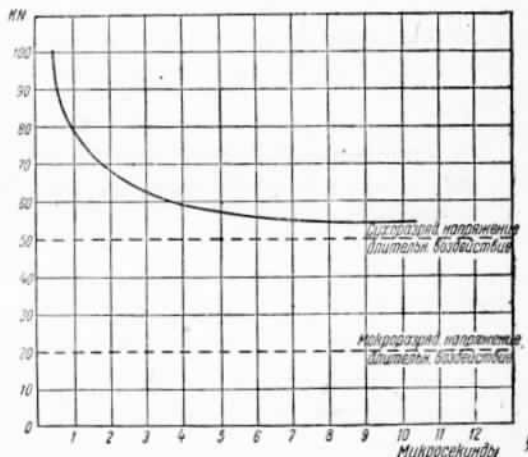


Рис. 90. Кривая разрядных напряжений импульса для тяговых изоляторов (приблизительная).

импульсах (не превышающих 20—25  $\mu$ сек); при более длительных импульсах необходимо разграничивать сухоразрядное и мокроразрядное напряжение.

Необходимо указать, что для развития процесса перекрытия необходима затрата некоторого количества энергии, которая может

развиться при приложенном к изолятору напряжении в течение некоторого времени. Поэтому существует определенный минимум времени, раньше которого изолятор не может быть перекрыт ни при каком напряжении. Этот предел опытным путем определить весьма затруднительно, но по мнениям некоторых исследователей он лежит в пределах десятых долей микросекунды (Эпштейн).

Для случая кривой, построенной нами, этот предел порядка  $0,4-0,45 \mu \text{сек.}$

Рассмотрим работу разрядника под действием напряжения. В практике электрических ж. д. могут быть применены роговые разрядники или разрядники оцелитовые, относящиеся к типу „селективных“.

Роговые разрядники, употребляемые в контактной сети, имеют рога, выгнутые из контактного провода сечением  $80-100 \text{ мм}^2$  ( $D=10,6$  и  $1,8 \text{ мм.}$ ).

Величина напряжения, необходимого для пробоя искрового промежутка, является трудно определяемой, так как зависит от многих факторов (форма рогов, температурные условия, влажность и т. п.).

Для простейшего вида роговых разрядников могут быть применены с достаточной точностью следующие кривые (рис. 91).

Время, потребное для ионизации воздушного промежутка, определить очень трудно вследствие целого ряда факторов, влияющих на эту величину.

Некоторые исследователи (Эпштейн) считают эту величину равную в среднем  $5-10 \mu \text{сек.}$  для напряжений, определяемых по кривой (рис. 91).

Со своей стороны проф. Пик (Реек) утверждает, что коэффициент импульса шаровых разрядников с практически равномерным полем (расстояние между электродами меньше диаметра) очень близок к единице. В этом случае даже небольшое превышение напряжения импульса чрезвычайно ускоряет разряд, сокращая время запаздывания до долей микросекунды.

Согласно опытному материалу лаборатории Вестингауза (Фортескую и Торок), при равномерном поле коэффициент импульса невелик, не превосходя  $1,25$ . Дальнейшее уменьшение времени не дает увеличения коэффициента импульса. Переход к неравномерным полям дает резкое увеличение коэффициента (до  $2$  и выше).

По данным опытов Golladay запаздывания при приблизительно двойном напряжении пробоя в среднем  $3,3 \mu \text{сек}$  (искровой промежуток порядка  $12 \text{ мм.}$ ).

Стремление создать равномерное поле и тем самым уменьшить коэффициент импульса привело к созданию специальных типов раз-

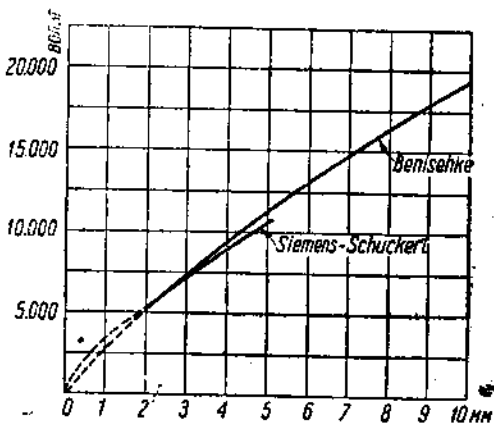


Рис. 91. Пробивное напряжен. искрового промежутка рогового разрядника простейшей формы.

рядников, имеющих искровые промежутки шарообразной формы (Alcuiff и Bendmana).

Обыкновенного вида роговые разрядники, какие применяются на контактной сети электрических ж. д., не удовлетворяют условию равномерности поля в искровом промежутке и очевидно обладают значительным коэффициентом импульса.

Точное определение времени запаздывания и коэффициентов импульса может быть произведено только путем лабораторных опытов с помощью совершенных измерительных приборов (катодный осциллограф).

Очевидно, что для роговых разрядников среднее время запаздывания можно принять равным 3—5  $\mu$ сек для напряжений, превышающих на некоторую величину пробивное напряжение длительного воздействия. Наименьшее время, необходимое для ионизации промежутка и перекрытия, принимаем равным порядка 0,15—1,20  $\mu$ сек.

По данным практики для роговых разрядников употребляют следующие искровые промежутки:

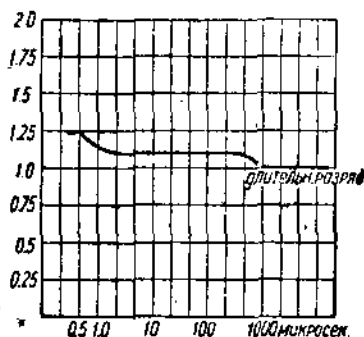


Рис. 92. Кривая разрядных напряжений импульса разрядника „Thyrite“.

| рабочее<br>напряжение<br>в кВ | искровой<br>промежуток<br>в мм |
|-------------------------------|--------------------------------|
| 6,6                           | 6—8                            |
| 11                            | 10—12                          |
| 22                            | 22—33                          |

(СЭТ, отд. 19, § 41).

Уменьшать искровой промежуток для более низких напряжений не рекомендуется, так как очень малый промежуток может быть перекрыт находящимися в воздухе пылью, насекомыми и т. п. На основании этого соображения многие специалисты не рекомендуют ставить роговые разрядники в сетях с напряжением ниже 3300 В. В тех случаях, когда установка роговых разрядников осуществлена, искровой промежуток всюду взят не меньше 6—8 мм.

Напряжение, которое появляется при перекрытии на зажимах рогового разрядника, очень мало и практически может быть принято равным нулю.

Действительно до начала разряда сопротивление искрового промежутка практически равно бесконечности. По мере ионизации воздушного промежутка сопротивление падает и при полном разряде достигает величины порядка единиц или десятков ом.

Для разрядников, имеющих включенными дополнительные сопротивления, напряжение ограничения волны повышается. Верхним пределом этого напряжения является пробивное напряжение разрядника.

Однако, как мы увидим в дальнейшем, абсолютная величина напряжения ограничения волны играет очень малую роль при определении мест установки разрядников.

Другим типом разрядников, могущих быть примененными в контактной сети электрических ж. д., являются оцеллитовые разрядники, изготовляемые ВЭО.

Оцеллитовые (аналогично применяемым в США тайритовым — „Thyrite“) имеют характеристику разрядных напряжений более совершенную, чем разобранные выше роговые разрядники (рис. 92).

Из характеристики мы заключаем, что коэффициент импульса очень мал даже при времени воздействия порядка 1—3  $\mu$ сек, повышаясь лишь при времени воздействия 0,5  $\mu$ сек.

Оцеллитовые разрядники пробиваются при напряжении, равном приблизительно двукратному номинальному (каталог АВН № 7), и разряд продолжается до падения напряжения на зажимах разрядника, равного номинальному рабочему напряжению.

Для внутренних установок ВЭО изготавливает разрядники на напряжение 3 kV и выше, для наружных установок — на напряжение 6 kV и выше. Очевидно, что в случае необходимости может быть поставлен перед промышленностью вопрос об изготовлении разрядников на напряжение 1,5 и 3,0 kV для наружных установок.

Этот вопрос будет нами разбираться ниже при определении типа разрядника.

### 3. РАБОТА РАЗРЯДНИКА С УЧЕТОМ ЯВЛЕНИЯ ЗАПАЗДЫВАНИЯ РАЗРЯДА

Рассмотрим прохождение волны перенапряжения по линии с учетом явления запаздывания разряда.

Пусть от точки А (рис. 93) двигается волна с фронтом волны  $N \frac{kV}{\mu \text{сек}}$ . Через  $\tau$  микросекунд волна достигает точки В (положение I), где установлен разрядник. Так как для явления разряда необходима затрата определенного времени, то до начала разряда волна переместится из I положения во II и пройдет время  $\tau_1$ .

В этот момент начнется образование волны обратного напряжения, идущего обратно к месту разряда.

Процесс нарастания напряжения в точке разряда будет продолжаться до тех пор, пока отраженная волна дойдет до места разряда, что произойдет через  $\tau$  микросекунд после начала действия разрядника. Полное время нарастания напряжения в месте разряда

$$T = \tau + \tau_1 + \tau = 2\tau + \tau_1. \quad (14)$$

Зная импульсную характеристику изолятора, можно определить время нахождения изолятора под высоким напряжением без его перекрытия для различной крутизны фронта волны.

Для решения задачи нам необходимо найти время, в течение которого к изолятору может быть приложено все время нарастающее напряжение с определенной величиной крутизны фронта.

Методика определения этого времени графически определена на рис. 94.

Пусть мимо изолятора проходит волна перенапряжения с крутизной фронта  $N \frac{kV}{\mu \text{сек}}$ . Напряжение возрастает от нуля до некоторой определенной величины, при которой произойдет перекрытие.

Линия АВ изображает волну с крутизной фронта  $N$ , эта линия

пересекает характеристику в точке *I*, соответствующей времени в 0,85  $\mu$  сек и напряжению 85 kV.

Казалось бы, что в это время должно произойти перекрытие изолятора. Однако это является неверным. В точке *I* изолятор был бы перекрыт, если бы напряжение 85 kV было бы все время 0,85  $\mu$  сек приложено к изолятору. В действительности напряжение возрастало от нуля до 85 kV. Площадь *AKIL* характеризует собой энергию, затраченную на приведение изолятора в состояние перекрытия. Прямая *AB*, характеризующая изменение напряжения, ограничивает площадь *AiL*, равную половине *AKIL*.

Отсюда мы можем заключить, что в точке *I* нарастающая волна напряжения не произведет пробоя, дав только половину энергии, необходимой для ионизации поверхностных слоев.

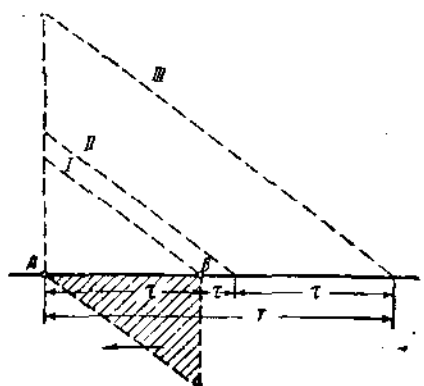


Рис. 93.

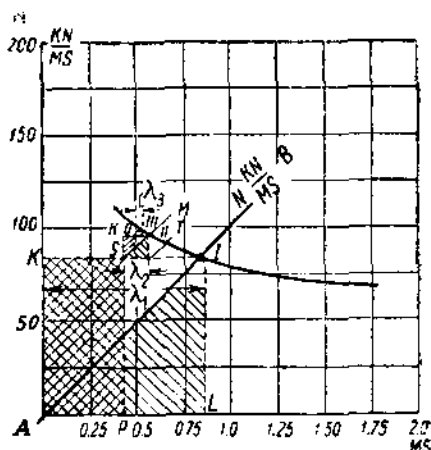


Рис. 94.

Напряжение будет повышаться, причем это повышение напряжения можно графически представить прямой *SM*, параллельной *AB*, но выходящей из точки *S* (из угла прямоугольника *AKSP*, выражающего энергию, затраченную уже на ионизацию).

Рассуждая таким же образом относительно прямой *SM*, получим еще некоторое количество энергии, но опять же в точке *II* перекрытия достигнуто не будет.

Построив несколько прямоугольников „энергии“, можно с любой точностью определить время запаздывания *T*.

Практически это может быть достигнуто построением трех прямоугольников, так как дальнейшее уточнение не оказывает влияния на результат и лежит уже в пределах ошибки чертежа.

После построения время запаздывания *T* определяется из формулы

$$T = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3. \quad (15)$$

Например, для случая, представленного на чертеже,

$$T = 0,85 + 0,125 + 0,025 = 1,0 \mu \text{ сек.}$$

Пользуясь указанным методом, определяем время запаздывания для различного значения крутизны фронта волны (рис. 95).

Построение произведено для значения *N* = 200, 150, 100, 50 и

$$\frac{25 \text{ kV}}{\mu \text{ сек.}}$$

На основании полученных величин строим кривую  $T$ , как функцию крутизны фронта волны (рис. 96).

В формуле (74)  $\tau$  есть время нахождения волной расстояния от места разряда до разрядника.

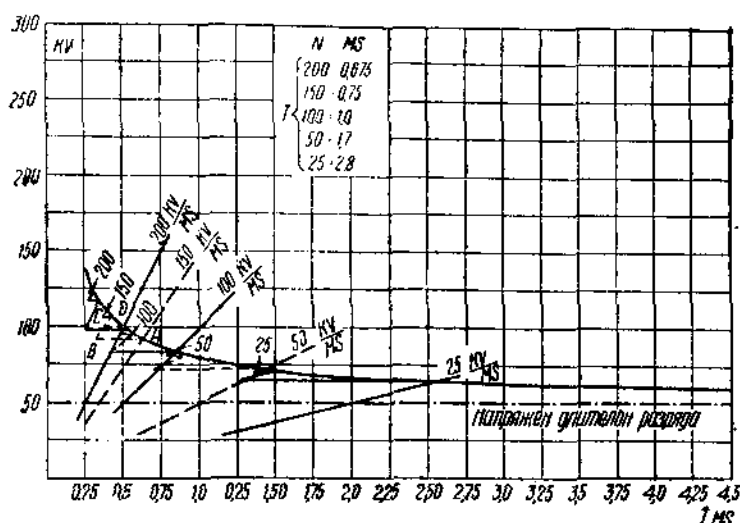


Рис. 95.

Принимая значение  $\tau_1 = 0,15 \mu \text{ сек}$  (для рогового разрядника с приблизительно равномерным полем или оцелитового), получаем

$$\tau = \frac{T - 0,15}{2}$$

Переводя время распространения в расстояние, получим

$$d = 0,3 \frac{T - 0,15}{2} = 0,15(T - 0,15).$$

Расстояние между разрядниками есть двойное расстояние от разряда до разрядника (фиг. 82)

$$l = 2d = 300(T - 0,15) \text{ м. (76)}$$

Имея кривую значений  $T$ , мы можем построить значения кривой  $[300(T - 0,15)]$ , что выражает собой расстояние между разрядниками в метрах.

Указанная кривая построена на рис. 96 пунктирной кривой, которая сразу дает максимальное расстояние между разрядниками, в зависимости от фронта волны, с учетом запаздывания разряда благодаря его импульсному характеру.

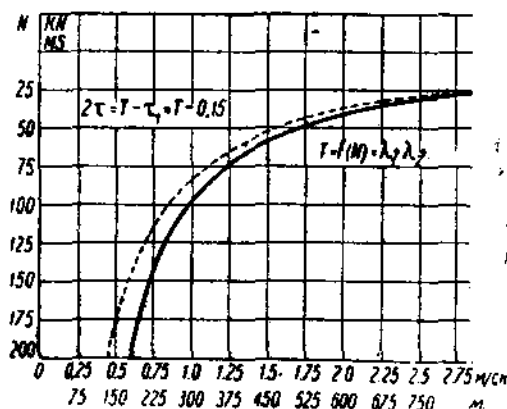


Рис. 96.

Форма кривой параболического характера дает очень небольшие расстояния для больших значений крутизны фронта волны с повышением их для меньшего фронта.

#### 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ ВОЛНЫ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ

В конце I главы была приведена таблица абсолютных величин для различных случаев перенапряжения и крутизны фронта волны.

Наибольшими значениями величин обладают волны от прямых ударов в контактную сеть, где крутизна фронта достигает величины  $1500 \frac{\text{kV}}{\mu \text{ сек}}$ , а среднее значение лежит в пределах  $100-200 \frac{\text{kV}}{\mu \text{ сек}}$ .

Ясно, что ориентироваться на защиту от прямых ударов молнии в провод совершенно не приходится, так как показал опыт: мощные грозовые удары в установку приводят ее к разрушению, раньше чем поддействует защитное приспособление.

Это заключение подтверждается работами проф. Маттиаса и др.

Поэтому ведем расчет на среднюю величину грозовых перенапряжений как статических, так и динамических, крутизна фронта которых лежит в пределах  $100-200 \frac{\text{kV}}{\mu \text{ сек}}$ . Принимаем для расчета

среднюю величину  $150 \frac{\text{kV}}{\mu \text{ сек}}$ . Такую крутизну фронта имела одна из наиболее характерных волн грозовых перенапряжений, заснятых катодным осциллографом (так называемая „Пенсильванская“ волна).

Необходимо указать, что при проектировании защиты линии передачи также не ориентируются при расстановке разрядников на защиту от непосредственных мощных ударов в установку.

Разрядники отводят перенапряжения, явившиеся следствием побочных разрядов (попадание в линию одной из ветвей молнии).

Мерами защиты от мощных прямых грозовых ударов являются не разрядники, а некоторые вспомогательные устройства, например громоотводы и главным образом заземляющие защитные тросы (земляные тросы), которые будут разобраны нами в специальной главе.

Для контактной сети электрических ж. д. с небольшим рабочим напряжением опасными оказываются не только перенапряжения грозового характера, как это имеет место в высоковольтных линиях передач, но и перенапряжения местного характера, вызванные явлениями нестационарного режима как в самой сети, так и на подстанциях или подвижном составе.

Однако все эти перенапряжения являются менее опасными по сравнению с грозовыми, так как обладают значительно меньшей величиной и пологим фронтом волны.

Для линий электрических ж. д., на которых контактная сеть смонтирована на деревянных опорах, в зависимости от их конструкции и расстояния до заземленных частей, необходимо принимать во внимание дополнительную изоляцию дерева.

Согласно опытам Пика электрическая прочность дерева для различных степеней влажности лежит в пределах от 330 до 990 kV разрядного напряжения на метр длины.

По его мнению средней расчетной величиной при практических расчетах является напряжение 590 kV на метр.

Влажное дерево хотя и не дает возможности образоваться полному разряду, но позволяет образоваться небольшим скользящим искрам по поверхности дерева при напряжениях, близких к импульсному напряжению изоляторов.

Эти неполные разряды могут привести к неполному перекрытию „изолирующего участка“ дугой рабочего напряжения.

Для условий контактной сети это является менее опасным, так как рабочее напряжение невелико, а длина изолирующих деревянных участков может быть значительна, особенно при применении деревянных траверс.

Проф. Пик считает все же опасным использование деревянных опор, как усиления изоляции линий, в виду возможности расщепления и загорания мачт, рекомендуя на линиях ответственного значения усилить изоляцию за счет увеличения числа изоляторов.

На электрических ж. д. усиление фарфора не может иметь места, поэтому использование изоляции дерева должно быть возможно более полным.

### 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТ УСТАНОВКИ РАЗРЯДНИКОВ

Определим расстояние между разрядниками при подвеске контактной сети на металлических опорах.

Подсчет ведем по формуле Э. Бекка.

(11)

$$d = \frac{e_p - e_n}{3,3N}$$

Согласно приведенному выше принимаем:

$e_p \cong 12 \text{ kV}$  для рогового и  $6 \text{ kV}$  — для оцеллитового,

$$N = 150 \frac{\text{kV}}{\mu \text{ сек}}$$

Напряжение  $e_p$  принимаем равным сухоразрядному напряжению изолятора, т. е. равным  $50 \text{ kV}$ .

$$1. \text{ Роговой разрядник } d = \frac{50 - 12}{3,3 \cdot 150} \cong 0,076 \text{ км.}$$

$$2. \text{ Оцеллитовый разрядник } d = \frac{50 - 6}{3,3 \cdot 150} \cong 0,088 \text{ км.}$$

Т. е. для этого случая разрядники необходимо практически устанавливать на каждой опоре.

Если учесть запаздывание разряда на изоляторах, то согласно кривой (рис. 96) расстояние между разрядниками должно быть меньше  $180 \mu \text{ сек}$  для волны с крутизной фронта  $150 \frac{\text{kV}}{\mu \text{ сек}}$ .

Эти цифры показывают, что для возможности защиты линии контактной сети от перенапряжения нам необходимо устанавливать по разряднику на каждые два пролета.

Если разрядники установить каждые  $500 \text{ м}$  (три на анкерный участок), то они защитят от перенапряжения с крутизной фронта не больше  $50 \frac{\text{kV}}{\mu \text{ сек}}$ .

Рассмотрим подвеску линии на деревянных опорах с использованием дерева, как дополнительной изоляции между проводом и землей. Очевидно, что может быть использован промежуток дерева от крепления консоли, на которой укреплен изолятор до заземленной части опоры или той части арматуры, которая присоединена к рельсу.

На промежуточных опорах заземленной деталью, находящейся на мачте, является оттяжка (рис. 97).

Наибольшее расстояние между пятой консоли и оттяжкой или между консолью фидера и оттяжкой может быть порядка 0,4 м (без изменения системы крепления оттяжки).

Принимая среднее разрядное напряжение для дерева  $590 \frac{\text{kV}}{\mu}$  получим

$$590 \cdot 0,4 = 236 \text{ kV.}$$

Расстояние между разрядниками по формуле Бекка:

$$\text{при роговых разрядниках } d = \frac{236 + 50 - 12}{3,3 \cdot 150} = 0,552 \text{ км;}$$

$$\text{при оцеллитовых } d = \frac{236 + 50 - 6}{3,3 \cdot 150} = 0,565 \text{ км.}$$

В случае применения деревянных консолей (журнал „Электрификация транспорта“, № 4, 1932 г.) изолирующая способность опоры в целом еще повышается.

Если довести расстояние (по поверхности дерева) между металлической частью, на которой укрепляем изолятор, и заземленными частями до  $0,6 + 0,75$  м, то расстояние между разрядниками может быть допущено

$$d = \frac{590 \cdot 0,6 + 50 - 12}{3,3 \cdot 150} = 0,780 \text{ км.}$$

Для определения расстояния между разрядниками в зависимости от активной длины изоляции дерева строим кривую

$$d = \frac{590 \cdot l + 50 - 12}{3,3 \cdot 150},$$

где  $l$  — активная длина изоляции дерева.

Необходимо поставить вопрос о разработке конструкции опоры с увеличенным „изолирующим промежутком“.

При существующем типе деревянной опоры оказывается возможность ограничиться установкой разрядников через каждые 500 м при расчетной величине фронта волны  $150 \frac{\text{kV}}{\mu/\text{сек}}$  и 750 м для  $100 \frac{\text{kV}}{\mu/\text{сек}}$  (при соблюдении на всех опорах наименьшей активной длины дерева 0,40 м).

При изменении типа опоры с целью увеличения активной изолирующей длины дерева — расстояние между разрядниками может быть увеличено.

Необходимо, чтобы все опоры контактной сети имели одинаковую электрическую прочность. Если одна из опор по каким бы то ни

было причинам не имеет полной длины изолирующего промежутка дерева; то на такой опоре необходима установка разрядника.

Опоры, находящиеся в непосредственной близости от разрядника, могут иметь более низкую изоляцию (формула 12).

Найдем расстояние, на котором не требуется дополнительной изоляции:

$$50 = \frac{(236 + 50 - 12)}{0,552} + 12;$$

отсюда:

$$x = \frac{0,552 \cdot 38}{2 \cdot 274} = 0,038 \text{ км};$$

т. е. даже соседняя опора должна иметь дополнительную изоляцию.

Все эти подсчеты велись из условия волны перенапряжения клинообразной формы с определенной крутизной фронта волны и без ограничения абсолютной величины перенапряжения.

Такую форму волны перенапряжения мы получаем практически только при прямом ударе молнии в установку; в других случаях, как уже было указано выше в I главе, перенапряжения ограничены амплитудой напряжения, не превышающей величины 100 кВ.

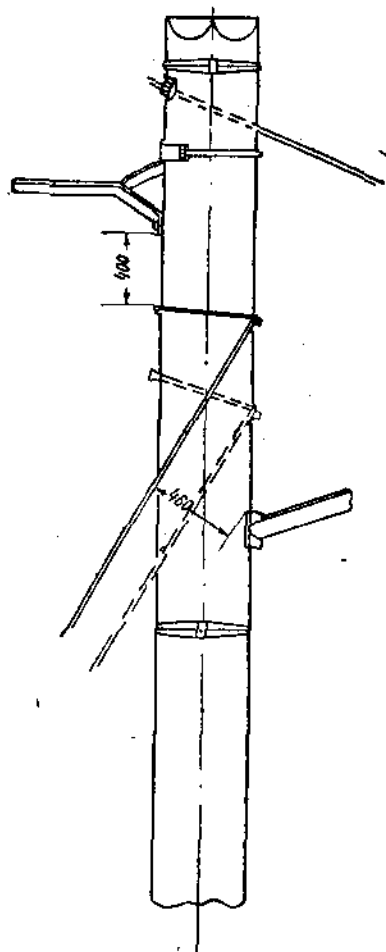
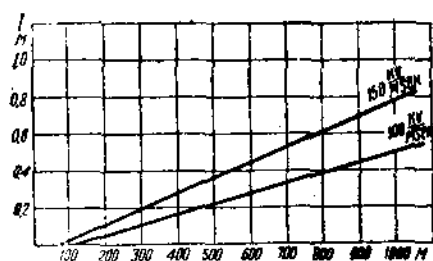


Рис. 97.



Расстояние между разрядниками.

Рис. 98.  $l$  — Активн. длина изоляции деревян. опоры.

Очевидно, что перенапряжение, ограниченное определенной амплитудой, может быть представлено в форме трапециoidalной волны, для которой принимаем крутизну фронта  $150 \frac{\text{kV}}{\mu \text{ сек}}$  и амплитуду перенапряжения 100 кВ.

Рассмотрим воздействие на изоляцию линии этой волны. Время воздействия на изолятор, установленный на металлической опоре, может быть найдено из кривой (рис. 95) (ABCD) — равное 0,775  $\mu \text{ сек}$ , что дает допустимое расстояние между разрядниками порядка 235 м.

Для изоляторов, установленных на деревянных опорах, удовлетворяющих поставленным выше условиям (изоляционный промежуток), перенапряжение не приведет к перекрытию, и волна, минуя изоляторы, пройдет к разряднику, который и отведет ее в землю.

## 6. ВЫБОР ТИПА РАЗРЯДНИКА

На основании всех приведенных выше характеристик нам необходимо установить тип и основные параметры разрядников для защиты контактной сети от перенапряжения.

Этих типов было намечено два: роговые разрядники и разрядники оцеллитовые.

Роговые разрядники должны создавать наиболее равномерное электрическое поле в искровом промежутке для достижения наименьшего времени запаздывания разряда. Это условие соблюдается для двух шаровых поверхностей при зазоре между ними меньшем диаметра шаровой поверхности. Необходимо переконструировать применяющийся в контактной сети разрядник таким образом, чтобы получить наименьшее время запаздывания.

Не имея точных экспериментальных данных относительно времени запаздывания на разряднике, принятом как стандарт на электрических ж. д (конструкция разработана НИИ Электрификации ж. д. черт. 137), необходимо заметить следующее (рис. 99).

Искровой промежуток определяется крайними точками двух рогов, выгнутых из контактного провода. Радиус выгиба равен  $\infty 14$  мм.

Для этого искрового промежутка мы не можем получить полной равномерности поля, однако, так как расстояние между электродами значительно меньше диаметра выгиба (условие равномерности поля для шаровых электродов), то говорить о значительной неравномерности поля также не приходится.

Для большей гарантии получения равномерного поля можно дать больший радиус выгиба, доведя его до 20—25 мм.

Искровой промежуток, принятый НИИ равным 12 мм, для рабочего напряжения 3000 В, является преувеличенным и тем самым нарушает гарантию работы разрядника. Исходя из кривых пробивного напряжения (рис. 92) и данных СЭТ, необходимо принять наименьший промежуток, допустимый для разрядников, а именно:

для рабочего напряжения 1500 В—5—6 мм,

для рабочего напряжения 3000 В—6 мм.

Усложнением конструкции разрядника можно создать равномерное поле путем придания искровому промежутку шаровой формы (pora Bendmanna, Schrottke, Alcutta), что для разрядников контактной сети не имеет смысла, так как очень незначительно уменьшает время запаздывания.

Применять сопротивление целесообразно лишь для того, чтобы ограничить силу тока, протекающего от рабочего напряжения, и чтобы предупредить выбрасывание соответствующего быстродействующего автоматического выключателя. С другой стороны это усложнит конструкцию разрядника и увеличит его стоимость. В условиях работы контактной сети выбрасывание быстродействующего автомата происходит очень часто по ряду причин, поэтому единичные выбрасывания автомата при перекрытии рогового разрядника ничем

не отразятся на работе. Установка сопротивления для ограничения вторичных перенапряжений, появляющихся при разрыве дуги на рогах, не является необходимой, ибо, как показали расчеты, приведенные в главе I, возникающие перенапряжения не являются опасными.

Оцеллитовые разрядники, выпускаемые ВЭО, в значительной мере свободны от недостатков роговых разрядников. Во оцеллитовых разрядниках время перекрытия практически очень мало, достигая долей микросекунды, при незначительных коэффициентах импульса. Оцеллитовые разрядники являются значительно более точно градуированными и менее зависимыми от внешних условий, чем роговые разрядники.

В то время как роговые разрядники не могут быть установлены с искровым промежутком меньше, чем 5 мм, т. е. фактически на пробивное напряжение  $\sim 12$  Вк, оцеллитовые разрядники устанавливаются точно на двойное рабочее напряжение и почти не зависят от внешних причин.

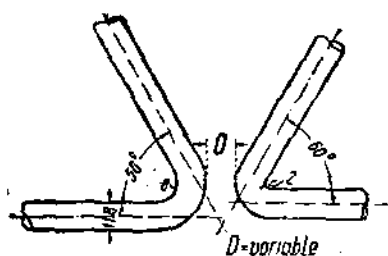


Рис 99.

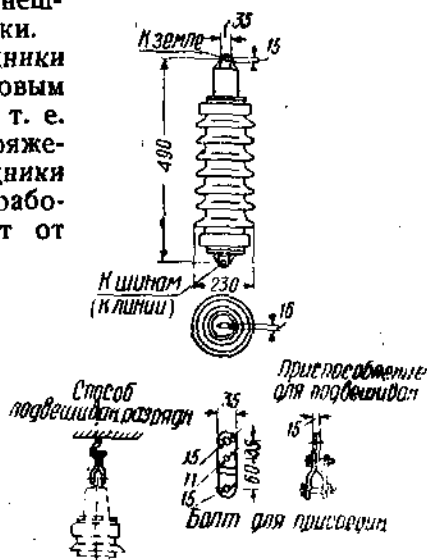


Рис. 100.

По каталогу ВЭО АВН № 7, изданному в апреле 1932 г., выпускаются разрядники для наружных установок на напряжение не ниже 6,6 кВ, поэтому необходимо подвять вопрос о выпуске разрядников на рабочее напряжение 1,65 и 3,3 кВ постоянного тока для защиты контактной сети.

Вид оцеллитового разрядника ВЭО для рабочего напряжения 6,6 кВ приведен на рис. 100.

До сих пор оцеллитовые разрядники не являются достаточно полно экспериментально изученными, имеются некоторые опытные исследования американских лабораторий, но данные там полученные не могут быть применимы к разрядникам ВЭО.

Поэтому необходимо в настоящее время поставить вопрос о всестороннем экспериментальном изучении оцеллитовых разрядников для определения их действительной характеристики.

Сравнивая роговые и оцеллитовые разрядники, необходимо отдать предпочтение последним, как имеющим лучшие свойства и большую надежность действительной защиты от перенапряжений.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

На основании всего материала, приведенного выше, выводим следующее.

1. Разрядники во всех случаях не защищают от мощных прямых ударов непосредственно в контактную сеть, но в некоторых случаях могут защищать от перенапряжений, возникающих по другим причинам.

2. Кроме разрядников необходимо применить другие виды защиты для предотвращения непосредственных ударов молнии в установку. Перейдем к выводам отдельно по контактной сети на металлических и на деревянных опорах.

### А

При подвеске контактной сети на металлических опорах защита от перенапряжения с крутым фронтом и большой амплитудой становится невозможной, так как требуется установка разрядников практически на каждой опоре.

Необходимо в большей степени применить защиту от непосредственных ударов, что будет разобрано нами ниже. Расчетные данные показывают, что установка разрядников через каждые 500 м защищает только от перенапряжений с крутизной фронта волны  $50 \frac{\text{kV}}{\mu \text{сек}}$  и ограничено амплитудой.

Для контактной сети, подтянутой на металлических опорах, отказываемся от применения разрядника как защитного приспособления от перенапряжений.

Условия, которым должна удовлетворять сеть, следующие:

I. Разрядники должны быть установлены в месте присоединения фидеров подстанции и контакторных будок к контактной сети.

II. Электрическая прочность наиболее ответственных изоляторов (натяжные изоляторы анкеровок) должна быть повышена по сравнению с линейными изоляторами.

*Примечание.* Желательно также повышение электрической прочности поддерживающих изоляторов по сравнению с фиксаторами.

III. Разрядники должны быть установлены на электрическом подвижном составе.

### Б

При подвеске контактной сети на деревянных опорах, последняя при соблюдении некоторых условий может быть защищена с помощью обыкновенных разрядников от перенапряжения с максимальной крутизной фронта волны  $150 \frac{\text{kV}}{\mu \text{сек}}$  — без ограничения амплитуды перенапряжения.

Для этого необходимо следующее:

I. Разрядники должны быть установлены через каждые 500 м для районов с большим количеством гроз и каждые 750 м для районов с небольшой грознапряженностью.

II. Между заземленной частью опоры или заземленной арматурой на опоре и соответствующей металлической частью, поддерживающей изоляторы (основные, фиксаторные или фидерные), должно

быть соблюдено расстояние не менее 0,40 м, считая по поверхности дерева между этими частями.

*Примечание.* Исключение может быть допущено только на опорах, соседних с теми, на которых установлены разрядники, где это расстояние может быть уменьшено до 0,20 м (например, для анкерных опор).

III. На анкеровках без воздушного промежутка разрядник должен устанавливаться на междуанкерной опоре; на анкеровках с воздушным промежутком—на междуанкерных опорах для каждой ветви отдельно.

IV. Все опоры, на которых не могут быть выдержаны требования пункта II, или установленные для какой-нибудь специальной цели металлические опоры (например, сигнальные мостики, путе-проводы), должны быть оборудованы разрядниками.

*Примечание.* В случае, если ближайший разрядник находится на расстоянии одного пролета, он может быть перенесен на опору с ослабленной электрической прочностью.

V. Применение деревянных консолей еще более повышает электрическую прочность опоры.

VI. Разрядники должны быть установлены в месте присоединения фидеров тяговой подстанции и контакторной будки.

VII. Разрядники должны быть установлены на электрическом подвижном составе.

### III. ЗАЩИТА ОТ НЕПОСРЕДСТВЕННЫХ УДАРОВ МОЛНИЕЙ

#### 1. ПОРАЖАЕМОСТЬ МОЛНИЕЙ

Разрядники, установленные на линии, являются аппаратами для локализации уже возникшего перенапряжения. Уже по указанному в главе II является необходимость устройств, которые предупреждали бы возникновение перенапряжений, являясь как бы профилактическим средством. Такие установки необходимы нам для защиты от прямых ударов молнии в контактную сеть, что может привести к значительным повреждениям сети и разрушению опор, так как разрядники не рассчитаны на локализацию таких перенапряжений.

В малогрозовых районах или при прохождении линии электрической ж. д. в лесу вероятность попадания прямого удара чрезвычайно мала. В местах не защищенных случаи непосредственных ударов молнии в установку могут быть весьма частыми.

В процессе эксплуатации линии всегда могут быть наблюдаемы участки или даже отдельные опоры, которые неоднократно подвергались ударам молнии. Примером этого может служить опыт эксплуатации уральских линий передач, где наблюдения над поражением опор грозами систематизировались.

В результате обнаружилось, что только некоторые сравнительно небольшие участки длинных линий передач являются пораженными.

Например, линия ЧГРЭС—Златоуст поражается только в непосредственной близости от ЧГРЭС (опоры № 25—109), на линии ЧГРЭС—Кыштым поражаются два участка, один—около ЧГРЭС (опоры № 339—376), другой—в середине линии (опоры № 92—116),

причем некоторые из этих опор систематически поражаются молнией (например, № П-115, П-116, А-376).

Эти явления связаны с рядом геофизических факторов. Вопросы поражаемости молнией различных сооружений или возможности поражения молнией в данной местности до сих пор совершенно не разработаны, имеются только некоторые попытки к их теоретическому обоснованию, однако без всяких экспериментальных и опытных доказательств. Поэтому ограничимся только констатацией, что поражаемость различных участков линии молнией определяется геофизическими факторами данного участка, но на сегодняшний день мы не можем предусмотреть при проектировании или трассировке линий этих „опасных“ участков.

Отсюда следует, что необходимо оборудовать защитными приспособлениями только те участки, которые в процессе эксплуатации покажут себя поражаемыми молнией (или имеются какие-либо данные по району о поражаемости грозами, например опыт близлежащих линий передач).

Приспособлениями, могущими защитить контактную сеть и опоры от ударов молнии, могут быть защитные тросы и громоотводы.

Если рассматривать отдельно контактную сеть по типу применяемых опор, необходимо констатировать следующее.

Контактный провод, подвешенный на металлических опорах, почти не будет подвергаться прямым ударам в провода, так как все удары будет воспринимать на себя опора, которая более или менее совершенно соединена с землей через фундамент.

Только в исключительных случаях может произойти разветвленный удар молнии, одна из ветвей которого попадет в провода контактной сети.

Как было указано, возможно также попадание в провод разрядного напряжения при повышенном сопротивлении „мачта—грунт“ и перекрытие изолятора (проф. Маттиас).

При применении деревянных опор и особенно штыревых изоляторов более вероятно попадание удара молнии именно в контактный провод, а не в опору, или и в провод и в опору. При попадании в деревянную опору почти во всех случаях опора разрушается.

С другой стороны, применение металлических опор, являющихся своеобразными „заземленными остриями“, приводит к перераспределению потенциалов на поверхности земли и повышает вероятность попадания молнии в опору, а не в близлежащие повышенные точки.

## 2. ЗАЩИТНЫЙ ТРОС

На участках с большой грознапряженностью целесообразно для защиты контактной сети и опор подвесить защитный трос.

Не разбирая теоретически работу защитных тросов, что детально произведено в курсах линии передач или теории перенапряжения, укажем только следующее: защитный трос, кроме защиты от прямых ударов молнии в установку, значительно понижает напряжение, появившееся на линии при индуктивном ударе.

Согласно опытам Пика найдено, что один трос понижает индуктированное напряжение наполовину, два — до одной трети и т. д.

Тот же Пик, экспериментируя с моделями облаков и линий, нашел, что при соответствующем расположении троса на него приходится 98% всех ударов и только 2% попадает на рабочие провода.

Достаточно указать, что в настоящее время все линии передач снабжены защитными тросами, поэтому делать исключение для опор контактной сети, надежность правильного функционирования которой не менее необходима, чем любой линии передачи, является совершенно необоснованным.

Учитывая сделанные замечания, можно прийти к следующему заключению.

Если линия передачи проходит в местности, мало подверженной грозам, то применение троса не имеет смысла.

При прохождении линии по местности с большой грозоопасностью наибольшая опасность будет заключаться в возможности перекрытия изолятора и загорания опоры. В этом случае целесообразно применять подвеску защитного троса. Тросы должны быть подвешены выше рабочих проводов, и к ним должны быть применены все правила устройства защитных тросов для линий передач.

Для деревянных опор необходимо не потерять изоляцию дерева, для чего заземляющие провода должны быть изолированы от столбов. С этой целью они могут быть проложены на особых изоляторах или еще лучше заземлены с помощью оттяжек, которые с одной стороны соединяются с тросом у верхушки столба, а нижним концом присоединены к заземлению опоры.

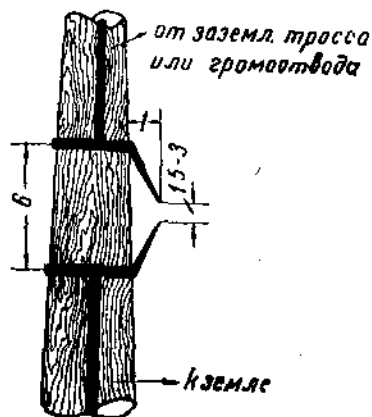


Рис. 101.

Применение „заземляющих“ оттяжек целесообразно, потому что грозовая волна будет сразу отведена на землю и этот отвод будет происходить по проводу, максимально удаленному от рабочих проводов, что уменьшает опасность перекрытия с троса на рабочие провода.

В отношении перекрытия с проводов на землю полностью будет сохранена изоляция дерева. Устройство „заземляющих оттяжек“ в условиях контактной сети является вполне возможным и конструктивно, так как эти же оттяжки можно использовать для механического усиления опоры.

Кроме применения „заземляющих оттяжек“, возможно устройство искровых промежутков (Пик).

Искровой промежуток, указанный на рис. 101, по своим относительным размерам предусматривает пробой воздушного слоя между остриями, а не перекрытия по поверхности дерева.

Однако, по конструктивным соображениям, устройство „заземляющих оттяжек“ более удобно.

Применение защитного троса на металлических опорах не имеет никакого смысла, так как электрическая крепость изоляторов, употребляемых для электротяги, сравнительно мала (сухоразряд-

ное 50 kV) и всякий удар молнии в трос или опору будет приводить к обратному перекрытию изоляторов.

Для предотвращения перекрытия с заземляющего троса на провод необходимо соблюдение соответствующего расстояния между ними, зависящего от изоляции линии, от расстояния между точками заземления троса и от рабочего напряжения линии.

Определение подвеса заземляющего троса должно быть произведено для каждого типа контактной сети методами, применяемыми для решения этого вопроса в высоковольтных линиях передач.

Опасаться индуктирования в контактную сеть при ударе молнии в трос больших потенциалов не приходится, так как коэффициент связи очень мал и расстояние между точкой разряда и точкой отвода в землю незначительно.

### 3. ГРОМООТВОДЫ

На тех опорах контактной сети, которые в процессе эксплуатации покажут себя неоднократно поражаемыми ударами, или на опорах, которые необходимо обеспечить защитой от грозовых ударов, могут быть устанавливаемы обыкновенные громоотводы.

Громоотвод должен представлять собою металлический стержень или пучок стержней, укрепленный в самой верхней точке опоры и соединенный с заземлением или посредством „заземляющей

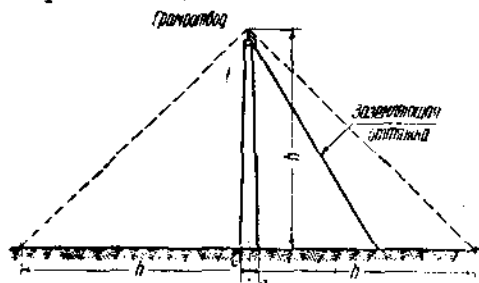


Рис. 102.

оттяжки" или, в крайнем случае, обыкновенным заземляющим проводом, идущим к заземлению с включенным искорным промежутком.

Громоотводы простейшего вида применяются на линиях связи для защиты опор по несколько штук на километр.

Защита контактной сети от прямых ударов молнии осуществляется до известной степени

этими громоотводами, установленными на опорах, особенно если громоотвод значительно возвышается над контактным проводом.

Предложение такой системы защиты выдвинуто Союзом германских электротехников с числом столбов два-три на километр.

Защита громоотводами не является достаточной и может применяться только в исключительных случаях при невозможности применить защитный трос.

Зона действия громоотвода показана на рис. 102 пунктиром.

Громоотвод вполне защищает все находящееся в пределах объема конуса, высота и радиус основания которого равны высоте громоотвода.

### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Контактная сеть электрических ж. д. является более ответственным сооружением, чем линия передачи, питающая любое промышленное предприятие; поэтому защита ее должна быть абсолютно надежной.

Для этого необходимо следующее:

1. В местностях, подверженных сильным грозам, должен быть подвешен защитный трос.

*Примечания:* 1) Необходимо разработать конструкцию деревянной опоры для подвески защитного троса, предусмотрев дополнительную изоляцию дерева (наиболее желательно применение „заземляющей оттяжки“), увязав эту конструкцию с повышением изоляции „провод—грунт“.

2) На металлических опорах подвеска заземляющего троса не является необходимой.

2. В местностях, не подверженных сильным грозам, заземляющие тросы должны быть подвешены только на участках, неоднократно поражаемых ударами молнии (опасные участки).

*Примечания:* 1) Опасные участки определяются либо в процессе эксплуатации, либо по данным геофизических факторов или данным эксплуатации близлежащих линий передач.

2) В случаях невозможности подвески заземляющего троса, могут быть на отдельных опорах установлены громоотводы, для чего необходимо разработать специальную конструкцию опоры и заземления этого громоотвода.

3. Заземление защитного троса должно производиться через каждые 300 м для быстрого отвода перенапряжения в землю.

Вопрос защиты контактной сети от перенапряжения является на сегодняшний день чрезвычайно актуальным, но в то же время чрезвычайно мало исследованным теоретически и практически. Для действительного, являющегося решением вопроса о перенапряжении в контактных сетях электрических ж. д. необходима экспериментальная проверка возникновения и распространения перенапряжений. Необходимо провести следующее:

1. Научно-исследовательскому институту электрификации ж. д. и его филиалам организовать систематические наблюдения над перенапряжением с помощью клейдонографов и прямых регистраторов ударов молнии.

Могут быть применены клейдонографы с часовым механизмом и клейдонографы с регистрацией одного перенапряжения, разработанные ВЭИ и получившие большее распространение в сетях МОГЭС.

Наиболее целесообразно организовать исследования на участках, которые в результате эксплуатации показали себя подверженными грозовым разрядам.

Таковыми участками являются:

А. На Северных ж. д. участок в районе ст. Лосиноостровской и ст. Болшево.

Б. Электрифицированный участок Пермской ж. д. (Кизел—Чусовская), проходящий в очень грозовых районах.

В. На Закавказских ж. д. электрифицируемый в настоящее время участок Навтлуг—Сталиниси.

Необходимо установить серию клейдонографов, начиная от поражаемых точек до фидеров подстанций, чтобы иметь возможность проследить как амплитуду, так и прохождение волны перенапряжения по линии.

2. Необходимо провести полные лабораторные исследования тяговых изоляторов, особенно обратив внимание на снятие импульсных характеристик, а также разработать изолятор с усиленной изоляцией.

3. Необходимо провести всесторонние испытания оцеллитовых разрядников типа ВЭО, а также определить импульсные характеристики стандартных роговых разрядников по черт. 4 ЦЭН № 26.

4. Просить Главную геофизическую обсерваторию разработать вопрос о влиянии геофизических факторов и строения земной поверхности на грозопоражаемость сооружений в данном районе для возможности выбора защиты контактной сети при проектировании.

Только координируя теорию с практическими данными, можно выбрать наиболее совершенный тип защиты контактной сети от перенапряжения и обеспечить максимум надежности в работе электрических ж. д.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сиротинский Л. И., Перенапряжения и защита от перенапряжений в электрических установках.
2. Эпштейн 11. Перенапряжения в электрических установках.  
(2. Линии передач электрической энергии.
3. Круг, Основы электротехники.
4. Рюденберг, Явления неустановившегося режима в электрических установках.
5. Гемант, Электрофизика изолирующих материалов.
6. Третьяк, Электрическая дуга.
7. Угрюмов и Генсель, Основы техники сильных токов.
8. Материалы Первой всесоюзной конференции по электропередаче больших мощностей на большие расстояния токами сверхвысоких напряжений. Доклад Крачковского.
9. Материалы I и II Мировых энергетических конференций.
10. Comptes rendes de la conference des grands Reslanox
11. Bulletin kommission für Überspannungsschutz des Schweizer El. Ver., № 6, Iun, 1926.
12. Peek, Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering.
13. Wechman, Die electrische Zugvorderung.

### Статьи в журналы

GER., Aug. 1929.

El. W., Jan., Oct. Nov. 1930.

ETZ., № 4, 5, 48, 1927 г., № 4, 5, 31 — 1933 г.

JAIEE., Nov. 1929, July 1930 г.

Z. Techn.—Phys., Bd. 5.

Tramway and Railway World, № 9, 25.

Электричество за 1926—1933 гг.

# ВЕДОМОСТЬ № 2

Динамическая характеристика пантографа № 2 секции № 404

Испытание производилось 17 апреля 1932 года

Температура воздуха + 9° С

Давление воздуха в цилиндрах пантографа 4,2—5 кг

| Запись №                | Прилож.<br>груз кг | Высота над<br>головкой<br>рельса мм | Примечание             |
|-------------------------|--------------------|-------------------------------------|------------------------|
| А. Ход пантографа вверх |                    |                                     |                        |
| 1 . . . . .             | 0                  | 5 250                               | Повторно               |
| 2 . . . . .             | 0                  | 5 850                               |                        |
| 3 . . . . .             | 0                  | 6 050                               |                        |
| 4 . . . . .             | 0                  | 6 050                               |                        |
| 5 . . . . .             | 0                  | 5 850                               |                        |
| 6 . . . . .             | 0                  | 6 050                               |                        |
| 7 . . . . .             | 3                  | 5 250                               |                        |
| 8 . . . . .             | 3                  | 5 850                               |                        |
| 9 . . . . .             | 3                  | 6 050                               |                        |
| 10 . . . . .            | 5                  | 5 250                               |                        |
| 11 . . . . .            | 5                  | 5 850                               |                        |
| 12 . . . . .            | 5                  | 6 050                               |                        |
| Б. Ход пантографа вниз  |                    |                                     |                        |
| 13 . . . . .            | 11                 | 5 250                               | Пантограф не опускался |
| 14 . . . . .            | 11                 | 5 850                               |                        |
| 15 . . . . .            | 15                 | 5 250                               | Пантограф не опускался |
| 16 . . . . .            | 15                 | 5 850                               |                        |
| 16а . . . . .           | 15                 | 6 050                               |                        |
| 17 . . . . .            | 20                 | 5 250                               |                        |
| 18 . . . . .            | 20                 | 5 850                               |                        |
| 19 . . . . .            | 20                 | 6 050                               |                        |
| 20 . . . . .            | 25                 | 5 250                               |                        |
| 21 . . . . .            | 25                 | 5 850                               |                        |
| 22 . . . . .            | 25                 | 6 050                               |                        |
| 23 . . . . .            | 30                 | 5 250                               |                        |
| 24 . . . . .            | 30                 | 5 850                               |                        |
| 25 . . . . .            | 30                 | 6 050                               |                        |

**О П Е Ч А Т К И**  
в книге «Расчеты по контактной сети электрических жел. дор.»

| Страница       | Строка |           | Напечатано                      | Следует читать                                |
|----------------|--------|-----------|---------------------------------|-----------------------------------------------|
|                | сверху | снизу     |                                 |                                               |
| Титульный лист | 4      | —         | выпуск VIII                     | выпуск VII                                    |
| Оглавление     | 15     | —         | —                               | Добавить: Приложение к статье В. В. Спасского |
| 3              | —      | 2         | в выпрямленных сетях            | в сетях выпрямленного                         |
| 6              | —      | 2         | ниж.                            | ниж.                                          |
| 8              | 10     | —         | $E \text{ кг/мм}^2$             | $E' \text{ кг/мм}^2$                          |
| 13             | 3      | —         | (форм. 5)                       | (форм. V)                                     |
| 18             | —      | 11        | $\delta = C_2 \Delta_2 = \dots$ | номер формулы: (2)                            |
| 34             | —      | 16        | 11-6                            | (11'-6)                                       |
| 43             | —      | 1         | (M)                             | —                                             |
| 43             | —      | 2         | (XIII-a)                        | (VIII-a)                                      |
| 58             | —      | 5, 14, 16 | C-1003                          | C-10-03                                       |
| 74             | —      | 26        | Секция № 40                     | Секция № 404                                  |
| 84             | —      | 13        | Таблица 2                       | Таблица 5                                     |
| 85             | 16     | —         | $a = \frac{1}{p} = 0,0067$      | $a = \frac{1}{p} = 0,0067 = 1,50$             |
| 85             | 17     | —         | в таблице 4                     | в таблице 5                                   |
| 85             | 17     | —         | 72 км/час                       | 52,5 км/час                                   |
| 85             | 19     | —         | W 72 км/час                     | W 52,5 км/час                                 |
| 85             | 19     | —         | 0,662 м/сек                     | 0,662 м/сек <sup>2</sup>                      |
| 85             | —      | 14        | $= \frac{27,8}{602}$            | $= \frac{27,8^2}{602}$                        |
| 90             | 3      | —         | C-1000                          | C-10-03                                       |
| 100            | 9      | —         | C-1007                          | C-10-03                                       |
| 102            | 2      | 5         | в выпрямленных сетях            | в сетях выпрямленного                         |
| 124            | —      | —         | чертеж 85 следует               | перевернуть                                   |
| 144            | —      | 8         | журналы                         | журналах                                      |
| 144            | —      | 4         | July                            | July                                          |
| 144            | —      | 6         | Jan                             | Jan.                                          |
| 144            | —      | 9         | Wechman                         | Wechmann                                      |
| 144            | —      | 9         | elektrische Zugvorderung        | elektrische Zugvorderung                      |
| 144            | —      | 11        | Bullitin kommission             | Bulleten Kommission                           |
| 144            | —      | 11        | Uberspannungschutz              | Uberspannungschutz                            |
| 144            | —      | 12        | Compes randes                   | Comptes rendues                               |
| 144            | —      | 12        | Reslanox                        | Resaux                                        |

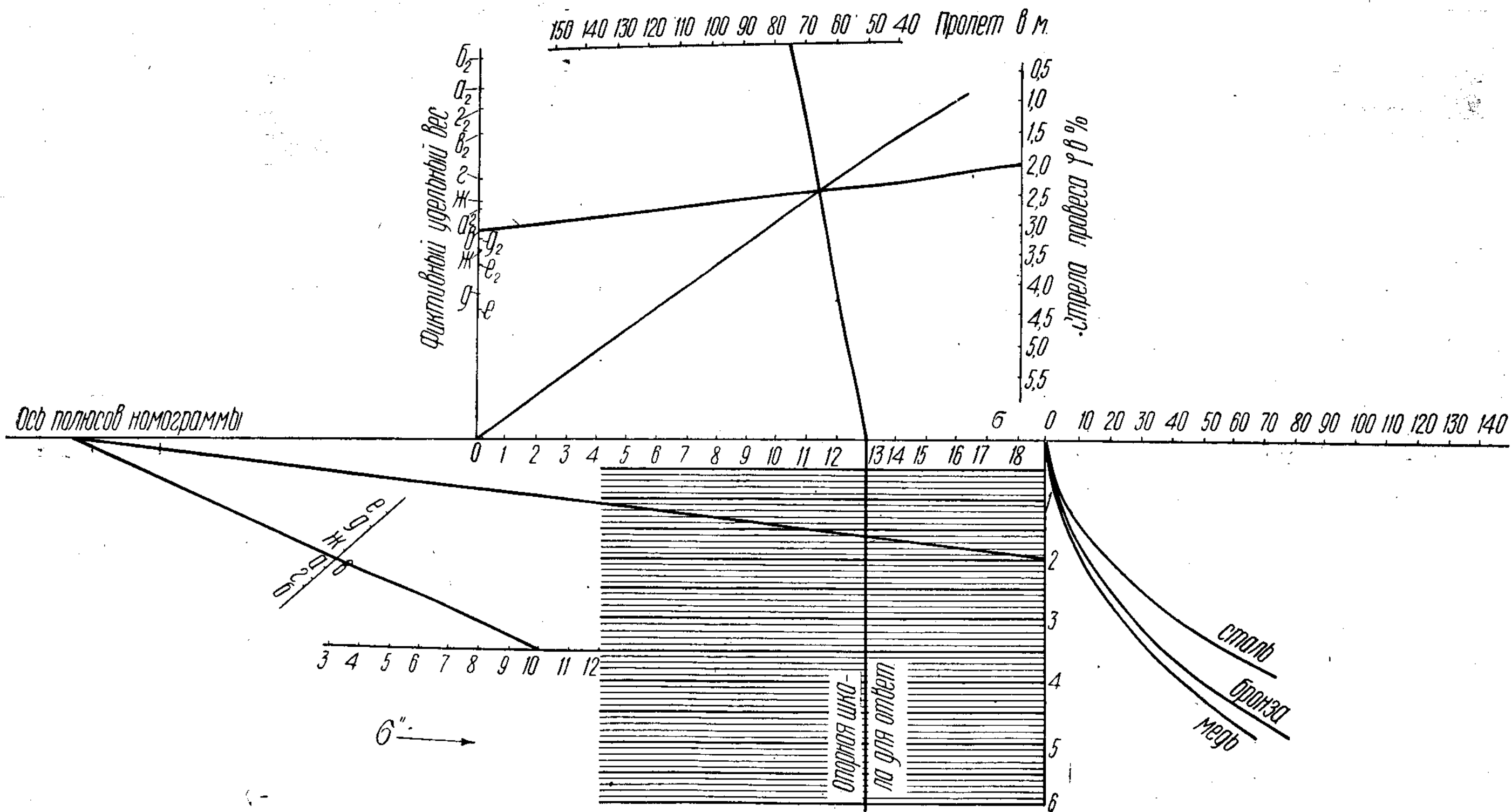


Рис. 32. Номограмма для расчета полукompенсированной цепной подвески.

$\alpha$  — бронза  $w' = 120$  мм<sup>2</sup>; медь  $w'' = 110$  мм<sup>2</sup>  
 $\delta$  — бронза  $w' = 120$  мм<sup>2</sup>; медь  $w'' = 100$  мм<sup>2</sup>  
 $\kappa$  — бронза  $w' = 120$  мм<sup>2</sup>; медь  $w'' = 2 + 100 - 200$  мм<sup>2</sup>  
 $\epsilon$  — сталь  $w' = 50$  мм<sup>2</sup>; медь или железо — 100 мм<sup>2</sup>  
 $\sigma$  — сталь  $w' = 30$  мм<sup>2</sup>; медь  $w'' = 80$  мм<sup>2</sup>  
 $\zeta$  — сталь  $w' = 10$  мм<sup>2</sup>; медь или железо  $w'' = 300$  мм<sup>2</sup>  
 $\theta$  — сталь  $w' = 50$  мм<sup>2</sup>; медь  $w'' = 2 + 80 - 160$  мм<sup>2</sup>

- 409352 -

Цена 2 р. 75 н.

PLST



0000000581140

1934

**Продажа во всех  
магазинах и отделениях  
Книготоргового объединения  
ОГИЗа и КООПКНИГИ.  
Почтовые заказы выполняет  
наложенным платежом.**

**без задатка**

**«КНИГА—ПОЧТОЙ»,  
Москва, 64, Покровка, д. 28**