

Ваи.315
Г52

Инж. А. А. ГЛАЗУНОВ
Преподаватель Московского Высшего Технического Училища

БРЕП

621.315
Г52

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА И ССР

ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПРОВОДОВ И ТРОССОВ

47820

69764

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА И ССР
11286

nr 82, 8/908

Гонс
РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА И ССР



ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКОВСКОГО ВЫСШЕГО ТЕХНИЧЕСКОГО УЧИЛИЩА
МОСКВА — 1928.

Отпечатано в Типографии Госиздата
„Красный Пролетарий“, Москва,
Пашенковская улица, д. 16.
Мосгублит № 17012
Тираж 3000 экз.
Зак. 5818.
12¹/₂ печ. л.

ПРЕДИСЛОВИЕ.

Ни в нашей ни в иностранной литературе не имеется достаточно полных трудов, освещающих механическую сторону линий электропередач, а между тем, проводимая в настоящее время широкая электрификация СССР выдвигает перед инженерами ряд сложных задач в этой области. Такое положение побудило автора систематизировать литературный и имеющийся у него материал по механической части электропередач с тем, чтобы облегчить всем начинающим работу в этой области техники.

Настоящая книга представляет из себя первую часть предполагаемого автором к выпуску труда по линиям электропередач, в которой изложен механический расчет проводов и троссов. Расчет проводов является, как известно, одной из наиболее сложных и важных задач, так как результаты его в значительной степени определяют конструкцию линии передачи, а следовательно, и ее экономическую характеристику. Во второй книге автор предполагает осветить вопросы трассировки, монтажа, конструкции и проектирования электропередач.

В конце книги, в виде приложения, даны нормы механического расчета электрических воздушных линий сильного тока, утвержденные IX Всесоюзным Электротехническим Съездом. Вся теория и примеры в книге составлены применительно к этим нормам.

В заключении считаю необходимым отметить ту работу, которую провели при составлении этой книги студенты Московского Высшего Технического Училища А. Ф. Иваницкий и С. А. Сапаров. В их задачу входила обработка моих записок и разработка, по моим указаниям и под моим руководством, некоторых отдельных заданий. Приношу им здесь свою глубокую благодарность за вдумчивое и серьезное отношение к выполненной работе.

Инж. А. Глазунов.

Москва.
Июль 1928 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Введение	VII
Глава I. Провода и троссы для линий электропередач.	
§ 1. Требования, предъявляемые к проводам и троссам	1
§ 2. Материалы для проводов и троссов (Медь—2. Алюминий—5. Бронза—7. Железо и сталь—8. Сталь-алюминий—9. Сталь-медь—10. Добавочные сведения—11.)	2
Глава II. Нагрузки проводов и троссов линий передач.	
§ 1. Общие положения	14
§ 2. Нагрузки на провода и троссы (Собственный вес—14. Давление ветра—15. Гололед и снег—19. Суммарные нагрузки—20. Удельные нагрузки для средних атмосферных условий—21. Пример—21.)	14
Глава III. Натяжения и стрелы провеса проводов при нормальных условиях работы линий электропередачи.	
§ 1. Общие сведения (Форма кривой—23. Пролет—23. Стрела провеса—23. Натяжение по проводам—24.)	23
§ 2. Натяжения и стрелы провеса провода, имеющего точки подвеса на равной высоте, при неизменяющихся атмосферных условиях (Цепная линия—24. Парабола—26. Натяжение по проводам—28. Комбинированные провода—29. Примеры—31.)	24
§ 3. Натяжения и стрелы провеса провода, имеющего точки подвеса на равной высоте, при изменении атмосферных условий (Провода, состоящие из одного материала—33. Комбинированные провода—35. Примеры—37.)	33
§ 4. Критический пролет (Общие положения—38. Критический пролет для однородного провода—39. Критический пролет для комбинированного провода—40. Примеры—42.)	38
§ 5. Критическая температура	44
§ 6. Натяжения и стрелы провеса провода, имеющего точки подвеса на разной высоте (Эквивалентный пролет—45. Большая разность высот точек подвеса—48. Примеры—53.)	45
§ 7. Большие пролеты (Пример—55.)	55
§ 8. Ход механического расчета проводов (Пример—56.)	56
Глава IV. Работа линий передач при обрыве проводов без учета действия уцелевших проводов и троссов.	
§ 1. Общие сведения (Причины обрыва проводов—58. Значение определения натяжений по проводам при обрыве их—58.)	58
§ 2. Коэффициент гибкости опоры (Коэффициент гибкости одиночного столба—59. Коэффициент гибкости решетчатых мачт—60. Примеры—62.)	59
§ 3. Обрыв проводов на линии передачи со штыревыми изоляторами без учета влияния уцелевших в поврежденном пролете проводов (Общие сведения—63. Аналитический метод—64. Графо-аналитический метод—67. Графический метод—69. Добавочные построения при графическом методе—72. Пример—73.)	63

	<i>Стр.</i>
§ 4. Условие равновесия гирлянды подвесных изоляторов (Отклонение гирлянды изоляторов — 76. Условие равновесия — 77).	76
§ 5. Обрыв проводов на линии передачи с подвесными изоляторами без учета влияния оставшихся необорванными проводов (Аналитический метод — 78. Графический метод — 80. Пример — 84.)	77
§ 6. Упрощенные методы определения натяжений, действующих по проводам при обрыве части их, без учета влияния оставшихся проводов и троссов в поврежденном пролете (Первое упрощение — 88. Второе упрощение — 88. Пример — 91.)	87
§ 7. Определение усилий, действующих на анкерные опоры при обрыве проводов	93
 Глава V. Работа линий передачи при обрыве части проводов и при учете действия троссов и уцелевших проводов.	
§ 1. Общие сведения	94
§ 2. Определение натяжений, действующих по проводам на линии передачи со штыревыми изоляторами при одностороннем обрыве части проводов и при учете влияния оставшихся (Графо-аналитический метод — 95. Графический метод — 96. Сопоставление результатов подсчетов — 99. Пример — 101.)	94
§ 3. Определение натяжений, действующих по проводам при обрыве части их на линиях передач, монтированных на штыревых изоляторах с заземленными стальными троссами (Условия равновесия опоры — 104. Определение натяжений по проводам и троссам — 106. Пример — 112.)	103
§ 4. Обрыв проводов на линии передачи с подвесными изоляторами с учетом влияния оставшихся проводов (Пример — 120.)	116
§ 5. Определение натяжений по проводам при обрыве части их на линии передачи с подвесными изоляторами и заземленными троссами (Пример — 127.)	126
 Глава VI. Особые случаи работы линий электропередач.	
§ 1. Неравномерная нагрузка проводов в пролетах (Графо-аналитический метод — 134. Графический метод — 135. Пример — 139.)	133
§ 2. Скользящие клеммы (Неравномерная нагрузка пролетов — 142. Сосредоточенная нагрузка в одном из пролетов — 143. Примеры — 144.)	141
§ 3. Поворотные кронштейны (Поворотные кронштейны с вертикальной осью вращения — 147. Поворотные кронштейны с наклонной осью вращения — 150. Примеры — 153.)	147
§ 4. Натяжения и стрелы провеса проводов в пролетах, подвешенных на оттяжных гирляндах изоляторов при изменяющихся атмосферных условиях (Общие сведения — 158. Натяжение по проводу при различных атмосферных условиях — 158. Пример — 161.)	158
§ 5. Неодинаковые пролеты (Пример — 167.)	163
§ 6. Натяжения и стрелы провеса проводов на линиях с подвесными изоляторами, проложенных в гористых местностях (Пример — 174.)	170
 ПРИЛОЖЕНИЕ.	
Нормы механического расчета электрических воздушных линий сильного тока	183

ВВЕДЕНИЕ.

Линии электропередачи, работающие с напряжением 3—6 kV, сооружались у нас в СССР сравнительно давно (20—25 лет), но механический расчет их обычно не производился. Постройка таких линий происходила в большинстве случаев по трафарету, взятому с телеграфных и телефонных сетей, путем установки одиночных столбов по 20—25 штук на один километр. Такое положение существовало, и могло существовать пока не потребовались электропередачи с напряжением 20—120 kV и сечением проводов 50—150 мм². Сооружение крупных районных электрических станций, находящихся вдали от места потребления энергии, выдвинуло во всей широте вопрос о рациональном проектировании и построении линий передач, так как к ним стали предъявляться строгие требования, главнейшими из которых являются надежность и экономичность их при эксплуатации.

Работа линий передач протекает в чрезвычайно трудных условиях, так как они постоянно подвергаются действию тех или иных атмосферных явлений, как-то: ветер, гололед, высокая и низкая температура воздуха и т. д., причем многие из этих факторов, представляющих из себя для электропередач механические нагрузки, достигают иногда очень больших величин. Кроме того, к неблагоприятным условиям работы электропередач следует также отнести и то, что уход и надзор за ними не может быть столь же тщательным, как уход за машинами и аппаратами на электрических станциях и подстанциях. И действительно, в то время как станции и подстанции занимают сравнительно небольшие площади, машины и аппараты их в большинстве случаев находятся в зданиях, линии передачи имеют протяжения десятков, сотен и даже тысяч километров и постоянно подвергаются действию переменных атмосферных условий. Если учесть далее, что разрушение хотя бы и незначительного участка электропередачи вызывает всегда сравнительно продолжительные перебои в снабжении энергией потребителей, то станет понятной необходимость производства расчетов проводов и опор линий передач.

Последняя мысль подтверждается еще и теми соображениями, что стоимость электропередач в современных установках составляет значительную часть от общих затрат. Понятно, что при такой высокой стоимости сетей на конструкцию их должно быть обращено самое серьезное внимание, и что решение о возможно дешевой стоимости транспорта энергии может быть получено только после тщательного проектирования всех сооружений линий передач.

ГЛАВА I.

Провода и троссы для линий электропередач.

§ 1. Требования, предъявляемые к проводам и троссам.

Работа проводов и заземленных троссов линий электропередач, подвергающихся действию ветра, дождя, снега, колебанию температуры окружающего воздуха и т. д., протекает в чрезвычайно тяжелых условиях. Если принять еще во внимание, что указанные выше факторы, представляющие, с точки зрения механического расчета, нагрузки, достигают весьма больших величин, то станет понятным, что к проводам и троссам предъявляются специальные и в высшей степени строгие требования, главнейшими из которых являются следующие.

1. Материал проводов должен обладать высокой электрической проводимостью.

Требование это вытекает из электрических свойств линий передач и, как понятное само-собой, не нуждается в добавочных разъяснениях.

2. Провода и троссы, при возможно меньшем весе их, должны иметь большую механическую прочность.

Это положение является результатом того, что наиболее дешевые линии передачи, при современных конструкциях их, можно получить только доводя натяжения в проводах и троссах, при самых неблагоприятных условиях нагрузки, до $9 \div 20 \text{ kg/mm}^2$, а в некоторых исключительных случаях—до $25 \div 40$ (и выше) kg/mm^2 . Если учесть далее, что по нормам СССР, провода линий передач должны иметь коэффициент запаса прочности не меньше 2, а в специальных случаях (как например, при пересечении железных дорог, прохождении по населенным местностям и т. д.)—не менее 3, то станет ясным, что для проводов линий передач могут употребляться только материалы, имеющие временное сопротивление на разрыв $18 \div 40$ (и выше) kg/mm^2 .

Кроме того, так как провода и троссы, во время монтажа и постоянном раскачивании их на линии передачи под действием ветра, испытывают перегибы, то материал, из которого они выполнены, должен быть не хрупким, а эластичным.

1 Линии электропередачи.

3. Провода и троссы должны хорошо противостоять влиянию атмосферных условий и химическим агентам, находящимся в воздухе данной местности.

Первое положение этого требования предъявляется ко всем проводам и троссам без исключения, а второе из них только в специальных случаях, как например, в местностях, находящихся близ химических заводов, газы которых могут действовать на провода и троссы.

4. Провода и троссы должны быть выполнены из таких материалов, при которых линии передачи, удовлетворяя всем вышеуказанным требованиям, давали бы наименьшую стоимость их эксплуатации. Не касаясь здесь вопроса, из чего складывается стоимость эксплуатации линии передачи, необходимо отметить только, что применение того или иного материала для проводов сильно отражается на конструкции опор линии передачи, а следовательно, и на стоимости сооружения ее.

§ 2. Материалы для проводов и троссов.

Наибольшим распространением в качестве материала для проводов у нас в СССР пользуется медь, а за границей, кроме того, еще и алюминий, так как оба эти металла почти полностью удовлетворяют требованиям, предъявляемым к проводам линий передачи.

В особых случаях применяется бронза, железо, сталь или комбинация в одном проводе двух металлов, как например, сталь-алюминий или сталь-медь.

Для заземленных троссов линий передачи, которые в огромном большинстве случаев не должны обладать высокой электрической проводимостью, идет почти исключительно сталь.

Рассмотрим теперь каждый из перечисленных металлов в отдельности и выясним, насколько он удовлетворяет приведенным выше требованиям.

Медь. Медь является одним из лучших проводников электрического тока и потому необходимые электрические свойства линии передачи (наименьшая потеря мощности, падение напряжения) могут быть получены при медных проводах значительно легче, чем при проводах из другого металла.

Медные провода для линий передач выполняются двух видов:

- 1) **одножильные** (однопроволочные), — состоящие из одной проволоки;
- 2) **многожильные** (кабели), — состоящие из нескольких скрученных проволок. Внешний вид скрученного многожильного провода представлен на фиг. 1.

Многожильные провода имеют значительные преимущества перед одножильными и потому получили более широкое применение для линий передач. Главнейшим преимуществом многожильных проводов является их большая механическая прочность. Последнее объясняется тем, что при изготовлении проволоки в верхних слоях ее получается уплотнение

металла, дающее, как известно, повышение временного сопротивления материала. Это уплотнение проникает только на некоторую глубину от поверхности, и потому его влияние сказывается значительно сильнее на проволоках малого диаметра, чем большого. Следовательно, много-



Фиг. 1.

жилльные кабели, составленные из проволок малого диаметра, имеют большую механическую прочность, чем одножилльные провода того же сечения.

Наличие уплотненного слоя металла на поверхности проволоки требует аккуратного обращения с проводами при всех перевозках и монтажах их, так как всякое наружное повреждение провода сильно уменьшает временное сопротивление его на разрыв. Последнее замечание особенно относится к одножилльным проводам, так как у многожилльных кабелей даже при неаккуратном обращении будут повреждены в одном и том же сечении не все проволоки, а только часть их.

Второе преимущество многожилльных кабелей заключается в том, что в них не может быть такого сильного ослабления временного сопротивления из-за случайных дефектов материала, какое может наблюдаться в одножилльных проводах. Это объясняется тем, что слабые места отдельных проволок не попадут при скрутке их на один и тот же участок кабеля.

Наконец, третьим преимуществом кабелей сравнительно с одножилльными проводами, является большая гибкость первых, облегчающая работы при монтаже линии передачи. Кроме того, благодаря этой гибкости, многожилльные провода не страдают так сильно, как одножилльные, от постоянных перегибов их, получающихся при качании под действием ветра.

На основании изложенных преимуществ многожилльных проводов нормы СССР допускают применение одножилльных медных проводов только в сетях низкого напряжения и для линий сельскохозяйственного назначения с напряжением не свыше 22 kV, причем, как наивысшее сечение для однопроволочных медных проводов, допускается 16 mm².

Данные, характеризующие медные провода, приведены в табл. I. Необходимо отметить, что данные табл. I относятся к отдельным проволокам и потому некоторые из них для многожилльных проводов должны быть изменены.

Это замечание относится к следующим величинам.

1) Временное сопротивление многожилльного провода процентов на 10 ниже той же величины для отдельной проволоки, т. е. составляет 36 — 41 kg/mm².

2) Модуль упругости не бывшего в работе многожилльного провода процентов на 10 — 15 меньше величины, указанной в таблице, так как

ТАБЛИЦА I.

№ по порядку	Свойства материала	Мягкая медь	Полутвердая медь	Твердотянутая медь	Примечания
1	Удельный вес	8,9	8,9 ÷ 8,93	8,9 ÷ 8,95	К пп. 2 и 3.
2	Временное сопротивление на разрыв (kg/mm ²)	22 ÷ 26	29 ÷ 38	38 ÷ 45	Высшие значения относятся к проволокам диаметром 1—3 мм. С увеличением диаметра значения приближаются к нижнему пределу.
3	Предел пропорциональности (упругости) (kg/mm ²)	12	21 ÷ 26	27 ÷ 35	
4	Модуль упругости E (kg/mm ²)	10 000	12 000	13 000	
5	Коэффициент растяжения $\beta = 1 : E$ (mm ² /kg)	$1 \cdot 10^{-4}$	$0,83 \cdot 10^{-4}$	$0,77 \cdot 10^{-4}$	
6	Температурный коэффициент линейного расширения α	$16,5 \cdot 10^{-6}$	$16,5 \div 17 \cdot 10^{-6}$	$16 \div 17 \cdot 10^{-6}$	
7	Удлинение при разрыве φ (%)	20 ÷ 44	—	1 ÷ 3	
8	Удельная проводимость при 15°C ($\frac{m}{\Omega \cdot mm^2}$)	58	57	57	

удлинение кабеля под действием растягивающей силы происходит не только из-за растяжения проволок, но и за счет изменения их взаимного расположения (проволоки сближаются). При работе кабеля модуль упругости его возрастает и достигает указанной в табл. I величины, которую и вводят при всех расчетах проводов.

3) Все сказанное в п. 2 табл. I применимо с соответствующей поправкой и к коэффициенту растяжения (β), как величине, обратной модулю упругости.

В настоящее время провода линий передачи изготавливаются только из полутвердой и твердотянутой меди; мягкая же медь не употребляется для них совершенно, так как она имеет весьма низкий предел пропорциональности, и потому всякая перегрузка линии сверх расчетной может вызвать в проводах большое остаточное удлинение, что, в свою очередь, поведет к значительному увеличению стрел провеса и потребует, следовательно, перетяжки линии передачи. Твердотянутая медь идет почти для всех проводов линий электропередач, а полутвердая медь — только для проводов местных сетей, где механические конструкции опор не позволяют доводить натяжения по проводам до их предельного значения.

При монтаже линий передачи горячая пайка проводов ни в коем случае не допускается, так как при ней происходит отжиг проводов в месте спайки, т. е. переход твердотянутой или полутвердой меди в мягкую, имеющую значительно меньшее сопротивление на разрыв, чем это предполагалось при расчете. Понятно, что в таком случае провода не выдержат расчетных натяжений — оборвутся и выведут линию передачи из работы.

Медные провода противостоят влиянию атмосферных условий и химическим агентам, находящимся в воздухе, чрезвычайно хорошо, так что соответствующее требование удовлетворяется ими в полной мере.

У нас в СССР, за исключением алюминиевых проводов, только линии передачи с медными проводами и удовлетворяют условию наименьшей стоимости их эксплуатации. Исключение из только что сказанного составляют линии, питающие местности с очень небольшими нагрузками (сельские местности), для которых иногда является более выгодным применение железных проводов.

Алюминий, имеющий удельную проводимость $34,8 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$, является худшим проводником электрического тока, чем медь. Поэтому для передачи одной и той же мощности при одних и тех же потерях в линии, алюминиевые провода должны иметь сечение больше медных в отношении проводимостей этих металлов ($57:34,8 = 1,64$). Кроме того, линии передачи с алюминиевыми проводами имеют большую величину самоиндукции, чем с медными. Это объясняется тем, что алюминиевые провода, допускающие меньшие натяжения, чем медные, требуют больших стрел провеса, а следовательно, и больших расстояний между собой.

В некоторых случаях, а именно при очень высоких напряжениях порядка 220 kV, алюминиевые провода могут иметь определенное преимущество перед медными, так как материал последних с точки зрения электрических свойств линии (падение напряжения) бывает иногда не совсем использован. И действительно, при напряжениях порядка 220 kV сечение проводов приходится выбирать исходя не только из расчетов на регулирование напряжения линии и потери мощности, но также соображаясь и с явлением короны. При этих расчетах иногда сечение провода определяется явлением короны, а не прочими электрическими свойствами линии передачи, т. е. если бы взять нужные провода из меди, то падение напряжения и потери мощности в них были бы ниже, чем это требуется экономическими и техническими соображениями. В таких случаях преимущество будет за алюминием, так как стоимость его ниже стоимости меди ¹⁾.

Данные, характеризующие алюминиевые проволоки, из которых изготавливаются многожильные провода, приведены в табл. II.

Замечания относительно величины E и β для многожильных медных проводов относятся также и к алюминиевым кабелям. Временное сопротивление на разрыв алюминиевого кабеля $18 - 20 \text{ kg/mm}^2$.

Алюминиевые провода всегда выполняются многожильными по следующим соображениям.

1. Получить однородный материал в толстых алюминиевых проводах почти невозможно.

¹⁾ В последнее время выпущены медные пустотелые провода (в виде пустотелого цилиндра), материал которых, следовательно, даже при очень высоких напряжениях, будет использован полностью.

Т А Б Л И Ц А II.

№ по порядку	Свойства материала.		Примечание
1	Удельный вес	2,7 ÷ 2,75	К пп. 2 и 3.
2	Временное сопротивление на разрыв (kg/mm ²)	18 ÷ 22	Высшие значения относятся к проволокам диаметром 1—3 мм.
3	Предел пропорциональности (упругости) (kg/mm ²)	13 ÷ 15	С увеличением диаметра, значения приближаются к наземному пределу.
4	Модуль упругости E (kg/mm ²)	6 500 ÷ 7 200	
5	Коэффициент растяжения $\beta = 1: E$ (mm ² /kg)	1,54 ÷ 1,39 · 10 ⁻⁴	
6	Температурный коэффициент линейного расширения α	23 · 10 ⁻⁶	
7	Удлинение при разрыве φ (%)	2 ÷ 4	
8	Удельная проводимость при 15°C ($\frac{m}{\Omega \cdot mm^2}$)	34,8	

2. При изготовлении алюминиевых проводов, в некоторых местах их, вполне возможно получение материала чрезвычайно твердым, а следовательно, и хрупким. Понятно, что это обстоятельство является весьма опасным только для одножильных проводов, так как у многожильных совершенно невероятным является попадание дефектных мест всех проволок на один и тот же участок провода.

Как видно из табл. II, в алюминиевых проводах при коэффициенте запаса прочности 2, напряженне, при самых неблагоприятных атмосферных условиях, можно доводить только до 9 kg/mm².

Одним из существенных недостатков алюминия является его мягкость, вследствие чего он легко подвергается механическим повреждениям. Так как сопротивление алюминиевой проволоки зависит в сильной степени от наружного уплотненного слоя металла, то приходится особенно тщательно следить, чтобы он не оказался поврежденным при перевозке и монтаже проводов.

Действию переменных атмосферных условий алюминий противостоит так же хорошо, как и медь, ибо он покрывается слоем окисла, защищающим его от дальнейшего вредного влияния внешних факторов. Одно время считали, что алюминиевые провода плохо держатся вблизи морей вследствие того, что будто бы содержащаяся в воздухе соль действует на них разъедающе. Однако, за последнее время этот взгляд совершенно оставлен, так как эксплуатация линий передач с алюминиевыми проводами, проходящих по берегам морей, показала, что опасения подобного рода ни на чем не основаны.

Химические агенты воздуха, как например, газы химических заводов, обычно разъедают алюминий, и потому в таких местах строить линии передачи с алюминиевыми проводами не рекомендуется.

Алюминий, идущий на изготовление проводов, должен быть очень чистым, т. е. не содержать примесей никаких других металлов. Иначе (например, при присутствии только следов меди) алюминиевые провода сравнительно быстро разрушаются, несмотря даже на слой окисла, образующийся на их поверхности. На основании только что указанных соображений, клеммы и вся арматура линий передачи, имеющая соприкосновение с алюминиевыми проводами, должна быть выполнена также из очень чистого алюминия.

Цены на алюминиевые провода обычно регулируются таким образом, что стоимость эксплуатации линий передачи с алюминиевыми и медными проводами получается одна и та же.

Бронза. При пересечении рек, долин и т. п., т. е. когда расстояние между опорами определяется только чисто местными условиями, приходится иногда делать чрезвычайно большие пролеты (500—1000 м и выше). Значительное расстояние между опорами требует подвески проводов с большой стрелой провеса и потому влечет за собой необходимость устройства высоких и, следовательно, дорогих опор. Для уменьшения стрел провеса в таких случаях, а вместе с этим и удешевления опор, применяют провода из материала с большим временным сопротивлением на разрыв, чем медь или алюминий, допускающего, следовательно, большие натяжения по ним. Одним из таких материалов и является бронза, обладающая, с одной стороны, большим временным сопротивлением на разрыв, а с другой — имеющая сравнительно хорошую проводимость.

Бронза представляет из себя сплав меди с оловом, в который иногда прибавляется еще незначительное количество фосфора, кремния и т. д.

В зависимости от состава бронзы, меняются ее механические и электрические свойства, причем уменьшение количества меди ведет к увеличению временного сопротивления бронзы на разрыв и понижению электрической проводимости ее.

Данные, характеризующие бронзовые проволоки, из которых скручиваются многожильные провода, приведены в табл. III.

Необходимо отметить, что для величин временного сопротивления, модуля упругости и коэффициента растяжения кабеля применимо и здесь все сказанное в примечании к табл. I.

Бронзовые провода всегда выполняются многожильными.

Условию стойкости против влияния атмосферных условий бронза удовлетворяет так же хорошо, как и медь.

Ввиду того, что бронза употребляется в исключительных случаях на отдельных участках линии электропередачи, то требование наименьшей стоимости эксплуатации приходится применять в таких случаях

ТАБЛИЦА III.

№№ по порядку	Свойства материала.	1	2	3	Примечание
1	Удельный вес	8,95	8,94	8,92	Данные в столбцах 1, 2 и 3 относятся к различным составам бронзы.
2	Временное сопротивление на разрыв (kg/mm ²)	46	60 ÷ 70	75 ÷ 80	
3	Предел пропорциональности (упругости) (kg/mm ²)	30	35 ÷ 40	45	
4	Модуль упругости E (kg/mm ²)	12 000	12 000	12 000	
5	Коэффициент растяжения $\beta = 1: E$ (mm ² /kg)	$0,835 \cdot 10^{-4}$	$0,835 \cdot 10^{-4}$	$0,835 \cdot 10^{-4}$	
6	Температурный коэффициент линейного расширения α	$18 \cdot 10^{-6}$	$18 \cdot 10^{-6}$	$18 \cdot 10^{-6}$	
7	Удлинение при разрыве φ (‰)	1,5	1,5 ÷ 1,0	1,0	
8	Удельная проводимость при 15°C ($\frac{m}{\Omega \cdot mm^2}$)	56,4	35,4	17,7	

только к этим участкам, рассматривая их отдельно от остальной линии передачи.

Железо и сталь. Железо и сталь в качестве материала для проводов употребляются в настоящее время только в исключительных условиях, а именно:

- 1) железные провода — для передачи на сравнительно большие расстояния малых количеств энергии (сельская электрификация);
- 2) стальные провода — при выполнении очень больших пролетов, когда применение даже бронзовых проводов с их временным сопротивлением на разрыв порядка 70 kg/mm² дает слишком большие стрелы провеса; в таких случаях берут сталь, имеющую временное сопротивление около 100 ÷ 120 kg/mm².

Главной причиной, препятствующей применению железных и стальных проводов, является их низкая проводимость. Кроме того, при проводах из этих металлов значительно повышается самоиндукция линии передачи, причем это особенно сильно сказывается при проводах из мягкого железа.

Для заземленных троссов, которые в большинстве случаев не должны обладать высокой электрической проводимостью, в настоящее время применяется почти исключительно сталь, так как троссы из этого металла, имея большую механическую прочность, являются наиболее дешевыми, сравнительно с кабелями из какого-либо другого металла.

Основные свойства железа и стали даны в табл. IV.

Т А Б Л И Ц А IV.

№№ по порядку	Свойства материала.	Железо твёрдо- тянутое	Сталь	Литая сталь	Специаль- ная сталь
1	Удельный вес	7,9	7,95	7,95	7,95
2	Временное сопротивление на разрыв (kg/mm ²)	62	70	90	130
3	Предел пропорциональности (упру- гости) (kg/mm ²)	42	50	70	110
4	Модуль упругости E (kg/mm ²) . .	20 000	20 000	21 000	21 500
5	Коэффициент растяжения $\beta = 1 : E$ (mm ² /kg)	$0,5 \cdot 10^{-4}$	$0,5 \cdot 10^{-4}$	$0,48 \cdot 10^{-4}$	$0,47 \cdot 10^{-4}$
6	Температурный коэффициент линей- ного расширения α	$12,3 \cdot 10^{-6}$	$12,3 \cdot 10^{-6}$	$12,3 \cdot 10^{-6}$	$12,3 \cdot 10^{-6}$
7	Удлинение при разрыве φ (%) . .	2 ÷ 5	2 ÷ 5	2 ÷ 5	2 ÷ 5
8	Удельная проводимость при 15°C ($\frac{m}{\Omega \cdot mm^2}$)	7,25	6,25	5,7	4,9

Цифры табл. IV относятся к отдельным проволокам, и потому временное сопротивление для кабелей будет отличаться от табличного значения процентов на 10 ÷ 15.

Существенным недостатком железных и стальных проводов является то, что они поддаются действию атмосферных условий — ржавеют. Во избежание этого, провода и троссы в настоящее время изготавливаются только из оцинкованных проволок, где наружный слой цинка и является предохраняющим от ржавчины. Из сказанного ясно, какое большое значение имеет хорошая оцинковка провода и потому к ней должны всегда предъявляться строгие требования. Главнейшим из них является недопустимость появления трещин в слое цинка и откалывания его при перегибе провода. Проба прочности оцинковки производится обычно путем навивания проволоки на цилиндр с диаметром, равным десятикратному диаметру проволоки, причем проволока должна сильно натягиваться и каждый виток ее плотно прилегать к предыдущему. При этой пробе оцинковка не должна давать трещин.

В отношении наименьшей стоимости эксплуатации линии железные провода удовлетворяют только при передаче небольшой мощности на сравнительно большие расстояния. Это положение вытекает из тех соображений, что при передаче энергии с малыми плотностями тока (A/mm²) слагающая в стоимости эксплуатации линии, зависящая от первоначальных затрат, значительно превосходит слагающую, обусловленную потерями энергии в линии.

Сталь-алюминий. Алюминиевые провода, допускающие сравнительно небольшие натяжения по ним, требуют больших стрел провеса и,

следовательно, высоких опор, что особенно сильно сказывается при больших пролетах, делая при этом применение алюминиевых проводов невыгодным. Последнее замечание относится не только к исключительно большим пролетам, но также и к пролетам, обычно применяемым на линиях с напряжением 100 kV и выше. Указанное обстоятельство вызвало стремление повысить механическую прочность алюминиевых проводов и привело к изготовлению их со стальными сердечниками. При этом стальной сердечник выполняется из оцинкованных стальных проволок, имеющих временное сопротивление на разрыв около $70-120 \text{ kg/mm}^2$, и служит для восприятия большей части механических усилий. Алюминиевые же проволоки, покрывающие сердечник, обычно двумя слоями, играют роль, главным образом, токопроводящей части.

Таким образом, механическая прочность всего комбинированного провода в значительной мере определяется прочностью его сердечника и является значительно большей, чем прочность обыкновенного алюминиевого провода.

Соотношение между сечениями обоих металлов выбирается таким образом, чтобы, с одной стороны, не могла получиться, как увидим далее, механическая перегрузка одного из них при изменении натяжения по проводу и, с другой стороны, чтобы стальная сердцевина была совершенно покрыта алюминиевыми проволоками. Наиболее выгодными значениями отношения сечений алюминиевой части к стальной являются значения, лежащие около 5.

Для сталь-алюминиевых проводов дать характеризующие их основные свойства величины, как это было сделано для проводов из одного металла, не представляется возможным, так как они всецело зависят от соотношения между сечениями составных частей. Методы определения модуля упругости, коэффициента растяжения и температурного коэффициента линейного расширения для комбинированных проводов будут даны в главе III.

Сталь-медь. Стремление сочетать высокую проводимость меди с большей механической прочностью стали заставило искать конструкцию комбинированного провода, состоящего из этих двух металлов. Однако, долгое время эти попытки не достигали желаемых результатов, так как не удавалось достаточно прочно связать медную оболочку со стальной сердцевиной. И только в последнее время Монноту удалось получить комбинированные провода из стали и меди, путем сваривания этих двух металлов.

Полученные по способу Моннота биметаллические провода дали на практике весьма хорошие результаты в том смысле, что расслоения между медной оболочкой провода и стальной сердцевиной совершенно не замечалось. Соотношение между количеством меди и стали может колебаться в проводах Моннота в широких пределах, а именно, от 1:1 до 9:1. Это дает возможность выполнять их близко подходящими по своим электрическим и механическим свойствам или к чисто медным проводам или к стальным троссам.

Данные, характеризующие важнейшие свойства проводов Моннота, приведены в табл. V.

ТАБЛИЦА V.

1. Удельный вес	8,45	8,3
2. Временное сопротивление на разрыв (kg/mm ²)	58	90
3. Модуль упругости (kg/mm ²)	19 000	21 000
4. Коэффициент растяжения (mm ² /kg)	0,525 · 10 ⁻⁴	0,475 · 10 ⁻⁴
5. Температурный коэффициент линейного расширения	12 · 10 ⁻⁶	12 · 10 ⁻⁶
6. Удельная проводимость при 15°C ($\frac{m}{\Omega \cdot mm^2}$)	29	21

В отношении сопротивляемости влиянию атмосферных условий провода Моннота являются такими же стойкими, как и медные провода, ибо наружная оболочка их состоит из чистой меди.

Эти биметаллические провода, сочетавшие в себе высокую проводимость с большой механической прочностью, получают наибольшее распространение на линиях передачи с сравнительно большой протяженностью и при незначительных нагрузках, т. е. в тех же самых условиях, что и железные провода. Объяснение этого положения лежит, с одной стороны, в меньшей стоимости биметаллических проводов по сравнению с медными, а с другой, в их значительно большей проводимости, сравнительно с проводами железными.

Добавочные сведения о проводах линий передач. Приведенные выше данные о проводах линий электропередач характеризовали их с точки зрения физических и механических свойств. Но для расчета линий передачи необходимы также данные, характеризующие размеры проводов, как-то: диаметр их, вес и т. д. Поэтому ниже приведено несколько таблиц, из которых и могут быть получены все эти величины.

Данные для нормальных сечений медных и алюминиевых проводов сведены в табл. VI. Цифры этой таблицы понятны сами собой и не нуждаются в пояснении, за исключением графы „Конструкция провода“. В этой графе приведены данные относительно числа и диаметра отдельных проволок, составляющих многожильный провод.

Для бронзовых, железных и стальных проводов, как употребляющихся сравнительно редко, твердо установленных нормальных сечений не имеется, но обычно они выполняются приблизительно тех же сечений и той же конструкции, что и медные провода.

Сталь-алюминиевые провода не имеют нормальных сечений и изготовляются заводами обычно по особым заказам. Данные относительно некоторых сталь-алюминиевых проводов приведены в табл. VII.

ТАБЛИЦА VI.

Сечение про- вода	Конструкция провода		Внешний диа- метр провода	Вес 1000 м провода		Примечания
	Число про- волоки	Диаметр каждой про- волоки		Медь	Алюминий	
6	1	2,75	2,75	53	—	Одножильные провода
10	1	3,55	3,55	89	—	
16	1	4,5	4,5	142	—	
10	7	1,35	4,05	89,2	—	
16	7	1,71	5,15	142,7	—	
25	7	2,14	6,40	223	67,5	
35	7	2,53	7,55	312,2	95,2	
50	19	1,83	9,15	446	136	
70	19	2,17	10,9	624,4	195	
95	19	2,53	12,6	847,4	257	
120	19	2,84	14,2	1070,4	324	
150	19	3,17	15,9	1335	406	
185	37	2,5	17,5	1650	500	
240	37	2,8	19,6	2140,8	648	
240	61	2,25	20,3	2140,8	648	
300	61	2,5	22,5	2676	810	

ТАБЛИЦА VII.

№ сечения 1)	Стальная часть				Алюминиевая часть				Комбинированный провод			Отношение се- чения алюми- ниевой части к стальной
	Проволоки		Кабель		Проволоки		Кабель		Сечение	Диаметр	Вес 1000 м	
	Число	Диаметр	Диаметр	Сечение	Число	Диаметр	Число сл.	Сечение				
		mm	mm	mm ²		mm		mm ²	mm ²	mm	kg	
35	7	1,40	4,25	10,8	26	1,75	2	62,5	73,3	11,3	238÷286	5,74
50	7	1,65	4,95	15,0	26	2,10	2	90,1	105,1	13,5	341÷404	5,91
70	7	1,95	5,85	20,9	26	2,45	2	122,6	143,5	15,8	474÷550	5,78
95	7	2,25	6,75	27,8	26	2,85	2	165,9	193,7	18,3	644÷730	5,88
120	7	2,55	7,65	35,8	26	3,20	2	209,1	244,9	20,6	816÷930	5,78
150	7	2,85	8,55	44,6	26	3,60	2	264,7	309,3	23,1	1034÷1165	5,87
185	7	3,20	9,60	56,2	26	4,00	2	326,7	382,9	25,7	1293÷1440	5,75
240	19	2,15	10,75	68,9	26	4,55	2	422,8	491,7	29,1	1634÷1845	6,10

1) Цифра, обозначающая номер сечения кабеля, дает эквивалентное по проводимости сечение медного кабеля, причем проводимостью стальной части комбинированного провода пренебрегают.

В Америке для проводов линий передачи принят не метрический сортament, как в Европе, а сортament В. & S. (Броун и Шарп), данные о котором приведены в табл. VIII. Как видно из этой таблицы, единицей площади поперечного сечения в сортamente В. & S. является 1 circ. mils., равная примерно 1 : 2000 mm² и представляющая площадь круга с диаметром, равным одной тысячной дюйма.

ТАБЛИЦА VIII.

Номер по сортamentу В. & S.	Сечение провода		Внешний диаметр кабеля	Вес 1000 м провода	
				медного	алюминиевого
	circ. mils.	mm ²		mm ²	kg
600 000	600 000	304	22,6	2745	822
500 000	500 000	253,5	20,6	2280	684
450 000	450 000	228	19,6	2055	615
400 000	400 000	203	18,5	1830	547
350 000	350 000	177,5	17,3	1590	479
300 000	300 000	152	16,0	1375	410
250 000	250 000	126,7	14,7	1143	342
40	211 600	107,3	13,5	921	289
30	167 800	85,2	12,0	768	230
20	133 100	67,2	10,7	610	182
0	105 600	53,6	9,4	480	144
1	83 700	42,5	8,4	379	115
2	66 400	33,6	7,4	284	91
3	52 600	26,6	6,6	239	72
4	41 700	21,1	5,8	190	57
5	33 090	16,8	5,26	152	45,6
6	26 250	13,3	4,65	119	35,5

ГЛАВА II.

Нагрузки проводов и троссов линий передач.

§ 1. Общие положения.

Всякий провод или тросс, подвешенный между двумя точками, подвергается действию различных внешних факторов (собственный вес, ветер и т. д.), представляющих (с точки зрения механического расчета) нагрузки, вызывающие изменение натяжения по проводам¹⁾. При этом в расчете проводов и троссов всегда принимается, что нагрузка на них распределена равномерно вдоль всей их длины.

Для производства всех расчетов наиболее удобной формой выражения нагрузок на провода являются так называемые удельные нагрузки, т. е. нагрузки, отнесенные к единице длины (1 м) и к единице площади поперечного сечения (1 мм²) провода.

§ 2. Нагрузки на провода и троссы.

Собственный вес. Удельная нагрузка на провод от собственного веса его, зависящая только от материала провода, легко может быть подсчитана, как вес стержня, имеющего длину, равную 1 м при поперечном сечении в 1 мм², и выполненного из того же материала, что и провод.

Средние значения удельных нагрузок от собственного веса, которые в дальнейшем будут обозначаться через γ_1 , для важнейших материалов даны в табл. IX.

ТАБЛИЦА IX.

Материал проводов	Удельная нагрузка γ_1 кг/м·мм ²
Медь	0,0089
Бронза	0,0089
Алюминий	0,0027
Железо	0,0079
Сталь	0,0079

¹⁾ Колебания температуры окружающего воздуха, хотя и влияющие на натяжения по проводам, не могут быть отнесены к нагрузкам на провода, и потому в настоящей главе не рассматриваются. Этот вопрос будет освещен в следующей главе III.

Для комбинированного провода, т. е. состоящего из двух металлов, удельная нагрузка от собственного веса может быть подсчитана следующим образом.

Обозначим удельную нагрузку от собственного веса и поперечное сечение токопроводящего металла через γ_1' и q' , а те же величины для стального сердечника — через γ_1'' и q'' . Называя далее искомую удельную нагрузку для всего провода через γ_1 и полное сечение его через q , можем написать:

$$\gamma_1 q = \gamma_1' q' + \gamma_1'' q'' \quad (1)$$

Из этого соотношения и определится величина удельной нагрузки от собственного веса для всего комбинированного провода:

$$\gamma_1 = \frac{\gamma_1' q' + \gamma_1'' q''}{q} = \frac{\gamma_1' q' + \gamma_1'' q''}{q' + q''} \text{ kg/m} \cdot \text{mm}^2. \quad (2)$$

Все величины, входящие в формулу (2), являются для данного комбинированного провода известными, и потому определение γ_1 не составит никакого труда.

При определении удельной нагрузки от собственного веса для изолированных проводов, употребляющихся иногда в сетях низкого напряжения, необходимо учитывать и вес изоляции их. Последняя величина зависит, как известно, от качества изоляции провода и потому в таких случаях приходится брать общий вес провода из специальных каталогов и относить его для получения величины удельной нагрузки к единице сечения меди.

Давление ветра. Провода и троссы линий электропередач, подвешенные на открытом воздухе, подвергаются действию ветра, которое выражается в том, что они получают некоторую добавочную нагрузку, увеличивающую по ним натяжение. Ввиду важности вопроса, для расчета линий передач и других инженерных сооружений, о величине давления ветра на различные поверхности, были произведены многочисленные исследования в этом направлении, результаты которых, однако, между собой не совсем совпадают.

Величина давления ветра на 1 м² поверхности, нормальной к направлению ветра, пропорциональна квадрату скорости ветра и может быть выражена формулой:

$$p = \alpha v^2, \quad (3)$$

где p — давление ветра в kg/m^2 ,

α — опытный коэффициент, зависящий от очертания поверхности, на которую давит ветер,

v — скорость ветра в m/sec .

Прежде чем перейти дальше, рассмотрим несколько подробнее величины, входящие в формулу (3).

Наибольшие расхождения при определении различными авторами давления ветра на поверхности, получаются при определении величины

коэффициента α . Этот коэффициент, как указывалось уже выше, зависит от очертания поверхности и имеет, согласно данных различных исследователей, значения, приведенные в табл. X.

ТАБЛИЦА X.

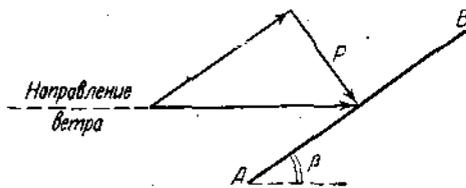
Фамилии исследователей или наименования учреждений	Коэффициент α		
	для плоских поверхностей	для цилиндрических по- верхностей	
		с диаметром менее 100 мм	с диаметром более 100 мм
Marvin	0,1	—	—
Longley	0,088	—	—
Smeaton	0,122	—	—
Buck	0,122	0,061	—
Грасгоф	0,122	—	—
Центральный Аэро-Гид- родинамический Ин- ститут в Москве . .	0,08	0,068	0,046
Согласно Союзных Норм для механического расчета линий элект- ропередач	0,09	0,06	0,06

Как видно из этой таблицы величина α колеблется в довольно значительных пределах.

Полное давление ветра на опоры, провода и троссы, согласно Союзных Норм, определяется следующей формулой:

$$P = \alpha v^2 F' \text{ kg}, \quad (4)$$

где α и v обозначают то же, что и в уравнении (3), а F' представляет из себя проекцию подверженной действию ветра площади в кв. метрах на плоскость, нормальную к направлению ветра.



Фиг. 2.

Таким образом, если имеется поверхность AB с площадью F , наклоненная под углом β к направлению ветра (фиг. 2), то да-

вление на нее может быть определено так:

$$P = \alpha v^2 F \sin \beta \text{ kg}. \quad (5)$$

Необходимо, однако, отметить, что с этим положением согласны не все исследователи, как например, Ньютон, который для определения величины P предлагает следующую формулу:

$$P = \alpha v^2 F \sin^2 \beta \text{ kg}. \quad (6)$$

Последняя формула теоретически является более обоснованной.

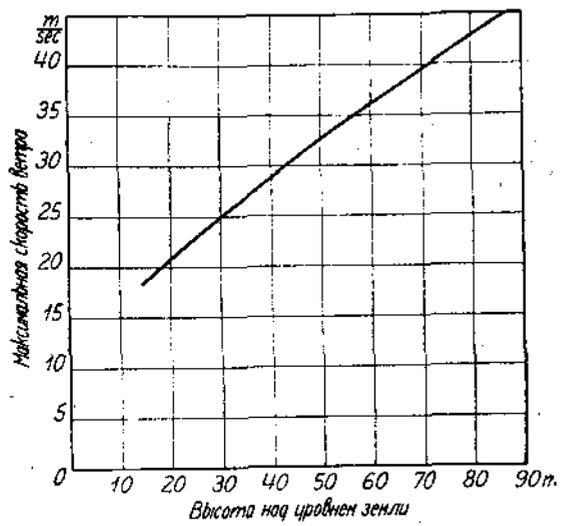
Если теперь, воспользовавшись уравнениями (5) и (6), определить при помощи интегрирования давление ветра на цилиндрические поверхности, то получим, что коэффициент для перехода от давления ветра на плоскую поверхность к давлению ветра на цилиндрическую поверхность будет равен:

соответственно уравнению (5) $\alpha' = 0,78,$
 " " " (6) $\alpha' = 0,66.$

Как видно из приведенного, коэффициенты α для цилиндров (см. табл. X), полученные опытным путем, близко подходят к величине того же самого коэффициента, определенного умножением α для плоских поверхностей (табл. X) на величины α' , подсчитанные по формулам (5) и (6).

В отношении скорости ветра, входящей в формулу для определения давления ветра, дать какие-либо определенные значения не представляется возможным. Эта скорость зависит исключительно от местных условий; так, например, в центральной полосе РСФСР максимальная скорость чрезвычайно редко достигает 20 м/сек, в то время как в районе Новороссийска скорость ветра доходит до 40 м/сек и выше¹⁾.

Необходимо обратить внимание на то обстоятельство, что для скоростей ветра, входящих в формулу (3), нужно брать не скорости отдельных струй ветра, которые достигают иногда чрезвычайно больших величин, а некоторую среднюю скорость за данный момент на сравнительно большую поверхность. Последнее объясняется тем, что давление ветра на провода и тросы линий передач воспринимается ими, подвешенными на большом протяжении. Если же в формулу (3) вставлять максимальную скорость отдельных струй ветра, то конструкция линии передачи получится излишне тяжелой и дорогой.



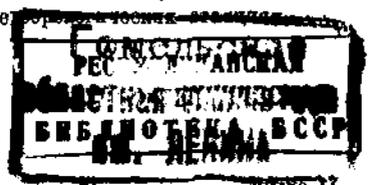
Фиг. 3.

Кроме указанного, на выбор расчетной скорости ветра влияет высота подвески провода над уровнем земли (высота опоры), так как у поверхности земли скорость ветра меньше, чем в верхних слоях атмосферы. Чрез-

02874 47820
89764
19269
98811

1) Сведения о скорости ветра для различных местностей можно получить в Главной Геофизической Обсерватории в Ленинграде и на местных метеорологических станциях.

2 Линии электропередачи.



вычайно интересную кривую зависимости скорости ветра от высоты над уровнем земли дал F. Fowle (Чикаго, С.-А. С. Ш.), которая и представлена на фиг. 3.

Из этой кривой ясно видно, что брать за расчетную одну и ту же скорость ветра для обычных линий передач, у которых провода и тросы подвешены на высоте 10—20 м и для специальных пролетов линий передач, где провода могут быть подвешены на высоте 50—100 м, нельзя. Обычно принимают, что те значения скорости ветра, которые получаются с Главной Геофизической Обсерватории или же от местных метеорологических станций, действительны для высот до 30 м над уровнем земли.

Согласно Союзных Норм для механического расчета линий электропередач, в случае когда не имеется данных о скорости ветра, следует принимать скорость ветра 20 м/сек, причем, однако, эта цифра не должна вводиться в расчеты для местностей, где заведомо можно ожидать более сильных ветров.

Имея уравнение (4) для определения давления ветра на различные поверхности, уже легко найти величину этого давления на провода, тросы и опоры.

При всех расчетах линий передач, за исключением особых случаев, о которых будет говориться в дальнейшем, принимается всегда, что ветер направлен горизонтально и перпендикулярно к линии электропередачи.

Таким образом, если имеется провод или трос с поперечным сечением q мм², диаметром d мм и длиной l м, то давление ветра на них может быть определено следующим образом:

$$P = \frac{\alpha v^2 d \cdot l}{1000} \text{ kg} \quad (7)$$

или, переходя к удельным нагрузкам, которые будем обозначать для ветра через γ_2 , имеем:

$$\gamma_2 = \frac{\alpha d \cdot v^2}{1000q} \text{ kg/m} \cdot \text{мм}^2. \quad (8)$$

Принимая далее давление ветра на 1 м² проекции поверхности провода или тросса

$$p = \alpha v^2 \text{ kg/m}^2,$$

получим, что удельная нагрузка от ветра выразится следующим образом:

$$\gamma_2 = \frac{p d}{1000q} \text{ kg/m} \cdot \text{мм}^2. \quad (9)$$

Необходимо обратить внимание, что при определении давления ветра на многожильные провода и тросы по формулам (8) и (9), для значений d нужно вставлять величину внешнего диаметра провода. При подсчетах давления ветра на обледенелые провода и тросы (см. далее „Гололед“) должно быть обязательно учтено увеличение диаметра их на двойную толщину стенки льда, покрывающего провод или трос. Следовательно, удельная нагрузка, которую обозначим через γ_3 , на провода

и троссы, покрытые слоем льда с толщиной стенки b мм, определяются следующей формулой:

$$\gamma_3 = \frac{p(d+2b)}{1000g} \text{ kg/m} \cdot \text{mm}^2. \quad (10)$$

Гололед и снег. При резком понижении температуры воздуха и при достаточной влажности его, провода и троссы линий передач покрываются слоем льда, который плотно облегает их. Только что указанное явление называется гололедом.

Кроме того, при снегопаде в сравнительно теплую погоду, провода и троссы могут быть облеплены снегом, причем в некоторых случаях количество его достигает большой величины. Оба эти явления, т. е. гололед и налипание снега, значительно утяжеляют работу проводов и троссов линий передач, так как добавочная нагрузка на них в виде веса льда или снега увеличивает их натяжение.

Необходимо отметить, что эти нагрузки для средних климатических условий СССР имеют сравнительно с нагрузками от других факторов (собственный вес и ветер) очень большую величину и потому, если они не будут приняты во внимание при расчете, провода или троссы при гололеде или налипании снега оборвутся и выведут линию передач из работы.

Как показывают многочисленные наблюдения над проводами и троссами электропередач, толщина слоя образующегося льда или прилипшего снега совершенно не зависит от материала проводов и троссов.

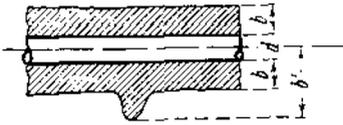
Толщина стенки льда, покрывающего провода и троссы при гололеде, не может быть дана, как нечто определенное, так как она зависит исключительно от местных условий.

Например, в центральном районе РСФСР явление гололеда наблюдается сравнительно редко, и толщина стенки льда, образующегося на проводах, не превосходит 10 мм, в то время как в Донбассе гололед представляет из себя обычное явление, и толщина стенок льда на проводах доходит до 30 мм и выше.

Исходя из только что сказанного, при расчете линии передачи всегда необходимо собрать на месте будущей постройки ее сведения об интенсивности, наблюдаемого в этом районе гололеда. К сожалению, необходимо отметить, что метеорологические станции СССР в большинстве случаев не ведут наблюдения над этим явлением; поэтому обычно приходится руководствоваться данными, собираемыми путем простого опроса местных жителей, а главное, сведениями, получаемыми от существующих в этом районе электрических станций и от Народных Комиссариатов Путей Сообщения и Почт и Телеграфов, имеющих долготлетние наблюдения над гололедом при эксплуатации своих телефонных и телеграфных линий. Однако, в случае получения сведений о гололеде из некомпетентных источников (местные жители), к ним следует всегда относиться крайне осторожно, так как иначе в расчет линий могут быть положены неправильные исходные величины. Как на наиболее часто

повторяющиеся ошибки при установлении расчетной толщины стенки гололеда, покрывающего провода или троссы, нужно указать следующие:

1) при запросе о максимальной толщине слоя льда, наблюдавшегося на проводах, дают сведения не о толщине стенки цилиндра, покрывающего их по всей длине, а сообщают размеры отдельных наиболее выступающих частей льда, т. е. дают размер b' (см. фиг. 4), а не b , который и является характерным;



Фиг. 4.

2) смешивают понятия о явлении гололеда с образованием инея, который иногда также имеет ледяную корку по поверхности. А между тем лед или иней, с точки зрения механического расчета проводов и троссов, представляют из себя различные нагрузки. И действительно, имея на проводах и троссах одну и ту же толщину стенки при льде или снеге, в отношении увеличения поверхности, на которую действует ветер, получим один и тот же эффект, а в отношении увеличения вертикальных нагрузок (вес), необходимо учесть то, что лед имеет удельный вес около 0,9, а налипший снег или иней — значительно меньший (для инея около 0,3).

По союзным нормам при расчете линий передач для районов, где не имеется наблюдений и где нельзя заведомо ожидать чрезвычайных гололедов, предлагается брать толщину стенки льда 10 мм. При этом считается, что гололед покрывает провода и троссы сплошным равномерным цилиндром, и что удельный вес льда равен 0,9.

Удельная нагрузка от льда, который представляет из себя пустотелый цилиндр, может быть определена по следующей формуле:

$$\gamma_4 = \frac{\pi [(d + 2b)^2 - d^2]}{4 \cdot 1000q} \cdot 0,9 = \frac{\pi b (d + b)}{1000q} \cdot 0,9 \text{ kg/m} \cdot \text{mm}^2, \quad (11)$$

где d — внешний диаметр провода в миллиметрах,

b — толщина слоя льда в миллиметрах,

q — поперечное сечение провода в кв. миллиметрах,

0,9 — удельный вес льда.

Суммарные нагрузки. Кроме указанных выше нагрузок, т. е. собственного веса, давления ветра и веса льда, для расчета проводов и троссов, согласно Союзных Норм, приходится определять еще следующие нагрузки.

1. Нагрузка от собственного веса и льда.

Так как эти обе силы действуют вертикально, то результирующая удельная нагрузка будет равна

$$\gamma_3 = \gamma_1 + \gamma_4 \text{ kg/m} \cdot \text{mm}^2. \quad (12)$$

2. Нагрузка от собственного веса и ветра, направленного нормально к линии передачи.

Силы, действующие в этом случае, будут перпендикулярны друг к другу, и равнодействующая их определится, следовательно, путем геометрического сложения и будет равна

$$\gamma_6 = \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2} \text{ kg/m} \cdot \text{mm}^2. \quad (13)$$

3. Нагрузка провода собственным весом, льдом и ветром.

Определение суммарной нагрузки в этом случае должно быть произведено также геометрически и может быть подсчитано по формуле:

$$\gamma_7 = \sqrt{\gamma_5^2 + \gamma_3^2} = \sqrt{(\gamma_1 + \gamma_2)^2 + \gamma_3^2} \text{ kg/m} \cdot \text{mm}^2. \quad (14)$$

Удельные нагрузки для средних атмосферных условий. Для удобства производства расчетов ниже приводится таблица значений удельных нагрузок для наиболее ходовых сечений медного многожильного провода (см. табл. XI), причем в качестве исходных данных при подсчете входящих в таблицу величин, были приняты средние атмосферные условия (по нормам для механического расчета линий передач), определяемые скоростью ветра 20 м/сек и толщиной стенки льда при гололеде 10 мм. Коэффициент α для цилиндрических поверхностей принят равным 0,06.

ТАБЛИЦА XI.

№№ по порядку	Удельные нагрузки								
	Сечение провода q	Диаметр провода d	от собственного веса провода γ_1	от ветра при отступлении гололеда γ_2	от ветра при гололеде γ_3	от веса льда при гололеде γ_4	от собственного веса провода и льда γ_5	от собственного веса и ветра при отступлении гололеда γ_6	от собственного веса, льда и ветра γ_7
			kg/m · mm ²	kg/m · mm ²	kg/m · mm ²	kg/m · mm ²	kg/m · mm ²	kg/m · mm ²	kg/m · mm ²
1	10	4,05	0,0089	0,0097	0,0580	0,0408	0,0497	0,0173	0,0764
2	16	5,15	0,0089	0,0076	0,0376	0,0265	0,0355	0,0118	0,0517
3	25	6,40	0,0089	0,0061	0,0254	0,0185	0,0274	0,0108	0,0374
4	35	7,55	0,0089	0,0052	0,0189	0,0141	0,0230	0,0103	0,0315
5	50	9,15	0,0089	0,0044	0,0140	0,0108	0,0197	0,0099	0,0242
6	70	10,90	0,0089	0,0037	0,0106	0,0084	0,0173	0,00966	0,0204
7	95	12,60	0,0089	0,0032	0,0082	0,0067	0,0156	0,0094	0,0176
8	120	14,20	0,0089	0,0028	0,0068	0,0057	0,0146	0,0093	0,0161
9	150	15,90	0,0089	0,0025	0,0057	0,0048	0,0137	0,00925	0,0168

Пример 1. Определить удельные нагрузки для комбинированного сталь-алюминиевого провода, эквивалентного по проводимости медному проводу сечением $q = 150 \text{ mm}^2$.

По табл. VII берем сечения составных частей комбинированного провода:

токоведущей части (алюминия)	$q' = 264,7 \text{ mm}^2$
стального сердечника	$q'' = 44,6 \text{ "}$
всего провода	$q = 309,3 \text{ "}$
внешний диаметр	$d = 23,1 \text{ mm.}$

1. Удельная нагрузка от собственного веса для комбинированного провода определяется по уравнению (2):

$$\gamma_1 = \frac{\gamma_1' q' + \gamma_1'' q''}{q' + q''},$$

где $\gamma_1' = 0,0027 \text{ kg/m} \cdot \text{mm}^2$ — удельная нагрузка от собственного веса для алюминия, $\gamma_1'' = 0,0079 \text{ kg/m} \cdot \text{mm}^2$ — удельная нагрузка от собственного веса для стали.

Подставив эти значения в уравнение (2), получим:

$$\gamma_1 = \frac{0,0027 \cdot 264,7 + 0,0079 \cdot 44,6}{309,3} = 0,00345 \text{ kg/m} \cdot \text{mm}^2.$$

2. Удельная нагрузка от ветра при отсутствии гололеда.

Принимая скорость ветра $v = 20 \text{ m/сек}$, согласно формулы (3) можем написать:

$$p = \alpha v^2 = 0,06 \cdot 20^2 = 24 \text{ kg/m}^2,$$

а удельная нагрузка будет:

$$\gamma_2 = \frac{p d}{1000q} = \frac{24 \cdot 23,1}{1000 \cdot 309,3} = 0,00179 \text{ kg/m} \cdot \text{mm}^2.$$

3. Удельная нагрузка от ветра при гололеде с толщиной стенки льда $b = 10 \text{ mm}$

$$\gamma_3 = \frac{p(d+2b)}{1000q} = \frac{24 \cdot (23,1 + 20)}{1000 \cdot 309,3} = 0,00335 \text{ kg/m} \cdot \text{mm}^2.$$

4. Удельная нагрузка от льда при той же толщине стенки его

$$\gamma_4 = \frac{\pi b(d+b) 0,9}{1000q} = \frac{3,14 \cdot 10 \cdot (23,1 + 10) \cdot 0,9}{1000 \cdot 309,3} = 0,00302 \text{ kg/m} \cdot \text{mm}^2.$$

5. Удельная нагрузка от собственного веса и гололеда

$$\gamma_5 = \gamma_1 + \gamma_4 = 0,00345 + 0,00302 = 0,00647 \text{ kg/m} \cdot \text{mm}^2.$$

6. Удельная нагрузка при отсутствии гололеда от собственного веса и ветра

$$\gamma_6 = \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2} = \sqrt{0,00345^2 + 0,00179^2} = 0,00389 \text{ kg/m} \cdot \text{mm}^2.$$

7. Удельная нагрузка от собственного веса, веса льда и ветра при гололеде:

$$\gamma_7 = \sqrt{\gamma_5^2 + \gamma_3^2} = \sqrt{0,00647^2 + 0,00335^2} = 0,00729 \text{ kg/m} \cdot \text{mm}^2.$$

ГЛАВА III.

Натяжения и стрелы провеса проводов при нормальных условиях работы линии электропередачи.

§ 1. Общие сведения.

При механическом расчете линии передачи одной из главных задач является определение стрел провеса проводов и натяжений, действующих по ним, так как обе эти величины решающе влияют на конструкцию линии передачи, определяя расстояние между опорами, высоту их и т. д. Поэтому составление всякого проекта механической части линии передачи и начинается с подсчетов, определяющих провес и натяжение проводов.

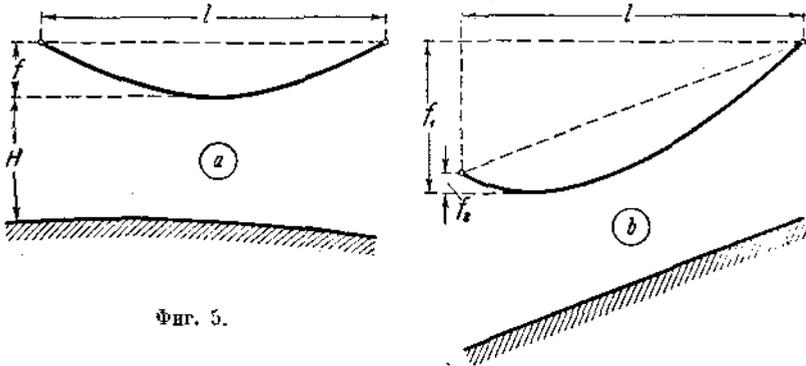
Прежде чем перейти к рассмотрению методов для определения этих величин, познакомимся с терминологией, применяемой в механическом расчете проводов.

Форма кривой. Идеально гибкая и равномерно нагруженная по своей длине нить, закрепленная между двумя точками подвеса, принимает форму цепной линии. Провода линий передач при сравнительно больших расстояниях между точками подвеса (50—300 м и, как исключение, до 1500 м и выше), при которых практически уничтожается влияние жесткости материала, удовлетворяют всем перечисленным условиям и поэтому образуемая ими кривая должна быть рассматриваема как цепная линия.

Пролет. Точки подвеса провода на изоляторах при всех расчетах, кроме некоторых случаев, оговоренных в дальнейшем особо, считаются неподвижными. Горизонтальное расстояние между точками подвеса провода или троса называется длиной пролета и будет в дальнейшем обозначаться буквой l (см. фиг. 5а и б). Для случая линии, идущей по горизонтальной местности и, следовательно, имеющей точки подвеса проводов на одинаковой высоте, длина пролета l будет равна расстоянию между опорами.

Стрела провеса. Выше было указано, что провод принимает форму цепной линии, а потому различные его точки неодинаково удалены от горизонтальной прямой, проходящей через точки подвеса провода. Верти-

кальное расстояние от этой прямой до наимизшей точки провода называется стрелой провеса f (см. фиг. 5а). Для случая линии, имеющей разные высоты точек подвеса провода, вводят понятие о стрелах провеса



Фиг. 5.

f_1 и f_2 относительно высшей и низшей точек подвеса; при этом стрелы провеса определяются как расстояние по вертикали от соответствующей точки подвеса до наимизшей точки провода (см. фиг. 5б).

Вертикальное расстояние H низшей точки провода от земли называется габаритом линии передачи. При заданном габарите величина стрелы провеса определяет высоту точки подвеса провода, а следовательно и высоту опоры.

Натяжение по проводам. Из свойств цепной линии вытекает, что каждое сечение провода подвергается действию усилия, направленного касательно к кривой провода в этом месте. Это усилие называется натяжением провода и будет обозначаться буквой S . Заметим, что величина этого натяжения неодинакова для всех сечений и зависит от местоположения их на проводе. Из дальнейшего увидим, что величины натяжений находятся в строгой зависимости от стрелы провеса, длины пролета и нагрузки провода. Для удобства расчета провода вводим величину натяжения, отнесенную к единице поперечного сечения (1 мм^2) и называемую напряжением провода. Обозначив это напряжение буквой σ и сечение провода q , будем иметь:

$$\sigma = \frac{S}{q}. \quad (15)$$

§ 2. Натяжения и стрелы провеса провода, имеющего точки подвеса на равной высоте, при неизменяющихся атмосферных условиях.

Цепная линия. Как указывалось уже выше, провод, подвешенный между двумя точками A и B и равномерно нагруженный по всей длине удельной нагрузкой γ , принимает форму цепной линии (фиг. 6), которая может быть выражена следующим уравнением:

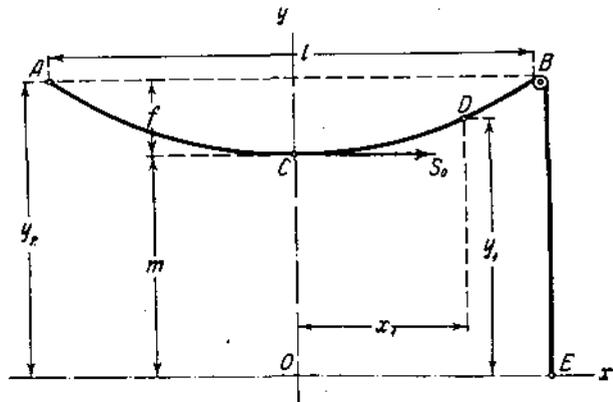
$$y = \frac{1}{2} m \left(e^{\frac{x}{m}} + e^{-\frac{x}{m}} \right), \quad (16)$$

где e — основание натуральных логарифмов,

m — расстояние нижней точки провода от оси Ox .

Заметим, что ось

Oy является осью симметрии цепной линии; положение же оси Ox определяется длиной отрезка провода BE с той же удельной нагрузкой γ , которую нужно было бы перекинуть через идеальный блок в точке B , чтобы уравновесить данную цепную линию.



Фиг. 6.

Раскладывая правую часть уравнения (16) в ряд, получим:

$$y = m + \frac{x^2}{1 \cdot 2 \cdot m} + \frac{x^4}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot m^3} + \dots \quad (17)$$

Длина провода, отсчитываемая от нижней точки C до какой-либо точки D с текущими координатами x_1 и y_1 , определится уравнением:

$$L_1 = x_1 + \frac{1}{1 \cdot 2 \cdot 3} \cdot \frac{x_1^3}{m^2} + \frac{1}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5} \cdot \frac{x_1^5}{m^4} + \dots \quad (18)$$

Параметр m , входящий в уравнения (16), (17) и (18), представляет отношение натяжения провода в нижней точке его C к внешней силе, действующей на единицу длины провода. Поэтому можно написать:

$$m = \frac{S_0}{\gamma q} = \frac{\sigma_0 q}{\gamma q} = \frac{\sigma_0}{\gamma}, \quad (19)$$

где S_0 — натяжение по проводу в нижней точке его,

γ — удельная нагрузка провода,

σ_0 — напряжение провода в нижней точке его,

q — сечение провода.

Подставляя m из формулы (19) в уравнения (17) и (18), получим:

$$y = \frac{\sigma_0}{\gamma} + \frac{x^2 \gamma}{1 \cdot 2 \cdot \sigma_0} + \frac{x^4 \gamma^3}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot \sigma_0^3} + \dots, \quad (20)$$

$$L_1 = x_1 + \frac{1}{1 \cdot 2 \cdot 3} \cdot \frac{x_1^3 \gamma^2}{\sigma_0^2} + \frac{1}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5} \cdot \frac{x_1^5 \gamma^4}{\sigma_0^4} + \dots \quad (21)$$

Определим теперь y_2 (фиг. 6) для точки подвеса провода B , подставляя в уравнение цепной линии вместо x длину полупролета $\frac{l}{2}$:

$$y_2 = \frac{\sigma_0}{\gamma} + \frac{l^2 \gamma}{1 \cdot 2 \cdot 4 \cdot \sigma_0} + \frac{l^4 \gamma^3}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 16 \cdot \sigma_0^3} + \dots \quad (22)$$

Из фиг. 6 имеем:

$$y_s = m + f = \frac{\sigma_0}{\gamma} + f.$$

Приравнявая это соотношение правой части уравнения (22), получим выражение для стрелы провеса:

$$f = \frac{l^2 \gamma}{8 \sigma_0} + \frac{l^4 \gamma^3}{384 \sigma_0^3} + \dots \quad (23)$$

Определим теперь длину провода в пролете между точками *A* и *B*, для чего вместо *x* подставим в уравнение (21) величину $\frac{l}{2}$ и все уравнение умножим на 2;

$$L = 2 \left[\frac{l}{2} + \frac{1}{1 \cdot 2 \cdot 3} \cdot \frac{l^3 \gamma^2}{8 \sigma_0^2} + \frac{1}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5} \cdot \frac{l^5 \gamma^4}{32 \sigma_0^4} + \dots \right]. \quad (24)$$

Как показывает исследование вопроса для обычно встречающихся на практике условий, когда пролет *l* во много раз больше стрелы провеса *f*, производство подсчетов стрел провеса и длины провода можно производить приближенно, оставляя в уравнении (23) один первый член, а в уравнении (24)—два первых члена.

Принимая это положение, будем иметь:
стрела провеса провода

$$f = \frac{l^2 \gamma}{8 \sigma_0}; \quad (25)$$

длина провода в пролете

$$L = l + \frac{l^3 \gamma^2}{24 \sigma_0^2} \quad (26)$$

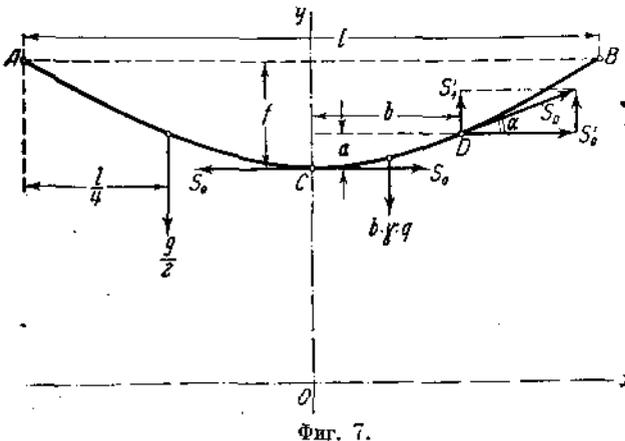
или, подставляя в уравнение (26) уравнение (25),

$$L = l + \frac{8}{3} \cdot \frac{f^2}{l}. \quad (27)$$

Уравнения (25) и (27) представляют из себя уравнения параболы, по которым и производится расчет натяжений и стрел провеса провода.

Парабола. Для более ясного представления картины действия сил в проводе, дадим вывод стрелы провеса *f* иным путем, исходя из положений механики, а не математики.

Предположим опять, что имеется некоторый



Фиг. 7.

провод со стрелой провеса f , натянутый между двумя точками A и B (фиг. 7).

Так как длина провода L в пролете весьма незначительно отличается от величины самого пролета l ($1 \rightarrow 3\%$), то можно с достаточной для практики точностью считать нагрузку на провод, отнесенную ко всей его длине L , пропорциональной не L , а l .

При этом допущении вся нагрузка провода между точками A и B будет равна

$$g = l\gamma q.$$

Рассмотрим теперь условие равновесия провода на длине AC , для чего предположим его разрезанным в точке C , и отброшенную половину CB заменяем приложенной в точке C силой S_0 , направленной в сторону точки B и представляющей горизонтальное натяжение по проводу.

Уравнение моментов относительно точки A напишется в следующем виде:

$$fS_0 = \frac{g}{2} \frac{l}{4} = \frac{gl}{8} \quad (28)$$

или, заменяя в уравнении (28) g через $l\gamma q$ и определяя f , будем иметь:

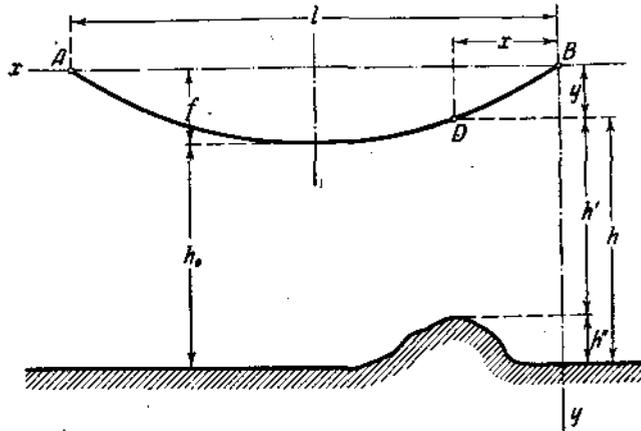
$$f = \frac{l\gamma q}{8S_0} = \frac{l^2\gamma q}{8\sigma_0 q} = \frac{l^2\gamma}{8\sigma_0}, \quad (25)$$

т. е. получаем уравнение параболы, для которой длина провода в пролете выражается формулой (27). Таким образом, двумя различными путями мы подошли к одним и тем же результатам.

В некоторых случаях (при прохождении линии по переменной местности) наименьшее расстояние провода от земли определяется не расстоянием от нее самой нижней точки провода, что имело бы место при идеально горизонтальной поверхности земли.

Поэтому уместно здесь привести выражение для определения расстояния любой точки провода от оси Ox . Это выражение, очевидно, будет являться уравнением параболы, отнесенным к координатным осям xu (фиг. 8), и потому может быть написано в следующем виде:

$$y = \frac{4fx}{l} \left(1 - \frac{x}{l} \right).$$



Фиг. 8.

Зная расстояние h_0 нижней точки провода от земли, получим расстояние h любой точки провода при идеально горизонтальной поверхности в таком виде:

$$h = h_0 + f - y.$$

Заметим, что величина h_0 обычно бывает заданной при проектировании линии передачи.

Введя поправку на профиль земной поверхности, можем получить действительное расстояние $h' = h - h''$ любой точки провода от земли и тем самым произвести проверку условия $h' \geq h_0$.

Натяжение по проводам. Определим теперь величину натяжения по проводу S_D в какой-либо его точке D (фиг. 7). Натяжение S_D , действующее по касательной в точке D , может быть рассмотрено как результирующее двух взаимно перпендикулярных сил S'_0 и S'_1 , параллельных координатным осям.

Рассматривая кусок провода CD вырезанным и заменяя отбрасываемую часть AC силой S_0 (направленной в сторону точки) A и DB — силами S'_0 и S'_1 , находим из условия равновесия куска CD значения для сил S'_0 и S'_1 (фиг. 7), а именно:

$$S'_0 = S_0 \quad \text{и} \quad S'_1 = byq$$

(здесь применено то же допущение, что нагрузка провода пропорциональна длине пролета l).

Кроме того, из силового треугольника может быть получено соотношение:

$$S_D = \frac{S'_0}{\cos \alpha} = \frac{S_0}{\cos \alpha}.$$

Зная составляющие S'_0 и S'_1 , можем найти и величину полного натяжения в точке D , которое будет равно

$$S_D = \sqrt{S'^2_0 + S'^2_1}. \quad (29)$$

Из последней формулы может быть получено следующее уравнение (вывода не приводим), равноценное в смысле точности с уравнением (29), а именно:

$$S_D = S_0 + ayq. \quad (30)$$

Применяя формулу (30) к точке A или B , получим

$$S_A = S_B = S_0 + fyq. \quad (31)$$

Очевидно, это и будут наибольшие натяжения, а потому сечения провода у точек подвеса являются теоретически наиболее опасными. Однако, так как второй член практически весьма мал, то весь расчет ведут по натяжению S_0 в нижней точке провода.

Таким образом, задавшись пролетом и натяжением провода, мы сможем по уравнениям (25) и (27) определить длину провода в пролете и стрелу провеса.

Комбинированные провода. При комбинированных проводах определение натяжения по проводам и стрел провеса может быть произведено по уравнению, подобному уравнению (25), но отнесенному ко всему сечению комбинированного провода, а именно:

$$= \frac{l^2 \gamma q_0}{8 S_0}, \quad (32)$$

где γ — удельная нагрузка для комбинированного провода,
 S_0 — натяжение по всему комбинированному проводу,
 q_0 — сечение всего комбинированного провода.

Необходимость относить уравнение для стрелы провеса ко всему сечению q_0 , а не к 1 mm^2 сечения, вызывается тем, что напряжение стального сердечника и электрически проводящей части не будут одинаковыми.

Рассмотрим теперь распределение этих напряжений между сердечником и проводящей частью. Очевидно, можно написать:

$$S_0 = S_1 + S_2, \quad (33)$$

где S_1 — натяжение по стальному сердечнику,
 S_2 — " по проводящей части провода.

Обозначим:

q_0 — сечение всего комбинированного провода,
 q_1 — " стального сердечника,
 q_2 — " проводящей части,
 E_0 — модуль упругости всего провода,
 E_1 — " " стали,
 E_2 — " " материала проводящей части,
 β_0 — коэффициент упругого удлинения всего провода,
 β_1 — " " " стали,
 β_2 — " " " проводящей части,
 λ — упругое удлинение комбинированного провода,
 σ_0 — условное напряжение во всем комбинированном проводе, равное отношению $S_0 : q_0$,
 σ_1 — напряжение в стальном сердечнике,
 σ_2 — " в материале проводящей части.

На основании законов механики можно написать:

$$\lambda = \sigma_0 \beta_0 = \sigma_1 \beta_1 = \sigma_2 \beta_2 \quad (34)$$

или

$$\lambda = \frac{\sigma_0}{E_0} = \frac{\sigma_1}{E_1} = \frac{\sigma_2}{E_2}. \quad (35)$$

Соединяя уравнения (34) и (35), получим:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{\beta_2}{\beta_1}, \quad (36)$$

т. е. напряжения материалов в комбинированном проводе распределяются пропорционально модулям упругости материалов его составных частей.

Заменяв S_0 через $\sigma_0 q_0$ и т. д., можем формулу (33) написать в следующем виде:

$$\sigma_0 q_0 = \sigma_1 q_1 + \sigma_2 q_2. \quad (37)$$

Принимая далее условно

$$q_0 = q_1 + q_2 = 1$$

и обозначая отношение

$$q_2 : q_1 = a,$$

после соответствующих преобразований будем иметь:

$$q_1 = \frac{1}{a+1}; \quad (38)$$

$$q_2 = \frac{a}{a+1}. \quad (39)$$

Подставляя далее уравнения (38) и (39) в формулу (37), получим:

$$\sigma_0 = \sigma_1 \frac{1}{a+1} + \sigma_2 \frac{a}{a+1} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 a}{a+1}. \quad (40)$$

Заменяя в формуле (40) σ_1 и σ_2 из уравнения (36), найдем:

$$\sigma_0 = \sigma_1 \frac{1}{a+1} + \frac{\sigma_1 E_2}{E_1} \cdot \frac{a}{a+1} = \frac{\sigma_1}{a+1} \cdot \left(1 + \frac{E_2}{E_1} a \right) = \sigma_1 \frac{1 + \frac{E_2}{E_1} a}{a+1} \quad (41)$$

и

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_2 E_1}{E_2} \cdot \frac{1}{a+1} + \sigma_2 \frac{a}{a+1} = \frac{\sigma_2}{a+1} \cdot \left(\frac{E_1}{E_2} + a \right) = \sigma_2 \frac{\frac{E_1}{E_2} + a}{a+1}. \quad (42)$$

Из соотношений (41) и (42) могут быть получены формулы для определения напряжения в материале составных частей комбинированного провода, а именно:

$$\sigma_1 = \sigma_0 \frac{a+1}{1 + \frac{E_2}{E_1} a} \quad (43)$$

и

$$\sigma_2 = \sigma_0 \frac{a+1}{\frac{E_1}{E_2} + a}. \quad (44)$$

Таким образом, при расчете комбинированного провода сначала определяют удельные нагрузки для него, относя их ко всей площади сечения q_0 , задаются величиной σ_0 , находят стрелу провеса провода по формуле (32) и распределение напряжений в материалах провода по уравнению (43) и (44).

Пример 2. Требуется определить стрелу провеса, натяжение, действующее по проводу, и длину его в пролете для многожильного медного провода с поперечным сечением $q = 70 \text{ mm}^2$.

Пролет $l = 175 \text{ м}$. Провод покрыт слоем льда с толщиной стенки $b = 10 \text{ мм}$; скорость ветра $v = 20 \text{ м/сек}$.

Допускаемое напряжение материала провода в нижней точке его $\sigma_0 = 18 \text{ кг/мм}^2$.

Удельная нагрузка провода для этих атмосферных условий приведена в табл. XI и равна

$$\gamma = \gamma_7 = 0,0204 \text{ кг/м} \cdot \text{мм}^2.$$

Подставляя указанные выше данные в формулы (25) и (27), получим:

стрела провеса

$$f = \frac{l^2 \gamma}{8 \sigma_0} = \frac{175^2 \cdot 0,0204}{8 \cdot 18} = 4,34 \text{ м};$$

длина провода

$$L = l + \frac{8}{3} \frac{f^2}{l} = 175 + \frac{8}{3} \cdot \frac{4,34^2}{175} = 175 + 0,286 = 175,286 \text{ м}.$$

Если пользоваться более точными формулами (23) и (24), то будем иметь:

$$f = \frac{l^2 \gamma}{8 \sigma_0} + \frac{l^3 \gamma^3}{384 \sigma_0^3} = 4,34 + \frac{175^3 \cdot 0,0204^3}{384 \cdot 18^3} = 4,3436 \text{ м},$$

$$L = l + \frac{l^3 \gamma^2}{24 \sigma_0^2} + \frac{l^5 \gamma^4}{1920 \sigma_0^4} = 175,286 + \frac{175^5 \cdot 0,0204^4}{1920 \cdot 18^4} = 175,286143 \text{ м}.$$

Полученные результаты показывают, что применение приближенных формул (25) и (27) вполне допустимо, так как разница в подсчетах по ним и более точным формулам никакого практического значения не имеет.

Напряжение по проводу в точке подвеса, определяемое по формуле (31), будет равно

$$\sigma_1 = \sigma_0 + f \gamma = 18 + 4,34 \cdot 0,0204 = 18,0885 \text{ кг/мм}^2.$$

Как видно из этого подсчета, натяжение в точках подвеса провода очень мало отличается от натяжения в нижней точке его, а потому практически все расчеты проводов ведутся по напряжению материала в нижней точке провода.

Пример 3. Наимизшая точка медного провода, разобранный в предыдущем примере, находится от поверхности земли на высоте $h_0 = 6 \text{ м}$. Требуется определить расстояние от земли до точки провода D , находящейся в 40 м от точки подвеса провода B (фиг. 8), если местное повышение почвы над горизонтальной поверхностью равно $h'' = 1,7 \text{ м}$.

Согласно приведенной в теории формуле, будем иметь:

$$y = \frac{4fx}{l} \left(1 - \frac{x}{l}\right) = \frac{4 \cdot 4,34 \cdot 40}{175} \left(1 - \frac{40}{175}\right) = 3,975 \cdot 0,772 = 3,06 \text{ м};$$

$$h = 6 + 4,34 - 3,06 = 7,28 \text{ м}.$$

Искомое расстояние провода до поверхности земли будет равно

$$h' = h - h'' = 7,28 - 1,7 = 5,58 \text{ м,}$$

т. е. меньше допустимого по нормам для проводов высокого напряжения.

Пример 4. Определить стрелу провеса и напряжения материалов комбинированного сталь-алюминиевого провода с сечением алюминия $q_2 = 264,7 \text{ мм}^2$ и сечением стали $q_1 = 44,6 \text{ мм}^2$.

Длина пролета $l = 175 \text{ м}$. Атмосферные условия: температура окружающего воздуха $t = -30^\circ \text{С}$, гололед и ветер отсутствуют.

Отношение сечения проводящей части алюминия q_2 к сечению стального сердечника q_1 , согласно табл. VII, равно:

$$a = 5,87^1).$$

Подберем отнесенное ко всему сечению натяжение провода σ_0 таким образом, чтобы напряжение σ_2 проводящей части было бы не более $7,93 \text{ кг/мм}^2$. Выбор этого значения σ_2 станет нам понятным из рассмотрения последующего примера.

Пользуясь уравнениями (43) и (44), получим:

$$\sigma_1 = \sigma_0 \frac{a + 1}{1 + \frac{E_2}{E_1} a} = \sigma_0 \frac{5,87 + 1}{1 + \frac{7000}{20000} \cdot 5,87} = 2,24 \sigma_0 \quad (\text{a})$$

и

$$\sigma_2 = \sigma_0 \frac{a + 1}{\frac{E_1}{E_2} + a} = \sigma_0 \frac{5,87 + 1}{\frac{20000}{7000} + 5,87} = 0,79 \sigma_0. \quad (\text{b})$$

Подставляя в уравнение (b) напряжение для алюминиевой части провода $\sigma_2 = 7,93 \text{ кг/мм}^2$, получим напряжение, отнесенное ко всему сечению провода:

$$\sigma_0 = \frac{7,93}{0,79} = 10,05 \text{ кг/мм}^2.$$

При этом значении σ_0 напряжение в стальном тросе будет

$$\sigma_1 = 2,24 \cdot \sigma_0 = 2,24 \cdot 10,05 = 21,5 \text{ кг/мм}^2.$$

Стрела провеса найдется по формуле (32):

$$f = \frac{l^2 \gamma q_0}{8 S_0} = \frac{l^2 \gamma}{8 \sigma_0} = \frac{175^2 \cdot 0,00345}{8 \cdot 10,5} = 1,31 \text{ м.}$$

($\gamma = 0,00345$ была найдена в примере главы II).

1) Величина a несколько отличается от отношения величин q_2 и q_1 , приведенных в условиях примера. При выполнении комбинированных проводов возможны колебания в величине сечений алюминия и стали, а потому взята цифра, помещенная в таблице, как некоторая средняя.

§ 3. Натяжения и стрелы провеса провода, имеющего точки подвеса на равной высоте, при изменении атмосферных условий.

Провода, состоящие из одного материала. В проводе, подвешенном между двумя точками и натянутом до некоторого определенного напряжения материала, под влиянием изменения внешних факторов, т. е. температуры окружающего воздуха и нагрузки от ветра, снега или льда, изменяется натяжение по проводу, а следовательно, и его стрела провеса. Определение нового натяжения, действующего по проводу в зависимости от переменных атмосферных условий, и составляет задачу настоящего параграфа.

Положим, что начальные условия, в которых находился провод, характеризуемые температурой t_1 °C и удельной нагрузкой γ_1 , изменились и стали соответственно: t_2 °C и γ_2 .

Введем, кроме принятых в предыдущем параграфе, еще следующие обозначения:

- σ_1 — напряжение материала провода при t_1 °C и γ_1 ,
- σ_2 — " " " " при t_2 °C и γ_2 ,
- α — температурный коэффициент линейного расширения,
- l_0 — длина ненагруженного провода при 0°С,
- l_1' — " " " " при t_1 °C,
- l_1 — " натянутого провода до напряжения материала σ_1 при t_1 °C.

Согласно основным положениям физики, можем написать следующую зависимость:

$$l' = l_0 (1 + \alpha t_1).$$

Если теперь провод ненатянутый и нагретый до температуры t_1 подвергнуть действию растягивающей силы $S_1 = \sigma_1 q$, то он, вследствие упругого удлинения, получит новое приращение длины, причем длина всего провода определится по формуле:

$$L_1 = l_1' (1 + \beta \sigma_1) = l_0 (1 + \alpha t_1) (1 + \beta \sigma_1). \quad (45)$$

Принимая далее, что длина провода L_1 при атмосферных условиях, характеризуемых температурой t_1 °C и нагрузкой γ_1 , соответствует пролету l , можем согласно уравнения (26) написать:

$$L_1 = l + \frac{l^3 \gamma_1^2}{24 \sigma_1^2}.$$

Подставляя это значение L_1 в уравнение (45), получим:

$$l + \frac{l^3 \gamma_1^2}{24 \sigma_1^2} = l_0 (1 + \alpha t_1) (1 + \beta \sigma_1) \quad (46)$$

или

$$l + \frac{l^3 \gamma_1^2}{24 \sigma_1^2} = L_0 + L_0 \alpha t_1 + L_0 \beta \sigma_1 + L_0 \alpha t_1 \beta \sigma_1.$$

Пренебрегая членом $L_0 \alpha t_1 \beta \sigma_1$, как малой величиной второго порядка (и α и β малы), и деля все уравнение на βL_0 , будем иметь:

$$\frac{l}{\beta L_0} + \frac{l^2 \gamma_1^2}{\beta L_0 24 \sigma_1^2} = \frac{L_0}{\beta L_0} + \frac{L_0 \alpha t_1}{\beta L_0} + \frac{L_0 \beta \sigma_1}{\beta L_0}. \quad (47)$$

Но так как длина провода L_0 для обычно применяемых на линиях передач пролетов мало отличается от длины пролета l , то можно принять, что $l = L_0$. Внося это допущение в уравнение (47) и преобразуя его, найдем:

$$\sigma_1 - \frac{l^2 \gamma_1^2}{24 \beta \sigma_1^2} = -\frac{\alpha t_1}{\beta}. \quad (48)$$

Повторяя те же самые рассуждения для других атмосферных условий, характеризуемых температурой $t_2^\circ\text{C}$ и удельной нагрузкой γ_2 , мы получим совершенно аналогичную формулу:

$$\sigma_2 - \frac{l^2 \gamma_2^2}{24 \beta \sigma_2^2} = -\frac{\alpha t_2}{\beta}. \quad (49)$$

Вычитая из уравнения (48) уравнение (49), будем иметь:

$$\sigma_1 - \frac{l^2 \gamma_1^2}{24 \beta \sigma_1^2} - \sigma_2 + \frac{l^2 \gamma_2^2}{24 \beta \sigma_2^2} = -\frac{\alpha t_1}{\beta} + \frac{\alpha t_2}{\beta}$$

или, произведя соответствующие преобразования, получим:

$$\sigma_1 - \frac{l^2 \gamma_1^2}{24 \beta \sigma_1^2} = \sigma_2 - \frac{l^2 \gamma_2^2}{24 \beta \sigma_2^2} - \frac{\alpha}{\beta} (t_1 - t_2). \quad (50)$$

Это уравнение дает возможность, зная напряжение σ_1 при некоторой нагрузке γ_1 и температуре t_1 , найти напряжение σ_2 , соответствующее другой нагрузке γ_2 и другой температуре t_2 . Зная же σ_2 и γ_2 , легко может быть найдена и стрела провеса провода для новых условий по формуле

$$f_2 = \frac{l^2 \gamma_2}{8 \sigma_2}.$$

Таким образом, задаваясь натяжением $q \sigma_1$ для каких-либо исходных условий, мы можем при помощи уравнения (50) найти натяжения для любых других атмосферных условий, при которых приходится работать проводу линии электропередачи.

Уравнение (50) представляет из себя кубическое уравнение относительно σ_2 , решение которого проще всего производится подбором значений для σ_2 , для чего уравнение (50) приводится к следующему виду:

$$\sigma_2 - \frac{A}{\sigma_2^2} = B.$$

Здесь A и B суть числовые коэффициенты, полученные подстановкой в уравнение (50) всех известных величин. Наиболее быстрый подбор значения σ_2 может быть произведен следующим образом: против вели-

чины A на счетной линейке устанавливается движок последней; задаваясь σ_2 , находим по таблице квадратов, имеющейся в любом справочнике, σ_2^2 ; затем делим A на σ_2^2 и, получив величину отношения $\frac{A}{\sigma_2^2}$, считаем ее из σ_2 и сравниваем с B .

Кроме указанного метода, многими авторами были предложены остроумные графические решения рассматриваемого кубического уравнения (см. Смуров, Фармаковский), которые, однако, как показал опыт автора настоящей книги, требуют значительно большего времени для определения величины σ_2 , чем изложенный выше метод подбора. Даже при составлении монтажных кривых¹⁾, когда для провода одного и того же сечения и пролета требуется произвести несколько вычислений (около 5), то и в этом случае решение подбором дает результаты более быстро, чем какой-либо графический метод.

Комбинированные провода. Уравнение (50) может быть применено для определения напряжения при изменении атмосферных условий и в случае комбинированных проводов. Для этого нужно вместо α и β подставить соответствующие величины, отнесенные ко всему проводу, а для σ брать условное напряжение для всего сечения комбинированного провода.

Выведем теперь значение для β , отнесенное ко всему проводу.

Так как удлинение всего провода равно удлинению стального сердечника и равно удлинению токопроводящей части, то (сохраняя принятые ранее обозначения) можем написать:

$$\frac{S_0}{q_0 E_0} = \frac{S_1}{q_1 E_1} = \frac{S_2}{q_2 E_2} \quad (51)$$

или

$$S_1 = \frac{S_0}{q_0 E_0} q_1 E_1; \quad (52)$$

$$S_2 = \frac{S_0}{q_0 E_0} q_2 E_2. \quad (53)$$

Сложив уравнения (52) и (53) и заметив, что

$$S_0 = S_1 + S_2,$$

получим:

$$q_0 E_0 = q_1 E_1 + q_2 E_2. \quad (54)$$

Обозначая, как и раньше (см. формулы (38) и (39)),

$$q_0 = 1,$$

¹⁾ Монтажными кривыми называются кривые, на которых дается зависимость натяжений по проводу и стрел провеса его от температуры окружающего воздуха, причем пределы колебания температуры берутся в соответствии с временем года, когда производится монтаж линии передачи.

$$q_1 = \frac{1}{a+1}, \quad (38)$$

$$q_2 = \frac{a}{a+1} \quad (39)$$

и вводя значения q_1 и q_2 в уравнение (54), найдем:

$$E_0 = \frac{E_1}{a+1} + \frac{E_2 a}{a+1} = \frac{1}{a+1} (E_1 + E_2 a).$$

Заменив E_0 через β_0 ($\beta_0 = \frac{1}{E_0}$), получим:

$$\beta_0 = \frac{a+1}{E_1 + aE_2}. \quad (55)$$

Уравнение (55) и дает возможность, зная отношение между поперечными сечениями проводящей части провода и стального сердечника и при известных модулях упругости материалов составных частей провода, найти коэффициент упругого удлинения для всего комбинированного провода.

Теперь перейдем к определению температурного коэффициента расширения для всего провода, исходя из следующих соображений.

У комбинированного провода температурный коэффициент расширения α_0 будет лежать между соответствующими коэффициентами стального сердечника α_1 и проводящей части α_2 . Ввиду того, что $\alpha_1 < \alpha_2$, то при всяком повышении температуры по сравнению с той, при которой был изготовлен комбинированный провод, материал стали будет испытывать добавочное растягивающее усилие, а материал проводящей части — добавочное сжимающее¹⁾. Из условий равновесия всего провода вытекает равенство растягивающего усилия для стали сжимающему усилию проводящей части, а потому можно будет написать:

$$P = (\alpha_0 - \alpha_1) (t - t_0) E_1 q_1 = (\alpha_2 - \alpha_0) (t - t_0) E_2 q_2, \quad (56)$$

где

P — добавочное усилие по стали или проводящей части провода,

t_0 — температура окружающего воздуха во время изготовления провода²⁾,

t — температура окружающего воздуха,

α_0 — температурный коэффициент расширения всего провода;

α_1 — то же для стали,

α_2 — то же для проводящей части провода.

¹⁾ При охлаждении провода будет обратное явление, т. е. сталь получит добавочное сжатие, а проводящая часть — растяжение.

²⁾ В расчетах обычно принимают $+15^\circ\text{C}$.

Решая уравнение (56) относительно α_0 и подставляя опять

$$\frac{q_2}{q_1} = a,$$

получим:

$$\alpha_0 = \frac{\alpha_1 E_1 + \alpha_2 E_2 a}{E_1 + E_2 a}. \quad (57)$$

Уравнение (57) дает возможность, зная E_1 , E_2 , α_1 и α_2 составных частей провода, найти температурный коэффициент расширения α_0 для всего провода.

Таким образом, найдя β_0 и α_0 для всего провода, можно перейти к определению условного напряжения в проводе σ при изменившихся температурных условиях, пользуясь уравнением (50) и поступая совершенно так же, как и для случая простого провода.

Пример 5. При температуре окружающего воздуха $t_1 = +40^\circ\text{C}$ и отсутствии добавочных нагрузок на провод найти натяжение и стрелу провеса для многожильного медного провода сечения $q = 70 \text{ mm}^2$, имеющего точки подвеса на равной высоте, если при температуре $t_2 = -5^\circ\text{C}$, ветре со скоростью $v = 20 \text{ m/sec}$ и слое льда на проводе с толщиной стенки $b = 10 \text{ mm}$ напряжение в нижней точке провода σ_2 равнялось 18 kg/mm^2 (см. пример 2; стр. 31). Длина пролета $l = 175 \text{ m}$.

По формуле (50) имеем:

$$\sigma_1 - \frac{l^2 \gamma_1^2}{24 \beta \sigma_1^2} = \sigma_2 - \frac{l^2 \gamma_2^2}{24 \beta \sigma_2^2} - \frac{\alpha}{\beta} (t_1 - t_2),$$

$$\sigma_1 - \frac{175^2 \cdot 0,0089^2}{24 \cdot 0,77 \cdot 10^{-4} \cdot \sigma_1^2} = 18 - \frac{175^2 \cdot 0,0204^2}{24 \cdot 0,77 \cdot 10^{-4} \cdot 18^2} - \frac{17 \cdot 10^{-6}}{0,77 \cdot 10^{-4}} \cdot [40 - (-5)]$$

или

$$\sigma_1 - \frac{1320}{\sigma_1^2} = -13,2.$$

Подбором находим

$$\sigma_1 = 7,90 \text{ kg/mm}^2,$$

по формуле (25) определяем стрелу провеса:

$$f = \frac{l^2 \gamma_1}{8 \sigma_1} = \frac{175^2 \cdot 0,0089}{8 \cdot 7,9} = 4,3 \text{ m}.$$

Пример 6. При температуре $t = -5^\circ\text{C}$, ветре со скоростью $v = 20 \text{ m/sec}$ и слое льда на проводе с толщиной стенки $b = 10 \text{ mm}$ найти натяжение и стрелу провеса для комбинированного сталь-алюминиевого провода с сечением алюминия $q_2 = 264,7 \text{ mm}^2$ и сечением стали $q_1 = 44,6 \text{ mm}^2$ (см. пример 4; стр. 32), если при температуре $t = -30^\circ\text{C}$ приведенное ко всему сечению комбинированного провода напряжение $\sigma_0 = 10,05 \text{ kg/mm}^2$. Пролет $l = 175 \text{ m}$. Точки подвеса провода лежат на одной горизонтали.

По формулам (55) и (57) находим:

$$\beta_0 = \frac{a+1}{E_1 + aE_2} = \frac{5,88+1}{20000 + 5,88 \cdot 7000} = 1,12 \cdot 10^{-4}$$

и

$$\alpha_0 = \frac{\alpha_1 E_1 + \alpha_2 E_2 a}{E_2 a + E_1} = \frac{125 \cdot 10^{-3} \cdot 20000 + 23 \cdot 10^{-6} \cdot 7000 \cdot 5,88}{7000 \cdot 5,88 + 20000} = 19,6 \cdot 10^{-6}$$

Подставляя полученные значения в уравнение (50), будем иметь:

$$\sigma_1 = \frac{175^2 \cdot 0,00729^2}{24 \cdot 1,12 \cdot 10^{-4} \sigma_1^2} = 10,05 \frac{175^2 \cdot 0,00345^2}{24 \cdot 1,12 \cdot 10^{-4} \cdot 10,05} = \frac{19,6 \cdot 10^{-6}}{1,12 \cdot 10^{-4}} \cdot 25;$$

$$\sigma_1 - \frac{605}{\sigma_1^2} = 4,32.$$

Подбором находим:

$$\sigma_1 = 10,18 \text{ kg/mm}^2.$$

Входящие в это уравнение $\gamma_1 = 0,00345$ и $\gamma_2 = 0,00729$ были определены в примере 1 (стр. 21).

Соответствующая стрела провеса будет:

$$f = \frac{l^2 \gamma_1}{8 \sigma_1} = \frac{175^2 \cdot 0,00729}{8 \cdot 10,18} = 2,74 \text{ м.}$$

§ 4. Критический пролет.

Общие положения. Наибольшее напряжение в проводе может наступить или при максимальной добавочной нагрузке от гололеда и ветра или при наиминзшей температуре данной местности, так как в последнем случае происходит наибольшее сокращение длины провода, что и вызывает увеличение натяжения по нему. Ввиду того, что максимальная добавочная нагрузка не совпадает по времени с наиминзшей температурой (по Союзным Нормам наибольшая нагрузка от гололеда и ветра считается имеющей место при температуре $t = -5^\circ\text{C}$), то, при механическом расчете проводов необходимо решить, какой же из этих двух факторов, т. е. максимальная нагрузка или наиминзшая температура, вызывает наибольшее натяжение по проводу, и по нему вести расчет его, задавшись допустимым напряжением материала.

Так называемый критический пролет и дает возможность решить задачу о нахождении наиболее неблагоприятных условий, в которых будут работать провода проектируемой линии передачи.

Критическим пролетом для данного сечения провода и для атмосферных условий данной местности (скорость ветра, толщина гололеда и наиминзшая температура) называется такой пролет, при котором максимальное напряжение материала провода будет наступать и при наиминзшей температуре и при наибольшей добавочной нагрузке провода.

Исходя из приведенного определения критического пролета, трудно дать и математическое выражение его.

Критический пролет для однородного провода. Сделаем это сначала для случая однородного провода, воспользовавшись уравнением (50) и придавая входящим в него величинам следующие значения:

$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_{\text{max}}$ — наибольшее допустимое напряжение материала провода, причем σ_1 отвечает наиминизшей температуре, а σ_2 — наибольшей нагрузке;

γ_1 — удельная нагрузка провода при наиминизшей температуре воздуха;

$\gamma_2 = \gamma_7$ — удельная нагрузка провода при наибольшей добавочной нагрузке;

t_1 — наиминизшая температура воздуха данной местности;

t_2 — температура воздуха, соответствующая наибольшей добавочной нагрузке.

После подстановки соответствующих величин уравнение (50) примет вид:

$$\sigma_{\text{max}} - \frac{l_k^2 \gamma_1^2}{24 \beta \sigma_{\text{max}}^2} = \sigma_{\text{max}} - \frac{l_k^2 \gamma_7^2}{24 \beta \sigma_{\text{max}}^2} - \frac{\alpha}{\beta} (t_1 - t_2)$$

или

$$l_k^2 \left(\frac{\gamma_7^2 - \gamma_1^2}{24 \beta \sigma_{\text{max}}^2} \right) = \frac{\alpha}{\beta} (t_2 - t_1),$$

откуда будем иметь:

$$l_k = \sigma_{\text{max}} \sqrt{\frac{24 \alpha (t_2 - t_1)}{\gamma_7^2 - \gamma_1^2}}. \quad (58)$$

Таким образом, критический пролет зависит от физических свойств материала провода σ_{max} и α и от атмосферных условий данной местности (t_1 , γ_1 , t_2 и γ_2) и может быть легко подсчитан. Сравнивая его с выбравшим пролетом, можно решить при каких атмосферных условиях наступит наибольшее напряжение в проводе; для этого руководствуемся следующим правилом.

Если действительный пролет меньше критического, то максимальное напряжение в проводе будет всегда при наиминизшей температуре; если же пролет больше критического, то наибольшее напряжение в проводе будет при добавочной нагрузке и $t = -5^\circ\text{C}$.

Для доказательства этого правила возьмем случай, когда действительный пролет больше, чем пролет критический. Очевидно, значения величин t_1 , t_2 , γ_1 , γ_7 и σ_{max} , как совершенно не зависящие от длины пролета, останутся те же, что и в формуле для критического пролета. Напряжения же в проводе при наиминизшей температуре (t_1) и при наибольшей добавочной нагрузке обозначим соответственно σ_t и σ_7 .

Введя эти обозначения в формулу (50), будем иметь:

$$\sigma_t - \frac{l_k^2 \gamma_1^2}{24 \beta \sigma_t^2} = \sigma_7 - \frac{l_k^2 \gamma_7^2}{24 \beta \sigma_7^2} - \frac{\alpha}{\beta} (t_1 - t_2)$$

1) Сечение провода косвенно влияет на l_k , так как при определенной толщине гололеда удельная нагрузка от него и от ветра изменяется с изменением диаметра провода.

или

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{l^2}{24\beta} \left(\frac{\gamma_1^2}{\sigma_1^2} - \frac{\gamma_2^2}{\sigma_2^2} \right) - \frac{\alpha}{\beta} (t_2 - t_1).$$

Заменяв член правой части $\alpha(t_2 - t_1)$ из формулы для критического пролета, найдем:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{l^2}{24\beta} \left(\frac{\gamma_1^2}{\sigma_1^2} - \frac{\gamma_2^2}{\sigma_2^2} \right) - \frac{l_k^2}{24\beta} \left(\frac{\gamma_1^2}{\sigma_{\text{нх}}^2} - \frac{\gamma_2^2}{\sigma_{\text{нх}}^2} \right).$$

Полученное соотношение для случая $l > l_k$ может иметь смысл только при $\sigma_1 > \sigma_2$.

Действительно, если бы мы предположили, что $\sigma_2 > \sigma_1$ (или, что то же, $\sigma_2 = \sigma_{\text{нх}}$), то левая часть равенства получила бы отрицательное значение, правая же часть его (как это видно из почленного сравнения) осталась бы величиной положительной, и поэтому существование всего уравнения было бы математически невозможно.

Для случая пролета меньше критического ($l < l_k$) совершенно аналогично можно доказать, что σ_2 будет больше σ_1 .

Таким образом, приведенное выше правило для определения наиболее тяжелых атмосферных условий при пролетах, отличных от критического, считаем доказанным и заметим, что оно и его доказательство сохраняют свою силу и для случая комбинированного провода.

Критический пролет для комбинированного провода. Выведенное уравнение (58) критического пролета для однородного провода не может быть применено к комбинированному проводу, так как наибольшее допустимое напряжение для всего провода не является постоянным, а зависит от температуры среды, окружающей провод во время работы его на линии передачи. Это положение основано на следующих соображениях.

Выше уже указывалось, что стальной сердечник и проводящая часть комбинированного провода вследствие разных температурных коэффициентов расширения будут испытывать напряжения даже и при отсутствии нагрузки, но при температуре воздуха, отличной от той, при которой провод изготовлялся. Эти добавочные напряжения могут быть определены из формулы (56) следующим образом.

Сила, с которой будет проводящая часть действовать на стальной сердечник, может быть написана при принятых ранее обозначениях в следующем виде:

$$P = (\alpha_0 - \alpha_1) (t - t_0) E_1 q_1,$$

а сила реакции стального сердечника на проводящую часть (равная первой) напишется так:

$$P = (\alpha_2 - \alpha_0) (t - t_0) E_2 q_2.$$

Деля оба эти уравнения соответственно на q_1 и q_2 найдем: добавочное напряжение стали сердечника

$$\sigma_1 = (\alpha_0 - \alpha_1) (t - t_0) E_1; \tag{59}$$

добавочное напряжение материала проводящей части

$$\sigma_2 = (\alpha_2 - \alpha_0) (t - t_0) E_2. \quad (60)$$

При этом отметим, что при повышении температуры t над температурой t_0 , соответствующей времени изготовления провода, внутреннее добавочное усилие будет действовать сжимающе на материал проводящей части, а на сталь сердечника растягивающе; при понижении температуры будет происходить обратное явление.

Если теперь предположить, что комбинированный провод, находящийся в воздухе с температурой t , будет еще натянут усилием S , то действительные напряжения в составных частях его определятся следующим образом:

Обозначим:

σ_{S_1} — напряжение стали провода от действия одной только силы S , т. е. без учета внутренних добавочных усилий;

σ_{S_2} — то же материала проводящей части;

σ_{d_1} — действительное напряжение стали провода;

σ_{d_2} — то же материала проводящей части.

Очевидно, для случая $t > t_0$ можно написать:

$$\sigma_{d_1} = \sigma_{S_1} + \sigma_1 \quad (61)$$

и

$$\sigma_{d_2} = \sigma_{S_2} - \sigma_2. \quad (62)$$

Для случая $t < t_0$ будем иметь:

$$\sigma_{d_1} = \sigma_{S_1} - \sigma_1 \quad (61')$$

и

$$\sigma_{d_2} = \sigma_{S_2} + \sigma_2. \quad (62')$$

Умножив уравнения (61) и (62) соответственно на q_1 и q_2 и заметив, что $\sigma_1 q_1 = \sigma_2 q_2$, после сложения получим:

$$\sigma_{d_1} q_1 + \sigma_{d_2} q_2 = \sigma_{S_1} q_1 + \sigma_{S_2} q_2.$$

Приняв во внимание все сказанное, определение длины критического пролета может быть произведено следующим образом.

Вводим, кроме ранее принятых, обозначения:

	для стали сердечника	для проводя- щей части	для всего провода
максимальное допускаемое напря- жение	σ_{1mx}	σ_{2mx}	—
действительное напряжение при наименьшей температуре t_1 . . .	σ'_{d_1}	σ'_{d_2}	—
действительное напряжение при наибольшей нагрузке и темпе- ратуре t_2	σ''_{d_1}	σ''_{d_2}	—
добавочное напряжение от внутрен- них усилий в проводе при наи- меньшей температуре t_1	σ'_1	σ'_2	—

добавочное напряжение от внутренних усилий при наибольшей нагрузке и температуре t_2	σ'_1	σ''_2	—
напряжение без учета внутренних усилий при наименьшей температуре t_1	σ'_{S_1}	σ'_{S_2}	—
напряжение без учета внутренних усилий при наибольшей добавочной нагрузке и температуре t_2	σ'_{S_1}	σ''_{S_2}	—
наибольшее допустимое напряжение при наименьшей температуре t_1 .	—	—	σ'_0
наибольшее допустимое напряжение при наибольшей нагрузке и температуре t_2	—	—	σ''_0

Определение σ'_0 производим так:
берем

$$\sigma'_{d_1} = \sigma_{1\max} \quad \text{и} \quad \sigma'_{d_2} = \sigma_{2\max}.$$

Находим σ'_1 по уравнению (59) и σ'_2 по уравнению (60).

Затем определяем σ'_{S_1} и σ'_{S_2} соответственно по уравнению (61') и (62'). Найденные значения σ'_{S_1} и σ'_{S_2} представляем в уравнения (41) и (42) и получаем два значения σ'_0 . Очевидно, условие прочности провода требует выбора меньшего значения σ'_0 .

Совершенно аналогично определяем σ''_0 , причем опять из двух полученных значений берем меньшее.

Найденные величины σ'_0 и σ''_0 подставляем в уравнение (50), и, решив его относительно l , находим длину критического пролета:

$$l_k = \sqrt{\frac{\sigma''_0 - \sigma'_0 - \frac{\alpha}{\beta}(t_1 - t_2)}{\frac{\gamma_2^2}{24\beta(\sigma''_0)^2} - \frac{\gamma_1^2}{24\beta(\sigma'_0)^2}}}. \quad (63)$$

Пример 7. Для медных проводов сечением $q = 70 \text{ мм}^2$ найти критический пролет, сопоставляя натяжения: 1) при $t_2 = -5^\circ\text{C}$, ветре со скоростью $v = 20 \text{ м/с}$ и гололеде на проводах с толщиной стенки льда $b = 10 \text{ мм}$ и 2) при $t_1 = -30^\circ\text{C}$ и отсутствии дополнительных грузов на провода. Наибольшее допускаемое напряжение в нижней точке провода $\sigma_{\max} = 18 \text{ кг/мм}^2$.

По формуле (58) находим:

$$l_k = \sigma_{\max} \sqrt{\frac{24\alpha(t_2 - t_1)}{\gamma_2^2 - \gamma_1^2}} = 18 \sqrt{\frac{24 \cdot 17 \cdot 10^{-6} \cdot (-5 + 30)}{0,0204^2 - 0,0089^2}} = 99 \text{ м.}$$

Пример 8. При тех же атмосферных и температурных условиях, что и в предыдущем примере, найти критический пролет для комбинированного сталь-алюминиевого провода с сечением алюминия

$q_2 = 264,7 \text{ mm}^2$ и сечением стали $q_1 = 44,6 \text{ mm}^2$. Наибольшее допускаемое напряжение в стальном сердечнике $\sigma_{1\text{max}} = 25 \text{ kg/mm}^2$, а в алюминиевой токоведущей части $\sigma_{2\text{max}} = 9 \text{ kg/mm}^2$.

Согласно изложенного в теории примем, что при температуре $t_1 = -30^\circ\text{C}$

$$\sigma'_{a_1} = \sigma_{1\text{max}} = 25 \text{ kg/mm}^2,$$

$$\sigma'_{a_2} = \sigma_{2\text{max}} = 9 \text{ kg/mm}^2.$$

Полагая, что комбинированный провод изготовлен при температуре $t_0 = +15^\circ\text{C}$, по формуле (59) и (60) находим добавочные напряжения, возникающие в стальной и алюминиевой части при температуре -30°C ;

$$\sigma'_1 = (\alpha_2 - \alpha_1)(t_1 - t_0)E_1 = (19,6 - 12,5) \cdot 10^{-6} \cdot (-30 - 15) \cdot 20000 = -6,4 \text{ kg/mm}^2 \text{ (сжимающее усилие)}$$

и

$$\sigma'_2 = (\alpha_2 - \alpha_0)(t_1 - t_0)E_2 = (23 - 19,6) \cdot 10^{-6} \cdot (-30 - 15) \cdot 7000 = 1,07 \text{ kg/mm}^2 \text{ (растягивающее усилие)}.$$

Пользуясь уравнениями (61') и (62'), находим:

$$\sigma'_{s_1} = \sigma'_{a_1} + \sigma'_1 = 25 + 6,4 = 31,4 \text{ kg/mm}^2$$

и

$$\sigma'_{s_2} = \sigma'_{a_2} - \sigma'_2 = 9 - 1,07 = 7,93 \text{ kg/mm}^2.$$

Соответствующие этим значениям σ'_{s_1} и σ'_{s_2} величины фиктивных напряжений σ'_0 найдем, пользуясь формулами (41) и (42), по стали:

$$\sigma'_0 = \sigma'_{s_1} \frac{1 + \frac{E_2}{E_1} a}{a + 1} = 31,4 \cdot \frac{1 + \frac{7000}{20000} \cdot 5,88}{5,88 + 1} = 13,9 \text{ kg/mm}^2,$$

по алюминию:

$$\sigma'_0 = \sigma'_{s_2} \frac{\frac{E_1}{E_2} + a}{a + 1} = 7,93 \cdot \frac{\frac{20000}{7000} + 5,88}{5,88 + 1} = 10,05 \text{ kg/mm}^2.$$

Для того, чтобы оба поставленные условия были выполнены, т. е.

$$\sigma'_{a_1} \leq 25 \text{ kg/mm}^2 \text{ и } \sigma'_{a_2} \leq 9 \text{ kg/mm}^2,$$

необходимо выбрать фиктивное напряжение по алюминию, т. е. взять $\sigma'_0 = 10,05 \text{ kg/mm}^2$.

Полагая вновь при $t_2 = -5^\circ\text{C}$, гололеде и ветре

$$\sigma''_{a_1} = \sigma_{1\text{max}} = 25 \text{ kg/mm}^2$$

и

$$\sigma''_{a_2} = \sigma_{2\text{max}} = 9 \text{ kg/mm}^2,$$

найдем:

$$\sigma''_1 = (19,6 - 12,5) \cdot 10^{-6} \cdot (-5 - 15) \cdot 20000 = -2,84 \text{ kg/mm}^2 \text{ (сжатие)},$$

$$\sigma''_2 = (19,6 - 23) \cdot 10^{-6} \cdot (-5 - 15) \cdot 7000 = 0,476 \text{ kg/mm}^2 \text{ (растяжение)}$$

и

$$\sigma''_{s_1} = \sigma''_{a_1} + \sigma''_1 = 25 + 2,84 = 27,84 \text{ kg/mm}^2,$$

$$\sigma''_{s_2} = \sigma''_{a_2} - \sigma''_2 = 9 - 0,476 = 8,524 \text{ kg/mm}^2.$$

Воспользовавшись опять уравнением (41) и (42), получим:

$$\sigma''_0 = 27,84 \frac{3,06}{6,88} = 12,4 \text{ kg/mm}^2$$

и

$$\sigma''_0 = 8,524 \frac{8,74}{6,88} = 10,85 \text{ kg/mm}^2.$$

По тем же соображениям, что и раньше, выбираем

$$\sigma''_0 = 10,85 \text{ kg/mm}^2.$$

Подставляя в формулу (63) значения α , β , γ , и γ_1 , найденные нами раньше, определим критический пролет:

$$l_k = \sqrt{\frac{\sigma''_0 - \sigma'_0 - \frac{\alpha}{\beta} (t_1 - t_2)}{\frac{\gamma^2}{24\beta\sigma_0'^2} - \frac{\gamma_1^2}{24\beta\sigma_0''^2}}} = \sqrt{\frac{10,85 - 10,05 - \frac{19,6 \cdot 10^{-6}}{0,112 \cdot 10^{-3}} \cdot (-30 + 5)}{\frac{0,00729^2}{24 \cdot 0,112 \cdot 10^{-3} \cdot 10,85^2} - \frac{0,00345^2}{24 \cdot 0,112 \cdot 10^{-3} \cdot 10,05^2}}} = 203,5 \text{ m.}$$

§ 5. Критическая температура.

Наибольшая стрела провеса провода получается или при максимальной добавочной нагрузке его или при наивысшей температуре окружающего воздуха данной местности.

Решить вопрос при каких из указанных атмосферных условий будет иметь место наибольшая стрела провеса можно следующим образом.

Пусть для атмосферных условий, соответствующих максимальной нагрузке провода γ_1 , имеем стрелу провеса, равную

$$f_1 = \frac{l^2 \gamma_1}{8\sigma_1}$$

Очевидно, при повышении температуры и уменьшении удельной нагрузки провод, с одной стороны, будет испытывать температурное удлинение, а с другой, — упругое сокращение. Температура, при которой оба эти фактора (удлинение и сокращение) взаимно друг друга уничтожают, и носит название критической температуры t_k . Этой критической температуре будет соответствовать удельная нагрузка γ , являющаяся нагрузкой только от собственного веса провода. Получающаяся при указанных условиях стрела провеса

$$f_k = \frac{l^2 \gamma}{8\sigma}$$

равна начальной стреле провеса f_1 , что и дает возможность написать:

$$\frac{l\gamma_1}{8\sigma_1} = \frac{l\gamma}{8\sigma}$$

Находим из последнего уравнения напряжение материала провода при температуре t_k и нагрузке γ :

$$\sigma = \sigma_1 \frac{\gamma}{\gamma_1}$$

Подставляя последнее соотношение в основное уравнение состояния провода (50), получим:

$$\sigma_1 \frac{\gamma}{\gamma_1} - \frac{l^2 \gamma^2 \gamma_1^2}{24\beta \sigma_1^2 \gamma^2} = \sigma_1 - \frac{l^2 \gamma_1^2}{24\beta \sigma_1^2} - \frac{\alpha}{\beta} (t_k - t_1)$$

Решив его относительно t_k , найдем выражение для критической температуры:

$$t_k = t_1 + \sigma_1 \frac{\beta}{\alpha} \left(1 - \frac{\gamma}{\gamma_1} \right). \quad (64)$$

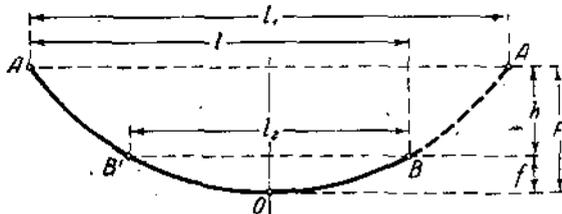
Из всего вывода формулы (64) следует, что если наивысшая температура воздуха данной местности будет больше критической, то наибольшая стрела провеса будет иметь место при наивысшей температуре и обратно, при наивысшей температуре данной местности ниже критической максимальная стрела провеса наступит при наибольшей нагрузке провода.

§ 6. Натяжения и стрелы провеса провода, имеющего точки подвеса на разной высоте.

Эквивалентный пролет. Провод, имеющий точки подвеса на разной высоте, примет так же, как и провод с точками подвеса, лежащими в одной горизонтальной плоскости, форму цепной линии, причем последнюю можно, с достаточной для практики точностью, заменить плоской параболой.

Для определения натяжений по проводу и стрел провеса его, можно случай разных высот точек подвеса привести к случаю одинаковых высот.

Действительно, пусть рассматриваемый нами провод AOB имеет точки подвеса A и B , разность высот которых равна h (фиг. 9). Продолжим кривую провода



Фиг. 9.

AOB до пересечения с прямой AA' , проведенной горизонтально из высшей точки подвеса A и, кроме того, проведем еще горизонтальную пря-

мую BB' из нижней точки подвеса B . При принятых на чертеже обозначениях можно будет написать:

$$F = \frac{l_1^2 \gamma}{8 \sigma} \quad (65)$$

и

$$f = \frac{l_2^2 \gamma}{8 \sigma} \quad (66)$$

Вычитая одно уравнение из другого и заметив, что разность стрел провеса равна h , будем иметь:

$$h = F - f = \frac{\gamma}{8 \sigma} (l_1^2 - l_2^2) = \frac{\gamma}{8 \sigma} (l_1 + l_2) (l_1 - l_2) \quad (67)$$

Из фиг. 9 видно, что

$$l = \frac{l_1}{2} + \frac{l_2}{2}$$

или

$$2l = l_1 + l_2 \quad (68)$$

Вводя значение $l_1 + l_2$ из уравнения (68) в уравнение (67), получим:

$$h = \frac{\gamma}{8 \sigma} 2l (l_1 - l_2),$$

откуда

$$l_1 - l_2 = \frac{4h\sigma}{\gamma l} \quad (69)$$

Подставляя значение l_2 из уравнения (68), будем иметь:

$$l_1 - 2l + l_1 = \frac{4h\sigma}{\gamma l};$$

откуда

$$l_1 = l + \frac{2h\sigma}{\gamma l} \quad (70)$$

Определяемая уравнением (70) величина некоторого условного пролета l_1 носит название эквивалентного пролета. Этот эквивалентный пролет и дает возможность привести случай провода с разной высотой точек подвеса к случаю провода с одинаковой высотой их, причем вводимый в рассмотрение условный провод AOA' имеет кривую провисания, совпадающую с кривой действительного провода AOB , а следовательно, натяжение его при данных атмосферных условиях будет равно натяжению действительного провода.

Таким образом, для определения натяжения и стрел провеса провода с разной высотой точек подвеса его нужно поступать так:

Задавшись величиной σ находим по уравнению (70) эквивалентный пролет l_1 , считая данными величину l , разность высот h и удельную нагрузку γ .

Затем находим по уравнению (68) величину l_2 и подсчитываем

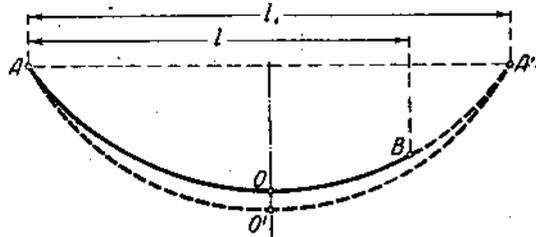
стрелы провеса F' и f относительной высшей и низшей точек подвеса провода по уравнениям (65) и (66).

При переменных атмосферных условиях (изменение нагрузки и температуры) определение натяжений в проводе и стрел провеса его может быть произведено, пользуясь формулой (50), где под величиной l следует понимать эквивалентный пролет.

Таким образом будут получены все величины, необходимые для расчета проводов и опор линии передачи. Заметим, что введение эквивалентного пролета для пересчетов при изменяющихся атмосферных условиях влечет за собой неточность тем большую, чем больше разность высот точек подвеса провода h по сравнению с действительным пролетом l .

Поэтому указанный метод применим только при известных соотношениях h к l , а именно, когда разность высот точек подвеса h не превосходит $10 \div 15\%$ от длины пролета l ; при большем же отношении этих величин получающаяся ошибка выходит из допустимых для практики пределов точности. [Так, при $h = (0,10 \div 0,15)l$ ошибка получается $3 \div 4\%$.] Это обстоятельство объясняется следующими соображениями.

Предположим, что для некоторых первоначальных условий, при которых провод имел форму кривой $AOBA'$ (фиг. 10), были подсчитаны натяжение и стрела провеса с помощью введения эквивалентного пролета AA' . Если мы теперь будем определять для других атмосферных условий натяжение и стрелы провеса, подставляя значение эквивалентного пролета l_1 в уравнение (50), то найденные значения их будут относиться к проводу, принявшему форму кривой $AO'A'$. Но провод не может принять такой формы, так как кривая AOA' не проходит через точку B , являющуюся точкой закрепления его, и поэтому найденные значения натяжений и стрел провеса не будут в точности соответствовать таковым же в действительном проводе.



Фиг. 10.

Возвращаясь несколько к прежнему, необходимо отметить еще следующее обстоятельство.

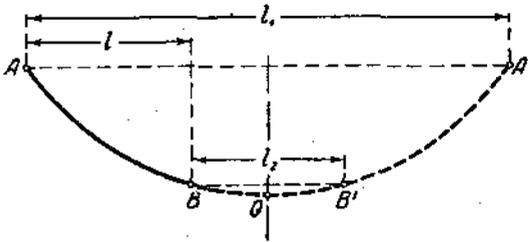
Из уравнений (68) и (70), решая их относительно l_2 , можно получить последнюю величину в виде:

$$\frac{l_2}{2} = \frac{l}{2} - \frac{h\sigma}{\gamma l}, \quad (71)$$

причем $\frac{l_2}{2}$ представляет расстояние от опоры B до точки O перегиба кривой (фиг. 9).

Из уравнения (71) видим, что при некоторых определенных число-

вых соотношениях значение l_2 может получиться отрицательным. Последнее показывает, что в этом случае наименьшая точка O (фиг. 11)

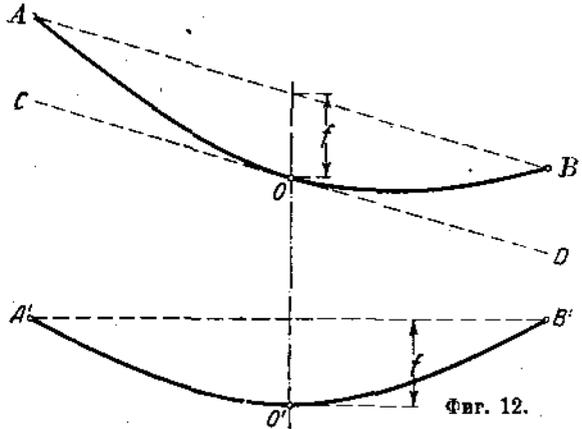


Фиг. 11.

кривой AOA' лежит вне обеих точек подвеса и, следовательно, сила натяжения провода у точки подвеса B даст вертикальную слагающую, направленную не вниз, как обычно, а вверх. Это обстоятельство при подвесных изоляторах может привести в некоторых случаях к подъему

гирлянды и, следовательно, нарушению ее электрических свойств, а при штыревых изоляторах может вызвать сдирание изолятора со штыря. Ввиду нежелательности указанных явлений, необходимо при проектировании линии передачи, идущей по пересеченной местности, выбирать соотношение между h и l так, чтобы l_2 получилась положительной величиной. Если же по местным условиям этого достигнуть нельзя, то нужно следить за тем, чтобы вертикальная составляющая натяжения провода у точки подвеса, направленная вверх, была меньше, чем направленная вниз вертикальная составляющая натяжения провода у той же точки подвеса от соседнего пролета.

Большая разность высот точек подвеса. При крутых подъемах, когда отношение разности высот точек подвеса h к длине пролета l больше $0,10 - 0,15$, необходимо пользоваться для определения натяжений и стрел провеса провода при различных атмосферных условиях другими уравнениями, которые могут



Фиг. 12.

быть получены путем следующих рассуждений. Выведем сначала несколько вспомогательных формул и положений, необходимых для дальнейшего. Примем за основу наших рассуждений положение Норм Немецких Электротехников, по которым провод с точками подвеса на разной высоте следует натягивать так, чтобы

его стрела провеса была равна стреле провеса провода, имеющего тот же пролет и точки подвеса на равной высоте (фиг. 12). При этом за стрелу провеса провода, при разной высоте точек подвеса его A и B , принимаем расстояние по вертикали между прямой AB и касательной CD , параллельной AB . Кривую AOB , являющуюся цепной линией, будем рассматривать как параболу. Из фиг. 13а видно, что

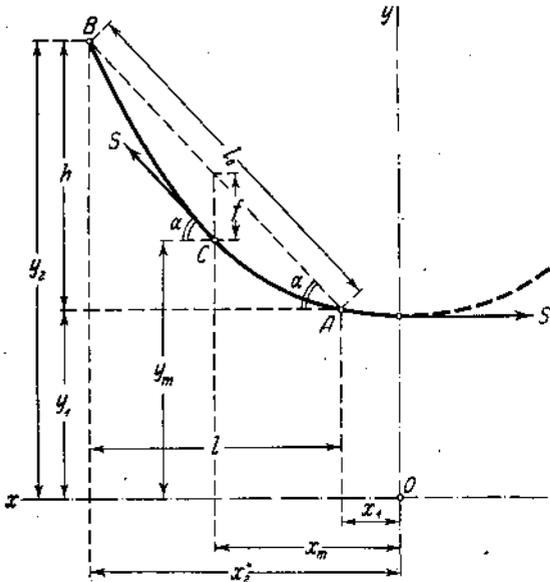
$$y = y_1 + y_2;$$

Подставляя же в уравнение (75) значения l_1 и F из уравнений (73) и (74), получим:

$$\sigma_0 = \sigma_0'.$$

Следовательно, если натягивать провод, соблюдая приведенное выше правило Норм Союза Немецких Электротехников, то в нижней точке провода напряжение материала будет одно и то же как в случае одинаковых высот точек подвеса провода, так и в случае разных высот их.

Перейдем теперь к исследованию основного вопроса о подсчете натяжений и стрел провеса провода с разной высотой точек подвеса при различных атмосферных условиях.



Фиг. 14.

Из уравнения цепной линии (фиг. 14) имеем:

$$y_1 = \frac{\sigma_0}{\gamma} \cdot \cosh \left(\frac{\gamma}{\sigma_0} x_1 \right),$$

$$y_2 = \frac{\sigma_0}{\gamma} \cosh \left(\frac{\gamma}{\sigma_0} x_2 \right),$$

$$y_m = \frac{\sigma_0}{\gamma} \cosh \left(\frac{\gamma}{\sigma_0} x_m \right) = \frac{\sigma_0}{\gamma} \cosh \left[\frac{\gamma(x_1 + x_2)}{\sigma_0 \cdot 2} \right].$$

Из фиг. 14 видно, что

$$f = \frac{y_1 + y_2}{2} - y_m.$$

Подставляя в это уравнение значение y_1 , y_2 и y_m из предыдущих уравнений и сделав преобразования, получим:

$$\begin{aligned} f &= \frac{\sigma_0}{2\gamma} \cdot \cosh \left(\frac{\gamma}{\sigma_0} x_1 \right) + \frac{\sigma_0}{2\gamma} \cdot \cosh \left(\frac{\gamma}{\sigma_0} x_2 \right) - \frac{\sigma_0}{\gamma} \cdot \cosh \left[\frac{\gamma}{2\sigma_0} (x_1 + x_2) \right] = \\ &= \frac{\sigma_0}{\gamma} \cdot \cosh \left(\frac{\gamma}{\sigma_0} x_m \right) \cdot \left[\cosh \left(\frac{x_2 - x_1}{2\sigma_0} \gamma \right) - 1 \right]. \end{aligned} \quad (76)$$

Выражение $\left[\cosh \left(\frac{x_2 - x_1}{2\sigma_0} \gamma \right) - 1 \right]$, если разложить в ряд первый член

квадратных скобок и взять только два первых члена, может быть упрощено до вида

$$\frac{(x_2 - x_1)^2 \gamma^2}{1 \cdot 2 \cdot 4 \cdot \sigma_0^2},$$

и, следовательно, уравнение (76) получит следующий вид:

$$f = \frac{\sigma_0}{\gamma} \cdot \cosh\left(\frac{\gamma}{\sigma_0} x_m\right) \cdot (x_2 - x_1)^2 \cdot \frac{\gamma^2}{8 \sigma_0^2};$$

но так как

$$x_2 - x_1 = l \quad \text{и} \quad x_m = \frac{x_1 + x_2}{2},$$

то

$$f = \frac{l^2 \gamma}{8 \sigma_0} \cdot \cosh\left(\frac{\gamma}{\sigma_0} x_m\right) = \frac{l^2 \gamma}{8 \sigma_0} \cdot \cosh\left[\frac{x_1 + x_2}{2 \sigma_0} \gamma\right]. \quad (77)$$

Далее имеем:

$$\begin{aligned} h = y_2 - y_1 &= \frac{\sigma_0}{\gamma} \cdot \left(\cosh \frac{\gamma x_2}{\sigma_0} - \cosh \frac{\gamma x_1}{\sigma_0} \right) = \\ &= \frac{2 \sigma_0}{\gamma} \cdot \sinh\left(\frac{x_1 + x_2}{2 \sigma_0} \gamma\right) \cdot \sinh\left(\frac{x_2 - x_1}{2 \sigma_0} \gamma\right). \end{aligned} \quad (78)$$

Но так как величина

$$\frac{x_2 - x_1}{2 \sigma_0} \gamma$$

является малой, то можно принять, что

$$\sinh\left(\frac{x_2 - x_1}{2 \sigma_0} \gamma\right) = \frac{x_2 - x_1}{2 \sigma_0} \gamma = \frac{\gamma l}{2 \sigma_0}. \quad (79)$$

Подставляя уравнение (79) в уравнение (78), получим:

$$\sinh\left(\frac{x_1 + x_2}{2 \sigma_0} \gamma\right) = \frac{h}{l}. \quad (80)$$

Для гиперболических функций имеем:

$$\cosh^2 x - \sinh^2 x = 1.$$

Подставляя в это соотношение значение величин

$$\cosh\left[\frac{x_1 + x_2}{2 \sigma_0} \gamma\right] \quad \text{и} \quad \sinh\left[\frac{x_1 + x_2}{2 \sigma_0} \gamma\right],$$

определенные из уравнений (77) и (80), получим:

$$\frac{64 \sigma_0^2 f^2}{\gamma^2 l^4} - \frac{h^2}{l^2} = 1$$

или

$$f = \frac{\gamma}{8 \sigma_0} l \sqrt{l^2 + h^2}.$$

Натяжение S в точке C может быть выражено, как было выведено выше (см. стр. 28), следующим образом:

$$S = \frac{S_0}{\cos \alpha}$$

или, что то же,

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{\cos \alpha};$$

а так как

$$\cos \alpha = \frac{l}{\sqrt{l^2 + h^2}},$$

то

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{l} \sqrt{l^2 + h^2},$$

и, следовательно, уравнение для стрелы провеса f примет вид:

$$f = \frac{\gamma}{8\sigma} (l^2 + h^2);$$

но так как (фиг. 14)

$$l^2 + h^2 = l_0^2,$$

то

$$f = \frac{\gamma l_0^2}{8\sigma}. \quad (81)$$

Длина цепной линии между точками подвеса A и B будет равна:

$$L = \frac{\sigma_0}{\gamma} \left(\sinh \frac{x_2 \gamma}{\sigma_0} - \sinh \frac{x_1 \gamma}{\sigma_0} \right) = \frac{2\sigma_0}{\gamma} \cdot \sinh \frac{\gamma(x_2 - x_1)}{2\sigma_0} \cdot \cosh \frac{\gamma(x_2 - x_1)}{2\sigma_0}$$

Подставляя из уравнения (76)

$$\cosh \frac{(x_1 + x_2)\gamma}{2\sigma_0} = \frac{\gamma f}{\sigma_0} \cdot \frac{1}{\cosh\left(\frac{x_2 - x_1}{2\sigma_0} \gamma\right) - 1},$$

будем иметь:

$$L = 2f \frac{\sinh\left(\frac{x_2 - x_1}{2\sigma_0} \gamma\right)}{\cosh\left(\frac{x_2 - x_1}{2\sigma_0} \gamma\right) - 1}. \quad (82)$$

Раскладывая \sinh и \cosh в ряд и принимая только члены ряда, кончая третьей степенью (так как аргумент $\beta = \frac{x_2 - x_1}{2\sigma_0} \gamma$ мал), получим:

$$\begin{aligned} L &= 2f \frac{\beta + \frac{\beta^3}{6}}{\frac{\beta^2}{2}} = 4f \left(\frac{1}{\beta} + \frac{\beta}{6} \right) = \frac{\gamma l^2}{2\sigma_0 \cos \alpha} \left(\frac{2\sigma_0}{l\gamma} + \frac{l\gamma}{12\sigma_0} \right) = \\ &= \frac{l}{\cos \alpha} + \frac{\gamma^2 l^3}{24\sigma_0^2 \cos \alpha} = l_0 + \frac{8f^2}{3l_0}. \end{aligned} \quad (83)$$

Из уравнений (81) и (83) видно, что зависимость между стрелой провеса, напряжением и длиной провода, в случае разной высоты точек подвеса его, получается совершенно та же, что и для провода с одинаковой высотой точек подвеса, если в соответствующие уравнения подставить вместо длины пролета l и напряжения в нижней точке σ_0 , расстояние между точками подвеса l_0 и напряжение σ в средней точке провода C .

Из сказанного вытекает, что пересчеты при изменяющихся атмосферных условиях, а следовательно, и определение критического пролета в случае разной высоты точек подвеса провода, могут быть произведены по совершенно тем же формулам, что и при одинаковой высоте точек подвеса, а именно, (50) и (58), только в них нужно вставлять вместо l и σ_0 соответственно

$$l_0 = \frac{l}{\cos \alpha} \quad \text{и} \quad \sigma = \frac{\sigma_0}{\cos \alpha},$$

где α — угол наклона линии, соединяющей точки подвеса провода, к горизонту (см. фиг. 13 и 14).

Пример 9. Для медного провода сечением $q = 70 \text{ мм}^2$ при пролете $l = 175 \text{ м}$ и разности высот точек подвеса провода $h = 15 \text{ м}$ (фиг. 9), определить эквивалентный пролет (l_1), напряжение материала провода и стрелы провеса его при температурах $t_1 = +40^\circ\text{C}$ и $t_2 = -5^\circ\text{C}$, если известно, что при температуре $t_2 = -5^\circ\text{C}$ и нагрузке $\gamma_7 = 0,0204 \text{ кг/м} \cdot \text{мм}^2$ провод имеет напряжение $\sigma_{\text{мх}} = 18 \text{ кг/мм}^2$.

По формулам (70) и (68) находим эквивалентные пролеты:

$$l_1 = l + \frac{2h\sigma}{\gamma l} = 175 + \frac{2 \cdot 15 \cdot 18}{175 \cdot 0,0204} = 175 + 151 = 326 \text{ м}$$

и

$$l_2 = 2l - l_1 = 350 - 326 = 24 \text{ м}.$$

Таким образом, точка перегиба кривой лежит между точками подвеса A и B .

Стрелы провеса при температуре $t_2 = -5^\circ\text{C}$ по формулам (65) и (66) будут:

относительно точки A

$$F = \frac{l_1^3 \gamma_7}{8 \sigma_{\text{мх}}} = \frac{326^3 \cdot 0,0204}{8 \cdot 18} = 15,08 \text{ м},$$

относительно точки B

$$f = \frac{l_2^3 \gamma_7}{8 \sigma_{\text{мх}}} = \frac{24^3 \cdot 0,0204}{8 \cdot 18} = 0,0815 \text{ м}.$$

Проверка: $F - f = h = 15,08 - 0,0815 = 15 \text{ м}$.

Напряжение провода при температуре $t_1 = +40^\circ\text{C}$ по формуле (50) определится:

$$\sigma_1 - \frac{l_1^3 \gamma_1^2}{24 \beta \sigma_1^2} = \sigma_2 - \frac{l_2^3 \gamma_2^2}{24 \beta \sigma_2^2} - \frac{\alpha}{\beta} (t_1 - t_2);$$

$$\sigma_1 - \frac{326^2 \cdot 0,0089^2}{24 \cdot 0,77 \cdot 10^{-4} \cdot \sigma_1^2} = 18 - \frac{326^2 \cdot 0,0204^2}{24 \cdot 0,77 \cdot 10^{-4} \cdot 18} - \frac{17 \cdot 10^{-6}}{0,77 \cdot 10^{-4}} \cdot (40 + 5);$$

$$\sigma_1 - \frac{4550}{\sigma_1^2} = -65,9$$

или

$$\sigma_1 = 7,86 \text{ kg/mm}^2.$$

Стрелы провеса:

$$F'' = \frac{326^2 \cdot 0,0089}{8 \cdot 7,86} = 15,08 \text{ m};$$

$$f' = \frac{24^2 \cdot 0,0089}{8 \cdot 7,86} = 0,0815 \text{ m}.$$

Пример 10. Для медного провода сечением $q = 70 \text{ mm}^2$ при пролете $l = 175 \text{ m}$ и разности высот точек подвеса $h = 40 \text{ m}$ определить напряжения в проводе и стрелы провеса его при температурах $t_1 = +40^\circ\text{C}$ и $t_2 = -5^\circ\text{C}$, если при температуре $t_2 = -5^\circ\text{C}$ и удельной нагрузке $\gamma_2 = 0,00204 \text{ kg/m} \cdot \text{mm}^2$ напряжение материала провода $\sigma = 18 \text{ kg/mm}^2$ (фиг. 13).

Определяем расстояние между точками подвеса:

$$l_0 = \sqrt{l^2 + h^2} = \sqrt{175^2 + 40^2} = 179,5 \text{ m}.$$

Находим стрелу провеса, с какой должен быть подвешен провод, чтобы стрела провеса провода при разной высоте точек подвеса (фиг. 13а) была равна стреле провеса при равной высоте точек подвеса (фиг. 13б):

$$f = \frac{l^2 \gamma_2}{8\sigma} = \frac{175^2 \cdot 0,0204}{8 \cdot 18} = 4,34 \text{ m}.$$

Для соблюдения вышеуказанного условия напряжение в точке C провода должно быть

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{\cos \alpha} = 18 \cdot \frac{179,5}{175} = 18,45 \text{ kg/mm}^2.$$

Стрела провеса относительно точки B (фиг. 13а) определится по формуле (74);

$$F = f \left(1 + \frac{h}{4f} \right)^2 = 4,34 \left(1 + \frac{40}{4 \cdot 4,34} \right)^2 = 47,3 \text{ m}.$$

Если эту же задачу решить с помощью эквивалентного пролета, то получим;

$$l_1 = l + \frac{2h\sigma}{\gamma l} = 175 + \frac{2 \cdot 40 \cdot 18}{0,0204 \cdot 175} = 175 + 403 = 578 \text{ m}$$

и

$$l_2 = 2 \cdot 175 - 578 = -228 \text{ m},$$

т.е. точка перегиба кривой лежит не между опорами A и B , а вне их
Стрела провеса относительно точки B по формуле (65)

$$F = \frac{578^2 \cdot 0,0204}{18 \cdot 8} = 47,3 \text{ m}.$$

При температуре $t_1 = +40^\circ\text{C}$ напряжение по проводу найдется:

$$\sigma_1 - \frac{179,5^2 \cdot 0,0089^2}{24 \cdot 0,77 \cdot 10^{-4} \cdot \sigma_1^2} = 18,45 - \frac{179,5^2 \cdot 0,0204^2}{24 \cdot 0,77 \cdot 10^{-4} \cdot 18,45^2} - \frac{17 \cdot 10^{-6}}{0,77 \cdot 10^{-4}}; \quad (45)$$

$$\sigma_1 - \frac{1380}{\sigma_1^2} = -12,85,$$

откуда подбором находим

$$\sigma_1 = 8,11 \text{ kg/mm}^2.$$

Стрелы провеса (Фиг. 13а)

$$f = \frac{l_0^2 \gamma_1}{8\sigma_1} = \frac{179,5^2 \cdot 0,0089}{8 \cdot 8,11} = 4,42 \text{ m}$$

и

$$F = f \cdot \left(1 + \frac{h}{4f}\right)^2 = 4,42 \cdot \left(1 + \frac{40}{4 \cdot 4,42}\right)^2 = 47 \text{ m}$$

Если те же величины определить с помощью эквивалентного пролета, то будем иметь:

$$\sigma_1 - \frac{578^2 \cdot 0,0089^2}{24 \cdot 0,77 \cdot 10^{-4} \cdot \sigma_1^2} = 18 - \frac{578^2 \cdot 0,204^2}{24 \cdot 0,77 \cdot 10^{-4} \cdot 18^2} - \frac{17 \cdot 10^{-6} \cdot 45}{0,77 \cdot 10^{-4}};$$

$$\sigma_1 - \frac{1430}{\sigma_1^2} = -223,4;$$

$$\sigma_1 = 7,86 \text{ kg/mm}^2$$

и

$$F = \frac{578^2 \cdot 0,0089}{8 \cdot 7,86} = 47,4 \text{ m}.$$

Как видно из приведенного примера, разница в определении стрел провеса F по обоим способам достигает величины 0,4 m, что уже является величиной, которой практически, в некоторых случаях, пренебрегать не следует.

§ 7. Большие пролеты.

В случае исключительно больших пролетов порядка 500 — 1200 и более метров, при определении стрелы провеса провода, пользование формулой (25) приводит к ошибкам, выходящим за пределы, допустимые для практических расчетов. Поэтому в этих случаях за исходную формулу для определения стрел провеса провода принимают уравнение (23), причем в нем оставляют два первых члена:

$$f = \frac{l^2 \gamma}{8\sigma_0} + \frac{l^4 \gamma^3}{384 \sigma_0^3}. \quad (84)$$

Пример 11. Над судоходной рекой подвешен медный провод сечением $q = 120 \text{ mm}^2$ с пролетом $l = 600 \text{ m}$. Определить стрелы провеса провода в пролете при температуре $t = -5^\circ\text{C}$ и добавочных нагрузках, действующих на провод в виде давления ветра со скоростью $v = 20 \text{ m/sec}$

и веса слоя льда с толщиной стенки $b = 10$ мм. Удельная нагрузка на провод при этих условиях равна $\gamma_7 = 0,0184$ кг/м·мм².

Так как река судоходная, то допускаемое напряжение в проводе не должно превосходить $\frac{1}{3}$ временного сопротивления материала на разрыв и принимается равным $\sigma_{\text{мх}} = 12$ кг/мм².

Пользуясь формулой (84), получим стрелу провеса:

$$f = \frac{l^2 \gamma}{8 \sigma_0} + \frac{l^4 \gamma^3}{384 \sigma_0^3} = \frac{600^2 \cdot 0,0184}{8 \cdot 12} + \frac{600^4 \cdot 0,0184^3}{384 \cdot 12^3} = 70,22 \text{ м.}$$

Если бы мы пользовались формулой (25), то имели бы $f = 69$ м, т.е. при пользовании формулами (25) и (84) получается разница в 1,22 м.

§ 8. Ход механического расчета проводов.

К механическому расчету линии передачи приступают после выяснения электрических свойств ее, т.е. когда сечение q проводов и тип изоляторов, на которых они будут подвешены, известны.

Ход механического расчета проводов следующий.

1. Зная сечение проводов и атмосферные условия данной местности, определяют удельные нагрузки $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ и т. д.

2. Находят критический пролет l_k .

3. Сравнивают выбранный для линии передачи пролет l с критическим пролетом l_k и тем самым узнают условия, при которых будет максимальное напряжение материала провода.

4. Задаваясь допускаемым напряжением материала провода при наиболее неблагоприятных условиях нагрузки, определяют напряжение провода при других атмосферных условиях. Находят стрелы провеса провода при различных нагрузках.

Пример 12. Требуется произвести, руководствуясь Союзными Нормами, механический расчет провода с поперечным сечением $q = 25$ мм². Пролет $l = 100$ м.

Атмосферные условия принимаются: 1) наименьшая температура воздуха $t_1 = -30^\circ\text{C}$; 2) максимальные добавочные нагрузки на провод от гололеда с толщиной стенки $b = 10$ мм и давления ветра, скорость которого $v = 20$ м/сек, имеющие место при температуре $t_2 = -5^\circ\text{C}$ и 3) высшая температура воздуха $t_3 = +40^\circ\text{C}$.

Удельные нагрузки провода, вычисленные для этих атмосферных условий, приведены в табл. XI главы II (стр. 21).

Пользуясь формулой (58), определяем критический пролет, считая допустимое напряжение по проводу $\sigma_{\text{мх}} = 18$ кг/мм².

$$l_k = \sigma_{\text{мх}} \sqrt{\frac{24a(t_2 - t_1)}{\gamma_2^2 - \gamma_1^2}} = 18 \cdot \sqrt{\frac{24 \cdot 17 \cdot 10^{-6} \cdot 25}{0,0374^2 - 0,0089^2}} = 50 \text{ м.}$$

Так как найденное значение $l_k = 50$ м меньше, чем заданная величина пролета $l = 100$ м, то наибольшее напряжение в проводе будет иметь место при $t_2 = -5^\circ\text{C}$ и добавочных нагрузках на проводе.

Определяем напряжение в проводе при различных атмосферных условиях.

а) При $t_2 = +40^\circ\text{C}$, т.е. когда провод нагружен только собственным весом. В этом случае имеем:

$$\sigma_1 - \frac{l^2 \gamma_1^2}{24 \beta \sigma_1^2} = \sigma_{\text{max}} - \frac{l^2 \gamma_7^2}{24 \beta \sigma_{\text{max}}^2} - \frac{a}{\beta} (t_2 - t_1)$$

или, подставляя цифровые значения, получим:

$$\sigma_1 - \frac{100^2 \cdot 0,0089^2}{24 \cdot \sigma_1^2 \cdot 0,77 \cdot 10^{-4}} = 18 - \frac{100^2 \cdot 0,0374^2}{24 \cdot 18^2 \cdot 0,77 \cdot 10^{-4}} - \frac{17 \cdot 10^{-6}}{0,77 \cdot 10^{-4}} [40 - (-5)];$$

$$\sigma_1 - \frac{429}{\sigma_1^2} = -15,45.$$

Из последнего уравнения найдем:

$$\sigma_1 = 4,62 \text{ kg/mm}^2.$$

б) При $t_2 = -5^\circ\text{C}$ и ветре, но при сброшенном с провода гололеде определение напряжения в материале провода при этих условиях необходимо для расчетов при обрыве проводов; см. ниже); пользуясь тем же уравнением (50), имеем:

$$\sigma_2 - \frac{\gamma_6^2 l^2}{24 \sigma_2^2 \beta} = \sigma_{\text{max}} - \frac{l^2 \gamma_7^2}{24 \beta \sigma_{\text{max}}^2};$$

$$\sigma_2 - \frac{100^2 \cdot 0,0108^2}{24 \cdot 0,77 \cdot 10^{-4} \cdot \sigma_2^2} = 18 - \frac{100^2 \cdot 0,0373^2}{24 \cdot 0,77 \cdot 10^{-4} \cdot 18^2};$$

$$\sigma_2 - \frac{632}{\sigma_2^2} = -5,5;$$

откуда

$$\sigma_2 = 7,1 \text{ kg/mm}^2.$$

Стрела провеса провода по уравнению (25) будет равна:

а) при $t_2 = -5^\circ\text{C}$ и добавочных нагрузках

$$f = \frac{100^2 \cdot 0,0373}{8 \cdot 18} = 2,6 \text{ m};$$

б) при $t_2 = +40^\circ\text{C}$

$$f = \frac{100^2 \cdot 0,0089}{8 \cdot 4,62} = 2,42 \text{ m};$$

в) при $t_2 = -5^\circ\text{C}$ и ветре, но при сброшенном гололеде

$$f = \frac{100^2 \cdot 0,0108}{8 \cdot 7,1} = 1,9 \text{ m}.$$

Таким образом, максимальная стрела провеса провода равна 2,6 м.

ГЛАВА IV.

Работа линий передач при обрыве проводов без учета действия уцелевших проводов и троссов.

§ 1. Общие сведения.

Причины обрыва проводов. При эксплуатации вполне правильно и надежно спроектированной линии электропередачи, все же возможны аварии, вызывающие перерывы в подаче энергии к потребителям. Помимо основной причины аварий—повреждения изоляторов, которую мы здесь рассматривать не будем,—перебои в работе линий передач обуславливаются иногда обрывом проводов, происходящим по следующим причинам.

1. Как уже указывалось выше, переменные атмосферные условия, при которых работают провода линий передач, представляют, с точки зрения механического расчета их, нагрузки, влияющие на натяжения по проводам. При некотором неблагоприятном стечении обстоятельств эти нагрузки могут значительно превысить величины, положенные в основу расчета, что и поведет к обрыву одного или нескольких проводов.

2. Причиной обрыва могут служить дефекты как в самом материале провода, так и в местах сращивания отдельных концов его (в клеммах, скрутках), не обнаруженные во время монтажа линии. Последнее объясняется тем, что монтаж линии передачи обычно производится при значительно более благоприятных атмосферных условиях, чем те, при которых наступают максимальные расчетные напряжения, т. е. при монтаже проводов натяжения по ним не приходится доводить до предельных допускаемых величин.

3. Вольтова дуга, возникшая вследствие перенапряжений или короткого замыкания (соприкосновение проводов), может повести к перегоранию провода и, следовательно, его обрыву.

Значение определения натяжений по проводам при обрыве их. Согласно Союзных Норм для механического расчета линий электропередач все опоры должны быть рассчитаны для двух следующих случаев нагрузки:

- 1) провода не оборваны;
- 2) провода оборваны, причем для анкерных опор считаются оборванными все провода одного пролета при необорванных троссах или

оборванными троссы одного пролета при необорванных проводах, а для всех остальных опор считаются оборванными два провода в одном пролете. При этом принимается, что обрыв происходит при температуре -5°C и ветре, а гололед считается сброшенным.

При расчете всех опор, кроме анкерных, на случай обрыва проводов может быть принято во внимание поддерживающее действие троссов и необорванных проводов, но при этом добавочные усилия, передающиеся от опор к троссам и проводам, должны быть учтены при расчете этих последних.

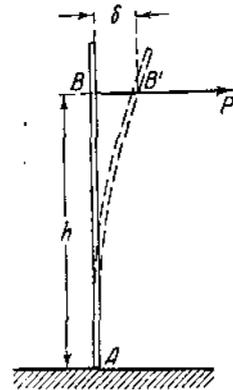
Обрыв проводов в одном из пролетов линии передачи значительно изменяет условия работы опор, так как до обрыва они подвергаются только действию вертикальных сил (вес опор, изоляторов и проводов) и силы давления ветра, который принимается направленным перпендикулярно к линии передачи. После обрыва проводов, вследствие неуравновешенного натяжения по ним, опоры будут испытывать еще действия сил, направленных вдоль линии передачи, причем эти последние, подсчитанные по нормам СССР, значительно превосходят силу давления ветра. Из сказанного ясно, что расчет опор должен быть произведен в предположении действия на них как сил, перпендикулярных к линии передачи (ветер), так и продольных, возникающих при обрыве проводов. Необходимо отметить, что в большинстве случаев конструкция и вес опоры определяются расчетом ее при одностороннем обрыве проводов линии передачи.

§ 2. Коэффициент гибкости опоры.

Прежде чем перейти к определению натяжений, действующих по проводам при обрыве части их, необходимо познакомиться с понятием о коэффициенте гибкости опоры, имеющем весьма существенное значение для расчета проводов при обрыве.

Коэффициент гибкости одиночного столба.

Если опору AB , выполненную в виде одиночного цилиндрического столба, прочно заделанного одним концом в землю, нагрузить в некоторой точке B горизонтальной силой P (фиг. 15), то опора прогнется и займет положение AB' , при котором наступит равновесие между внешней силой P и внутренними силами упругости. При условии, что напряжение материала опоры не превысило предела пропорциональности, прогиб ее будет пропорционален приложенной силе и выразится формулой:



Фиг. 15.

$$\delta = \frac{1}{3} \cdot \frac{Ph^3}{EJ}, \quad (85)$$

где: P — горизонтальная сила, приложенная к опоре,
 h — высота точки приложения силы над местом зацемяления опоры
 (поверхностью земли),
 E — модуль упругости материала опоры,
 J — экваториальный момент инерции,
 δ — прогиб опоры в точке приложения силы.

Положив в уравнении (85) силу P равной единице, можно выразить соответствующий этому случаю прогиб опоры аналогичной формулой

$$K = \frac{1}{3} \frac{h^3}{EJ}. \quad (86)$$

Этот прогиб K и носит название коэффициента гибкости опоры, представляя, таким образом, прогиб ее под влиянием единичной силы. Обычно за единицу силы принимают 1 kg, а величину прогиба выражают в метрах.

Для деревянных столбов, представляющих фактически усеченные конусы, можно пользоваться при определении коэффициента гибкости их той же формулой (86), только подставляя в нее момент инерции, подсчитанный по формуле

$$J = \frac{\pi d_1 d_2^3}{64}, \quad (87)$$

где: d_1 — диаметр столба в точке приложения силы,
 d_2 — " " в плоскости зацемяления его.

Коэффициент гибкости решетчатых мачт. Коэффициент гибкости решетчатых мачт может быть определен с достаточной для практики точностью следующим методом.

Возьмем для простоты плоскую решетчатую мачту (фиг. 16а) и нагрузим ее горизонтальной силой P , лежащей в плоскости решетки.

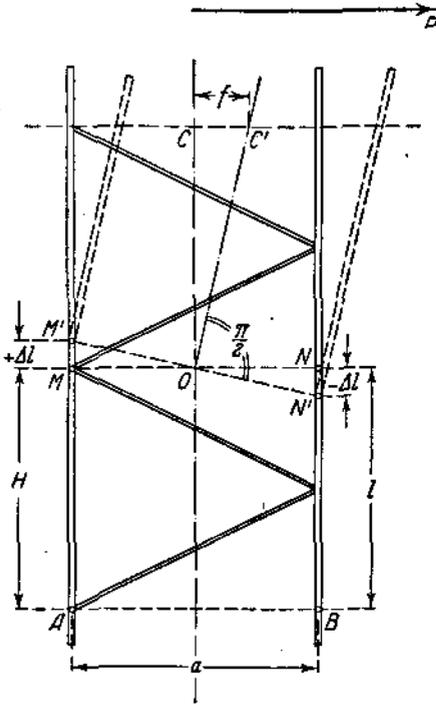
По этой силе можно тем или иным методом найти усилия, действующие по стержням любого пояса мачты. Очевидно, вследствие симметричного расположения стержней относительно оси мачты, усилия по ним будут равны по величине и обратны по направлению, т. е. один стержень будет работать на сжатие, а другой — на растяжение. Выделим какой-либо пояс мачты между сечениями MN и AB (см. фиг. 16а), отстоящими друг от друга на расстоянии H , и обозначим силы, действующие по стержням AM и BN , соответственно через $+Q$ и $-Q$. Эти усилия вызовут удлинение $+ \Delta l$ и укорочение $- \Delta l$ стержней, определяемые по уравнению

$$\pm \Delta l = \frac{\pm Ql}{FE}, \quad (88)$$

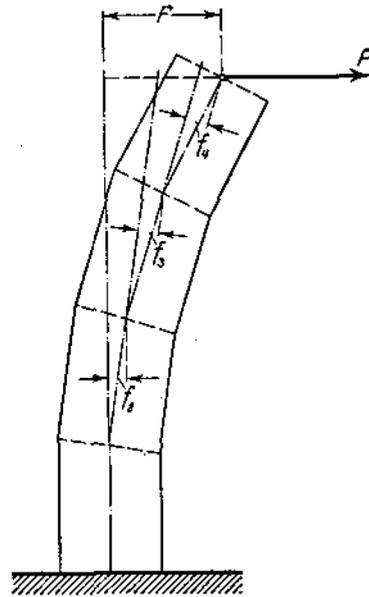
где: F — площадь поперечного сечения стержня,
 E — модуль упругости материала стержня,
 l — длина рассматриваемого участка стержня.

Очевидно, эти деформации стержней, равные между собой по величине, вызовут смещение верхнего сечения MN и заставят его занять

положение $M'N'$, причем центр сечения (точка O) останется на прежнем месте. Этот поворот сечения вызовет, в свою очередь, отклонение следую-



Фиг. 16 а.



Фиг. 16 б.

щего за рассматриваемым поясом, которое можно принять равным приблизительно отрезку CC' (см. фиг. 16 а). Обозначив этот отрезок через f , определим величину его из подобия треугольников $CC'O$ и ONN' :

$$\frac{f}{H} = \frac{\Delta l}{\frac{a}{2}}$$

откуда

$$f = \frac{2 \cdot \Delta l \cdot H}{a}, \quad (89)$$

где: a — расстояние между стойками опоры.

Заменяя в уравнении (89) величину Δl ее значением из уравнения (88), получим выражение для величины отклонения какого-либо пояса опоры под влиянием деформации стержней предыдущего пояса:

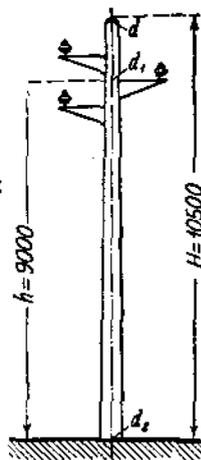
$$f = \frac{2QH}{aFE}. \quad (90)$$

Выполнив аналогичные подсчеты по всем остальным поясам опоры и просуммировав их графически, как это изображено на фиг. 16 б, или аналитически, найдем величину полного прогиба мачты. Коэффициент гибкости решетчатой опоры получится, если в предыдущем расчете предположить силу $P=1$.

Из приведенных для определения коэффициента гибкости уравнений (86) и (90) видно, что величина его зависит от весьма многих величин, как то: материала мачты (E), общих размеров ее (a , H , l) и сечения стержней (F), и потому может колебаться в широких пределах.

Для металлических анкерных опор и опор промежуточных башенного типа коэффициент гибкости столь незначителен, что в расчетах его принимают равным нулю; для деревянных опор величина его колеблется в широких пределах и доходит в специальных типах опор с повышенной гибкостью до 0,0024 м/кг и выше.

При предварительных подсчетах коэффициент гибкости промежуточных металлических опор (не башенного и не специального гибкого типа) может быть определен исходя из величины прогиба всей опоры при нагрузке ее расчетной силой, равного, приблизительно, 1% от высоты опоры над уровнем земли.



Фиг. 17.

Пример 13. Определить коэффициент гибкости деревянной опоры, выполненной в виде одиночного столба высотой $h = 10,5$ м, имеющего в отрубе $d = 215$ мм. Расположение кронштейнов — согласно фиг. 17.

В зависимости от точки приложения силы, — на верхнем, среднем или нижнем кронштейне, — коэффициент гибкости опоры, подсчитанный по формуле (86), будет иметь различную величину. Однако, на практике, независимо от обрыва того или иного провода, обычно оперируют только с одним коэффициентом гибкости, который вычисляется относительно точки приложения равнодействующей от сил, одновременно приложенных ко всем кронштейнам опоры. При нашем расположении кронштейнов, точка приложения равнодействующей будет лежать на высоте среднего кронштейна, т. е. $h = 9$ м.

Коэффициент гибкости опоры найдем по формуле (86):

$$K = \frac{1}{3} \frac{h^3}{EJ},$$

где

$$E = 110\,000 \text{ kg/cm}^2,$$

$$h = 900 \text{ см.}$$

Для определения J по формуле (87)

$$J = \frac{\pi d_1 d_2^3}{64}$$

найдем предварительно d_1 и d_2 .

Считая увеличение диаметра сечения столба на каждый погонный метр длины равным 8 мм¹⁾, получим на уровне среднего кронштейна

$$d_1 = 215 + 8 \cdot 1,5 = 227 \text{ мм} = 22,7 \text{ см};$$

¹⁾ Для сосны и ели увеличение диаметра столба 10 ÷ 13 мм на 1 погонный метр. Для лиственных пород деревьев та же величина 7 ÷ 10 мм на 1 погонный метр.

на уровне земли

Тогда $d_2 = 215 + 8 \cdot 10,5 = 299 \text{ mm} \approx 30 \text{ cm}$.

$$J = \frac{3,14 \cdot 30^3 \cdot 22,7}{64} = 30100 \text{ cm}^4$$

и

$$K = \frac{900^3}{3 \cdot 110000 \cdot 30100} = 0,0725 \text{ cm/kg} = 0,000725 \text{ m/kg}$$

Пример 14. Определить для А-образной опоры высотой $H = 10 \text{ m}$, выполненной из двух швеллеров (корытное железо) № 14 (фиг. 18) коэффициент гибкости опоры. Точка приложения равнодействующих сил лежит на высоте $h_1 = 8,2 \text{ m}$.

Для этого случая за размер h , входящий в формулу коэффициента гибкости опоры, с достаточной для практики точностью можно принять высоту точки приложения равнодействующей сил от поверхности земли, т. е. в нашем случае

$$h = h_1 = 8,2 \text{ m};$$

тогда при модуле упругости железа

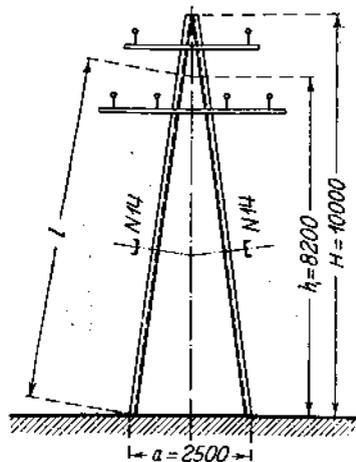
$$E = 2,1 \cdot 10^6 \text{ kg/cm}^2$$

и моменте инерции одного швеллера

$$J_x = 624 \text{ cm}^4$$

получим коэффициент гибкости опоры равным

$$K = \frac{h^3}{3 \cdot E \cdot J \cdot 2} = \frac{820^3}{3 \cdot 2,1 \cdot 10^6 \cdot 624 \cdot 2} = 0,0705 \text{ cm/kg} \approx 0,0007 \text{ m/kg}$$



Фиг. 18.

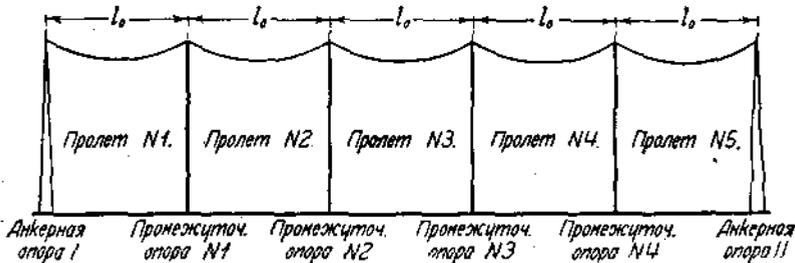
§ 3. Обрыв проводов на линии передачи со штыревыми изоляторами, без учета влияния уцелевших в поврежденном пролете проводов.

Общие сведения. В § 1 этой главы было указано, что промежуточные опоры должны быть рассчитаны на обрыв двух, а анкерные на обрыв всех проводов линии передачи. Как увидим из дальнейшего изложения, для расчета анкерных мачт усилия, действующие по проводам при обрыве, могут быть найдены методами, изложенными в главе III. Для расчета промежуточных опор определение натяжений по проводам при обрыве их не может быть сделано приемами главы III, и потому в дальнейшем мы и займемся рассмотрением этого вопроса.

Для обобщения всех последующих выводов и рассуждений, будем считать, что на линии передачи произошел обрыв n проводов одного пролета. При этом, в параграфах, где описываются методы определения натяжений по проводам при обрыве части их, без учета влияния уцелевших в поврежденном пролете проводов, влиянием этим будем пренебрегать и, следовательно, при всех выводах исходить из положения, что других проводов, кроме тех, с которыми произошла авария, как бы и не существует на линии передачи.

Наиболее опасным местом обрыва проводов, в смысле усилий, приходящихся на промежуточную опору, будет обрыв в пролете, примыкающем к анкерной опоре.

Аналитический метод. На фиг. 19 представлена схема линии электропередачи, подвешенной на штыревых изоляторах, имеющей ме-



Фиг. 19.

жду анкерными опорами по пять равных пролетов длиной l_0 , каждый и не защищенной заземленными троссами ¹⁾.

Для каждого из пролетов, нагруженного удельной нагрузкой γ , можно найти стрелу провеса и длину провода в пролете по основным уравнениям (25), (26) и (27):

$$f_0 = \frac{l_0^2 \gamma}{8 \sigma}; \quad (25)$$

$$L_0 = l_0 + \frac{8 f_0^2}{3 l_0} = l_0 + \frac{l_0^3 \gamma^2}{24 \sigma^2}. \quad (26) \text{ и } (27)$$

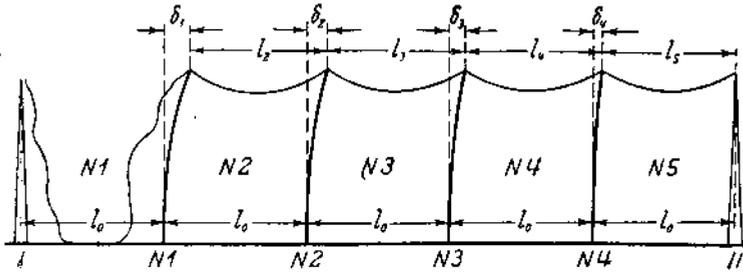
Предположим теперь, что в пролете № 1, примыкающем к анкерной опоре I, произошел обрыв n проводов. При этом, вследствие неодинакового натяжения по проводам по обе стороны от каждой из промежуточных опор, последние отклонятся от вертикального положения по направлению к анкерной опоре II и примут вид, изображенный на фигуре 20. Очевидно, прогибы промежуточных опор будут уменьшаться по мере удаления их от поврежденного пролета ²⁾, и, наконец, анкерная

1) Практически между анкерными опорами делается 8—12 пролетов. При выводах в настоящей книге принимается для сокращения рассуждений 5 пролетов.

2) На линиях передачи со штыревыми изоляторами, как показывают испытания и подсчеты, влияние обрыва распространяется всего на 4—5 ближайших к месту обрыва пролетов, т. е. заметное отклонение будут испытывать только 4—5 соответствующих промежуточных опор.

опора II, практически принимаемая за абсолютно жесткую, никакого прогиба не даст.

Вследствие неодинакового отклонения опор, а следовательно, и точек подвеса проводов, длины новых пролетов и натяжения по проводам в них не будут равны между собой. Обозначим новые значения пролетов и напряжений материала проводов через l и σ с соответствующими индексами, т. е. l_2, l_3, l_4, l_5 и $\sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, \sigma_5$ (фиг. 20).



Фиг. 20.

Очевидно, для каждого из вновь получившихся пролетов мы можем написать, пользуясь формулой (27), основную зависимость длины провода L от длины l самого пролета и напряжения σ :

$$L = l + \frac{l^3 \gamma^2}{24 \sigma^2}. \quad (27)$$

Кроме того, при условии полного закрепления провода в точках подвеса его и постоянстве температуры до и после обрыва, эту же длину провода можно выразить так:

$$L = L_0 [1 + \beta(\sigma - \sigma_0)], \quad (91)$$

где L_0 и σ_0 — величины, соответствующие проводу до момента обрыва его.

Приравнявая правые части уравнений (27) и (91), получим

$$L_0 [1 + \beta(\sigma - \sigma_0)] = l + \frac{l^3 \gamma^2}{24 \sigma^2}. \quad (92)$$

Придавая в этом уравнении l и σ соответствующие индексы, мы получим для каждого пролета совершенно аналогичные уравнения, а именно:

для пролета № 2

$$L_0 [1 + \beta(\sigma_2 - \sigma_0)] = l_2 + \frac{l_2^3 \gamma^2}{24 \sigma_2^2}, \quad (93)$$

для пролета № 3

$$L_0 [1 + \beta(\sigma_3 - \sigma_0)] = l_3 + \frac{l_3^3 \gamma^2}{24 \sigma_3^2}, \quad (94)$$

для пролета № 4

$$L_0 [1 + \beta(\sigma_4 - \sigma_0)] = l_4 + \frac{l_4^3 \gamma^2}{24 \sigma_4^2}, \quad (95)$$

для пролета № 5

$$L_0 [1 + \beta (\sigma_n - \sigma_0)] = l_n + \frac{l_n^3 \gamma^2}{24 \sigma_0^2}. \quad (96)$$

Перейдем теперь к рассмотрению условий равновесия отдельных опор после обрыва.

Очевидно, отклонение опоры № 4 (фиг. 20) может быть выражено так:

$$\delta_4 = Kn (S_3 - S_1), \quad (97)$$

где K — коэффициент гибкости опоры,
 n — число оборвавшихся проводов,
 S_3 и S_1 — натяжения по проводам в соответствующих пролетах.
 δ_4 — отклонение опоры № 4.

Аналогичные уравнения мы можем написать и для отклонений остальных опор, а именно:

для опоры № 3

$$\delta_3 = Kn (S_1 - S_2), \quad (98)$$

для опоры № 2

$$\delta_2 = Kn (S_3 - S_2), \quad (99)$$

для опоры № 1

$$\delta_1 = Kn S_2, \quad (100)$$

причем в последнее уравнение вместо разности натяжений вошло только натяжение проводов со стороны пролета № 2, так как провода в пролете № 1 оборваны.

Заменяя отклонения опор через длины пролетов (по фиг. 20) и вводя напряжение материала проводов вместо натяжений по ним, мы приведем уравнения (97) — (100) к следующему виду:

$$\delta_4 = l_0 - l_3 = Knq (\sigma_n - \sigma_4); \quad (101)$$

$$\delta_3 = 2 l_0 - l_3 - l_4 = Knq (\sigma_4 - \sigma_3); \quad (102)$$

$$\delta_2 = 3 l_0 - l_3 - l_4 - l_3 = Knq (\sigma_3 - \sigma_2); \quad (103)$$

$$\delta_1 = 4 l_0 - l_3 - l_4 - l_3 - l_2 = Knq \sigma_2. \quad (104)$$

Указанным способом можно для любой линии передачи со штыревыми изоляторами, имеющей N пролетов между анкерными опорами, написать $2(N-1)$ самостоятельных уравнений.

В нашем случае, при $N=5$ получено восемь уравнений: (93) — (96) и (101) — (104). Так как число неизвестных (l и σ с соответствующими индексами) равно числу уравнений, то задача определения натяжений является вполне определенной и может быть выполнена совместным решением их. Но это совместное решение является весьма затруднительным, так как, с одной стороны, число уравнений доходит в действительности до $14 \div 22$ (при $N=8 \div 12$), а с другой стороны, часть неизвестных, а именно напряжения материала провода, входят в первые из этих уравнений в третьей степени.

Несколько быстрее можем прийти к цели, применив для решения указанной системы уравнений метод подбора. Для этого задаемся значением напряжения материала провода в последнем пролете (σ_3) и находим по уравнению (96) величину пролета l_3 . Затем, переходя поочередно от уравнений (93) — (96) к уравнениям (101) — (104) и обратно, можно определить величины всех пролетов и соответствующие им напряжения материала проводов. Если величина σ_3 была выбрана правильно, то при подстановке в уравнение (104) входящих в него величин, должно получиться тождество. Несоблюдение этого условия указывает на неправильный выбор величины σ_3 и заставляет, задавшись другим его значением, проделать все вычисления снова и, вообще, повторять их до тех пор, пока левая и правая части уравнения (104) не будут тождественно равны.

Как видно из изложенного, описанный метод подбора требует большого количества вычислений и отнимает много времени, поэтому задача обычно, решается графо-аналитическим или графическим методами. К рассмотрению последних мы и перейдем.

Графо-аналитический метод. Графо-аналитический метод, предложенный автором настоящей книги, заключается в следующем. Уравнение, дающее зависимость между напряжением материала провода и длиной пролета при некоторых неизменных атмосферных условиях, имеет, как было выведено выше, вид:

$$L_0 [1 + \beta (\sigma - \sigma_0)] = l + \frac{l^3 \gamma^2}{24 \sigma^2} \quad (92)$$

Преобразуя его, получим:

$$\frac{l^3 \gamma^2}{24 \sigma^2} - L_0 \beta \sigma = L_0 (1 - \beta \sigma_0) - l. \quad (105)$$

В этом уравнении длина провода L_0 , удельная нагрузка γ и напряжение σ_0 относятся к исходным условиям, непосредственно предшествовавшим моменту обрыва проводов. Давая в уравнении (105) пролету l различные значения, найдем соответствующие величины напряжения материала σ , а по ним и значения действующих по проводам натяжений S , так как $S = q\sigma$. По полученным результатам строим кривую зависимости натяжения S по проводу от изменения длины пролета l (фиг. 21).

В данном случае нас интересует только сокращение длины пролетов, как то непосредственно видно на фиг. 20, и поэтому при построении кривой задаемся значениями l , меньшими l_0 .

При расчетах необходимо строить эту кривую в возможно большем масштабе, так как отклонения опор от вертикали, а, следовательно, и сокращения пролетов, представляют обычно величины весьма незначительные.

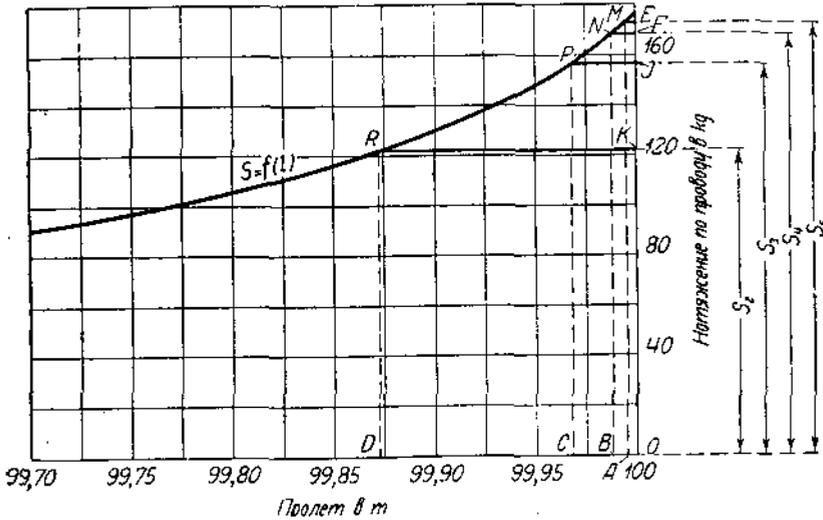
Предположим опять, что обрыв проводов произошел в пролете № 1, смежном с анкерной опорой I. Для определения натяжений по проводам в неповрежденных пролетах поступаем следующим образом.

Задаваясь величиной натяжения S_2 по каждому из проводов про-

лета № 2, из условия равновесия промежуточной опоры № 1 находим ее отклонение (фиг. 20):

$$\delta_1 = KnS_2. \quad (106)$$

По кривой $S=f(l)$ фиг. 21, откладывая $OK=S_2$ и проводя горизонталь KR , определяем длину l_2 второго пролета (точка D), соответствующую выбранному натяжению S_2 .



Фиг. 21.

Переходя ко второй промежуточной опоре, можно представить отклонение ее δ_2 следующим образом:

$$\delta_2 = \delta_1 + l_2 - l_0. \quad (107)$$

Так как в правой части уравнения (107) все величины известны, то найдем и величину отклонения δ_2 опоры № 2.

Затем, из условия равновесия промежуточной опоры № 2, которое напишется так:

$$\delta_2 = Kn(S_3 - S_2),$$

можно определить величину натяжения по проводам третьего пролета, равную

$$S_3 = \frac{\delta_2 + KnS_2}{Kn}. \quad (108)$$

Зная S_3 , находим по кривой $S=f(l)$ фиг. 21, откладывая $OJ=S_3$ и проводя горизонталь JP , соответствующее значение длины пролета l_3 (точка C). Подсчитываем отклонение δ_3 опоры № 3 из соотношения (см. фиг. 20):

$$\delta_3 = \delta_2 + l_3 - l_0. \quad (109)$$

Условие равновесия промежуточной опоры № 3

$$\delta_3 = Kn(S_4 - S_3)$$

позволяет определить величину натяжения по проводам четвертого пролета

$$S_4 = \frac{\delta_3 + KnS_3}{Kn}, \quad (110)$$

а по нему, пользуясь кривой фиг. 21, и длину пролета l_4 (точка B). Затем находим отклонение четвертой опоры

$$\delta_4 = \delta_3 + l_4 - l_0 \quad (111)$$

и из условия равновесия опоры № 4

$$\delta_4 = Kn(S_3 - S_4)$$

определяем натяжения по проводам пятого пролета:

$$S_5 = \frac{\delta_4 + KnS_4}{Kn}. \quad (112)$$

Наконец, по кривой $S = f(l)$, откладывая $OE = S_5$ и проводя прямую ME , находим длину l_5 (точка A) и проверяем соблюдение соотношения

$$l_0 = \delta_4 + l_5, \quad (113)$$

вытекающего из принятого нами условия, что анкерная опора II, как жесткая, не имеет никакого прогиба. Выполнение соотношения (113) и служит критерием правильности выбора натяжения S_2 .

В случае несоблюдения указанного условия, необходимо задаться другим значением S_2 и произвести все подсчеты снова, повторяя их до тех пор, пока соотношение (113) не окажется выполненным.

Графический метод. Перейдем теперь к рассмотрению графического метода для определения натяжений по проводам при обрыве части их.

Необходимо указать здесь, что графический метод определения натяжения по проводам при обрыве части их был впервые предложен проф. К. И. Шенфером, которым дано решение задачи так, как изложено в § 6 настоящей главы.

Закон изменения натяжений в зависимости от длины пролета, как уже было указано выше, может быть графически представлен кривой фиг. (21). Видоизменим несколько эту кривую, откладывая по оси абсцисс не длины пролета, а сокращения его

$$\Delta l = l_0 - l,$$

тогда зависимость $S = f(\Delta l)$ будет иметь вид, представленный кривой I фиг. 22.

Отклонение промежуточных опор, в зависимости от действующей на них разности натяжений в смежных пролетах, представляет закон прямой

$$\delta = Kn \Delta S, \quad (114)$$

где ΔS — разность натяжений по одному проводу в двух смежных с данной опорой пролетах (остальные обозначения те же, что и раньше). За-

и, аналогично предыдущему, найдем сокращение длины четвертого пролета

$$\Delta l_4 = EF.$$

Из фиг. 20 отклонение δ_3 опоры № 3 может быть выражено следующим образом:

$$\delta_3 = \delta_4 + l_0 - l_4 = \delta_4 + \Delta l_4$$

и, на основании полученного соотношения, представлено отрезком

$$EJ = EF + FJ$$

при условии, что

$$FJ = AB = \Delta l_3.$$

Отклонению $\delta_3 = EJ$ будет соответствовать разность натяжений, действующих на опору № 3, определяемая по кривой *II*,

$$\Delta S_3 = S_4 - S_3 = MK.$$

Найдем теперь натяжение в пролете № 3

$$S_3 = S_4 - \Delta S_3 = OE - MK,$$

отложив от точки *E* отрезок $EN = MK$; получим

$$S_3 = ON.$$

Очевидно, сокращение пролета № 3 будет

$$\Delta l_3 = NP.$$

Отклонение опоры № 2 может быть написано так:

$$\delta_2 = \delta_3 + l_0 - l_2 = \delta_3 + \Delta l_3$$

и, следовательно, выражено отрезком

$$\delta_2 = NR = NP + PR.$$

причем

$$PR = EJ = \delta_3.$$

Этому отклонению будет отвечать разность натяжений, действующих на опору № 2

$$\Delta S_2 = S_3 - S_2 = HT,$$

откуда натяжение во втором пролете будет

$$S_2 = S_3 - \Delta S_2 = ON - HT = ON - NX = OX.$$

Сокращение пролета № 2 найдется по кривой *I* и будет представлено отрезком XY , т. е.

$$\Delta l_2 = XY.$$

Отклонение опоры № 1, аналогично с предыдущим, напишется так:

$$\delta_1 = \delta_2 + l_0 - l_1 = \delta_2 + \Delta l_2;$$

поэтому, отложив от точки Y горизонтальный отрезок

$$YZ = NR = \delta_2,$$

получим графическое выражение отклонения первой опоры

$$\delta_1 = XZ.$$

Таким образом, все натяжения и отклонения промежуточных опор оказались найденными.

Критерием правильности выбора натяжения S_3 служит местоположение точки Z (фиг. 22), а именно: если точка Z попала на кривую II , то величина S_3 выбрана правильно. Это положение вытекает из следующих соображений: координатами точки Z являются $XZ = \delta_1$ и $ZU = S_3$, но так как S_2 представляет одновременно и разность натяжений, действующих на опору № 1 ($S_1 = 0$ — провода оборваны), то можно написать, что $ZU = \Delta S_1 = S_2$. Таким образом, координаты точки Z удовлетворяют уравнению кривой II и поэтому сама точка Z должна лежать на этой кривой. Несоблюдение этого условия указывает на неправильный выбор величины S_3 ; в последнем случае необходимо задаться новым его значением и все построения проделать сначала, повторяя их до тех пор, пока указанное условие не будет выполнено.

Задача определения натяжений при обрыве может быть решена графически с помощью тех же самых кривых несколько иначе, для чего необходимо идти с другого конца, т. е. задаться величиной S_2 (или δ_1), определить δ_1 (или S_2), и в зависимости от них найти сокращение пролета № 2 и отклонение второй опоры. Затем постепенно нашли бы величины натяжений в пролетах №№ 3, 4 и 5 и отклонения соответствующих опор. В этом случае критерием правильности выбора величины S_2 явится условие отсутствия прогиба анкерной опоры II .

Добавочные построения при графическом методе. Из всего вышеизложенного видно, что задача определения натяжений при обрыве решается, в конечном итоге, путем подбора величины S_3 (или δ_1). При недостаточном навыке иногда приходится задаваться этими величинами несколько раз, прежде чем получить правильное решение.

В дальнейшем дан способ, предложенный инж. В. П. Фармаковским, применение которого дает возможность решать эту задачу при помощи тех же кривых с первого же раза, но за счет большого количества добавочных построений.

Суть этого способа заключается в следующем.

Если мы будем давать величине δ_1 произвольные значения, то, очевидно, точка Z будет перемещаться по кривой II (фиг. 23) или, что то же, по кривой OZ . Точка Y' отстоит по горизонтали от точки Z на величину отрезка $Y'Z = \Delta l_2$ и определяемого по кривой I , поэтому перемещение Z повлечет за собой и перемещение точки Y' , которая опишет при этом кривую $Y''Z'$. Для построения кривой $Y''Z'$ мы должны от кривой OZ откладывать влево абсциссы соответствующих точек кривой I . Каждому положению точки Y' на кривой $Y''Z'$ будет соответствовать

ущевших проводов линии на участке между двумя анкерными мачтами сброшен. Требуется определить натяжения по проводам в различных пролетах после обрыва их. Коэффициент гибкости опоры $K = 0,000725 \text{ m/kg}$. Анкерные опоры расположены через каждые 5 пролетов. Пролет линии $l = 100 \text{ m}$ (условия примера соответствуют Нормам СССР).

а) Графо-аналитический метод. Стрела провеса провода при сброшенном гололеде и ветре была найдена в примере 12 и равнялась

$$f = 1,9 \text{ m.}$$

Длина провода в пролете, подсчитанная по уравнению (26), найдется:

$$L_0 = l + \frac{8}{3} \cdot \frac{f^2}{l} = 100 + \frac{8}{3} \cdot \frac{1,9^2}{100} = 100,096 \text{ m.}$$

Подставляя подсчитанную величину L_0 и напряжение материала провода $\sigma_0 = 7,1 \text{ kg/mm}^2$, найденное в примере 12, в уравнение (105)

$$\frac{l^3 \gamma^2}{24 \sigma^2} - L_0 \beta \sigma = L_0 (1 - \beta \sigma_0) - l,$$

получим:

$$\frac{l^3 \cdot 0,0108}{24 \cdot \sigma^2} - 100,096 \cdot 0,77 \cdot 10^{-4} \sigma = 100,096 (1 - 0,77 \cdot 10^{-4} \cdot 7,1) - l$$

или

$$\frac{486 \cdot 10^{-8} \cdot l^3}{\sigma^2} - 0,0077 \sigma = 100,0377 - l.$$

Задаваясь различными значениями l , находим соответствующие им величины σ , а следовательно, и $S = q\sigma$.

Результаты этих подсчетов сведены в табл. XII.

Т А Б Л И Ц А XII.

Пролет в метрах (l) . . .	100	99,9	99,8	99,7	99,6
Напряжение провода в kg/mm^2 (σ)	7,1	5,22	4,26	3,66	3,22
Натяжение по проводу в kg (S)	177,5	130,5	106,5	91,5	80,5

По полученным данным строим кривую, представленную на фиг. 21, и приступаем к определению натяжений в проводах после обрыва части их.

Задаемся в пролете № 2 натяжением проводов $S_2 = 122 \text{ kg}$.

По кривой фиг. 21 находим соответствующий пролет

$$l_2 = 99,874 \text{ m.}$$

Прогиб промежуточной опоры № 1 может быть подсчитан по уравнению (106) и будет равен:

$$\delta_1 = KnS_2 = 0,000725 \cdot 2 \cdot 122 = 0,177 \text{ m.}$$

Согласно уравнениям (107) и (108) имеем:

$$\delta_2 = \delta_1 + l_2 - l_0 = 0,177 - (100 - 99,874) = 0,051 \text{ m}$$

и

$$S_3 = \frac{\delta_2 + KnS_2}{Kn} = S_2 + \frac{\delta_2}{Kn} = 122 + \frac{0,051}{0,00145} = 157 \text{ kg.}$$

По натяжению S_3 и по кривой фиг. 21 находим

$$l_3 = 99,9665 \text{ m.}$$

Тогда по уравнениям (109) и (110) имеем:

$$\delta_3 = \delta_2 + l_3 - l_0 = 0,051 - 0,0335 = 0,0175 \text{ m}$$

и

$$S_4 = S_3 + \frac{\delta_3}{Kn} = \frac{0,0175 + 0,00145 \cdot 157}{0,00145} = 157 + \frac{0,0176}{0,00145} = 169,2 \text{ kg.}$$

Этому натяжению по кривой фиг. 21 отвечает $l_4 = 99,9875 \text{ m.}$

Находим прогиб опоры № 4

$$\delta_4 = \delta_3 - (l_0 - l_4) = 0,0175 - 0,0125 = 0,005 \text{ m}$$

и натяжение по проводу в пролете № 5

$$S_5 = \frac{\delta_4 + KnS_4}{Kn} = \frac{0,005}{0,00145} + 169,2 = 172,65 \text{ kg.}$$

Натяжению по кривой отвечает пролет $l_5 = 99,996 \text{ m.}$

Прогиб анкерной опоры II

$$\delta_5 = \delta_4 - (l_0 - l_5) = 0,005 - 0,004 = 0,001 \text{ m,}$$

т. е. с достаточной для практики точностью можем положить $\delta_5 = 0$.

Полученный результат показывает, что величина S_2 была выбрана правильно и подсчитанные натяжения по проводам в пролетах и прогибы опор соответствуют действительности.

в) Графический метод. Для графического метода решения задачи нам необходимо в дополнение к кривой $S = f(l)$ построить еще кривую $\delta = Kn\Delta S$.

Последняя кривая в рассматриваемом случае удовлетворяет уравнению:

$$\delta = 0,000725 \cdot 2 \cdot \Delta S = 0,00145 \Delta S$$

и представляет из себя прямую II, нанесенную на фиг. 22.

Графическое решение задачи, описание которого дано полностью в теоретической части настоящего параграфа, представлено на фиг. 22, а результаты его сведены в табл. XIII.

Т А Б Л И Ц А XIII.

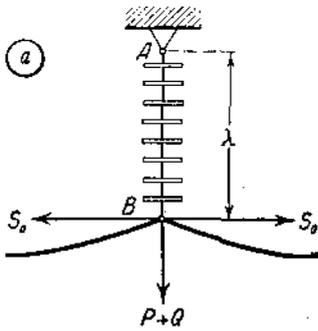
S_2	S_3	S_4	S_5
122 kg	157 kg	169 kg	173 kg

Как видно из этой таблицы, полученные величины натяжений по проводам вполне совпадают с таковыми, полученными графо-аналитическим методом.

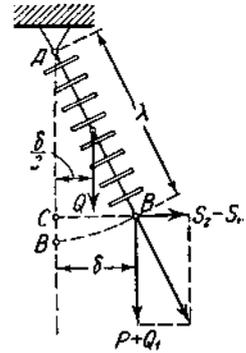
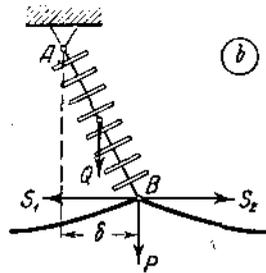
§ 4. Условия равновесия гирлянды подвесных изоляторов.

Прежде чем перейти к определению натяжений по проводам при одностороннем обрыве части их для линии передачи с подвесными изоляторами, необходимо сначала рассмотреть условия равновесия гирлянды изоляторов.

Отклонение гирлянды изоляторов. Предположим, что имеется гирлянда изоляторов, состоящая из n элементов (фиг. 24 а), с общей длиной λ и весом Q . Вес провода (с добавочными нагрузками или без них), приходящийся на эту гирлянду, обозначим через P , причем это будет вес провода на длине одного пролета (точнее — двух полупролетов).



Фиг. 24.



Фиг. 25.

При нормальных условиях работы линии, т. е. когда горизонтальные составляющие S_0 натяжения проводов левого и правого от гирлянды пролетов равны (фиг. 24 а), гирлянда изоляторов будет занимать вертикальное положение.

В случае нарушения по каким-либо причинам равенства между натяжением S_1 по проводу левого и натяжением S_2 по проводу правого пролета, гирлянда изоляторов отклонится в сторону большего натяжения и займет положение, указанное на фиг. 24 б. Так как гирлянда представляет из себя шарнирное соединение n отдельных тарелок изоляторов, то при отклонении она примет вид не прямой AB , как это изображено на фигуре, а некоторой ломаной линии. Однако учет кривизны гирлянды при ее отклонении значительно усложняет все расчеты, не оказывая на результаты их существенного влияния. Если же, кроме того, учесть, что при механическом расчете линий передач многие факторы приходится оценивать весьма приближенно (как, например — гибкость опор, атмосферные условия и т. д.) и к тому же делаемые нормами предположения о количестве оборванных проводов, о сбрасывании с них всего гололеда при обрыве и т. д. являются по существу условными, то станет понятным, что не имеет никакого смысла значительно усложнять вопрос опре-

деления натяжения по проводам при их обрыве введением учета кривизны гирлянды при ее отклонении.

Условия равновесия. Сделав эти предпосылки, перейдем к рассмотрению условий равновесия гирлянды.

На гирлянду будут действовать следующие силы (фиг. 24b).

Разность натяжений по проводам $S_2 - S_1$, приложенная к конечной точке B гирлянды и направленная горизонтально. Вес провода с добавочными нагрузками на него P , приложенный к точке B и вес самой гирлянды Q , приложенный на половине длины гирлянды.

Под влиянием силы $S_2 - S_1$ гирлянда отклонится на величину δ и займет такое положение, при котором сумма моментов всех сил относительно точки A будет равна нулю.

Уравнение моментов относительно точки A (фиг. 25) будет:

$$P\delta + Q\frac{\delta}{2} - (S_2 - S_1) \cdot \sqrt{\lambda^2 - \delta^2} = 0.$$

Обозначая $Q:2$ через Q_1 и решая относительно δ уравнение моментов, найдем величину отклонения гирлянды:

$$\delta = \lambda \cdot \frac{S_2 - S_1}{\sqrt{(P + Q_1)^2 + (S_2 - S_1)^2}}. \quad (115)$$

Этим уравнением, дающим отклонение гирлянды изоляторов от вертикали в зависимости от разности натяжений проводов в двух соседних пролетах, в дальнейшем придется часто пользоваться.

Необходимо указать, что если в силу P в качестве добавочных нагрузок входит нагрузка провода от ветра, то силы P , Q , S_2 и S_1 не лежат в одной и той же плоскости. Однако, при всех практических подсчетах можно, в виду малых ошибок, которые от этого получатся, складывать P и Q арифметически, а не геометрически.

§ 5. Обрыв проводов на линии передачи с подвесными изоляторами, без учета влияния оставшихся необорванными проводов.

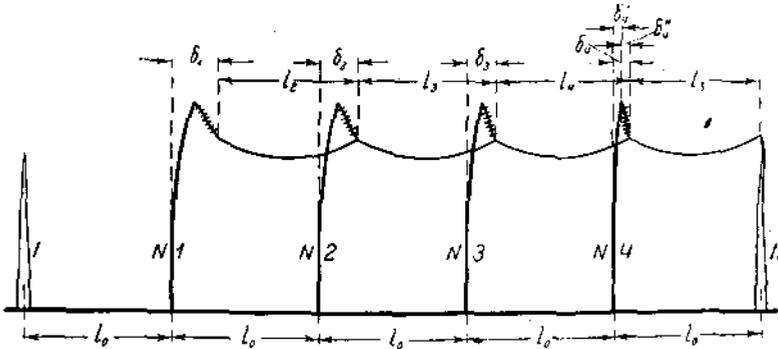
Определение натяжений при обрыве части проводов одного пролета для случая линии передачи, монтированной на подвесных изоляторах, будем производить, исходя из того же предположения, что и при штыревых изоляторах, т. е. что уцелевшие провода поврежденного пролета никакого влияния не оказывают.

Заметим, что это предположение для данного случая имеет значительно больше обоснований, чем для случая штыревых изоляторов, так как подвижность гирлянды (возможность отклонений ее) значительно уменьшает влияние от уцелевших проводов на мачты, а следовательно, и на поврежденные провода.

Здесь, так же как и при штыревых изоляторах, исследование можно

вести тремя методами: аналитическим, графо-аналитическим и графическим. Но применение графо-аналитического метода при подвесных изоляторах приводит к многократному решению квадратных уравнений, что требует затраты значительного количества времени, и потому здесь не рассматривается.

Аналитический метод. Пусть имеется линия передачи, расстояние между анкерными опорами которой разбито на 5 равных пролетов. При обрыве проводов в 1-м пролете (у анкерной опоры I) все промежуточные опоры и все гирлянды изоляторов отклонятся в сторону анкерной опоры II и займут положение, показанное на фиг. 26.



Фиг. 26.

Очевидно, зависимость между натяжением провода и длиной пролета будет в этом случае та же самая, что и при штыревых изоляторах и, следовательно, может быть выражена теми же уравнениями [см. уравнения (93), (94), (95) и (96)], а именно:

для пролета № 2

$$L_0[1 + \beta(\sigma_2 - \sigma_0)] = l_2 + \frac{l_2^3 \gamma_0^2}{24\sigma_2^2}, \quad (93)$$

для пролета № 3

$$L_0[1 + \beta(\sigma_3 - \sigma_0)] = l_3 + \frac{l_3^3 \gamma_0^2}{24\sigma_3^2}, \quad (94)$$

для пролета № 4

$$L_0[1 + \beta(\sigma_4 - \sigma_0)] = l_4 + \frac{l_4^3 \gamma_0^2}{24\sigma_4^2}, \quad (95)$$

для пролета № 5

$$L_0[1 + \beta(\sigma_5 - \sigma_0)] = l_5 + \frac{l_5^3 \gamma_0^2}{24\sigma_5^2}. \quad (96)$$

Перейдем теперь к рассмотрению условий равновесия опор и гирлянд при их отклонении.

Отклонение δ_4 точки подвеса провода на промежуточной опоре № 4 состоит из отклонения самой опоры δ_4' и отклонения гирлянды изоляторов δ_4'' , следовательно:

$$\delta_4 = \delta_4' + \delta_4''.$$

Отклонение гирлянды изоляторов, как было выведено выше [уравнение (115)], равно:

$$\delta_4'' = \lambda \frac{S_5 - S_4}{\sqrt{(P + Q_1)^2 + (S_5 - S_4)^2}}.$$

Отклонение же опоры, при коэффициенте гибкости ее K , определяется, согласно уравнения (97), так:

$$\delta_4' = Kn(S_5 - S_4).$$

Общее отклонение точки подвеса провода от положения, соответствующего необорванным проводам, будет:

$$\delta_4 = Kn(S_5 - S_4) + \lambda \frac{S_5 - S_4}{\sqrt{(P + Q_1)^2 + (S_5 - S_4)^2}}. \quad (116)$$

Но отклонение δ_4 точки подвеса провода (фиг. 26) может быть выражено:

$$\delta_4 = l_0 - l_5. \quad (113')$$

Приравняв правые части двух предыдущих уравнений друг другу, получим условие равновесия опоры № 4:

$$l_0 - l_5 = Kn(S_5 - S_4) + \lambda \frac{S_5 - S_4}{\sqrt{(P + Q_1)^2 + (S_5 - S_4)^2}}. \quad (117)$$

Очевидно, правая часть уравнения (117) после соответствующего изменения индексов у натяжений S может выразить отклонение точки подвеса провода на любой опоре. Для вывода аналогичных уравнений применительно к остальным опорам нужно, следовательно, дать выражение этого отклонения через длины пролетов (левая часть уравнения).

Для опоры № 3 из фиг. 26 получаем:

$$\delta_3 = 2l_0 - l_4 - l_5;$$

для опоры № 2 подобным же образом находим:

$$\delta_2 = 3l_0 - l_5 - l_4 - l_5$$

и, наконец, для опоры № 1 будем иметь:

$$\delta_1 = 4l_0 - l_5 - l_5 - l_4 - l_5.$$

Приравняв полученные выражения отклонений точек подвеса к выражениям их (отклонений), согласно уравнений (98) и (115), будем иметь:

для опоры № 3

$$2l_0 - l_4 - l_5 = Kn(S_4 - S_3) + \lambda \frac{S_4 - S_3}{\sqrt{(P + Q_1)^2 + (S_4 - S_3)^2}}; \quad (118)$$

для опоры № 2

$$3l_0 - l_5 - l_4 - l_5 = Kn(S_3 - S_2) + \lambda \frac{S_3 - S_2}{\sqrt{(P + Q_1)^2 + (S_3 - S_2)^2}}; \quad (119)$$

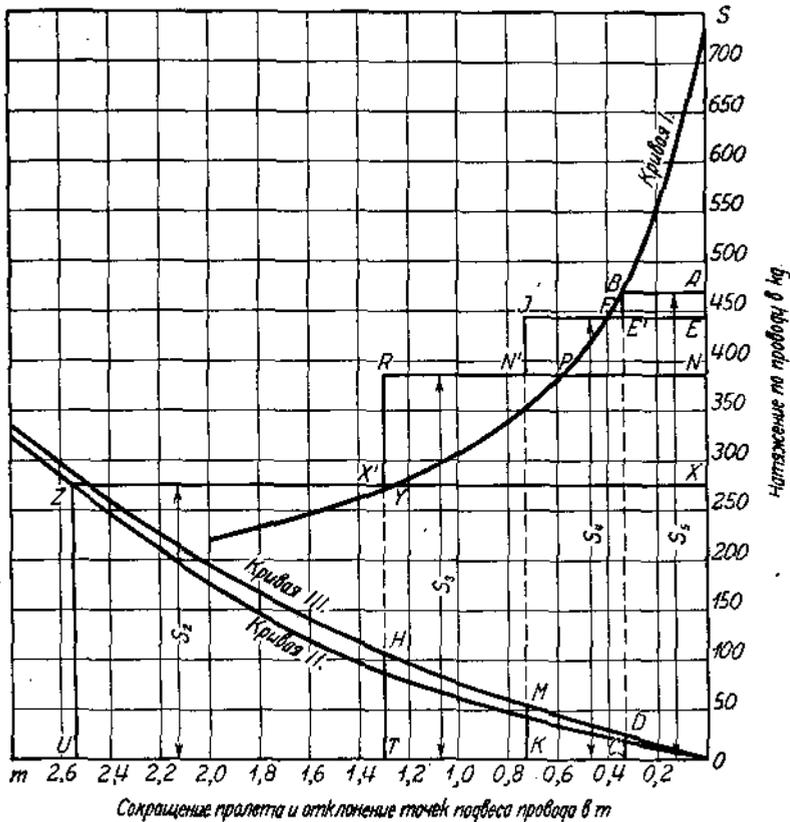
для опоры № 1

$$4l_0 - l_5 - l_5 - l_4 - l_5 = KnS_2 + \lambda \frac{S_2}{\sqrt{(P_1 + Q_1)^2 + S_2^2}}. \quad (120)$$

Как видим, уравнение для опоры № 1 получилось несколько отличным от остальных уравнений, а именно: вместо величины P , являющейся весом провода с добавочными нагрузками на длине целого пролета, вошла величина P_1 , равная весу провода с добавочными нагрузками на него на длине полупролета и высоты мачты. Это обстоятельство объясняется тем, что оборвавшийся в первом пролете провод ложится на землю почти у самой опоры и, следовательно, только часть его, равная по длине высоте опоры, находится в подвешенном состоянии.

Таким образом, мы получили систему восьми уравнений (93) — (96) и (117) — (120) с восемью неизвестными l_3, l_4, l_3, l_2 и S_3, S_4, S_3, S_2 , которые и могут быть решены аналитически. Однако, решение этой системы уравнений обычными приемами является настолько сложным (особенно, если принять во внимание, что число пролетов доходит практически до 10 и больше), что приходится для определения неизвестных прибегать к методу подбора. Но и этот способ, будучи применен непосредственно, занимает весьма много времени, почему обычно и прибегают к графическому решению, к рассмотрению которого мы и перейдем.

Графический метод. При графическом методе определения натяжений в случае обрыва проводов одного из пролетов поступают следующим образом.



Фиг. 27.

Строим, как и при подобных же подсчетах для линий со штыревыми изоляторами, кривую зависимости натяжения провода от изменения длины пролета (кривая *I* фиг. 27), исходя из уравнения (105),

$$\frac{l^2 \gamma_0^2}{24\sigma_1^2} - L_0 \beta \sigma_1 = L_0(1 - \beta \sigma_0) - l, \quad (105)$$

причем по оси абсцисс откладываем сокращения пролета Δl , а по оси ординат — натяжения по проводу S .

На том же чертеже строим кривую *II*, дающую отклонение точки подвеса на первой от места обрыва опоре в зависимости от натяжения провода в соседнем неповрежденном пролете [в нашем случае (см. фиг. 26) это будет 2-й пролет]. При построении исходим из выведенного выше уравнения:

$$\delta_1 = KnS_2 + \lambda \frac{S_2}{\sqrt{(P_1 + Q_1)^2 + S_2^2}}. \quad (120')$$

Совершенно аналогично строим кривую *III*, дающую отклонение точки подвеса на любой опоре в зависимости от разности натяжений проводов в соседних с опорой пролетах. Исходным уравнением является:

$$\delta_{n-1} = Kn(S_n - S_{n-1}) + \lambda \frac{S_n - S_{n-1}}{\sqrt{(P + Q_1)^2 + (S_n - S_{n-1})^2}}. \quad (116')$$

При построении кривых *II* и *III* откладываем по оси абсцисс отклонения точек подвеса δ , а по оси ординат — натяжения по проводам S .

Выполнив указанные построения, переходим к определению натяжений по проводам при одностороннем обрыве их, поступая следующим образом.

Задаемся натяжением S_5 по проводу в пролете № 5 и откладываем это натяжение по оси ординат; из полученной точки *A* проводим горизонталь *AB* до пересечения с кривой *I*. Очевидно, отрезок *AB* даст сокращение длины пролета № 5, т. е.:

$$AB = \Delta l_5.$$

Но из фиг. 26 видим, что

$$\Delta l_5 = \delta_4;$$

следовательно,

$$AB = \delta_4,$$

где δ_4 есть отклонение точки подвеса провода на опоре № 4, причем оно может иметь место только в том случае, если на опору № 4 действует разность натяжений по проводам двух смежных с опорой пролетов. Указанная разность натяжений связана с отклонением опоры ранее выведенным уравнением (116):

$$\delta_4 = Kn(S_5 - S_4) + \lambda \frac{S_5 - S_4}{\sqrt{(P + Q_1)^2 + (S_5 - S_4)^2}}. \quad (116)$$

Очевидно, эта разность натяжений графически выразится отрезком DC между осью абсцисс и кривой III , так как эта кривая построена нами по уравнению (120''), являющемуся обобщенным выражением уравнения (116).

Таким образом, можно написать:

$$S_3 - S_4 = DC.$$

Подставляя значение

$$S_3 = OA,$$

найдем

$$S_4 = OA - DC.$$

Отложив от точки A вниз отрезок

$$AE = DC,$$

получим

$$S_4 = OE.$$

Проводим из точки E горизонтальную прямую EJ .

Из фиг. 26 имеем:

$$\delta_3 + l_4 = l_0 + \delta_4,$$

или

$$\delta_3 = l_0 - l_4 + \delta_4 = \Delta l_4 + \delta_4, \quad (121)$$

т. е. отклонение точки подвеса провода на опоре № 3 складывается из отклонения точки подвеса на опоре № 4 и сокращения пролета № 4.

Возвращаясь к фиг. 27, можем графически определить величину δ_3 , отложив от точки F по горизонтали отрезок FJ , равный по величине AB ; полученный отрезок

$$EJ = EF + FJ.$$

Но

$$FJ = AB = \delta_4;$$

отрезок же EF , очевидно, равен сокращению пролета под действием натяжения OE , равного S_4 , т. е.

$$EF = \Delta l_4.$$

Таким образом, отрезок

$$EJ = \Delta l_4 + \delta_4$$

и даст отклонение точки подвеса провода на опоре № 3, т. е.

$$EJ = \delta_3.$$

Аналогично предыдущему, находим по кривой III разность натяжений в смежных с опорой № 3 пролетах, которая и создаст отклонение δ_3 точки подвеса провода.

Именно:

$$\Delta S_4 = S_4 - S_3 = MK,$$

откуда

$$S_3 = S_4 - \Delta S_4 = OE - MK.$$

Откладываем из точки E вниз отрезок

$$EN = MK,$$

получим

$$S_3 = ON.$$

Проводя из точки N горизонталь NR и повторяя для опоры № 2 те же рассуждения, что и раньше, т. е.

$$\delta_2 + l_3 = l_0 + \delta_3$$

или

$$\delta_2 = \Delta l_3 + \delta_3.$$

Но так как

$$\delta_3 = EJ = PR \quad \text{и} \quad \Delta l_3 = NP,$$

то находим

$$\delta_2 = NP + PR = NR.$$

Аналогично с предыдущим,

$$S_3 - S_2 = HT.$$

Отложив от точки N вниз отрезок

$$NX = HT,$$

получим

$$S_2 = OX.$$

Проводя из точки X горизонталь XZ и отложив на ней отрезок

$$YZ = NR = \delta_3$$

и заметив (фиг. 26), что

$$\delta_1 = l_0 - l_2 + \delta_2 = \Delta l_2 + \delta_2,$$

получаем графическое изображение отклонения точки подвеса опоры № 1

$$\delta_1 = XZ.$$

Таким образом, исходя из предположенного натяжения S_3 по проводу в пролете № 5 и выполнив все только что описанные построения, найдем натяжения по проводам во всех пролетах и отклонения точек подвеса на всех опорах.

Здесь, как и в случае штыревых изоляторов, критерием правильности выбора величины S_3 служит местоположение точки Z , а именно: если точка Z попадет на кривую II , то величиной натяжения S_3 задаться правильно; если не попадет — то неправильно. Это правило вытекает из следующих соображений: точка Z , как это видно из фиг. 27, имеет координаты δ_1 и S_3 , но так как кривая II как раз и дает зависимость [см. уравнение (120')] отклонения δ_1 точки подвеса на опоре № 1

от натяжения S_2 по проводам пролета № 2, то, следовательно, точка Z должна лежать на этой кривой.

В случае, если точка Z на кривую II не попадет, то нужно задаться новым значением S_3 и проделать все построение снова до тех пор, пока приведенное правило не будет соблюдено.

Пример 16. На трехфазной линии электропередачи с горизонтальным расположением медных проводов сечением $q = 70 \text{ mm}^2$ при $t = -5^\circ\text{C}$ и добавочных нагрузках на провода в виде давления ветра со скоростью $v = 20 \text{ m/sec}$ и слоя льда с толщиной стенки $b = 10 \text{ mm}$, в пролете, примыкающем к анкерной опоре, произошел обрыв двух проводов. Принимаем, что от сотрясения проводов в момент обрыва гололед со всех уцелевших проводов линии на участке между двумя анкерными опорами сброшен. Требуется определить, пренебрегая влиянием уцелевших проводов в поврежденном пролете, натяжения по проводам в различных пролетах после обрыва.

Пролет линии $l = 175 \text{ m}$. Коэффициент гибкости опоры $K = 0,0024 \text{ m/kg}$ (специальный тип деревянных опор с повышенной гибкостью). Длина гирлянды $\lambda = 1,3 \text{ m}$. Анкерные опоры расположены через каждые пять пролетов.

а) Построение кривой зависимости $l = f(S)$.

Согласно табл. XI удельная нагрузка на провода до обрыва равнялась

$$\gamma_7 = 0,0204 \text{ kg/m} \cdot \text{mm}^2,$$

а после обрыва

$$\gamma_6 = 0,00966 \text{ kg/m} \cdot \text{mm}^2.$$

Так как пролет больше критического (определение критического пролета для этого случая см. пример 7, стр. 42), то напряжение до обрыва примем равным $\sigma = 18 \text{ kg/mm}^2$.

Напряжение в проводах, соответствующее атмосферным условиям: $t = -5^\circ\text{C}$, ветер, гололед отсутствует, т. е. при изменении нагрузки с $\gamma_7 = 0,0204 \text{ kg/m} \cdot \text{mm}^2$ на величину $\gamma_6 = 0,00966 \text{ kg/m} \cdot \text{mm}^2$ может быть найдено из уравнения (50):

$$\sigma_1 - \frac{\gamma_6^2 l^2}{24\sigma_1^2 \beta} = \sigma_2 - \frac{l^2 \gamma_7^2}{24\beta \sigma_2^2};$$

$$\sigma_1 - \frac{0,00966^2 \cdot 10^4 \cdot 175^2}{24\sigma_1^2 \cdot 0,77} = 18 - \frac{175^2 \cdot 0,0204^2 \cdot 10^4}{24 \cdot 18^2 \cdot 0,77};$$

$$\sigma_1 - \frac{1545}{\sigma_1^2} = -3,4;$$

откуда

$$\sigma_0 = \sigma_1 = 10,55 \text{ kg/mm}^2.$$

Стрела провеса при этом по уравнению (25) будет равна

$$f = \frac{l^2 \gamma_6}{8\sigma_1} = \frac{175^2 \cdot 0,00966}{8 \cdot 10,55} = 3,50 \text{ m}$$

и длина провода в пролете по уравнению (26)

$$L_0 = l + \frac{8}{3} \frac{f^2}{l} = 175 + \frac{8}{3} \cdot \frac{3,5^2}{175} = 175,186 \text{ м.}$$

Подставляя найденную величину L_0 в уравнение (105):

$$\frac{F^2 \gamma_0^2}{24\sigma^2} - L_0 \beta \sigma = L_0 (1 - \beta \sigma_0) - l,$$

получим

$$\frac{0,00966^2 l^3}{24\sigma^2} - 175,186 \cdot 0,77 \cdot 10^{-4} \cdot \sigma = 175,186 - 175,186 \cdot 0,77 \cdot 10^{-4} \cdot 10,55 - l,$$

откуда

$$388 \cdot 10^{-8} \frac{l^3}{\sigma^2} - 0,0135 \sigma = 175,04 - l.$$

Задаваясь различными значениями величины l , находим соответствующие им значения напряжения в проводе, а следовательно, и величину натяжения по всему проводу.

Результаты подсчета сведены в таблицу XIV.

ТАБЛИЦА XIV.

Длина пролета в м (l)	175	174,8	174,6	174,3	174	173,5	173
Напряжение провода в kg/mm^2 (σ) . .	10,55	7,92	6,26	5,05	4,31	3,56	3,11
Натяжение по проводу в kg (S)	738,5	554	437	353	302	249	217

По этим данным построена кривая l фиг. 27, где по оси абсцисс отложены не абсолютные величины пролетов, а соответствующие им сокращения в метрах.

б) Построение кривой $\delta = f(S)$ для неповрежденных пролетов. Вес провода и добавочная нагрузка от ветра в одном пролете:

$$P = \gamma q l = 0,00966 \cdot 70 \cdot 175 = 118 \text{ kg.}$$

Половина веса гирлянды изоляторов равна

$$Q_1 = \frac{Q}{2} = \frac{50}{2} = 25 \text{ kg.}$$

Подставляя эти величины в формулу (115), получим:

$$\begin{aligned} \delta &= \delta' + \delta'' = 2 \frac{S_n - S_{n-1}}{\sqrt{(P + Q_1)^2 + (S_n - S_{n-1})^2}} + K_n (S_n - S_{n-1}) = \\ &= \frac{1,3 \Delta S_n}{\sqrt{(118 + 25)^2 + \Delta S_n^2}} + 0,0024 \cdot 2 \cdot \Delta S_n; \\ \delta &= \frac{1,3 \Delta S_n}{\sqrt{143^2 + \Delta S_n^2}} + 0,0048 \Delta S_n. \end{aligned}$$

Задаваясь различными значениями ΔS_0 , получим соответствующие значения δ .

Результаты подсчетов приведены в табл. XV.

ТАБЛИЦА XV.

Разность натяжений по проводам в кг . . .	25	50	75	100	150	200	250	300	350	400	450
Отклонение конца гирлянд в м .	0,224	0,430	0,605	0,745	0,940	1,058	1,130	1,170	1,200	1,220	1,240
Прогиб опоры в м . .	0,12	0,24	0,36	0,48	0,72	0,96	1,20	1,44	1,68	1,92	2,16
Результующее отклонение конца гирлянд в м	0,344	0,677	0,965	1,225	1,66	2,018	2,33	2,61	2,88	3,14	3,40

По этим данным построена кривая III фиг. 27.

с) Построение кривой $\delta = f(S)$ для первой от места обрыва опоры. Примем длину оборванного провода, находящегося на весу, $l_1 = 11,5$ м. Тогда

$$P_1 = \left(\frac{l}{2} + l_1 \right) q_0 = (87,5 + 11,5) \cdot 70 \cdot 0,00966 = 67 \text{ kg}$$

и

$$P_1 + Q_1 = 67 + 25 = 92 \text{ kg};$$

на основании уравнения (120') имеем:

$$\delta' = KnS_2 + \lambda \frac{S_2}{\sqrt{(P_1 + Q_1)^2 + S_2^2}} = 0,0024 \cdot 2 \cdot S_2 + \frac{1,3 S_2}{\sqrt{92^2 + S_2^2}}$$

Задаваясь различными значениями S_2 , находим соответствующие им отклонения точек подвеса (табл. XVI). По этим данным строим кривую II.

ТАБЛИЦА XVI.

Натяжение по проводу во 2-м пролете в кг .	25	50	75	100	150	200	250	300	350	400	450
Отклонение конца гирлянд в м	0,34	0,62	0,82	0,955	1,11	1,18	1,22	1,24	1,26	1,27	1,28
Прогиб опоры в м . .	0,12	0,24	0,36	0,48	0,72	0,96	1,2	1,44	1,68	1,92	2,16
Результующее отклонение точки подвеса провода в м . .	0,46	0,86	1,18	1,435	1,83	2,14	2,42	2,68	2,94	3,19	3,44

Имея все три кривые:

$$1) \Delta l = f(\Delta S),$$

$$2) \delta = f(S_n - S_{n-1}),$$

$$3) \delta_1 = f(S_2).$$

находим на фиг. 27 графическим методом распределение натяжений в пролетах.

Описание построения при решении этой задачи здесь не приводится, так как оно полностью совпадает с описанием, данным в теоретической части этого параграфа.

Результаты решения сведены в табл. XVII.

ТАБЛИЦА XVII.

Натяжения в пролетах в kg					Отклонения точек подвеса в м			
S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	δ_1	δ_2	δ_3	δ_4
0	275	386	443	467,5	2,54	1,30	0,73	0,33

§ 6. Упрощенные методы определения натяжений, действующих по проводам при обрыве части их, без учета влияния оставшихся проводов и троссов в поврежденном пролете.

Описанные выше методы определения натяжений, действующих по проводам при обрыве части их в одном из пролетов, занимают значительное количество времени и потому при производстве этих подсчетов иногда допускают некоторые упрощения.

Рассмотрим здесь только упрощения подсчетов применительно к линиям передачи с подвесными изоляторами, а затем обобщим их и для случая штыревых изоляторов. Подобное обобщение вполне допустимо, так как графический расчет натяжений при обрыве для случая линии передачи со штыревыми изоляторами является частным случаем такового же расчета линии с подвесными изоляторами. И действительно, если при определении натяжений в случае обрыва части проводов на линии с подвесными изоляторами положить длину гирлянды изоляторов $\lambda = 0$, то уравнения (120) и (116), (117), (118), (119),

$$\delta_1 = KnS + \lambda \frac{S}{\sqrt{(P_1 + Q_1)^2 + S^2}}$$

и

$$\delta = Kn(S_n - S_{n-1}) + \lambda \frac{(S_n - S_{n-1})}{\sqrt{(P + Q_1)^2 + (S_n - S_{n-1})^2}},$$

дающие зависимость отклонения δ точек подвеса проводов от натяжений по проводам в двух смежных пролетах, примут вид:

$$\delta_1 = KnS$$

и

$$\delta = Kn(S_n - S_{n-1})$$

и, следовательно, кривые *III* и *II* фиг. 27, являющиеся графическим выражением уравнений (116) и (120), будут заменены прямой *II* фиг. 22, дающей зависимость прогиба опоры от разности натяжений по проводам и применяемой при графическом подсчете натяжений для линии со штыревыми изоляторами.

Первое упрощение. Первое упрощение, не влекущее сколь-нибудь значительных неточностей, и поэтому допустимое при всех расчетах линии передачи, таково.

Выше указывалось, что промежуточная опора, граничащая с поврежденным пролетом, находится в несколько отличных условиях по сравнению с остальными опорами, так как на нее действует не вес провода с добавочными нагрузками на него всего пролета P , а только части его P_1 . Соответственно с этим, отклонение точки подвеса на этой опоре выражается уравнением:

$$\delta = KnS_n + \lambda \frac{S_n}{\sqrt{(P_1 + Q_1)^2 + S_n^2}} \quad (120')$$

или кривой *II* (фиг. 27), построенной по этому уравнению. Отклонения же точки подвеса на остальных опорах определяются уравнением

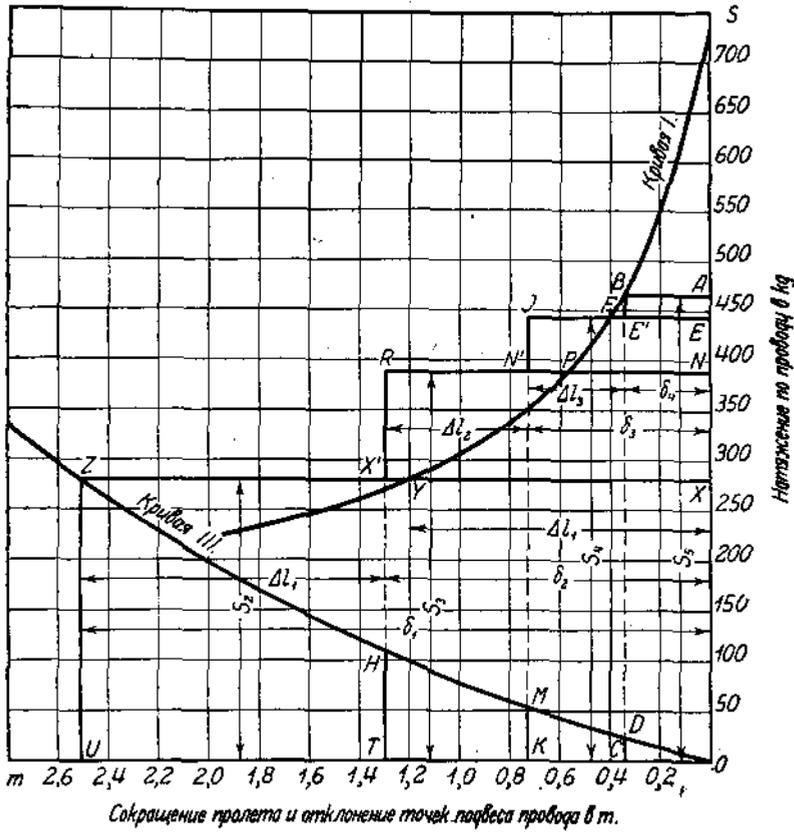
$$\delta' = Kn(S_n - S_{n-1}) + \lambda \frac{S_n - S_{n-1}}{\sqrt{(P + Q)^2 + (S_n - S_{n-1})^2}}, \quad (116')$$

по которому строится кривая *III*. Но так как величины отклонений δ и δ' , подсчитанные соответственно по формулам (120') и (116'), при получающихся после обрыва напряжениях в уцелевших проводах порядка $5 \div 12 \text{ kg/mm}^2$ весьма мало отличаются друг от друга, то выделять граничащую с поврежденным пролетом опору не имеет смысла. При этом уравнение (120') отпадает и, следовательно, приходится строить только одну кривую *III*, попадание на которую точки Z (фиг. 28) и является критерием правильности выбора натяжения в наиболее удаленном от места повреждения пролете.

Второе упрощение. Другое упрощение довольно существенное, но влекущее за собой ошибку вычислений порядка $2 \div 10\%$.

Предполагается, что длина провода в пролете при изменении натяжения по нему остается постоянной. Тогда уравнение, по которому строится кривая *I* фиг. 27, связывающее изменения напряжения в проводе с изменением длины пролета, получается не кубическим относительно напряжения материала провода, а квадратным, что и упрощает построение кривой.

Делая это допущение, вместо уравнения (105) получим уравнение, выведенное ниже.



Фиг. 28.

Длина провода в пролете для каких-либо исходных условий (γ_0 , δ , и l) выражается уравнением (26)

$$L = l + \frac{l^3 \gamma_0^2}{24\sigma_1^2}. \quad (26)$$

Если теперь предположить, что пролет при той же удельной нагрузке γ_0 изменился с l на l_1 и что длина провода в пролете осталась та же самая, то, обозначив новое напряжение материала провода через σ_2 , можно будет написать:

$$L = l_1 + \frac{l_1^3 \gamma_0^2}{24\sigma_2^2}. \quad (122)$$

Приравняв правые части уравнений (122) и (26) друг другу, получим:

$$L = l + \frac{l^3 \gamma_0^2}{24\sigma_1^2} = l_1 + \frac{l_1^3 \gamma_0^2}{24\sigma_2^2}. \quad (123)$$

Таким образом, действительно, видим, что полученное уравнение является квадратным относительно σ , и его решение может быть легко выполнено следующим образом:

Для исходных условий подсчитываем величину

$$L = l + \frac{l^3 \gamma_0^2}{24 \delta_1^2}$$

и, найдя ее значение, решаем уравнение (123) относительно σ_2 ; тогда будем иметь:

$$\sigma_2 = \sqrt{\frac{l_1^3 \gamma_0^2}{24(L - l_1)}}. \quad (124)$$

Из уравнения (124) при известных γ_0 и L , задаваясь различными значениями l_1 , легко найдем соответствующие значения σ_2 и, умножая на q , построим кривую I фиг. 27 изменения натяжения по проводу в зависимости от изменения длины пролета.

Теперь посмотрим какова возможность применения при подсчетах только что описанных облегчений.

Первое упрощение, как уже указывалось выше, может быть сделано при всех подсчетах.

Второе упрощение допустимо, по мнению автора настоящей книги, при всех расчетах линий с деревянными опорами и является нежелательным для электропередач с металлическими мачтами. Это положение основано на соображениях, что в механический расчет проводов при деревянных опорах входит довольно много величин, которые не могут быть оценены точно. К таким величинам относятся:

1) коэффициент гибкости опоры и разрушающее напряжение дерева, являющиеся переменными в зависимости от качества и сухости дерева;

2) при выводе всех уравнений для решения задачи при обрыве проводов считается, что опора не испытывает никаких деформаций, связанных с эксцентричным приложением сил (на концах траверса), действующих на нее (кручение), в то время как в действительности эти деформации имеют место и достигают значительных величин;

3) принимаемые при расчетах линий передач атмосферные условия, при которых наступает обрыв проводов ($t = -5^\circ\text{C}$, ветер, гололед сброшен), являются чисто условными; в действительности, обрыв может произойти при совершенно иных атмосферных условиях;

4) отсутствие во многих случаях точных сведений и наличие только приблизительных данных о климатических условиях, в которых проектируется линия передачи.

Из приведенного перечня видно, что ошибка в 2—10% при определении натяжений, действующих на деревянные опоры при обрыве проводов, не может оказать заметного влияния на прочность ее.

Для линии передач с металлическими опорами второе упрощение делать не следует, так как деформации опор от эксцентричного приложения сил незначительны, коэффициент гибкости их постоянен и, следовательно, предположения, сделанные при выводе уравнений, определяющих усилия по проводам при обрыве их, близко соответствуют действительности.

Последнее положение подтверждается еще и теми соображениями, что усилия по проводам, подсчитанные приближенным способом, меньше действительных.

Необходимо еще отметить, что второе упрощение может вводиться только в расчеты при обрыве проводов, когда не учитывается влияние действия тросов и уцелевших проводов (глава IV). В тех же подсчетах, где действие тросов и уцелевших проводов принимается во внимание (глава V), это упрощение делать нельзя.

Пример 17. Решить предыдущую задачу (стр. 84) приближенными способами.

а) Решение задачи с помощью кривой I и кривой III предыдущей задачи. Графическое решение этой задачи представлено на фиг. 28. Результаты построений приведены в табл. XIX под номером 2.

б) Решение задачи с помощью кривой квадратической зависимости натяжений по проводам от сокращения пролета и кривой III. По уравнению (124) имеем:

$$\sigma_2 = \sqrt{\frac{l_1^3 \gamma^2}{24(L-l_1)}} = \sqrt{\frac{l_1^3 \cdot 0,00966^2}{24(175,186-l_1)}} = 0,00917 \sqrt{\frac{l_1^3}{175,186-l_1}}$$

Давая l_1 различные значения, находим соответствующие σ , а следовательно, и $S = q\sigma$.

Результаты подсчетов сведены в табл. XVIII.

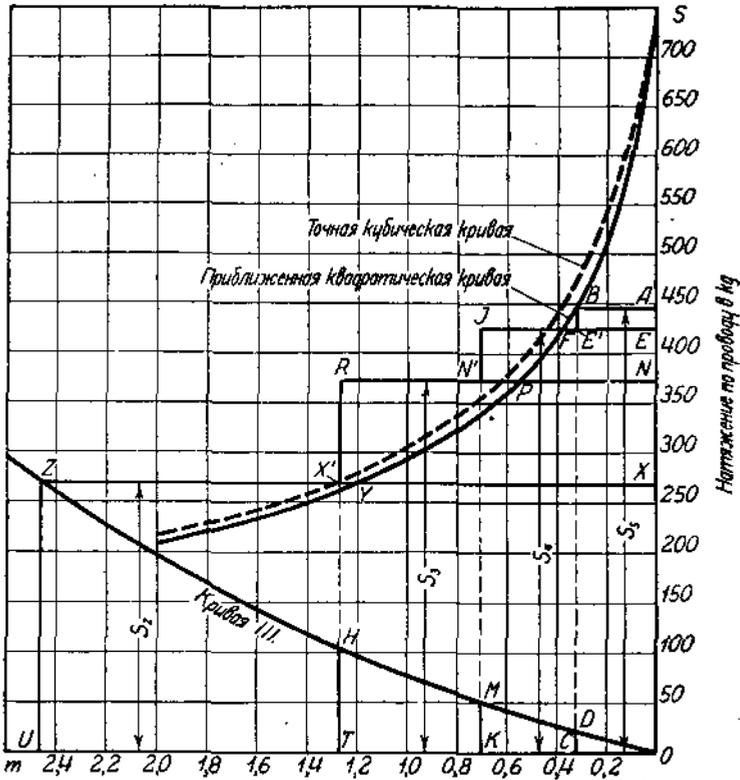
ТАБЛИЦА XVIII.

Величина пролета в м (l) . . .	175	174,9	174,8	174,6	174,3	174	173,5	173
Напряжение провода в kg/mm^2 (σ)	10,55	8,5	7,31	5,92	4,88	4,15	3,46	2,98
Натяжение провода в kg (S) . . .	740	595	512	415	338	291	242	208

На основании этой таблицы построена кривая фиг. 29, причем по оси абсцисс отложены не абсолютные величины пролетов, а соответствующие сокращения их.

Нанося на эту же фиг. 29 кривую III предыдущей задачи, находим графическим методом распределение натяжений по проводам. Результаты расчетов приведены в табл. XIX под номером 3.

В этой же таблице под № 1 приведены данные табл. XVII, т. е. величины, полученные при определении натяжений по проводам без допущений каких-либо упрощений в подсчетах.



Сокращение пролета и отклонение точек подвеса провода в т.

Фиг. 29.

ТАБЛИЦА XIX.

№ п. по порядку	Каким способом решена задача	Напряжение по проводу в кг					Отклонения точек подвеса в м			
		S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	δ_1	δ_2	δ_3	δ_4
1	Решение точным способом с помощью кривых I, II и III	0	275	386	443	467,5	2,54	1,3	0,73	0,33
2	Решение приближенным способом с помощью кривых I и III	0	280	388	442,5	465	2,51	1,3	0,73	0,34
3	Решение приближенным способом с помощью квадратической кривой и кривой III	0	267,5	372,5	425	445	2,46	1,27	0,71	0,32

Из сравнения результатов всех трех подсчетов видно, что напряжения по проводам S_2 , по которым и ведется расчет промежуточных мачт, почти не отличаются друг от друга. Наибольшее расхождение при применении точного и упрощенных методов получается в пролетах у анкерной опоры II и достигает величины, близкой к 5⁰/₁₀₀.

§ 7. Определение усилий, действующих на анкерные опоры при обрыве проводов.

Согласно Союзных Норм механического расчета линий электропередач, анкерные опоры должны быть рассчитаны на случай обрыва всех проводов, причем этот обрыв полагается считать имеющим место при $t = -5^{\circ}\text{C}$ и максимальных добавочных нагрузках от ветра и гололеда. После же обрыва гололед с проводов уцелевшего участка считается сброшенным.

Очевидно, наиболее неблагоприятным для анкерной опоры местом обрыва будет обрыв проводов в непосредственно прилегающем к ней пролете, так как при этом одностороннее натяжение со стороны проводов неповрежденного участка будет целиком восприниматься только самой анкерной опорой.

Определение этого одностороннего натяжения может быть произведено следующим образом: так как неповрежденный участок отделен от поврежденного анкерной опорой, не дающей практически прогиба ни при каких условиях, то изменение после обрыва режима работы проводов его будет обусловлено только сбрасыванием гололеда. Поэтому определение получающихся после аварии натяжений по проводам неповрежденного участка может быть произведено по основному уравнению состояния провода (см. главу III)

$$\sigma_1 - \frac{l^2 \gamma_1^2}{24\beta\sigma_1^2} = \sigma_2 - \frac{l^2 \gamma_2^2}{24\beta\sigma_2^2} - \frac{\alpha}{\beta} (t_1 - t_2). \quad (50)$$

Найденные по этому уравнению натяжения по проводам неповрежденного участка целиком воспринимаются анкерной опорой и составляют часть тех усилий, по которым производится ее расчет на случай обрыва проводов.

ГЛАВА V.

Работа линий передач при обрыве части проводов и при учете действия троссов и уцелевших проводов.

§ 1. Общие сведения.

При расчетах всех опор, кроме анкерных, допускается принимать во внимание поддерживающее действие проводов и троссов, причем в этих случаях добавочные усилия, передающиеся от опор троссам и проводам, должны быть учтены при расчете этих последних.

Необходимо заметить, что при учете действия троссов и уцелевших проводов распределение натяжений по ним, а следовательно, и усилий, приходящихся на опоры, значительно отличается от тех, которые получаются, если этим влиянием пренебрегать. Особенно это сказывается для линий передач со штыревыми изоляторами, так как в этом случае провода жестко связаны с опорой и весьма сильно реагируют на всякое ее отклонение.

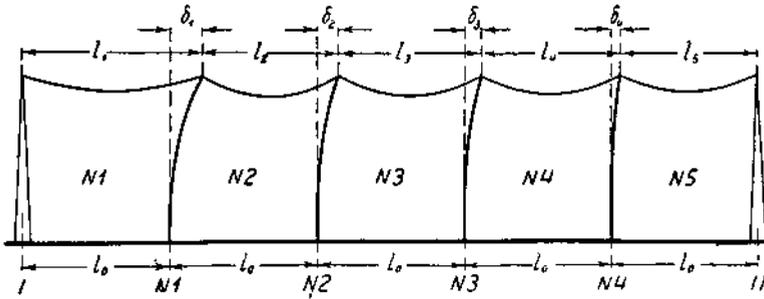
Произведенные автором настоящей книги подсчеты показали, что расчеты без учета действия троссов и проводов могут производиться только для сравнительно жестких металлических и деревянных опор, а во всех остальных случаях это влияние должно быть принято во внимание.

§ 2. Определение натяжений, действующих по проводам на линии передачи со штыревыми изоляторами, при одностороннем обрыве части проводов и при учете влияния оставшихся.

Возьмем опять линию передачи, имеющую пять равных пролетов между анкерными опорами (фиг. 30) и предположим, что в прилегающем к анкерной опоре I пролете № 1 произошел обрыв части проводов.

Обозначим полное число подвешенных на мачте проводов через n , число оборвавшихся — через n_1 и число уцелевших в поврежденном про-

лете проводов через $n_2 = n - n_1$. Задача определения натяжений, действующих по проводам различных пролетов после обрыва, может быть



Фиг. 30.

решена предлагаемыми автором настоящей книги графо-аналитическим и графическим методами.

Графо-аналитический метод. Рассмотрим сначала графо-аналитический метод.

Строим для атмосферных условий, соответствующих обрыву проводов, кривую зависимости натяжений S по проводу от длины пролета l , пользуясь ранее выведенным уравнением (105), давая в нем величине l значения как меньшие, так и большие начальной длины пролета l_0 (фиг. 31).

Далее, задаемся натяжением S_1 по одному из необорванных проводов пролета № 1, и по кривой фиг. 31 находим соответствующую длину пролета l_1 .

Зная l_1 , найдем отклонение промежуточной опоры № 1:

$$\delta_1 = \Delta l_1 = l_1 - l_0$$

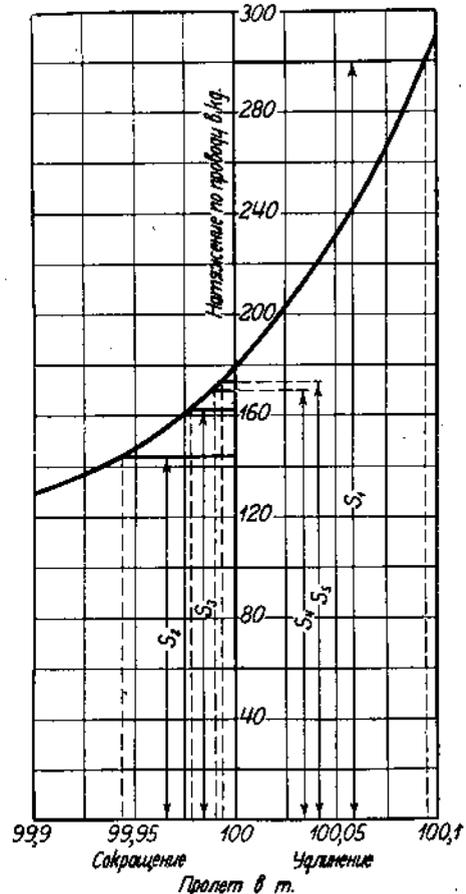
и, исходя из условий равновесия ее, выразим отклонение через коэффициент гибкости опоры K и натяжения проводов, действующих в соседних пролетах, следующим образом:

$$\delta_1 = K(nS_2 - n_2S_1).$$

Это уравнение позволит нам определить натяжение S_2 по одному из проводов второго пролета, а затем по кривой фиг. 31 найти соответствующую длину его l_2 .

Изменение длины второго пролета будет

$$\Delta l_2 = l_2 - l_0.$$



Фиг. 31.

Отклонение же опоры № 2 может быть определено из фиг. 30:

$$\delta_2 = \delta_1 + l_2 - l_0 = \delta_1 + \Delta l_2.$$

Найдя это отклонение, можно из условия равновесия второй опоры

$$\delta_2 = K (nS_3 - nS_2)$$

определить натяжение S_3 по проводам третьего пролета.

Все дальнейшие рассуждения абсолютно ничем не отличаются от изложенных в § 3 главы IV и поэтому, чтобы не повторяться, доводить их до конца здесь не будем. Укажем только, что критерием правильности выбора натяжения S_1 служит, как и раньше, отсутствие прогиба анкерной опоры II, требующее соблюдения равенства:

$$l_0 = \delta_1 + l_3,$$

невыполнение которого требует пересчетов при другом значении S_1 .

Графический метод. При графическом методе определения натяжений строим кривую зависимости натяжения по проводу от длины пролета, но откладывая по оси абсцисс не величины пролетов, а изменения его как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения по отношению к начальной длине l_0 (кривая I, фиг. 32).

Кроме того, строим еще две кривые.

1) Кривую II, дающую зависимость прогиба опоры от разности натяжений, действующих по проводам в смежных с ней пролетах. Очевидно, что кривая будет удовлетворять уравнению

$$\delta = K n \Delta S,$$

где n — число всех проводов на опоре.

2) Кривую III (прямую), удовлетворяющую уравнению

$$\delta = K n_2 \Delta S.$$

Построение этой кривой обусловлено следующими соображениями.

Усилие, действующее на промежуточную опору № 1, вследствие неодинакового натяжения по проводам в пролетах № 1 и № 2 (фиг. 30) может быть выражено уравнением

$$\Delta S = nS_2 - n_2S_1.$$

Решая это уравнение относительно S_2 , получим:

$$S_2 = \frac{\Delta S}{n} + \frac{n_2}{n} S_1 = \frac{n_2}{n} \left(\frac{\Delta S}{n_2} + S_1 \right),$$

т. е. для определения S_2 нужно к S_1 прибавить величину $\frac{\Delta S}{n_2}$ и полученный результат умножить на отношение $\frac{n_2}{n}$. Только что указанное определение и может быть произведено при помощи кривых II и III фиг. 32.

Но кривая

$$\frac{\Delta S}{n_2} = f(\delta)$$

может быть построена путем уменьшения ординат кривой

$$\delta = K \Delta S$$

в n_2 раз, или, что одно и то же, путем построения кривой, удовлетворяющей уравнению

$$\delta = K n_2 \Delta S,$$

которому и соответствует кривая III фиг. 32.

Сделав эти предпосылки, переходим к определению натяжений, действующих по проводам, поступая следующим образом.

Задаемся натяжением S_1 , действующим по уцелевшим проводам первого пролета, и, отложив его в виде отрезка OA (фиг. 32), находим по кривой I соответствующее увеличение пролета.

$$\Delta l_1 = AB = OC.$$

Так как анкерная опора прогиба не дает, то увеличение пролета Δl_1 происходит только за счет отклонения промежуточной опоры № 1; следовательно, можно написать:

$$\delta_1 = \Delta l_1 = OC.$$

Отложив величину δ_1 в виде отрезка OC' влево от начала координат, найдем по кривой III ординату ее $C'D$. Прибавляя теперь к отрезку OA отрезок AF' , равный $C'D$, получим отрезок OF , пропорциональный натяжению S_2 по проводам второго пролета. Действительно, отрезок $C'D$, как ордината кривой III, представляет величину $\frac{\Delta S}{n_2}$, поэтому отрезок

$$OF = OA + AF' = OA + C'D$$

будет, следовательно, равен

$$OF = S_1 + \frac{\Delta S}{n_2}.$$

Поэтому, поделив отрезок OF на отношение $\frac{n}{n_2}$, получим отрезок OJ , который и представит в масштабе чертежа натяжение S_2 , т. е.

$$S_2 = OJ = \frac{n_2}{n} \cdot OF.$$

Имея натяжение S_2 , легко найдем по кривой I соответствующее ему сокращение длины второго пролета, а именно

$$\Delta l_2 = JJ'.$$

Из фиг. 30 можно определить прогиб опоры № 2 следующим образом:

$$\delta_2 = \delta_1 + l_2 - l_3 = \delta_1 - \Delta l_2;$$

поэтому, отложив от точки C' или, что то же, от точки E вправо отрезок

$$EG = JJ' = \Delta l_2,$$

найдем отрезок

$$JG = OG' = \delta_2$$

и по нему, пользуясь кривой II , определим действующую на опору № 2 разность натяжений

$$\Delta S_2 = S_3 - S_2 = G'H'.$$

Из последнего выражения получим графическое изображение натяжения в третьем пролете

$$S_3 = S_2 + \Delta S_2 = G'G + G'H = OK$$

и по нему находим сокращение пролета № 3

$$\Delta l_3 = KK'.$$

Аналогично с предыдущим, определяем отклонение опоры № 3

$$\delta_3 = \delta_2 - \Delta l_3$$

и выражаем его отрезком

$$KL = OL' = JG - KK' = HK - KK',$$

а по последнему находим разность натяжений

$$\Delta S_3 = S_4 - S_3 = I'M' = LM$$

и

$$S_4 = OP = OK + LM.$$

Не приводя описания дальнейших построений, ничем не отличающихся от изложенных, укажем только выражение натяжений в остальных пролетах, а также сокращения их и отклонения опор через отрезки фиг. 32:

$$\Delta l_4 = PN',$$

$$\delta_4 = PN = MP - N'P = MP - MN',$$

$$S_5 - S_4 = P'R',$$

$$S_5 = OT = OP + P'R' = OP + PT,$$

$$\Delta l_5 = RT.$$

Здесь, как и раньше, условием правильного выбора натяжения S_4 является отсутствие прогиба анкерной опоры II, и, следовательно, равенство между сокращением пятого пролета Δl_5 и отклонением четвертой промежуточной опоры, т. е.

$$\delta_4 = \Delta l_5,$$

что соответствует попаданию точки T на ось ординат.

При несоблюдении этого условия необходимо задаться новым значением S_4 и все построения проделать снова.

Сопоставление результатов подсчетов. В заключение настоящего параграфа приведем несколько подсчетов, иллюстрирующих получающуюся разницу в натяжениях по проводам для случая одностороннего обрыва части их при пользовании различными методами.

Произведены следующие расчеты.

Расчет А. Влияние уцелевших в поврежденном пролете проводов не учтено.

Расчет В. Влияние уцелевших в поврежденном пролете проводов учтено.

Трехфазная линия $3 \times 35 \text{ mm}^2$. Пролет 80 м. Атмосферные условия: $t = -5^\circ \text{C}$, гололед с толщиной стенки 20 мм. Давление ветра 36 kg/m^2 проекции провода, покрытого гололедом.

Взят случай обрыва одного провода при вышеприведенных атмосферных условиях.

Тип I. Промежуточная опора сделана в виде одного столба ($d \sim 22 \text{ cm}$), коэффициент гибкости принят равным 0,0007 м/kg.

Случай 1. Обрыв произошел в пролете у анкерной опоры.

Случай 2. Обрыв произошел в среднем пролете между анкерными опорами.

Тип II. Промежуточная опора выполнена с повышенным коэффициентом гибкости, который принят равным 0,0024 м/kg.

Случай 1. Обрыв произошел в пролете у анкерной опоры.

Случай 2. Обрыв произошел в среднем пролете между анкерными опорами.

Результаты подсчетов сведены в табл. XX.

ТАБЛИЦА XX.

Тип и расчет	Напряжение в проводе смежного с поврежденным пролета	Напряжение в уцелевшем проводе поврежденного пролета	Напряжение по воду смежного с поврежденным пролета	Напряжение по уцелевшему проводу поврежденного пролета	Расчетные усилия от действия проводов на промежуточную опору	Расчетные усилия от действия проводов на крайней промежуточной опоре
	kg/mm ²	kg/mm ²	kg	kg	kg	kg
Тип I						
Случай 1						
Расчет А	13,7	—	480	—	480	480
” В	16,4	21,8	574	763	196	574
Случай 2						
Расчет А	13,7	—	480	—	480	480
” В	16,9	23,4	590	820	128	590
Тип II						
Случай 1						
Расчет А	10,9	—	382	—	382	382
” В	16,3	23,4	572	820	75	572
Случай 2						
Расчет А	10,9	—	382	—	382	382
” В	16,9	25,0	590	875	20	590

Из данных таблицы совершенно ясно видно, что определять натяжения по проводам при одностороннем обрыве части их, не принимая во внимание влияния уцелевших проводов, ни в коем случае нельзя, так как разница в усилиях, действующих на промежуточную опору, при различных методах расчета доходит до 20 раз (тип II, случай 2). Кроме того, необходимо отметить, что расчеты нужно производить не только на случай обрыва проводов в крайнем пролете, но также и в пролете среднем, так как последний случай может являться более опасным для уцелевших проводов и кронштейнов.

Пример 18. Для линии электропередачи, приведенной в примере 15 (стр. 73), и для тех же атмосферных условий, требуется определить натяжение по проводам после обрыва двух проводов в пролете № 1, причем влияние провода, оставшегося в поврежденном пролете, должно быть учтено.

Для решения этой задачи необходимо построить кривую зависимости величины натяжения по проводу от изменения величины пролета не только для случая сокращения пролета, но и для случая удлинения его. Уравнение этой кривой было найдено в примере 15 и имело вид

$$\frac{486 \cdot 10^{-8} \cdot l^3}{\sigma^2} - 0,0076 \sigma = 100,0377 - l.$$

Задаваясь различными значениями $l > l_0$, находим соответствующие им напряжения в проводе, а следовательно, и натяжения проводов

$$S = q\sigma.$$

Результаты этих подсчетов сведены в табл. XXI, где, кроме того, помещены еще значения S для $l < l_0$, вычисленные в примере 15.

ТАБЛИЦА XXI.

Пролет l [m]	99,6	99,7	99,8	99,9	100	100,025	100,050	100,075	100,10	100,125	100,15
Напряжение в проводе σ [kg/mm ²]	3,22	3,66	4,26	5,22	7,1	8,05	9,12	10,5	12,3	14,4	16,85
Натяжение по проводу S [kg]	80,5	91,5	106,5	130,5	177,5	201	228	262,5	308	360	420

По полученным данным построена кривая l , представленная на фиг. 31 и фиг. 32. На последней кривой по оси абсцисс отложена не абсолютная величина пролета, а соответствующие удлинения и сокращения его.

а) Графо-аналитический метод. В нашем случае $n = 3$, $n_1 = 2$ и $n_2 = 1$. Задаемся натяжением $S_1 = 300$ kg. По кривой фиг. 31 находим $l_1 = 100,09625$ m. Так как

$$\delta_1 = \Delta l_1 = l_1 - l_0 = 100,09625 - 100 = 0,09625 \text{ m},$$

то из уравнения

$$\delta_1 = K(nS_2 - n_2S_1)$$

находим натяжение по проводу в пролете № 2.

$$S_2 = \left(\frac{\delta_1}{K} + n_2S_1 \right) : n = \left[\frac{0,09625}{0,000725} + 300 \right] : 3 = 144 \text{ kg.}$$

По кривой фиг. 31 этому натяжению $S_2 = 144 \text{ kg}$ соответствует

$$l_2 = 99,94375 \text{ m;}$$

тогда

$$\Delta l_2 = l_2 - l_0 = 99,94375 - 100 = -0,05625 \text{ m}$$

и

$$\delta_2 = 0,09625 - 0,05625 = 0,04 \text{ m.}$$

Из уравнения

$$\delta_2 = K(nS_3 - nS_2)$$

получим натяжение по проводу в пролете № 3:

$$S_3 = \frac{\delta_2}{Kn} + S_2 = \frac{0,04}{0,000725 \cdot 3} + 144 = 162,4 \text{ kg.}$$

По кривой фиг. 31 находим:

$$l_3 = 99,9765 \text{ m;}$$

тогда

$$\Delta l_3 = 99,9765 - 100 = -0,0235 \text{ m}$$

и

$$\delta_3 = \delta_2 + \Delta l_3 = 0,04 - 0,0235 = 0,0165 \text{ m.}$$

Следовательно, натяжение по проводу в пролете № 4 будет:

$$S_4 = \frac{\delta_3}{Kn} + S_3 = \frac{0,0165}{0,002175} + 162,4 = 170 \text{ kg.}$$

По кривой фиг. 31 получим:

$$l_4 = 99,99 \text{ m}$$

и

$$\Delta l_4 = 99,99 - 100 = -0,01 \text{ m;}$$

откуда

$$\delta_4 = \delta_3 + \Delta l_4 = 0,0165 - 0,01 = 0,0065 \text{ m.}$$

Натяжение по каждому проводу в пролете № 5 найдется:

$$S_5 = \frac{\delta_4}{Kn} + S_4 = \frac{0,0065}{0,002175} + 170 = 173,2 \text{ kg;}$$

этому натяжению соответствует

$$l_5 = 99,99375 \text{ m}$$

и

$$\Delta l_5 = 0,00625 \text{ m;}$$

поэтому

$$\delta_5 = \delta_4 + \Delta l_5 = 0,0065 - 0,00625 = 0,00025 \text{ m,}$$

т. е. с достаточной для практики точностью можно принять $\delta_2 = 0$, что, в свою очередь, указывает на то, что $S_1 = 300$ kg было выбрано правильно.

б) Графический метод. Для решения этой же задачи графическим методом нужно построить еще две кривые, нанесенные на фиг. 32, — кривую II, уравнение которой будет,

$$\delta = K_n \Delta S = 0,000725 \cdot 3 \cdot \Delta S = 0,002175 \Delta S, \uparrow$$

и кривую III, уравнение которой имеет вид

$$\delta_1 = K_{n_2} \Delta S = 0,000725 (3S_2 - S_1) = 0,000725 \Delta S.$$

С помощью этих двух кривых и кривой I можно найти распределение натяжений в различных пролетах.

Графическое решение этой задачи представлено на фиг. 32, где все обозначения вполне тождественны с приведенными в теории (§ 2), и потому самый способ построения здесь не приводится. В таб. XXII под № 1 сведены результаты графического решения задачи, которые, как видно, вполне совпадают с результатами вычислений, сделанных с помощью графо-аналитического метода. В целях выяснения влияния учета необорванного провода на распределение натяжений по проводам, в той же таблице под № 2 приведены результаты решения примера 15, где влияние необорванного провода не было учтено.

ТАБЛИЦА XXII.

№№	Натяжения по проводам в килограммах					Прогибы опор в метрах			
	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	δ_1	δ_2	δ_3	δ_4
1	300	144	162,4	170	173,2	0,09625	0,04	0,0165	0,0065
2	—	122	157	169	173,0	0,177	0,051	0,0175	0,005

§ 3. Определение натяжений, действующих по проводам при обрыве части их на линиях передач, монтированных на штыревых изоляторах, с заземленными стальными троссами.

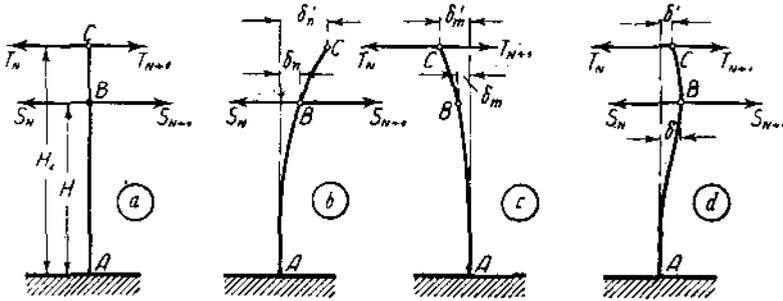
Задача определения натяжений по проводам и троссам, при учете действия последних, несколько осложняется тем обстоятельством, что точки закрепления троссов и проводов находятся на разной высоте, и по этому при определении деформации опор приходится рассматривать две группы сил, приложенных на разной высоте.

В основу метода решения поставленной задачи положен принцип независимости действия сил, применимый при упругих деформациях и заключающийся в следующем.

Сумма упругих деформаций тела под влиянием действующих на него сил равна упругой деформации, обусловливаемой результирующей этих сил.

Условия равновесия опоры. Рассмотрим сначала условия равновесия опоры, исходя из указанного принципа и полагая все деформации ее упругими.

Возьмем опору, схематически изображенную на фиг. 33 а. и предположим, что на нее действуют натяжения прикрепленных к ней проводов и троссов, причем число проводов будем полагать равным n , а троссов m . Для определения прогибов, которые даст опора под влиянием указанных сил, будем рассуждать следующим образом.



Фиг. 33.

Предположим сначала, что троссов нет и что опора находится только под действием натяжений по проводам. Очевидно, в этом случае прогиб опоры (см. фиг. 33 б) в точке B определится из известного нам уравнения

$$\delta_n = K_n n (S_{N+1} - S_N), \quad (97')$$

где K_n — коэффициент гибкости опоры на высоте подвеса проводов H , обозначавшийся нами ранее просто через K [см. формулу (86)]. Остальные обозначения видны из чертежа или же оговорены ранее.

Прогиб опоры в точке C (фиг. 33 б), являющейся точкой закрепления троссов, определится при сделанном предположении из аналогичного уравнения:

$$\delta'_n = K'_n n (S_{N+1} - S_N), \quad (97'')$$

где K'_n — величина, аналогичная коэффициенту гибкости опоры и равная прогибу ее в точке C под влиянием силы в 1 кг, приложенной в точке B .

Эта величина может быть выражена формулой

$$K'_n = \frac{1}{EJ} \left[\frac{H^3}{3} + \frac{H^2(H_1 - H)}{2} \right], \quad (125)$$

сопоставляя которую с выражением для коэффициента гибкости опоры K_n можно найти:

$$K'_n = K_n \left[1 + \frac{3H_1 - H}{2H} \right]. \quad (126)$$

Теперь предположим наличие только троссов, под влиянием натяжения которых опора прогнется и займет положение, указанное на фиг. 33 с.

Прогиб опоры в точке C определится из уравнения:

$$\delta'_m = K'_m m (T_N - T_{N+1}), \quad (127)$$

где

K'_m — коэффициент гибкости опоры на высоте H_1 подвеса троссов;
 m — число троссов.

С ранее введенным нами коэффициентом гибкости опоры $K_n = K$ он связан зависимостью

$$K'_m = K_n \frac{H_1^3}{H^3}. \quad (129)$$

Прогиб же опоры в точке B при том же предположении выразится так:

$$\delta_m = K_m m (T_N - T_{N+1}). \quad (129)$$

где K_m — величина, аналогичная коэффициенту гибкости опоры и равная прогибу ее в точке B под влиянием силы в 1 kg, приложенной в точке C . На основании принципа взаимности перемещений ¹⁾ величина K_m будет равна ранее введенной величине K'_n .

Переходя теперь к действительной нагрузке опоры проводами и троссами, можем найти, на основании принципа независимости действия сил, действительные отклонения интересующих нас точек B и C на N -й опоре, как суммы ранее полученных прогибов (см. фиг. 33 d), а именно:

действительный прогиб опоры в точке B будет

$$\delta = \delta_n - \delta_m = K_n n (S_{N+1} - S_N) - K_m m (T_N - T_{N+1}), \quad (130)$$

действительный прогиб опоры в точке C

$$\delta' = \delta'_n - \delta'_m = K'_n n (S_{N+1} - S_N) - K'_m m (T_N - T_{N+1}). \quad (131)$$

По этим уравнениям можно определить интересующие нас величины прогибов δ и δ' в зависимости от разности натяжений, действующих по проводам и троссам.

Применительно к промежуточной опоре, граничащей с поврежденным пролетом, приведенные уравнения нужно несколько изменить, так как со стороны пролета, где произошел обрыв, будут действовать только уцелевшие провода. Обозначив их число через n_2 и полагая, что обрыв произошел в пролете № 1, будем иметь:

$$\delta_t = K_n (n S_2 - n_2 S_1) - K_m m (T_1 - T_2), \quad (132)$$

$$\delta'_t = K'_n (n S_2 - n_2 S_1) - K'_m m (T_1 - T_2). \quad (133)$$

¹⁾ Общая формулировка принципа взаимности перемещений такова: если имеются две численно равные силы, то изменение координаты, соответствующей силе II , под действием силы I будет равно изменению координаты, соответствующей силе I , под действием силы II .

Определение натяжений по проводам и троссам. Имея уравнения отклонений опор в зависимости от действующих по проводам и троссам натяжений, перейдем к решению основной задачи определения самих натяжений, применив для этого метод последовательных приближений.

Сначала, пренебрегая влиянием троссов, определяем натяжения по проводам во всех пролетах и прогибы опор в точках *B* закрепления проводов с помощью метода, изложенного в предыдущем параграфе, т. е. учитывая влияние уцелевших в поврежденном пролете проводов. Пусть найденные величины будут:

$$S_1, S_2, S_3, S_4 \text{ и } S_5$$

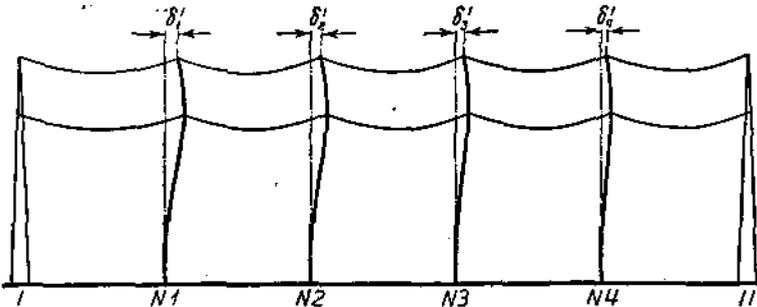
и

$$\delta_{n1}, \delta_{n2}, \delta_{n3}, \delta_{n4}.$$

Отклонения опор в точках *C* (Фиг. 33 б), в предположении отсутствия троссов, найдутся по уравнению (97'') и будут соответственно равны:

$$\delta'_{n1}, \delta'_{n2}, \delta'_{n3}, \delta'_{n4}.$$

В действительности же точки укрепления троссов *C* не могут получить указанных отклонений, ибо как только они начнут отходить от начального положения, так сейчас же по троссам возникнут разности натяжений, которые и будут стремиться вернуть их обратно. Очевидно, разности натяжений по троссам будут направлены противоположно разностям натяжений по проводам и совместное действие тех и других приведет опоры в некоторое положение, представленное на фиг. 34.



Фиг. 34.

Необходимо отметить, что отклонения опор в точках *B* (фиг. 33) и соответствующие им натяжения по проводам, при учете влияния троссов, также не будут равны найденным величинам, но при первом расчете троссов мы этого учитывать не будем и указанные величины будем полагать равными найденным выше.

Таким образом, считая натяжения по проводам найденными, мы можем из уравнений (131) и (133) выразить разности натяжений по

троссам как функции действительных отклонений точек их закрепления, т. е. точек C (фиг. 33). Полученные уравнения для N -й опоры

$$T_N - T_{N+1} = \Delta T_N = \frac{K'_n n}{K'_m m} (S_{N+1} - S_N) - \frac{\delta'_N}{K'_m m} \quad (134)$$

и для опоры № 1

$$T_1 - T_2 = \Delta T_1 = \frac{K'_n n}{K'_m m} (nS_2 - n_2S_1) - \frac{\delta'_1}{K'_m m} \quad (135)$$

показывают, что эти зависимости выражаются графически прямыми линиями, причем каждой опоре будет соответствовать своя прямая и что все эти прямые между собой параллельны. Нанеся их на чертеж, мы будем иметь для опор 1-й, 2-й, 3-й и 4-й прямые соответственно A_1B_1 , A_2B_2 , A_3B_3 и A_4B_4 (фиг. 35). На том же чертеже и в том же масштабе строим кривую изменения натяжения по троссу в зависимости от длины пролета, для чего пользуемся уравнением (105), давая в нем всем величинам значения, соответствующие троссу.

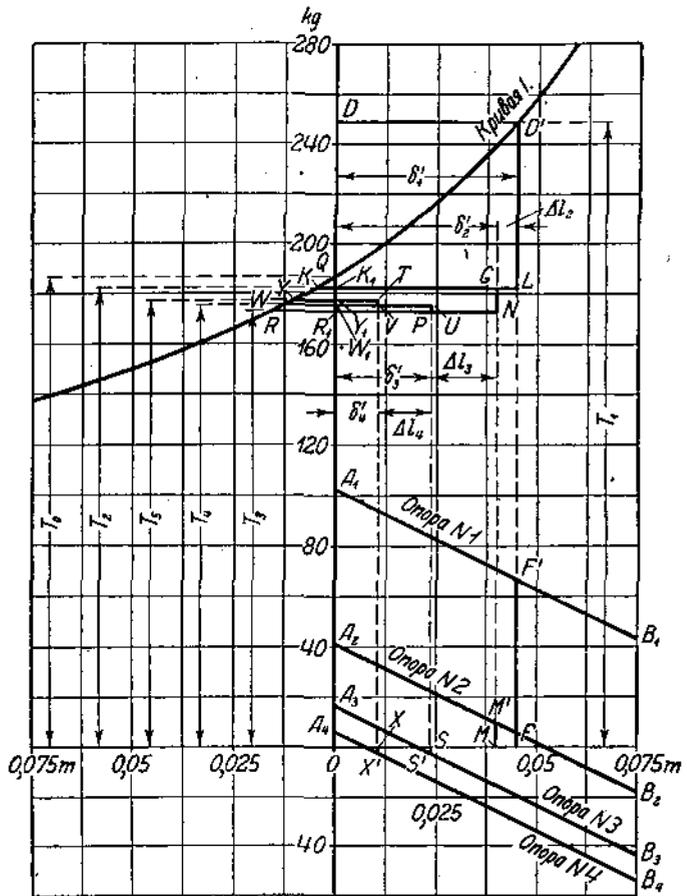
Выполнив указанные построения, переходим к определению действующих по троссам натяжений, поступая следующим образом.

Задаемся натяжением T_1 в пролете № 1 и по кривой I находим соответствующее удлинение пролета

$$\Delta l_1 = D'D.$$

Очевидно, это удлинение, благодаря жесткости анкерной опоры, будет получено только за счет отклонения промежуточной опоры № 1 в точке закрепления тросса, и поэтому можно написать

$$\delta'_1 = \Delta l_1.$$



Фиг. 35.

Зная отклонение опоры № 1, по прямой A_1B_1 найдем действующую на нее разность натяжений

$$\Delta T_1 = T_1 - T_2 = FF'.$$

Из последнего соотношения можно графически получить величину натяжения

$$T_2 = OK_1 = OD - FF' = OD - DK_1$$

и найти по нему изменение длины второго пролета

$$\Delta l_2 = KK'.$$

Так как

$$OK_1 = T_2 < OQ = T_0$$

(T_0 — натяжение по троссу, соответствующее нормальному пролету l_0), то в данном случае будем иметь сокращение пролета и потому отклонение второй опоры, как то видно из фиг. 34, будет равно

$$\delta_2' = \delta_1' - \Delta l_2.$$

Отложив от точки L отрезок GL (фиг. 35), равный KK_1 , получим графическое изображение отклонения δ_2' в виде отрезка K_1G , т. е.

$$\delta_2' = K_1G.$$

По прямой A_2B_2 найдем соответствующую разность натяжений по троссам:

$$\Delta T_2 = T_2 - T_3 = MM',$$

а по ней натяжение в третьем пролете

$$T_3 = OR_1 = OK_1 - MM'.$$

Соответствующее T_3 изменение длины пролета $\Delta l_3 = RR_1$ будет отрицательным (сокращение), и потому отклонение опоры № 3 будет равно разности (фиг. 35)

$$\delta_3' = \delta_2' - \Delta l_3$$

и может быть представлено отрезком R_1P , т. е.

$$\delta_3' = R_1P = R_1N - NP = NR_1 - RR_1.$$

Аналогично с предыдущим находим по кривой A_3B_3

$$\Delta T_3 = T_3 - T_4 = SS'$$

и затем, так как SS' имеет отрицательное значение,

$$T_4 = OW_1 = OR_1 + SS' = OR_1 + R_1W_1.$$

Здесь опять, благодаря сокращению $\Delta l_4 = WW'$ четвертого пролета, будет иметь место соотношение

$$\delta_4' = \delta_3' - \Delta l_4 = PR_1 - WW' = Y_1T.$$

По прямой A_4B_4 находим разность натяжений по троссам в пролете № 4 и № 5:

$$\Delta T_4 = T_4 - T_5 = XX'.$$

Изобразив T_3 отрезком $OY_1 = OW_1 + XX'$, получим сокращение пятого пролета

$$\Delta l_3 = YY_1.$$

Отклонение следующей (пятой) опоры будет

$$\delta_3' = \delta_4' - \Delta l_3.$$

Но так как опора II (фиг. 34) является анкерной, не дающей никакого прогиба при всех случаях нагрузки, то предыдущее равенство примет вид:

$$\delta_3' = 0 = \delta_4' - \Delta l_3$$

или

$$\delta_4' = \Delta l_3,$$

т. е. должно быть, чтобы

$$TY_1 = YY_1.$$

Несоблюдение этого требования указывает на неправильность выбора натяжения T_1 и заставляет, задавшись новым его значением, проделать все построения сначала.

Таким образом, натяжения по троссам во всех пролетах и прогибы опор в соответствующих точках являются найденными в первом приближении.

Для дальнейшего уточнения решения задачи будем теперь полагать известными натяжения по троссам и по ним находить натяжения по проводам. Для этого обращаемся к уравнениям (130) и (132) и, решив их относительно разности натяжений по проводам, найдем

$$S_{N+1} - S_N = \frac{\delta_N}{K_n n} + \frac{K_m m}{K_n n} (T_N - T_{N+1}), \quad (136)$$

$$nS_2 - n_2S_1 = \frac{\delta_1}{K_n} + \frac{K_m m}{K_n} (T_1 - T_2). \quad (137)$$

Левая часть последнего уравнения, относящегося к первой промежуточной опоре, представляет усилие, приходящееся на эту опору от разности натяжений по проводам $\Delta S = nS_2 - n_2S_1$. В соответствии с тем, что было сказано в § 2 настоящей главы (стр. 96), и в этом случае, для графического решения задачи необходимо построить кривую зависимости $\Delta S = f(\delta)$, а кривую, удовлетворяющую уравнению

$$\frac{\Delta S}{n_2} = f(\delta).$$

Последняя кривая может быть построена путем уменьшения ординат (ΔS) кривой, соответствующей уравнению (137) в n_2 раз, при неизменных абсциссах (δ) ее или, что то же самое, по уравнению

$$\Delta S n_2 = n_2(nS_2 - n_2S_1) = \frac{\delta_1}{K_n} + \frac{K_m m}{K_n} (T_1 - T_2). \quad (138)$$

Из полученных уравнений (136) и (138) следует, что зависимости между разностью натяжений по проводам и прогибом соответствующей опоры могут быть выражены прямыми линиями, которые мы и наносим на чертеж (фиг. 36). Таким образом получены прямые A_1B_1 , A_2B_2 , A_3B_3 , A_4B_4 (A_3B_3 и A_4B_4 совпали) соответственно для каждой из промежуточных опор. На том же чертеже наносим кривую изменения натяжения по проводу в зависимости от изменения длины пролета. Выполнив эти предварительные построения, приступаем к определению натяжений, действующих по проводам.

Задаемся значением натяжения в поврежденном пролете

$$S_1 = OA$$

и находим удлинение пролета

$$\Delta l_1 = AA' = OB.$$

Но так как $\Delta l_1 = \delta_1$, то, откладывая $OB = \Delta l_1$ влево от начала координат, найдем, что соответствующая ордината прямой A_1B_1 будет представлять величину

$$BB' = \frac{\Delta S}{n_2} = \frac{n}{n_2} S_2 - S_1.$$

Отложив эту ординату в виде отрезка AC (точка C около цифры 450 на фиг. 36), получим отрезок

$$OC = OA + AC = S_1 + \frac{n}{n_2} S_2 - S_1 = \frac{n}{n_2} S_2$$

и, поделив его на отношение $\frac{n}{n_2}$, найдем натяжение по проводам второго пролета

$$S_2 = OD.$$

Дальнейшее построение ничем по существу не отличается от только что изложенного при определении натяжений по троссам, поэтому мы не будем останавливаться на описании его и приведем только полученные выражения искомых величин натяжений и прогибов через отрезки фиг. 36:

натяжения	прогибы	сокращения пролетов
$S_1 = OA$	$\delta_1 = AA' = OB$	$\Delta l_1 = OB = AA'$
$S_2 = OD$	$\delta_2 = DE'$	$\Delta l_2 = DD' = EE'$
$S_3 = OG$	$\delta_3 = GJ'$	$\Delta l_3 = GG' = JJ'$
$S_4 = OL$	$\delta_4 = LM'$	$\Delta l_4 = LL' = MM'$
$S_5 = OP$		$\Delta l_5 = PR = LM'$

Здесь, как и ранее, должно быть выполнено условие отсутствия прогиба анкерной опоры, которое выразится (применительно к представленному на фиг. 34 случаю линии передачи с пятью пролетами между анкерами) соотношением:

$$\delta_5 = 0.$$

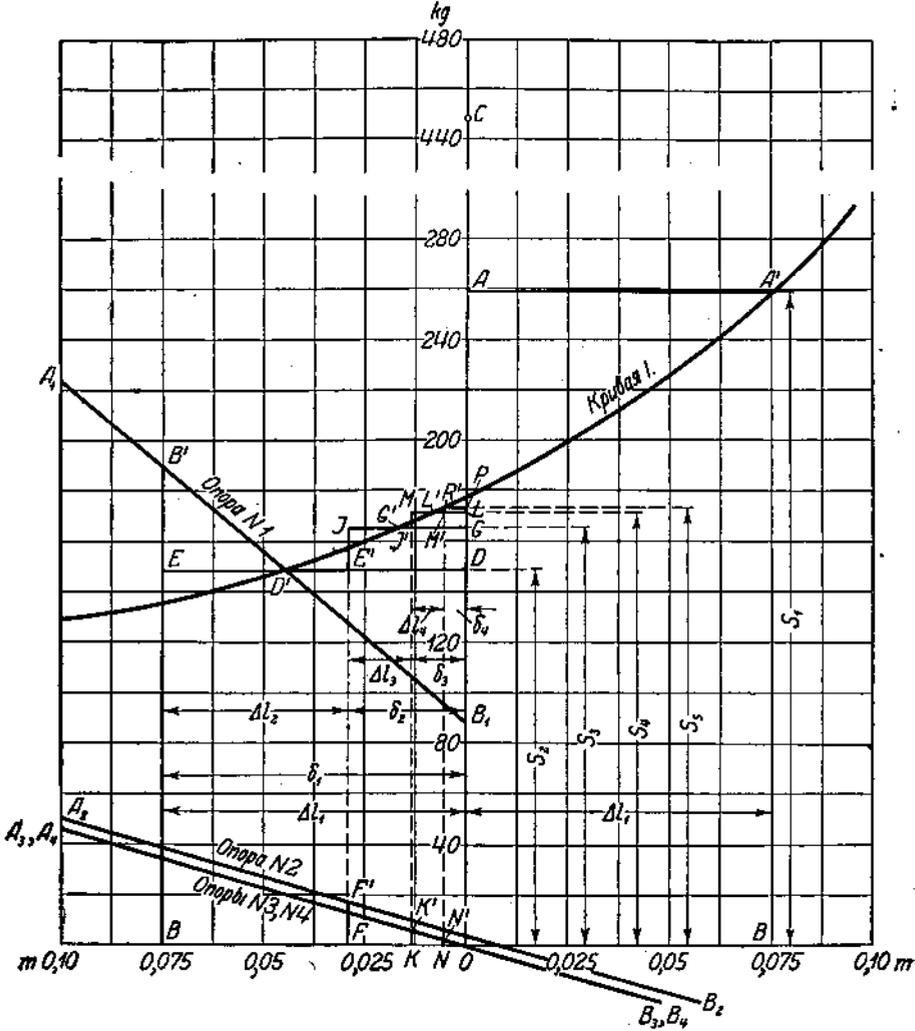
Соблюдение этого условия требует, следовательно, чтобы

$$\Delta l_5 = \delta_4,$$

что и будет выполнено, если точка P попадет на ось ординат.

В случае, если получится, что $M'L \neq R'P$, то это указывает на неправильный выбор натяжения S_1 и все построения должны быть повторены при другом его значении.

Таким образом, в результате описанных построений мы найдем значения натяжений по проводам и отклонений точек их закрепления во втором приближении, т. е. более близкие к действительным. Далее,



Фиг. 36.

исходя из этих более точных величин натяжений по проводам, можно найти описанным ранее способом более точные значения натяжений по тросам уже во втором приближении.

Повторяя снова весь цикл построений и делая это неопределенное количество раз, все более уточняя получаемые результаты, мы могли бы восстановить картину явления с любой степенью точности.

Заметим, что обычно бывает достаточно ограничиться определением

интересующих нас величин натяжений по проводам и троссам во втором— третьем приближении.

Совершенно очевидно, что эту задачу можно было бы решить и графо-аналитическим методом, для чего, ограничившись только построением кривых (см. фиг. 35 и 36), пришлось бы разности натяжений ΔS и ΔT находить не по прямым AB , а из уравнений (134) — (135) и (136) — (137). Порядок же решения остается при этом методе совершенно тот же.

Пример 19. Имеется трехфазная линия электропередачи с медными проводами сечением $q = 25 \text{ mm}^2$, защищенная одним стальным троссом сечением $q = 25 \text{ mm}^2$. При $t = -5^\circ\text{C}$ и добавочных нагрузках на проводах и троссе от ветра со скоростью $v = 20 \text{ m/sec}$ и слоя льда с толщиной стенки $b = 10 \text{ mm}$ в пролете, примыкающем к анкерной опоре, произошел обрыв двух проводов. Примем, согласно Союзных Норм, что от сотрясения проводов в момент обрыва их, гололед со всех уцелевших проводов и тросса на участке между двумя анкерными мачтами сброшен. Требуется определить натяжения по проводам и троссу в различных пролетах после обрыва. Пролет линии $l = 100 \text{ m}$. Анкерные опоры расположены через каждый 5 пролетов. Коэффициент гибкости промежуточных опор, подсчитанный для случая приложения силы на высоте укрепления среднего провода $H = 9 \text{ m}$ равен $K = 0,000725 \text{ m/kg}$. Тросс закреплен на вершине мачты на высоте $H = 10,7 \text{ m}$ над поверхностью земли.

1-й расчет проводов. Так как первый расчет проводов, который производится, пренебрегая наличием тросса, ничем не отличается от расчета произведенного для этой же линии (но при отсутствии тросса) в примере 18 (стр. 101), то он здесь не приводится, а даются лишь результаты его:

S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
300 kg	144 kg	162,4 kg	170 kg	173,2 kg

1-й расчет тросса. По формулам (126) и (128) находим коэффициенты:

$$K'_n = K_n \left(1 + \frac{3}{2} \frac{H_1 - H}{H} \right) = 0,000725 \left(1 + 1,5 \frac{10,7 - 9}{9} \right) = 0,000932 \text{ m/kg},$$

$$K'_m = 0,000725 \frac{10,7^3}{9^3} = 0,00123 \text{ m/kg}.$$

Имея эти коэффициенты, по формулам (134) и (135) находим уравнения прямых:

A_1B_1 — для опоры № 1

$$\begin{aligned} T_1 - T_2 = \Delta T_1 &= \frac{K'_n}{K'_m m} (nS_2 - n_2S_1) - \frac{\delta'_1}{K'_m m} = \\ &= \frac{0,000932}{0,00123 \cdot 1} (3 \cdot 144 - 300 \cdot 1) - \frac{\delta'_1}{0,00123 \cdot 1}, \\ \Delta T_1 &= 100 - 814\delta'_1; \end{aligned}$$

A_2B_2 — для опоры № 2

$$\begin{aligned} T_2 - T_3 = \Delta T_2 &= \frac{K'_n n}{K'_m m} (S_3 - S_2) - \frac{\delta'_2}{K'_m m} = \\ &= 3 \frac{0,000932}{0,00123 \cdot 1} (162,4 - 144) - \frac{\delta'_2}{0,00123} \\ \Delta T_2 &= 2,27(162,4 - 144) - 814\delta'_2, \\ \Delta T_2 &= 41,8 - 814\delta'_2; \end{aligned}$$

A_3B_3 — для опоры № 3

$$\begin{aligned} T_3 - T_4 = 2,27(S_4 - S_3) - 814\delta'_3 &= 2,27(170 - 162,4) - 814\delta'_3 = \\ &= 17 - 814\delta'_3; \end{aligned}$$

A_4B_4 — для опоры № 4

$$\begin{aligned} T_4 - T_5 = 2,27(S_5 - S_4) - 814\delta'_4 &= 2,27(173,2 - 170) - 814\delta'_4 = \\ &= 7,3 - 814\delta'_4. \end{aligned}$$

Все эти четыре прямые представляют зависимости прогиба опор в точках закрепления троса от разности натяжений по нему.

Далее находим уравнение кривой зависимости изменения пролета от величины натяжения по тросу при сброшенном гололеде.

Натяжение по тросу, после того как гололед будет сброшен, определится из уравнения (50):

$$\sigma_1 - \frac{l^2 \gamma_6^2}{24\beta \sigma_1^2} = \sigma_{\max} - \frac{l^2 \gamma_7^2}{24,5 \sigma_{\max}^2}$$

Подставляя в это уравнение

$$\beta = \frac{1}{E} = \frac{1}{19000} = 0,525 \cdot 10^{-4},$$

$$\delta_{\max} = 20 \text{ kg/mm}^2 \text{ и } \gamma_6 = 0,01 \text{ kg/m} \cdot \text{mm}^2, \quad \gamma_7 = 0,0366 \text{ kg/m} \cdot \text{mm}^2$$

(вычисления удельных нагрузок здесь не приведены), получим

$$\begin{aligned} \sigma_1 - \frac{100^2 \cdot 0,01^2}{24 \cdot 0,525 \cdot 10^{-4} \sigma_1^2} &= 20 - \frac{100^2 \cdot 0,0366^2}{0,525 \cdot 10^{-4} \cdot 24 \cdot 20^2}, \\ \sigma_1 - \frac{795}{\sigma_1^2} &= -6,58, \end{aligned}$$

откуда:

$$\sigma_1 = 7,51 \text{ kg/mm}^2.$$

Стрела провеса троса определится:

$$f = \frac{l^2 \gamma_6}{8\sigma_1^2} = \frac{100^2 \cdot 0,01}{8 \cdot 7,51} = 1,66 \text{ м.}$$

Длина троса в пролете по формуле (27) будет:

$$L = l + \frac{8}{3} \frac{f^3}{l} = 100 + \frac{8}{3} \frac{1,66^3}{100} = 100,0736 \text{ м.}$$

Подставляя найденные величины в уравнение (105), получим

$$\frac{l^3 \gamma_6^2}{24\sigma^2} - L_0 \beta \sigma = L_0 (1 - \beta \sigma_1) - l,$$

$$\frac{0,01^{2/3}}{24\sigma^2} - 100,0735 \cdot 0,525 \cdot 10^{-4} \sigma = 100,0735(1 - 0,525 \cdot 10^{-4} \cdot 7,51) - l$$

или

$$\frac{416 \cdot 10^{-8} L^2}{\sigma^2} - 0,00525 \sigma = 100,0341 - l.$$

Задаваясь различными значениями величины l , находим соответствующие им значения напряжения в тросе, а следовательно и величину натяжения по всему тросу.

Результаты подсчетов сведены в табл. XXIII.

Т А Б Л И Ц А XXIII.

Длина пролета l (м).	99,95	99,98	99,99	100,0	100,01	100,025	100,05	100,07
Напряжение в тросе σ (kg, mm ²)	6	6,8	7,14	7,51	7,95	8,7	10,38	12,2
Натяжение по тросу S (kg)	150	170	178	183	198,5	218	260	305

По этим данным построена кривая I фиг. 35.

С помощью этой кривой и прямых $A_1 B_1$, $A_2 B_2$ и т. д. находим распределение натяжений по тросу. Графическое решение этой задачи представлено на фиг. 35, где все обозначения, а также и метод решения, вполне совпадают с приведенными в тексте § 3 этой главы, вследствие чего объяснения построения здесь не повторяются.

Результаты подсчетов приведены в табл. XXV под № 1.

2-й расчет проводов. Помня, что коэффициент $K_m = K'_n$, по формулам (136) и (138) находим уравнения прямых:

A_1B_1 — для опоры № 1

$$\Delta S = \frac{\delta_1}{K_{n_2}} = \frac{K_m m}{K_{n_2}} (T_1 - T_2) = \frac{\delta_1}{0,000725} + \frac{0,000932}{0,000725} (249 - 182),$$

$$\Delta S = 1380\delta_1 + 86,5;$$

A_2B_2 — для опоры № 2

$$S_3 - S_2 = \Delta S_2 = \frac{\delta_2}{K_{n_2}} \frac{K_m m}{k_{n_2}} (T_2 - T_3) = \frac{\delta_2}{0,000725 \cdot 3} +$$

$$+ \frac{0,000932}{0,000725 \cdot 3} (182 - 173),$$

$$\Delta S_2 = 460\delta_2 + 3,88;$$

A_3B_3 — для опоры № 3

$$S_4 - S_3 = \Delta S_3 = 460\delta_3 + 0,43(T_3 - T_4) = 460\delta_3 + 0,43(173 - 175),$$

$$\Delta S_3 = 460\delta_3 - 0,86;$$

A_4B_4 — для опоры № 4

$$S_5 - S_4 = \Delta S_4 = 460\delta_4 + 0,43(T_4 - T_5) = 460\delta_4 + 0,43(175 - 177),$$

$$\Delta S_4 = 460\delta_4 - 0,86.$$

Уравнения прямых A_3B_3 и A_4B_4 совершенно тождественны и, следовательно, на чертеже представляются одной и той же прямой.

Имея эти кривые и кривую I , построенную по данным табл. XXI, приступим к определению натяжений по проводам (см. фиг. 36).

Задаем значения $S_1 = 259$ кг. Этому натяжению соответствует удлинение пролета $\Delta l = 0,075$ м, откладывая которое влево от оси ординат по кривой A_1B_1 , находим

$$BB_1 = \frac{\Delta S}{n_2} = 189 \text{ кг.}$$

Тогда отрезок:

$$OC = OA + AC = 259 + 189 = 448 \text{ кг;}$$

откуда

$$S_2 = \frac{\Delta S}{n_2} \cdot \frac{n_2}{n} = 448 \cdot \frac{1}{3} = 149 \text{ кг.}$$

Дальнейшие построения производятся так же, как было только что изложено, и потому здесь не приводятся. Все обозначения фиг. 36, на которой произведено графическое решение задачи, совпадают с приведенными в тексте § 3 настоящей главы.

Дальнейшие вычисления. После второго расчета проводов необходимо произвести на основании полученных данных новый (второй) расчет троса, затем 3-й расчет проводов и т. д.

В целях сокращения объема примера ни вычисления, ни графиче-

ские построения по этим расчетам здесь не приводятся, а в табл. XXIV и XXV под соответствующими номерами, даны конечные результаты вычислений.

ТАБЛИЦА XXIV.

Провода.

№		Натяжения по проводам в килограммах					Прогобы опор в метрах на высоте $H=9$ m			
		S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	δ_1	δ_2	δ_3	δ_4
1	1-й расчет	300	144	162,4	170	173,2	0,05625	0,04	0,0165	0,0065
2	2-й расчет	259	149	165,0	171	172	0,075	0,029	0,0138	0,005
3	3-й расчет	248	152	167	172	173	0,066	0,0275	0,0138	0,00685

ТАБЛИЦА XXV.

Тросс.

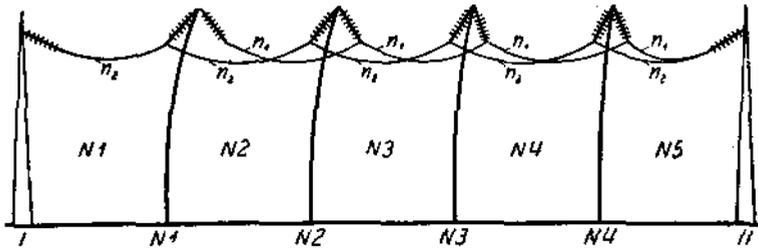
№		Натяжения по троссу в килограммах					Прогобы опор в метрах на высоте $H=10,7$ m			
		T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	δ_1	δ_2	δ_3	δ_4
1	1-й расчет	249	182	173	175	177	0,045	0,04	0,0238	0,0106
2	2-й расчет	271	175	171	176	180	0,0555	0,041	0,02	0,0075
3	3-й расчет	278	171	171	175	180	0,06	0,041	0,02	0,0075

Сопоставляя результаты подсчетов натяжений по проводам, полученные после 2-го и 3-го расчетов их, видим, что разница получилась не более 4%, а потому дальнейшие вычисления не имеют практического интереса.

§ 4. Обрыв проводов на линии передачи с подвесными изоляторами с учетом влияния оставшихся проводов.

При подвесных изоляторах учет влияния оставшихся в поврежденном пролете проводов менее важен, чем при штыревых изоляторах, но все же вносит некоторые изменения в картину распределения натяжений по проводам, в особенности при коротких гирляндах и больших значениях коэффициента гибкости промежуточных опор. Поэтому здесь и дается метод учета этого влияния, разработанный автором настоящей книги.

Возьмем, как и ранее, линию передачи с пятью пролетами и предположим, что в первом из них произошел обрыв части проводов (фиг. 37). Обозначим общее число проводов через n , число оборванных — через n_1 и число уцелевших в поврежденном пролете — через n_2 .



Фиг. 37.

После обрыва все промежуточные опоры и гирлянды, несущие оборванные провода, получают отклонения по направлению к анкерной опоре II, гирлянды же с неповрежденными проводами отклонятся относительно точек укрепления их на опорах в обратном направлении. При этом натяжения по необорванным проводам могут превзойти величины, имевшие место до обрыва.

Сложность картины отклонений точек подвеса проводов делает решение задачи определения натяжений после обрыва с первого раза невозможным и заставляет применить метод последовательных приближений, к изложению которого и перейдем.

Полагая вначале уцелевшие n_2 провода отсутствующими, находим с помощью изложенного ранее в § 6 главы IV метода натяжения по оборванным проводам и прогибы опор. Обозначим найденные величины натяжений через S_2 , S_3 , S_4 и S_5 .

Очевидно, эти натяжения, в смысле действия их на опоры, могут быть заменены силами, приложенными к опорам в точках закрепления к ним гирлянд и равными

$$\Delta S_1 = n_1 S_2, \quad \Delta S_2 = n_1 (S_3 - S_2), \quad \Delta S_3 = n_1 (S_4 - S_3) \quad \text{и} \quad \Delta S_4 = n_1 (S_5 - S_4).$$

Соответствующие прогибы опор в точках приложения сил будут:

$$\delta_{S_1} = K \Delta S_1, \quad \delta_{S_2} = K \Delta S_2, \quad \delta_{S_3} = K \Delta S_3 \quad \text{и} \quad \delta_{S_4} = K \Delta S_4,$$

где K — коэффициент гибкости опоры.

Если точки укрепления гирлянд на опоре находятся на разной высоте, то можно для упрощения расчетов принять, что точка приложения всех сил лежит на уровне траверсы среднего провода и исходя из этого предположения и определять коэффициент гибкости опоры.

Перейдем теперь к определению натяжений по уцелевшим проводам, причем провода оборванные будем считать отсутствующими на всей длине линии между анкерными опорами и замененными силами ΔS .

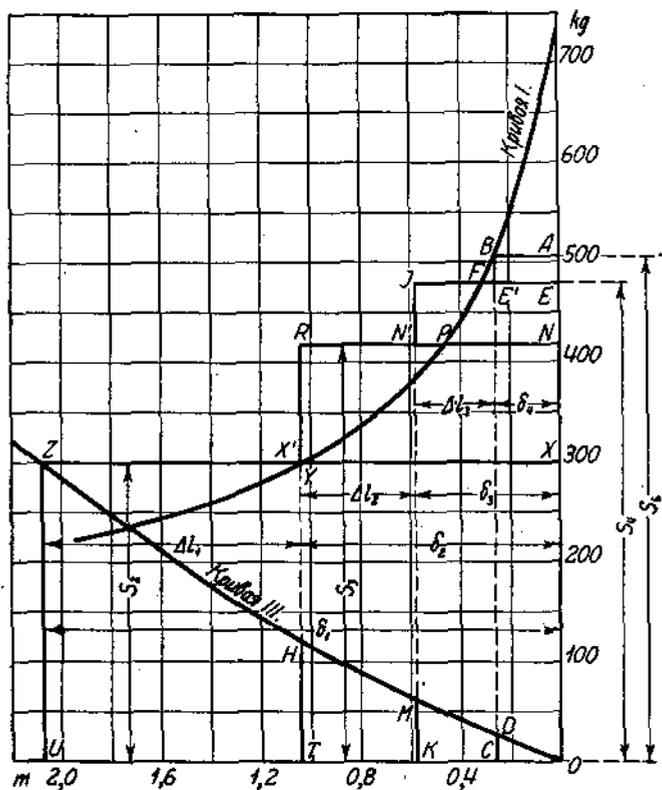
Отклонение точки подвеса уцелевшего провода на какой-либо N -й опоре будет складываться из отклонения гирлянды δ' под влиянием разности

натяжений по уцелевшим проводам ($R_N - R_{N+1}$), из прогиба опоры δ'' под действием той же разности ($R_N - R_{N+1}$) и из прогиба опоры δ_S под действием силы ΔS_N . Поэтому это отклонение может быть написано в следующем виде:

$$\delta = \delta' + \delta'' - \delta_S = \lambda \frac{R_N - R_{N+1}}{\sqrt{(P+Q)^2 + (R_N - R_{N+1})^2}} + K n_2 (R_N - R_{N+1}) - K \Delta S_N, \quad (139)$$

где n_2 — число уцелевших проводов.

В этом уравнении последний член является для данной опоры величиной постоянной, но неодинаковой для всех опор. Поэтому для опре-



Фиг. 38.

деления натяжений по уцелевшим проводам с помощью графического метода нужно будет для каждой опоры построить свою кривую зависимости отклонения точки подвеса от разности натяжений $\delta = f(\Delta R)$, причем это обстоятельство весьма незначительно усложнит задачу, так как все эти кривые будут между собой параллельны.

Построив эти кривые, а также кривую зависимости натяжения по проводу от длины пролета (фиг. 39), мы приступаем к определению натяжений, применяя обычный способ подбора.

По этому уравнению строим (фиг. 40) для каждой опоры свою кривую $\delta_s = f(\Delta S)$ и, применяя только что изложенный метод, сможем определить натяжения по оборванным проводам во всех пролетах уже во втором приближении к действительности. Таким образом, будем иметь известные величины S_1, S_2, S_1', S_2' и по ним сможем произвести второй расчет уцелевших проводов, найдя натяжения по ним R_1', R_2', R_3', R_4' и R_5' во втором приближении.

Повторяя описанные построения неопределенное количество раз, можно восстановить картину явления с любой степенью точности. Обычно бывает достаточно произвести три подсчета для оборванных проводов и два — для уцелевших, так как дальнейшего уточнение практического значения не имеет.

Пример 20. На трехфазной линии передачи с горизонтальным расположением медных проводов сечением $q = 70 \text{ mm}^2$, при $t = -5^\circ \text{ C}$ и добавочных нагрузках на провода от ветра со скоростью $v = 20 \text{ m/sec}$ и слоя льда с толщиной стенки $b = 10 \text{ mm}$ в пролете, примыкающем к анкерной опоре, произошел обрыв двух проводов. Принимаем, что от сотрясения проводов в момент обрыва гололед со всех уцелевших проводов линии на участке между двумя анкерными опорами сброшен. Требуется определить натяжения по проводам в различных пролетах после обрыва, учитывая при этом влияние уцелевшего в поврежденном пролете провода. Пролет линии $l = 175 \text{ m}$. Коэффициент гибкости опоры $K = 0,0024 \text{ m/kg}$. Длина гирлянды $\lambda = 0,7 \text{ m}$, а ее вес $Q = 30 \text{ kg}$. Анкерные опоры расположены через каждые 5 пролетов.

а) Построение кривой зависимости $l = f(S)$ по формуле (105). Пользуясь полученным в примере 16 (стр. 84) уравнением

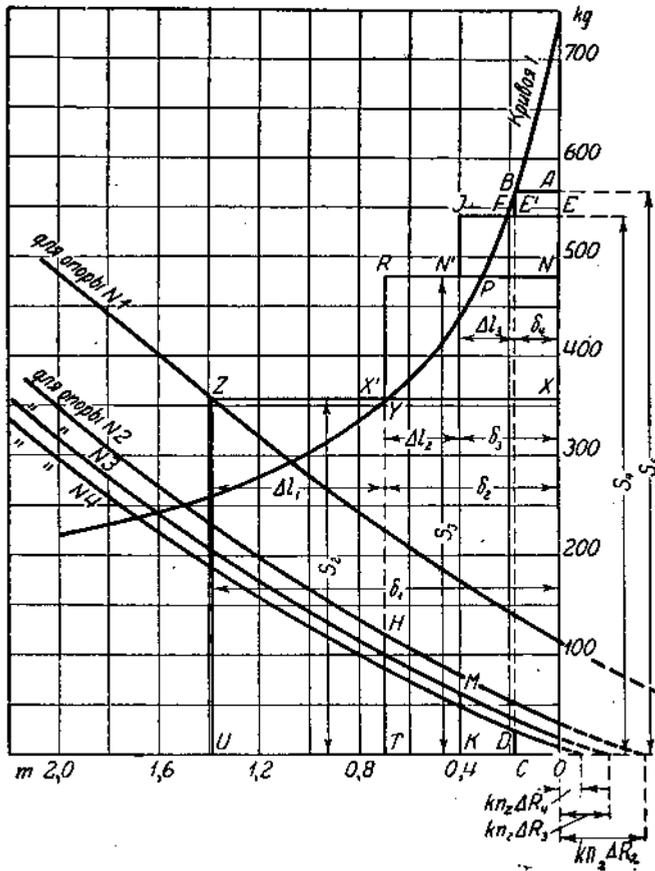
$$388 \cdot 10^{-8} \frac{l^3}{\sigma^2} - 0,0135 \sigma = 175,04 - l,$$

строим кривую l зависимости натяжения по проводу от длины пролета как для случая сокращения пролета, так и для случая удлинения его. Результаты подсчетов сведены в табл. XXVI.

ТАБЛИЦА XXVI.

Длина пролета l (m)	173	173,5	174	174,3	174,6	174,8	175	175,1	175,2	175,3	175,4
Натяжение в проводе σ (kg/mm ²)	3,11	3,56	4,31	5,05	6,26	7,92	10,55	13,2	17,1	22,2	26,8
Натяжение по проводу S (kg)	217	249	302	353	437	554	738,5	924	1197	1550	1875

По этим данным нанесена на фиг. 38, 39 и 40 кривая l .



Фиг. 40.

b) Построение кривой $\delta = f(\Delta S)$ (при двух оборванных проводах). По формуле (116') имеем:

$$\delta = \delta' + \delta'' = \lambda \frac{S_N - S_{N-1}}{\sqrt{(P + Q_1)^2 + (S_N - S_{N-1})^2}} + K n_1 (S_N - S_{N-1}). \quad (141)$$

Подставляя в это уравнение

$$P = \gamma_e q l = 0,00966 \cdot 70 \cdot 175 = 118 \text{ kg},$$

$$Q_1 = \frac{Q}{2} = 15 \text{ kg}$$

и

$$\lambda = 0,7 \text{ m},$$

получим

$$\delta = 0,7 \frac{S_N - S_{N-1}}{\sqrt{(118 + 15)^2 + (S_N - S_{N-1})^2}} + 0,0024 \cdot 2 \cdot (S_N - S_{N-1}),$$

$$\delta = \frac{0,7 \cdot \Delta S}{\sqrt{17689 + \Delta S^2}} + 0,0048 \Delta S$$

Задаваясь различными значениями ΔS , находим соответствующие отклонения точек подвеса (см. табл. XXVII) и строим кривую III (фиг. 38).

ТАБЛИЦА XXVII.

Разность натяж. по проводам (kg)	25	50	75	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Отклонение кон-да гирлянда (м)	0,13	0,246	0,343	0,42	0,525	0,584	0,62	0,64	0,66	0,665	0,673	0,677
Прогиб опоры (м)	0,12	0,24	0,36	0,48	0,72	0,96	1,2	1,44	1,68	1,92	2,16	2,4
Результирующее отклонение (м)	0,25	0,486	0,703	0,90	1,245	1,544	1,82	2,08	2,34	2,585	2,833	3,077

с) Построение кривой $\delta = f(\Delta R)$ при одном уцелевшем проводе. Отклонение точки подвеса под влиянием разности натяжений по необорванному проводу определится уравнением:

$$\delta = \delta' + \delta'' = \lambda \frac{R_N - R_{N+1}}{\sqrt{(P + Q_1)^2 + (R_N - R_{N+1})^2}} + Kn_2 (R_N - R_{N+1}). \quad (141')$$

Имея в виду, что это уравнение отличается от уравнения (141) только последним членом, получим:

$$\delta = \delta' + \delta'' = 0,7 \frac{\Delta R}{\sqrt{17689 + \Delta R^2}} + 0,0024 \Delta R.$$

Координаты кривой, удовлетворяющей этому уравнению, приведены в табл. XXVIII.

ТАБЛИЦА XXVIII.

Разность натяже-ний (kg)	25	50	75	100	150	200	250	300	350	400	450	500	530
Отклонение гар-лянда (м)	0,13	0,246	0,343	0,42	0,525	0,584	0,62	0,64	0,66	0,665	0,673	0,677	0,68
Прогиб опоры (м)	0,06	0,12	0,18	0,24	0,36	0,48	0,6	0,72	0,84	0,96	1,08	1,2	1,27
Результирующее отклонение (м)	0,19	0,366	0,523	0,66	0,885	1,064	1,22	1,36	1,50	1,625	1,753	1,877	1,95

1-й расчет оборванных проводов. Пренебрегая влиянием необорванного провода, производим обычным путем (см. пример 16 или

§ 6 гл. VI) расчет распределения натяжения по проводам в различных пролетах. Графическое решение этой задачи представлено на фиг. 38, где кривая *I* построена по данным табл. XXVI, а кривая *III* — по данным табл. XXVII.

Результаты графического решения приведены в табл. XXIX под № 1.

1-й расчет необорванного провода. Заменяем разности натяжений по оборванным проводам силами, приложенными в точках закрепления гирлянд. Тогда отклонение точек подвеса проводов на различных опорах изобразятся кривыми, удовлетворяющими уравнению (139):

$$\delta = \lambda \frac{R_N - R_{N+1}}{\sqrt{(P + Q_1)^2 + (R_N - R_{N+1})^2}} + Kn_2 (R_N - R_{N+1}) - K \Delta S_N. \quad (139)$$

Это уравнение отличается от уравнения (141), для которого уже подсчитаны координаты точек (см. табл. XXVIII), только последним членом, представляющим из себя для каждой опоры некоторую постоянную величину. Следовательно, отклонения точек подвеса необорванного провода на различных опорах изобразятся одной и той же кривой, сдвинутой относительно оси ординат на ту или иную величину, определяемую последним членом $K \Delta S_N$ формулы (139).

Сдвиг кривой, определяемой уравнением (141),

$$\begin{aligned} \delta &= \lambda \frac{R_N - R_{N+1}}{\sqrt{(Q_1 + P)^2 + (R_N - R_{N+1})^2}} + Kn_2 (R_N - R_{N+1}) = \\ &= \frac{0,7 \Delta R}{\sqrt{17689 + \Delta R^2}} + 0,0024 \Delta R, \end{aligned}$$

будет:

для опоры № 1 — на величину

$$\delta'_{S_1} = Kn_1 S_1 = 2 \cdot 0,0024 \cdot 300 = 1,44 \text{ м},$$

для опоры № 2 — на величину

$$\delta'_{S_2} = Kn_1 (S_3 - S_2) = 2 \cdot 0,0024 (417,5 - 300) = 0,565 \text{ м},$$

для опоры № 3 — на величину

$$\delta'_{S_3} = Kn_1 (S_4 - S_3) = 2 \cdot 0,0024 (480 - 417,5) = 0,3 \text{ м},$$

и, наконец, для опоры № 4 — на величину

$$\delta'_{S_4} = Kn_1 (S_5 - S_4) = 2 \cdot 0,0024 (505 - 480) = 0,12 \text{ м}.$$

Имея все эти четыре кривые для 1-й, 2-й, 3-й и 4-й опор и кривую *I*, построенную по данным табл. XXVI, находим распределение натяжений в различных пролетах.

Графическое решение этой задачи представлено на фиг. 39, на которой различные отрезки представляют из себя следующие величины:

сокращение пролетов	отклонение точек подвеса	разность натяжений по проводам
$\Delta l_1 = AB$	$\delta_1 = AB$	$\Delta R_1 = CD = BE'$
$\Delta l_2 = EF = E'I$	$\delta_2 = EI = NN' = AB + EF$	$\Delta R_2 = KM = IN'$
$\Delta l_3 = PN = N'R$	$\delta_3 = NR = XX' = NN' - PN$	$\Delta R_3 = HT = RX'$
$\Delta l_4 = XY = Y'X'$	$\delta_4 = XY' = ZZ' = XX' - YX$	$\Delta R_4 = UU' = Z'Y'$
$\Delta l_5 = ZZ' = ZZ''$	$\delta_5 = 0 = ZZ' - ZZ''$	

Результаты подсчетов приведены в табл. XXX под № 1.

2-й расчет оборванного провода. Заменяем разности натяжений по необорванному проводу силами, приложенными в точках закрепления гирлянд. Тогда отклонения точек подвеса оборванных проводов на различных опорах изобразятся той же кривой III фиг. 38, определяемой уравнением

$$\delta_s = \frac{0,7 \cdot \Delta S}{\sqrt{17689 + \Delta S^2}} + 0,0048 \Delta S$$

и соответственно сдвинутой относительно оси ординат, на величину:

для опоры № 1

$$\delta_{R_1} = Kn_2 (R_1 - R_2) = 0,0024 (1262 - 850) = 0,99 \text{ м,}$$

для опоры № 2

$$\delta_{R_2} = Kn_2 (R_2 - R_3) = 0,0024 (850 - 707,5) = 0,342 \text{ м,}$$

для опоры № 3

$$\delta_{R_3} = Kn_2 (R_3 - R_4) = 0,0024 (707,5 - 625) = 0,198 \text{ м}$$

и, наконец, для опоры № 4

$$\delta_{R_4} = Kn_2 (R_4 - R_5) = 0,0024 (625 - 590) = 0,084 \text{ м.}$$

На фиг. 40 нанесены все четыре кривые отклонений точек подвеса в зависимости от разности натяжений, а также и кривая I. Там же дано графическое решение задачи.

Согласно фиг. 40 имеем:

сокращение пролетов	отклонение точек подвеса	разность натяжений по проводам
$\Delta l_5 = AB$	$\delta_4 = AB$	$\Delta S_4 = CD = BE'$
$\Delta l_4 = EF = E'J$	$\delta_3 = EJ = NN' = AB + FE$	$\Delta S_3 = KM = JN'$
$\Delta l_3 = PN = N'R$	$\delta_2 = NR = XX' = NP + EJ$	$\Delta S_2 = HT = RX'$
$\Delta l_2 = XY = X'Z$	$\delta_1 = XZ = XY + NR$	$\Delta S_1 = UZ$

Результаты подсчетов приведены в табл. XXIX под № 2.

Дальнейшие вычисления. После второго расчета оборванного провода необходимо произвести на основании данных его второй расчет необорванного провода, затем по полученным данным третий расчет оборванных проводов, затем третий расчет необорванного провода и т. д. В целях сокращения объема примера дальнейшие вычис-

ления и построения здесь не приводятся, а в табл. XXIX и XXX под соответствующими номерами даются результаты этих подсчетов.

ТАБЛИЦА XXIX.
Оборванные провода

№ п/п		Натяжения по проводам (kg)					Отклонения точек подвеса (m)			
		S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	δ_1	δ_2	δ_3	δ_4
1	1-й расчет	—	300	417,5	480	505	2,07	1,04	0,58	0,26
2	2-й расчет	—	357,5	480	542	568	1,39	0,7	0,4	0,18
3	3-й расчет	—	381	498	555	577	1,22	0,64	0,36	0,17
4	4-й расчет	—	387,5	500	558	586	1,17	0,6	0,335	0,16

ТАБЛИЦА XXX.
Необорванные провода

№ п/п		Натяжения по проводам (kg)					Отклонения точек подвеса (m)			
		R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	δ_1	δ_2	δ_3	δ_4
1	1-й расчет	1262	850	707,5	625	590	0,22	0,29	0,26	0,15
2	2-й расчет	1395	860	703	615	575	0,25	0,33	0,29	0,17
3	3-й расчет	1442	862	692	606	568	0,265	0,34	0,30	0,172

Из рассмотрения табл. XXIX и XXX видно, что:

1) разница в натяжениях по оборванным проводам между соответствующими величинами, полученными после 3-го и 4-го расчета проводов, получается около 2% (таким образом, вычисления вполне можно ограничивать 3-мя подсчетами);

2) ошибка при определении натяжений по проводам, без учета действия оставшихся проводов, получается для поврежденных проводов около $29 \div 16\%$;

3) натяжение в первом пролете по необорванному проводу достигает величины $R_1 = 1442$ kg, что несколько выше принятого нами максимально допускаемого натяжения

$$S_{\max} = q\sigma_{\max} = 70 \cdot 18 = 1260 \text{ kg.}$$

При более неблагоприятных соотношениях это натяжение может дойти до еще более высоких значений.

§ 5. Определение натяжений по проводам при обрыве части их на линии передачи с подвесными изоляторами и заземленными троссами.

Ущербные в поврежденном пролете провода оказывают при наличии троссов столь незначительное влияние, что учитывать их никакого смысла не имеет. Определение натяжений после обрыва будем производить методом, предложенным инж. В. П. Фармаковским, основанным на последовательных приближениях.

Полагая сначала троссы отсутствующими, находим натяжения по проводам и отклонения точек подвеса их, считая, что опоры не прогибаются ($K=0$).

Пусть найденные величины натяжений по проводам будут:

$$S_2, S_3, S_4 \text{ и } S_n.$$

Очевидно, разности этих натяжений обусловят прогибы опор в точках закрепления гирлянд. Эти прогибы легко могут быть найдены по уравнению (97), а именно:

$$\delta'_n = K_n n_1 (S_{n+1} - S_n), \quad (97)$$

где K_n — коэффициент гибкости опоры на высоте точки укрепления гирлянды, n_1 — число оборвавшихся проводов.

Прогибы же опор в точках закрепления троссов, в предположении отсутствия последних, найдутся по уравнениям типа (97") (см. § 3 настоящей главы) и будут равны:

$$\delta'_{n_1}, \delta'_{n_2}, \delta'_{n_3} \text{ и } \delta'_{n_n}.$$

После этого переходим к определению натяжений по троссам, считая натяжения по проводам известными.

Очевидно, это определение ничем не будет отличаться от изложенного в § 3 настоящей главы для случая штыревых изоляторов, и потому описание его здесь не приводится. В результате будут найдены величины натяжений по троссам

$$T_1, T_2, T_3, T_4, T_5$$

и прогибы опор в точках их закрепления

$$\delta'_{m_1}, \delta'_{m_2}, \delta'_{m_3}, \delta'_{m_4}.$$

Зная натяжения по проводам и троссам, можно определить прогибы опор в точках закрепления гирлянд, несущих провода, для чего воспользуемся уравнениями (130) и (132) § 3 этой главы, полагая в последнем из них $S_1 = 0$ (учет уцелевших проводов не делаем). Пусть найденные величины прогибов опор в указанных точках будут

$$\delta'_{N_1}, \delta'_{N_2}, \delta'_{N_3}, \delta'_{N_4}.$$

Теперь перейдем ко второму, более точному расчету проводов, полагая прогибы опор δ'_N известными.

Отклонение точки подвеса провода складывается из прогиба опоры δ'_N в точке закрепления к ней гирлянды и отклонения δ''_N самой гирлянды. Поэтому, обозначив отклонение точки подвеса провода на какой-либо N -ой опоре через δ_N , можем написать соотношение:

$$\delta_N = \delta''_N + \delta'_N,$$

в котором последний член (при сделанном выше предположении) является величиной постоянной, т. е. не зависящей от искомых натяжений по проводам, причем для каждой опоры он будет иметь свое значение. По последнему соотношению построим для каждой опоры кривую отклонения точки подвеса проводов в зависимости от действующей по ним разности натяжений, для чего переписываем это соотношение в следующем виде:

$$\delta_N = \delta''_N + \delta'_N = \lambda \frac{S_{N+1} - S_N}{\sqrt{(P + Q_1)^2 + (S_{N+1} - S_N)^2}} + \delta'_N.$$

Очевидно, все эти кривые будут между собой параллельны, что значительно упрощает их построение.

Нанеся эти кривые на чертеж (фиг. 43) и построив там же кривую изменения натяжения по проводу в зависимости от изменения длины пролета, приступим к определению натяжений по проводам, применяя обычный метод подбора.

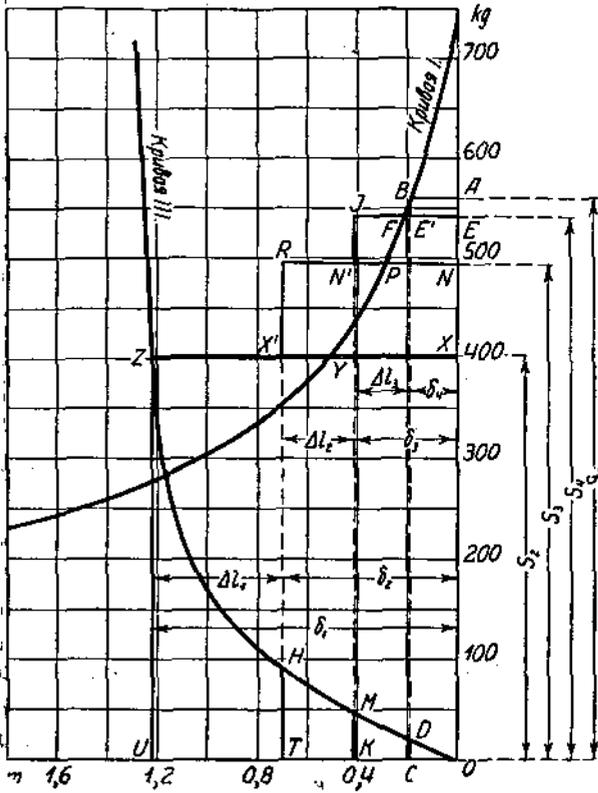
Задаваясь натяжением по проводам во втором (или в пятом) пролете, находим сокращение этого пролета, а по нему — отклонение точки подвеса проводов; затем определяем разность натяжений в рассматриваемом и следующем пролетах и т. д.

В результате найдем величины натяжений по проводам уже во втором приближении к действительности и сможем приступить ко второму расчету троссов. После этого приступают к третьему расчету проводов, а затем снова троссов и т. д., с каждым разом все более и более уточняя получаемые результаты.

Обычно бывает достаточным произвести только два расчета проводов и один расчет троссов, так как дальнейшее уточнение вносит слишком ничтожные изменения в картину распределения натяжений по проводам и троссам.

Пример 21. На трехфазной линии электропередачи с горизонтальным расположением медных проводов сечением $q = 70 \text{ мм}^2$ и защищенной двумя заземляющими (стальными) троссами сечением $q_T = 50 \text{ мм}^2$, при $t = -5^\circ \text{ C}$ и добавочных нагрузках на провода от ветра со скоростью $v = 20 \text{ м/сек}$ и слоя льда с толщиной стенки $b = 10 \text{ мм}$ в пролете, примыкающем к анкерной опоре, произошел обрыв двух проводов. Принимаем, что от сотрясения проводов в момент обрыва, гололед со всех уцелевших проводов и троссов сброшен. Требуется определить натяжения по проводам в различных пролетах после обрыва. Пролет линии $l = 175 \text{ м}$.

Коэффициент гибкости промежуточных опор $K = 0,0024 \text{ m/kg}$. Длина гирлянды $\lambda = 1,3 \text{ m}$ и ее вес $Q = 50 \text{ kg}$. Анкерные опоры расположены через каждые пять пролетов. Высота точек подвеса гирлянд над поверхностью земли $H = 11,6 \text{ m}$, а точек укрепления тросов $H = 12,3 \text{ m}$.



Фиг. 41.

табл. XIV), графическим методом находим распределение натяжений по проводам в различных пролетах (фиг. 41). Результаты расчета приведены в табл. XXXI под № 1.

1-й расчет тросов. По формулам (126) и (128) определяем коэффициенты гибкости

$$K'_n = K_n \left[1 + \frac{3}{2} \frac{H_1 - H}{H} \right] = 0,0024 \left(1 + 1,5 \frac{12,3 - 11,6}{11,6} \right) = 0,00262 \text{ m/kg},$$

$$K'_m = K_n \frac{H_1^3}{H^3} = 0,0024 \left(\frac{12,3}{11,6} \right)^3 = 0,00286 \text{ m/kg}.$$

По формулам (134) и (135) находим уравнения прямых:

$A_1 B_1$ — для опоры № 1

$$T_1 - T_2 = \Delta T_1 = \frac{K'_n}{K'_m m} (n S_2 - n_2 S_1) - \frac{\delta'_1}{K'_m m};$$

2-й расчет про-
водов. Расчет этот будем
вести без учета влияния
оставшегося в поврежден-
ном пролете провода, пред-
полагая прогиб самой опо-
ры равным нулю, т.-е. что
сокращение пролета про-
исходит только за счет от-
клонения гирлянды. Это
предположение равносиль-
но предположению в урав-
нении (116) $K = 0$, и тог-
да оно примет вид (см.
пример 16, табл. XV, вторая
строка):

$$\delta = \frac{1,3 \Delta S}{\sqrt{20449 + \Delta S^2}} \quad (a)$$

Пользуясь этим урав-
нением, строим кривую III
фиг. 41.

С помощью этой кри-
вой III и кривой I, кото-
рая была построена нами
раньше (см. пример 16 и

но так как влиянием необорванного провода мы пренебрегаем, то будем иметь:

$$\Delta T_1 = \frac{K'_n n}{K'_m m} S_2 - \frac{\delta'_1}{K'_m m} = \frac{0,00262}{0,00286} \cdot \frac{2}{2} 402,5 - \frac{\delta'_1}{2 \cdot 0,00286}$$

или

$$\Delta T_1 = 368 - 175 \delta'_1;$$

$A_2 B_2$ — для опоры № 2

$$\Delta T_2 = \frac{K'_n n}{K'_m m} (S_2 - S_1) - \frac{\delta'_2}{K'_m m} = \frac{0,00262 \cdot 2}{0,00286 \cdot 2} (495 - 402,5) - \frac{\delta'_2}{2 \cdot 0,00286},$$

$$\Delta T_2 = 84,5 - 175 \delta'_2;$$

$A_3 B_3$ — для опоры № 3

$$\Delta T_3 = \frac{K'_n n}{K'_m m} (S_3 - S_2) - \frac{\delta'_3}{K'_m m} = 0,915 (542,5 - 495) - 175 \delta'_3 = 43,5 - 175 \delta'_3;$$

$A_4 B_4$ — для опоры № 4

$$\Delta T_4 = \frac{K'_n n}{K'_m m} (S_4 - S_3) - \frac{\delta'_4}{K'_m m} = 0,915 (560 - 542,5) - 175 \delta'_4 = 16 - 175 \delta'_4.$$

Все эти четыре прямые представляют зависимость прогиба опоры в точках закрепления тросов от разности натяжений по ним.

Находим затем уравнение кривой зависимости изменения пролета от величины натяжения по тросу при сброшенном гололеде (уравнение кривой I фиг. 42).

Натяжение по тросу после сбрасывания гололеда определится из уравнения (50):

$$\sigma_1 - \frac{l^2 \gamma_6^2}{24 \beta \sigma_1^2} = \sigma_{max} - \frac{l^2 \gamma_7^2}{24 \beta \sigma_{max}^2}.$$

Подставляя в это уравнение $\sigma_{max} = 20 \text{ kg/mm}^2$, $\gamma_6 = 0,00904 \text{ kg/mm}^2 \cdot \text{m}$ и $\gamma_7 = 0,0244 \text{ kg/mm}^2 \cdot \text{m}$ (вычисления удельных нагрузок здесь не даны) получим:

$$\sigma_1 - \frac{175^2 \cdot 0,00904^2}{24 \cdot 0,525 \cdot 10^{-4} \sigma_1^2} = 20 - \frac{175^2 \cdot 0,0244^2}{24 \cdot 0,525 \cdot 20^2 \cdot 10^{-4}}$$

или

$$\sigma_1 - \frac{1980}{\sigma_1^2} = -16,1;$$

откуда

$$\sigma_1 = 8,9 \text{ kg/mm}^2.$$

Стрела провеса при этом будет равна

$$f = \frac{l^2 \gamma_6}{8 \sigma_1} = \frac{175^2 \cdot 0,00904}{8 \cdot 8,9} = 3,88 \text{ m},$$

а длина троса в пролете определится

$$L_0 = l + \frac{8}{3} \frac{f^2}{l} = 175 + \frac{8}{3} \frac{3,88^2}{175} = 175,228 \text{ m}.$$

Подставляя найденную величину L_0 в уравнение (105), получим:

$$\frac{l^3 \gamma_0^2}{24 \sigma^2} - L_0 \beta \sigma = L_0 (1 - \beta \delta_0) - l;$$

$$\frac{l^3 \cdot 0,00904^2}{24 \sigma^2} - 175,228 \cdot 0,525 \cdot 10^{-4} \sigma = 175,228 (1 - 0,525 \cdot 10^{-4} \cdot 8,9) - l$$

или

$$34 \cdot 10^{-7} \frac{l^3}{\sigma^2} - 0,0092 \sigma =$$

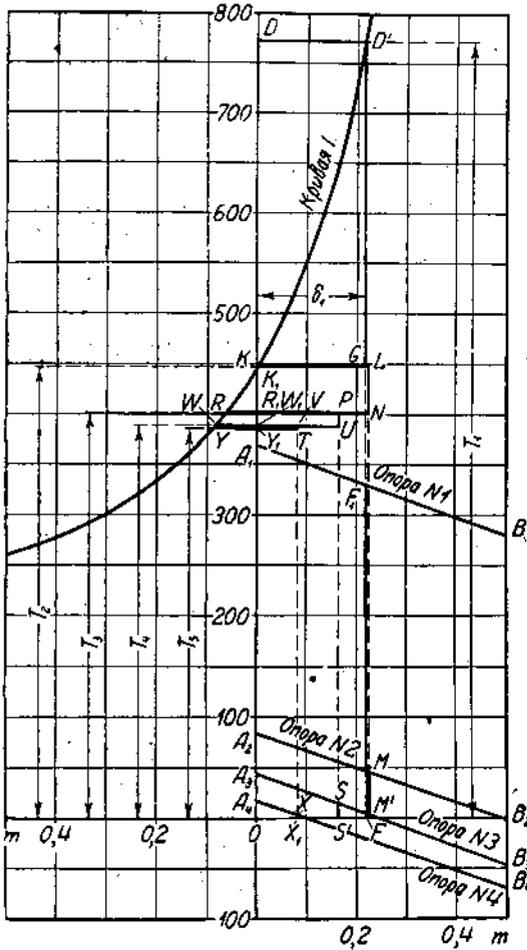
$$= 175,146 - l.$$

Задаваясь различными значениями величины l , находим соответствующие им значения напряжения в тросе и величину натяжения по всему тросу $T = q_T \sigma$ и строим кривую I фиг. 42.

Имея все эти кривые, способом, совершенно тождественным с описанным в § 3 настоящей главы, находим распределение натяжений по тросам. Графическое решение этой задачи представлено на фиг. 42, где все обозначения вполне совпадают с приведенными в тексте § 3.

Результаты подсчетов приведены в таблице XXXII под № 1.

2-й расчет проводов. Пользуясь уравнениями (130) и (132) и зная, что коэффициент $K_m = K'_m$, найдем прогибы опор в точках закрепления гирлянд:



Фиг. 42.

для опоры № 1

$$\delta'_{N_1} = K_m \cdot n_1 \cdot S_2 - K_m m (T_1 - T_2) =$$

$$= 0,0024 \cdot 2 \cdot 402,5 - 0,00262 \cdot 2 (772,5 - 447,5) = 0,23 \text{ м},$$

для опоры № 2

$$\delta'_{N_2} = K_m \cdot n_1 (S_3 - S_2) - K_m m (T_2 - T_3) =$$

$$= 0,0024 \cdot 2 (495 - 402,5) - 0,00262 \cdot 2 (447,5 - 403) = 0,202 \text{ м},$$

для опоры № 3

$$\delta'_{N_3} = K_m \cdot n_1 (S_4 - S_3) - K_m m (T_3 - T_4) =$$

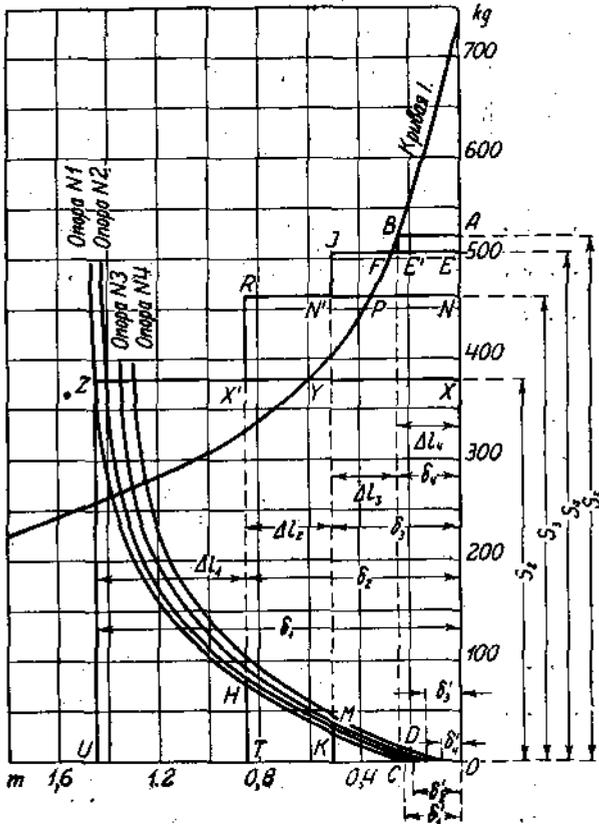
$$= 0,0024 \cdot 2 (542,5 - 495) - 0,00262 \cdot 2 (403 - 387,5) = 0,1465 \text{ м}.$$

и для опоры № 4:

$$\delta_{N_4}' = K_n n_1 (S_n - S_4) - K_m m (T_4 - T_n) =$$

$$= 0,0024 \cdot 2 (560 - 542,5) - 0,00262 \cdot 2 (387,5 - 387) = 0,084 \text{ м.}$$

Сдвигая кривую III [построенную по уравнению (а), стр. 128] соответственно на величину δ_1 , δ_2 , δ_3 и δ_4 , получим искомые кривые зависимости отклонения точек подвеса от разности натяжений по проводам для опоры №№ 1, 2, 3 и 4 (фиг. 43). Нанося на тот же чертеж кривую I,



Фиг. 43.

построенную по данным табл. XIV, находим распределение натяжений по проводам в различных пролетах. Графическое решение задачи дано на фиг. 43, где

сокращение про- лета	отклонение точек подвеса	разность натяже- ний по проводам
$\Delta l_5 = AB$	$\delta_4 = AB$	$\Delta S_4 = CD = BE'$
$\Delta l_4 = EF = E'J$	$\delta_3 = EJ = NN'$	$\Delta S_3 = MK = JN'$
$\Delta l_3 = NP = N'R$	$\delta_2 = XX' = NR$	$\Delta S_2 = HT = RX'$
$\Delta l_2 = XY = X'Z$	$\delta_1 = XZ$	$\Delta S_1 = ZU$

Результаты подсчетов приведены в табл. XXXI под № 2.

Дальнейшие вычисления. После второго расчета проводов необходимо произвести на основании полученных данных новый — второй расчет троссов, затем новый расчет проводов и т. д.

В целях сокращения объема книги ни вычисления, ни графические построения по этим расчетам здесь не приводятся, а в табл. XXXI и XXXII под соответствующими номерами приведены конечные результаты этих подсчетов.

ТАБЛИЦА XXXI.

Провода.

№		Натяжения по проводам (кг)					Отклонения точек подвеса (м)			
		S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	δ_1	δ_2	δ_3	δ_4
1	1-й расчет	—	402,5	495	542,5	560	1,22	0,7	0,41	0,19
2	2-й расчет	—	380	462,5	506	522,5	1,45	0,85	0,51	0,24
3	3-й расчет	—	385	468	509	525	1,40	0,83	0,50	0,24

ТАБЛИЦА XXXII.

Троссы.

№		Натяжения по троссам (кг)					Отклонения точек укрепления троссов (м)			
		T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	δ_1	δ_2	δ_3	δ_4
1	1-й расчет	777,5	447,5	403	387,5	387	0,22	0,225	0,165	0,085
2	2-й расчет	746	437,5	400	390	387	0,213	0,21	0,155	0,075

Сопоставляя результаты, приведенные в табл. XXXI, с результатами, полученными в примере 16 предыдущей главы, видим, насколько наличие троссов изменяет картину распределения натяжений по проводам в различных пролетах.

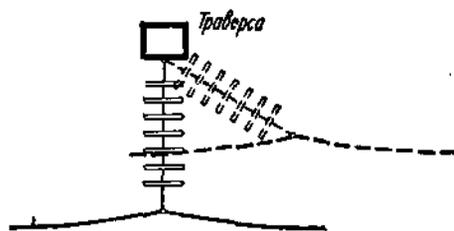
ГЛАВА VI.

Особые случаи работы линий электропередач.

§ 1. Неравномерная нагрузка проводов в пролетах.

Случай неравномерной нагрузки проводов в пролетах практически имеет интерес только для линий передач с подвесными изоляторами (особых конструкций здесь мы пока не касаемся), так как при них изменения натяжения и стрелы провеса провода одного какого-либо пролета

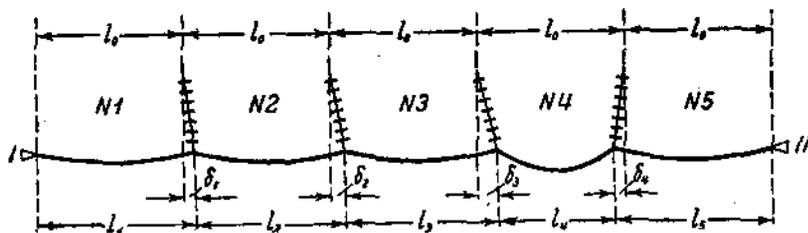
сильно влияют на те же величины других пролетов. Вообще же неравномерная нагрузка пролетов заслуживает особого рассмотрения по следующим соображениям: 1) отклонения гирлянд изоляторов, прилегающих к наиболее нагруженному пролету, могут быть настолько большими, что создадут



Фиг. 44.

опасность приближения провода к траверсе (Фиг. 44) и, как следствие этого, возможность возникновения дуги и 2) неравенство стрел провеса проводов одного пролета может повести к соприкосновению проводов различных фаз, т. е. к короткому замыканию на линии передачи

Возьмем линию передачи с подвесными изоляторами и предполо-



Фиг. 45.

жим, что провода одного пролета, например четвертого (Фиг. 45), работают при удельной нагрузке γ_2 , а остальных — при γ_1 , причем $\gamma_2 > \gamma_1$.

При этом гирлянды изоляторов отклонятся от вертикали и займут положение, указанное на Фиг. 45.

Определение натяжений может быть выполнено двумя, предложенными автором настоящей книги, методами: графо-аналитическим и графическим.

Графо-аналитический метод. Рассмотрим сначала графо-аналитический метод. Строим кривые зависимости натяжения по проводу от длины пролета, пользуясь уравнением:

$$\frac{l^3 \gamma^2}{24 \sigma^3} - L_0 \beta \sigma = L_0 (1 - \beta \sigma_0) - l. \quad (105)$$

Подставляя в это уравнение величину удельной нагрузки $\gamma = \gamma_2$, затем L_0 , соответствующую нагрузке γ_2 , и задаваясь значениями пролета l , меньшими пролета l_0 , строим кривую II (фиг. 46) применительно к наиболее нагруженному пролету.

Аналогично строим кривую I для остальных пролетов, но беря $\gamma = \gamma_1$ и L_0 для этой нагрузки провода и задаваясь значениями l , большими l_0 .

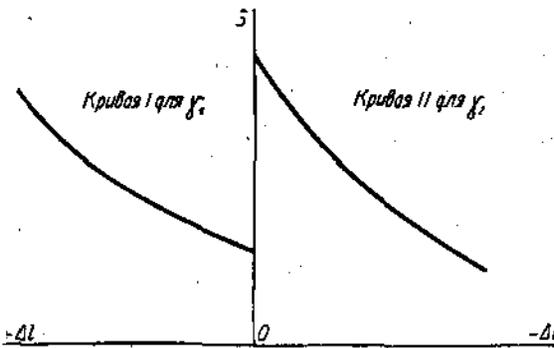
Ранее было выведено следующее условие равновесия гирлянды изоляторов (см. главу IV):

$$\delta = \lambda \frac{S_N - S_{N-1}}{\sqrt{(P + Q_1)^2 + (S_N - S_{N-1})^2}}, \quad (115)$$

дающее выражение для отклонения гирлянды δ в зависимости от разности натяжений проводов в смежных с гирляндой пролетах ($S_N - S_{N-1}$), половины веса гирлянды Q_1 , веса провода с добавочными нагрузками P в пролете и длины гирлянды λ . Решив это уравнение относительно разности натяжений, получим:

$$S_N - S_{N-1} = \frac{\delta (P + Q_1)}{\sqrt{\lambda^2 + \delta^2}}. \quad (142)$$

Выполнив эти предварительные операции, переходим к определению



Фиг. 46.

натяжений и стрел провеса провода, причем влиянием прогиба опор, как величиной незначительной, пренебрегаем.

Задаемся величиной натяжения S_1 по проводу в первом пролете, и по кривой I (фиг. 46) находим соответственное увеличение пролета Δl_1 , причем, согласно фиг. 45, можем написать:

$$\Delta l_1 = \delta_1 = l_1 - l_0,$$

где Δl — изменение длины пролета при изменении натяжения в проводе с S_0 на S_1 , а δ_1 — отклонение гирлянды изоляторов.

Имея S_1 и δ_1 , находим величину натяжения S_2 по проводу во втором пролете, пользуясь уравнением (142) и подставляя в него значения $S_{N-1} = S_1$ и $\delta = \delta_1$, причем под P понимаем вес провода с добавочными нагрузками двух полупролетов в пролетах № 1 и № 2.

Переходя ко второму пролету, будем иметь:

$$\Delta l_2 = l_2 - l_0$$

и

$$\delta_1 + l_2 = l_0 + \delta_2.$$

Соединяя эти два соотношения, получим

$$\delta_2 = (l_2 - l_0) + \delta_1 = \Delta l_2 + \delta_1.$$

Зная величину S_2 , можно по кривой I найти Δl_2 , а следовательно, и величину δ_2 . После этого находим величину S_3 , пользуясь уравнением (142), подставляя в него $S_{N-1} = S_2$, $\delta = \delta_2$ и P , равное весу провода с добавочными нагрузками во втором и третьем полупролетах.

Поступая так же, как описано выше, и беря величины Δl по кривой, соответствующей удельной нагрузке провода данного пролета (например, для четвертого пролета ну жно взять кривую II фиг. 46), найдем натяжения проводов $S_3, S_4, S_5, \dots, S_N$ и отклонение гирлянд изоляторов $\delta_3, \delta_4, \delta_5, \dots, \delta_N$ для всех пролетов.

Критерием правильности выбора натяжения S_1 в первом пролете будет, очевидно, выполнение для анкерной опоры соотношения

$$\delta_N = 0,$$

вытекающего, как и ранее, из условия неподвижности точки закрепления провода на этой опоре.

Если в результате получим, $\delta_N \neq 0$, то необходимо весь расчет проделать снова, задавшись другим значением S_1 , повторяя его до тех пор, пока условие $\delta_N = 0$ не будет соблюдено.

Графический метод. Теперь перейдем к рассмотрению графического метода.

При нем, кроме кривых I и II фиг. 46, строим еще две кривые, дающие зависимость отклонения гирлянды от разности натяжений в смежных с ней пролетах (фиг. 47). Исходными уравнениями для построения этих кривых являются:

$$\delta' = \lambda \frac{S_N - S_{N-1}}{\sqrt{(P + Q_1)^2 + (S_N - S_{N-1})^2}} \quad (\text{кривая III})$$

и

$$\delta'' = \lambda \frac{S_N - S_{N-1}}{\sqrt{(P_1 + Q_1)^2 + (S_N - S_{N-1})^2}} \quad (\text{кривая IV}),$$

где P — вес провода с добавочными нагрузками в двух полупролетах при удельной нагрузке γ_1 и P_1 — вес провода с добавочными нагрузками в полупролете при удельной нагрузке γ_1 плюс то же в полупролете при удельной нагрузке γ_2 .

Продлав указанные построения, переходим к определению натяжений.

Задаемся натяжением S_1 в первом пролете и, отложив его в виде отрезка OA , находим, пользуясь кривой I (фиг. 47), удлинение первого пролета

$$\Delta l_1 = AB.$$

Но из фиг. (45) имеем:

$$\delta_1 = l_0 - l_1 = \Delta l_1;$$

поэтому соответствующий отрезок CD кривой III даст разность натяжений, т. е.

$$S_2 - S_1 = CD.$$

Прибавив CD к отрезку OA , получим натяжение во втором пролете

$$S_2 = OE = OA + DC = OA + AE.$$

Аналогично получаем удлинение второго пролета, которое представится отрезком EF , т. е.

$$\Delta l_2 = EF.$$

На основании

фиг. 45 выражаем отклонение гирлянды на второй опоре

$$\delta_2 = \delta_1 + \Delta l_2,$$

которое и изображаем отрезком EJ , откладывая

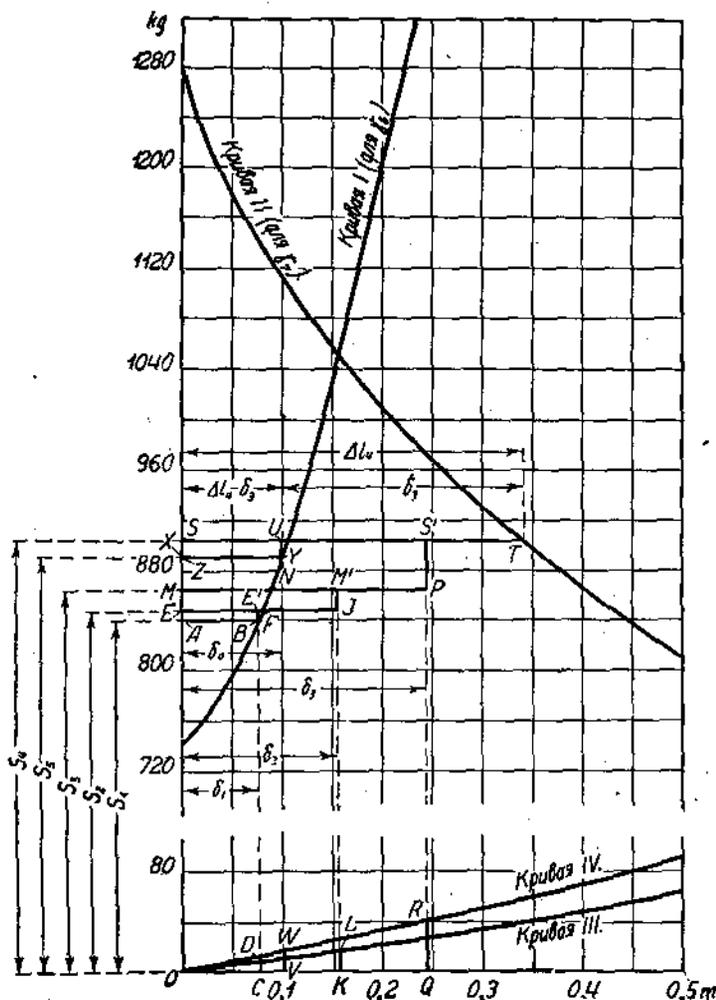
$$\Delta l_1 = FJ = AB.$$

По кривой III находим разность натяжений

$$LK = S_3 - S_2,$$

а затем и натяжение в проводе третьего пролета

$$S_3 = OM = OE + LK = OE + EM.$$



Фиг. 47.

Удлинение третьего пролета будет

$$\Delta l_2 = MN.$$

Отклонение гирлянды на опоре № 3, согласно фиг. 45, равно

$$\delta_2 = \delta_1 + \Delta l_2.$$

и может быть представлено отрезком

$$MP = MN + PN = MN + EJ,$$

по которому находим разность натяжений, действующих на опору № 3, причем здесь пользуемся кривой *IV*, так как следующий пролет имеет нагрузку γ_2 . Таким образом, получаем:

$$S_1 - S_2 = QR$$

и по последнему соотношению находим натяжение

$$S_1 = OS = OM + QR = OM + MS.$$

При определении сокращения четвертого пролета пользуемся кривой *II*, по которой и находим

$$\Delta l_3 = ST.$$

Отклонение гирлянды на четвертой опоре, как это видно из фиг. 45, может быть выражено соотношением

$$\delta_4 = \Delta l_3 - \delta_2$$

и, сообразно с этим, представлено отрезком *SU*,

$$\delta_4 = SU = S'T' = ST - SS',$$

отложив который по оси абсцисс в виде отрезка *OV*, найдем по кривой *IV* разность натяжений в четвертом и пятом пролетах, а именно:

$$S_4 - S_5 = VW.$$

По этому соотношению находим натяжение

$$S_4 = OX = OS - VW = OS - SX$$

и затем по кривой *I* — удлинение пятого пролета

$$\Delta l_5 = XY.$$

Таким образом, величины всех натяжений найдены.

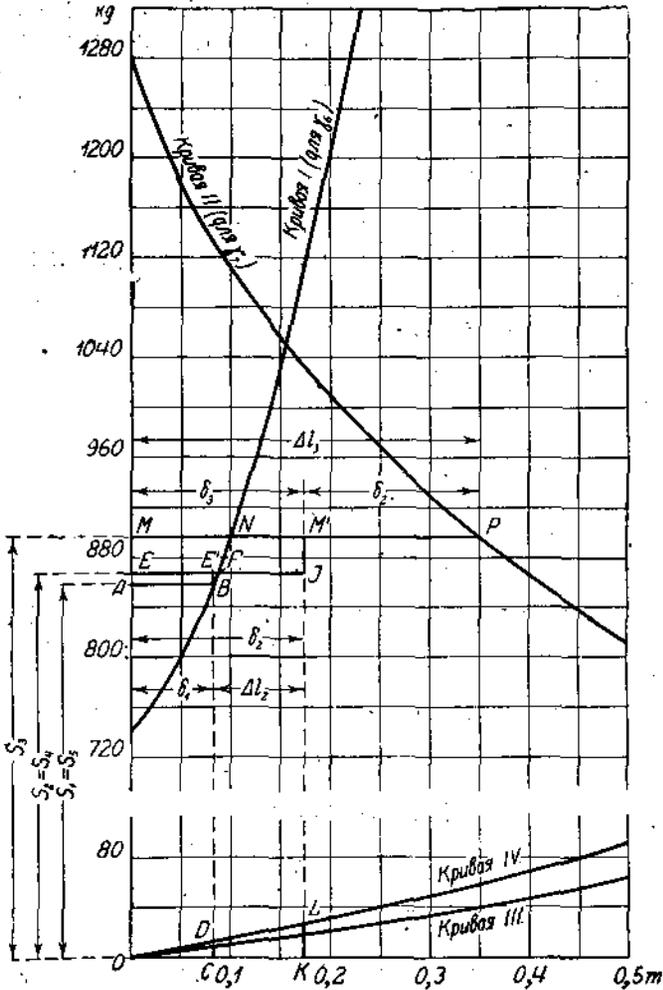
Критерием правильности выбора величины S_1 должно, очевидно, служить выполнение условия $\delta_5 = 0$, приводящее к соотношению $\Delta l_5 = \delta_4$. Поэтому, отложив от точки *Y* отрезок $YZ = SU$, мы должны получить точку *Z* (фиг. 47) на оси ординат. Невыполнение этого условия требует повторения построений при новом значении S_1 .

Определив тем или иным методом действующие по проводам натяжения при неравномерной нагрузке пролетов, а также и отклонения гирлянд изоляторов, нетрудно по последним величинам определить наи-

меньшее расстояние провода от траверсы и найти стрелы провеса проводов, пользуясь основной формулой:

$$f = \frac{\gamma y^2}{8\sigma}$$

Заметим, что неравномерная нагрузка может вызвать наиболее неблагоприятные последствия в смысле получения большой стрелы провеса



Фиг. 48.

в том случае, когда работающим при большей удельной нагрузке γ_2 является только один средний пролет, остальные же все пролеты работают при меньшей нагрузке γ_1 . При подсчетах, относящихся к этому случаю, можно внести значительное упрощение, если число пролетов между анкерными опорами является нечетным (см. фиг. 48). Действительно, в этом случае обе анкерные опоры являются вполне симметричными относительно среднего пролета, а следовательно, картина явления с одной стороны от него будет той же, как и с другой стороны. Поэтому под-

счеты натяжений, начатые с крайнего пролета, достаточно довести только до среднего наиболее нагруженного пролета, т. е. закончить их определением натяжения в этом среднем пролете.

Очевидно, в этом случае критерием правильности выбора натяжения в крайнем пролете будет соблюдение равенства между отклонениями гирлянд, ограничивающих средний пролет.

Пример 22. На линии электропередачи при температуре $t = -5^{\circ}\text{C}$ и ветре со скоростью $v = 20 \text{ m/sec}$ на участке между двумя анкерными опорами был сброшен гололед со всех пролетов провода, кроме пролета № 4, где он полностью удержался. Требуется определить максимальную стрелу провеса при этих условиях. Длина пролета $l = 175 \text{ m}$. Толщина слоя гололеда $b = 10 \text{ mm}$. Анкерные опоры расположены через каждые пять пролетов. Длина гирлянды $\lambda = 1,3 \text{ m}$. Провода медные с сечением $q = 70 \text{ mm}^2$.

Кривая *I*, дающая зависимость натяжения по проводам при сброшенном гололеде от величины удлинения пролета (фиг. 47 и 48), построена по данным табл. XXVI примера 20. По уравнению (а) примера 20 на тех же чертежах построена и кривая *III* (принимается во внимание только отклонение гирлянды).

Уравнение кривой *II*, дающей зависимость натяжения по проводам при гололеде от сокращения пролета, может быть найдено с помощью следующих вычислений.

Стрела провеса при $t = -5^{\circ}\text{C}$, ветре и гололеде будет равна

$$f = \frac{l^2 \gamma_1}{8 \sigma_{\max}} = \frac{175 \cdot 0,0204}{8 \cdot 18} = 4,34 \text{ m},$$

а длина провода в пролете определится:

$$L = l + \frac{8}{3} \frac{f^2}{l} = 175 + \frac{8 \cdot 4,34^2}{3 \cdot 175} = 175,29 \text{ m}.$$

Подставляя эти цифровые значения в уравнение (105), получим:

$$\begin{aligned} \frac{l^3 \gamma_1^2}{24 \sigma^2} - L_0 \beta \sigma &= L_0 (1 - \beta \sigma_0) - l, \\ \frac{l^3 \cdot 0,0204^2}{24 \sigma^2} - 175,29 \cdot 0,77 \cdot 10^{-4} \cdot \sigma &= \\ = 175,29 (1 - 0,77 \cdot 10^{-4} \cdot 18) - l, \\ 1735 \cdot 10^{-8} \frac{l^3}{\sigma^2} - 0,0135 \sigma &= 175,04 - l. \end{aligned}$$

Пользуясь этим уравнением, вычисляем координаты отдельных точек кривой *II* и наносим на ее фиг. 47 и 48.

Уравнение кривой *IV* найдется, если в формуле (115)

$$\delta = \frac{\lambda \Delta S}{\sqrt{(P_1 + Q_1)^2 + \Delta S^2}}$$

подставить:

$$P_1 = \frac{l}{2} \gamma_7 + \frac{l}{2} \gamma_6 = \frac{175}{2} \cdot 70 (0,0204 + 0,00966) = 184,5 \text{ kg}$$

и

$$Q_1 = Q : 2 = 50 : 2 = 25 \text{ kg}.$$

Тогда получим:

$$\delta = \frac{1,3 \Delta S}{\sqrt{(184,5 + 25)^2 + \Delta S^2}} = \frac{1,3 \Delta S}{\sqrt{44000 + \Delta S^2}}.$$

Пользуясь этим уравнением построена кривая IV фиг. 47 и 48.

Находим теперь натяжения в пролетах и отклонения точки подвеса. Все обозначения фиг. 47 вполне тождественны с приведенными в теории, и потому объяснение построения здесь не повторяется.

Результаты подсчетов приведены в табл. XXXIII под № 1.

Т А Б Л И Ц А XXXIII.

№		Натяжения по проводам (kg)					Отклонение точек подвеса (m)			
		S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	δ_1	δ_2	δ_3	δ_4
1	Гололед удержался в пролете № 4.	840	848	864	904	897	0,076	0,055	0,246	0,1
2	Гололед удержался в пролете № 3.	860	868	896	868	860	0,085	0,175	0,175	0,085

Зная натяжение по проводу в пролете № 4 и отклонения точек подвеса у опоры № 3 и № 4, легко найти стрелу провеса:

$$f = \frac{(l - \delta_3 - \delta_4)^2 \gamma_7}{8\sigma} = \frac{(175 - 0,246 - 0,1)^2 0,0204}{8 \cdot \frac{904}{70}} = 6,03 \text{ m.}$$

Наибольшая, возможная при этих условиях, стрела провеса будет, если гололед останется в среднем пролете (№ 3). Решение задачи для этого случая с помощью тех же кривых представлено на фиг. 48, а результаты приведены в табл. XXXIII под № 2. На фиг. 48 обозначены:

натяжения по проводам

$$S_1 = S_5 = OA, \quad S_2 = S_4 = OE \quad \text{и} \quad S_3 = OM;$$

удлинения пролетов

$$\Delta l_1 = \Delta l_5 = AB, \quad \Delta l_2 = \Delta l_4 = EF;$$

сокращение пролета № 3

$$\Delta l_3 = MP;$$

отклонение точек подвеса

$$\delta_1 = \delta_5 = AB, \quad \delta_2 = \delta_4 = MM' = M'P.$$

Стрела провеса, подсчитанная для этого случая, равна:

$$\frac{(l - 2\delta_2)^2 0,0204}{8\sigma_3} = \frac{(175 - 0,175 \cdot 2)^2 0,0204}{8 \cdot \frac{896}{70}} = 6,09 \text{ m.}$$

§ 2. Скользящие клеммы.

До сих пор рассматривались только случаи, когда провод в точках подвеса его закрепляется наглухо. Это глухое закрепление осуществляется на штыревых изоляторах вязкой провода, а на подвесных изоляторах особыми клеммами. При такой конструкции линии передачи опоры ее должны быть рассчитаны: 1) на нагрузку от ветра, направленного перпендикулярно к линии, при необорванных проводах и 2) на нагрузку от ветра и усилий, действующих по уделевшим проводам, при обрыве части их. Необходимо заметить, что вес опор обычно определяется вторым расчетом (при обрыве проводов), так как в этом случае усилия, действующие на опору, значительно превосходят усилия на нее при необорванных проводах. Последнее положение подтверждается еще и теми соображениями, что благодаря несимметричному расположению усилий на опоре при обрыве проводов она испытывает не только изгиб, но еще и кручение, а кронштейны — добавочный изгиб.

Правда, применение подвесных изоляторов делает менее тяжелыми условия работы опор и кронштейнов при обрыве, но все же продольные усилия в этом случае значительно превосходят поперечные.

Все сказанное чрезвычайно утяжеляет опоры и повышает стоимость линии электропередачи.

Поэтому вполне понятно стремление изыскать способы разгрузки линии передачи от получающихся при обрыве продольных усилий и тем самым создать возможность применения более легких и дешевых промежуточных опор.

Одним из таких способов, наиболее простым по осуществлению и надежным по действию, является применение так называемых скользящих клемм, идея которых принадлежит проф. Н. И. Сушкевичу.

Сущность этого способа заключается в следующем.

Провод закрепляется наглухо только на анкерных опорах, на опорах же промежуточных он кладется в специально устроенные клеммы, позволяющие ему свободно (теоретически — без трения) перемещаться вдоль своей оси. При таком устройстве всякое получившееся неравенство натяжений по проводу в смежных пролетах будет уничтожено перемещением провода в клемме в сторону большего натяжения и, следовательно, на опору никакого действия не окажет.

Применение скользящих клемм вызывает в расчете линий передач некоторые изменения, рассмотрением которых и займемся.

Очевидно, случай нормальной работы линии передачи при наличии на ней скользящих клемм ничем не отличается от такового же при обыкновенных клеммах. Случай одностороннего обрыва проводов при скользящих клеммах теряет всякий интерес, так как при этом оборвавшийся в каком-либо пролете провод выскользнет из клемм и упадет на землю, не давая никакого добавочного усилия на опору.

Неравномерная нагрузка пролетов. Поэтому рассмотрим здесь только случай неравномерной нагрузки пролетов, так как при нем свободное перемещение провода в клеммах может привести к весьма значительному провисанию провода в наиболее нагруженных пролетах, что должно (как это кажется на первый взгляд) отразиться на выборе высоты опор. Определение стрел провеса провода может быть произведено следующим методом, предложенным автором настоящей книги.

Предположим, что линия передачи имеет между анкерными опорами N равных пролетов, каждый длиной l . Предположим далее, что провод на промежуточных опорах не закреплен, а только подвешен в скользящих клеммах, причем перемещение его происходит без трения. Тогда при равномерной нагрузке γ_0 в пролетах натяжения и стрелы провеса провода будут одинаковы для всех пролетов, и, следовательно, для каждого из них основные уравнения

$$f_0 = \frac{l^2 \gamma_0}{8\sigma_0}$$

и

$$L_0 = l + \frac{8}{3} \frac{f_0^2}{l}$$

будут иметь одни и те же значения входящих в них величин.

Полная длина провода L'_0 между анкерными опорами найдется из соотношения:

$$L'_0 = NL_0 = N \left(l + \frac{8}{3} \frac{f_0^2}{l} \right).$$

Рассмотрим теперь, какие будут натяжения и стрелы провеса провода при неравномерных нагрузках отдельных пролетов, для чего предположим, что на n пролетах удельная нагрузка изменилась с γ_0 на γ_1 , а на $N - n$ пролетах — с γ_0 на γ_2 .

Так как провод подвешен на клеммах, не имеющих трения, то при разных нагрузках пролетов горизонтальное натяжение провода должно быть одно и то же для всех пролетов. Обозначив это натяжение через S_1 , будем иметь изменение натяжения на величину $S_1 - S_0$, где S_0 — натяжение по проводу при исходных условиях.

В соответствии с этим, длина провода между анкерными опорами изменится и станет равной

$$L'_1 = L'_0 [1 + \beta(\sigma_1 - \sigma_0)] = N \left(l + \frac{8}{3} \frac{f_0^2}{l} \right) [1 + \beta(\sigma_1 - \sigma_0)], \quad (143)$$

где: β — коэффициент растяжения, σ_1 — напряжение провода в нижней точке его при разных удельных нагрузках γ_1 и γ_2 в пролетах.

При вновь установившемся равновесии провода стрела провеса его в пролетах с удельной нагрузкой γ_1 будет равна

$$f_1 = \frac{l^2 \gamma_1}{8\sigma_1}, \quad (25')$$

а в пролетах с удельной нагрузкой γ_2 будет

$$f_2 = \frac{l^2 \gamma_2}{8\sigma_1}. \quad (25'')$$

Длина провода в соответствующих пролетах определится: для пролета с удельной нагрузкой γ_1 :

$$L_1 = l + \frac{8f_1^2}{3l};$$

для пролета с удельной нагрузкой γ_2 :

$$L_2 = l + \frac{8f_2^2}{3l}.$$

Длина всего провода между анкерными опорами может быть выражена следующим образом:

$$L' = nL_1 + (N-n)L_2 = n\left(l + \frac{8f_1^2}{3l}\right) + (N-n)\left(l + \frac{8f_2^2}{3l}\right). \quad (144)$$

Приравнявая правые части уравнений (143) и (144), как выражающие одну и ту же величину, друг другу, получим:

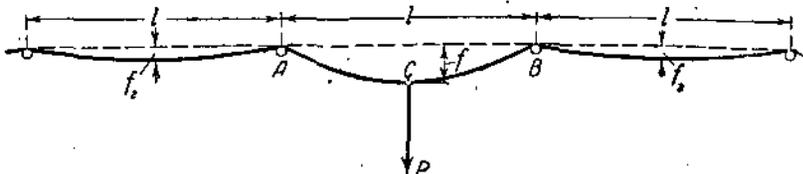
$$N\left(l + \frac{8f_0^2}{3l}\right)[1 + \beta(\sigma_1 - \sigma_0)] = n\left(l + \frac{8f_1^2}{3l}\right) + (N-n)\left(l + \frac{8f_2^2}{3l}\right). \quad (145)$$

Вставляя в уравнение (145) значения f_1 и f_2 из уравнений (25') и (25''), будем иметь следующее выражение:

$$N\left(l + \frac{8f_0^2}{3l}\right)[1 + \beta(\sigma_1 - \sigma_0)] = n\left(l + \frac{l^3 \gamma_1^2}{24\sigma_1^2}\right) + (N-n)\left(l + \frac{l^3 \gamma_2^2}{24\sigma_1^2}\right). \quad (146)$$

В уравнении (146) все величины, кроме σ_1 , являются известными (σ_0 и f_0 вычисляются для каких-либо исходных условий); следовательно, решая это уравнение, можно найти σ_1 , а по нему, пользуясь формулами (25') и (25''), определить и стрелы провеса.

Сосредоточенная нагрузка в одном из пролетов. При наличии скользящих клемм, представляет некоторый интерес сосредоточенная нагрузка (например, птицами) провода одного какого-либо пролета, при которой возможна значительная перетяжка и, следовательно, большой провес провода в этом пролете.



Фиг. 49.

Определение провисания провода при сосредоточенной нагрузке производится так.

Пусть какой-либо пролет нагружен сосредоточенной силой P (Фиг. 49), приложенной к проводу в середине его. Очевидно, в этом месте провод

получит излом и отрезки его AC и CB должны быть рассматриваемы как две отдельные параболы. Разрежем провод в точке C и раздвинем



Фиг. 50.

обе половины его так, чтобы они являлись отрезками одной параболы ACC_1B (фиг. 50), причем силу P будем полагать уже отсутствующей. Последнее возможно сделать при усло-

вии, что вес провода на участке CC_1 равен вертикальной силе P , т. е.

$$\gamma_0 q \cdot 2x = P, \quad (147)$$

откуда находим величину $2x$, а следовательно, и условную величину нового пролета $l+2x$.

Из фиг. 50 нетрудно видеть, что интересующая нас стрела провеса f может быть выражена следующим образом:

$$f = f_1 - f_2. \quad (148)$$

Для определения этих стрел провеса нужно сначала найти новое напряжение σ_1 , которое будет одинаково для всех пролетов. Обозначая опять число всех пролетов через N , длину провода между анкерами при начальных условиях (до приложения силы P) — через L_0 , удельную нагрузку — через γ_0 и начальное напряжение материала провода — через σ_0 , можно написать следующее соотношение:

$$L_0 [1 + \beta(\sigma_1 - \sigma_0)] = (N-1) \left(l + \frac{l^2 \gamma_0^2}{24\sigma_1^2} \right) + l + 2x + \frac{(l+2x)^2 \gamma_0^2}{24\sigma_1^2} - 2x - \frac{(2x)^2 \gamma_0^2}{24\sigma_1^2}. \quad (149)$$

Из этого соотношения найдем новое напряжение материала проводов σ_1 , так как все остальные величины известны.

Зная же σ_1 можно определять и стрелы провеса:

$$f_1 = \frac{(l+2x)^2 \gamma_0^2}{8\sigma_1}, \quad (150)$$

$$f_2 = \frac{(2x)^2 \gamma_0^2}{8\sigma_1}. \quad (151)$$

Подставляя полученные величины f_1 и f_2 в уравнение (148), определим интересующую нас величину провеса f в пролете, нагруженном сосредоточенной силой P .

Пример 23. На трехфазной линии электропередачи, приведенной в примере 22, с медными проводами сечением $q = 70 \text{ mm}^2$, подвешенными на скользящих клеммах, гололед между анкерными опорами оказался сброшенным со всех пролетов кроме одного, где он полностью

удержался. Требуется определить при $t = -5^{\circ}\text{C}$ и ветре, скорость которого $v = 20$ m/sec, стрелу провеса провода во всех пролетах. Пролет линии $l = 175$ м. Анкерные опоры расположены через каждые 5 пролетов. Толщина стенки льда $b = 10$ мм.

В примере 16 (стр. 84), при сброшенном гололеде, $t = -5^{\circ}\text{C}$ и ветре:

$$\begin{aligned} f &= 3,50 \text{ м,} \\ L_0 &= 175,186 \text{ м,} \\ \sigma_0 &= 10,5 \text{ kg/mm}^2. \end{aligned}$$

Полная длина провода на участке между двумя анкерными опорами (считая гололед сброшенным со всех пяти пролетов) будет равна

$$L'_0 = NL_0 = 5 \cdot 175,186 = 875,930 \text{ м.}$$

В случае, когда один пролет нагружен гололедом, натяжение найдется с помощью уравнения (146):

$$L'_0 [1 + \beta(\sigma_1 - \sigma_0)] = n \left(l + \frac{l^3 \gamma_6^2}{24 \sigma_1^2} \right) + (N - n) \left(l + \frac{l^3 \gamma_7^2}{24 \sigma_1^2} \right);$$

подставляя в это уравнение $n = 4$, $N - n = 5 - 4 = 1$, $L'_0 = 875,930$ м и $\sigma_0 = 10,5$ kg/mm², получим:

$$\begin{aligned} 875,930 [1 + 0,77 \cdot 10^{-4} (\sigma_1 - 10,55)] &= 4 \left[175 + \frac{175^3 \cdot 0,00966^2}{24 \sigma_1^2} \right] + \\ &+ 175 + \frac{175^3 \cdot 0,0204^2}{24 \sigma_1^2} \end{aligned}$$

или, после преобразования,

$$\frac{176}{\sigma_1^2} - 0,0675 \sigma_1 = 0,221;$$

откуда имеем:

$$\sigma_1 = 12,73 \text{ kg/mm}^2.$$

Стрела провеса в пролете, нагруженном гололедом, будет равна

$$f_1 = \frac{l^3 \gamma_7}{8 \sigma_1} = \frac{175^3 \cdot 0,0204}{8 \cdot 12,73} = 6,1 \text{ м}^1),$$

а в остальных пролетах

$$f_2 = \frac{l^3 \gamma_7}{8 \sigma_1} = \frac{175^3 \cdot 0,00966}{8 \cdot 12,73} = 2,9 \text{ м.}$$

Пример 24. На трехфазной линии электропередачи, приведенной в примере 16 или 22, с медными проводами сечением $q = 70$ мм², подвешенными на скользящих клеммах, при температуре $t = +40^{\circ}\text{C}$ на середине одного из пролетов приложена сосредоточенная нагрузка $P = 20$ кг. Требуется определить стрелу провеса во всех пролетах.

¹⁾ Результат этого примера ср. с результатом примера 22 (стр. 139).

В примере 5 при температуре $t = +40^{\circ}\text{C}$ имели:

$$f = 4,3 \text{ м и } \sigma = 7,9 \text{ кг/мм}^2.$$

Длина провода в пролете при этих условиях будет:

$$L_0 = l + \frac{8f^2}{3l} = 175 + \frac{8 \cdot 4,3^2}{3 \cdot 175} = 175,280 \text{ м,}$$

а длина провода на участке между двумя анкерными мачтами

$$L'_0 = NL_0 = 5 \cdot 175,280 = 876,400 \text{ м.}$$

По уравнению (147) эквивалентная длина провода, заменяющая силу P , будет равна

$$2x = \frac{P}{\gamma_0 g} = \frac{20}{70 \cdot 0,0089} = 32,2 \text{ м.}$$

Новое натяжение по проводу после приложения груза P найдется из уравнения (149):

$$\begin{aligned} L'_0 [1 + \beta(\sigma - \sigma_0)] &= (N-1) \left(l + \frac{l^3 \gamma_1^2}{24 \sigma_1^2} \right) + l + 2x + \\ &+ \frac{(l+2x)^2 \gamma_1^2}{24 \sigma_1^2} - 2x - \frac{(2x)^2 \gamma_1^2}{24 \sigma_1^2}; \\ 876,4 [1 + 0,77 \cdot 10^{-4} (\sigma_1 - 7,9)] &= 4 \left(175 + \frac{175^3 \cdot 0,0089^2}{24 \sigma_1^2} \right) + \\ &+ 175 + \frac{(175 + 32,2)^2 \cdot 0,0089^2}{24 \sigma_1^2} - \frac{32,2^2 \cdot 0,0089^2}{24 \sigma_1^2} \end{aligned}$$

или, после преобразований,

$$\frac{100}{\sigma_1^2} - 0,0675 \sigma_1 = 0,866;$$

откуда имеем:

$$\sigma_1 = 8,36 \text{ кг/мм}^2.$$

Стрела провеса в пролете, нагруженном силою P , определится

$$\begin{aligned} f_1 &= \frac{(l+2x)^2 \gamma_1}{8 \sigma_1} - \frac{(2x)^2 \gamma_1}{8 \sigma_1} = \frac{(175 + 32,2)^2 \cdot 0,0089}{8 \cdot 8,36} - \\ &- \frac{32,2^2 \cdot 0,0089}{8 \cdot 8,36} = 5,562 \text{ м.} \end{aligned}$$

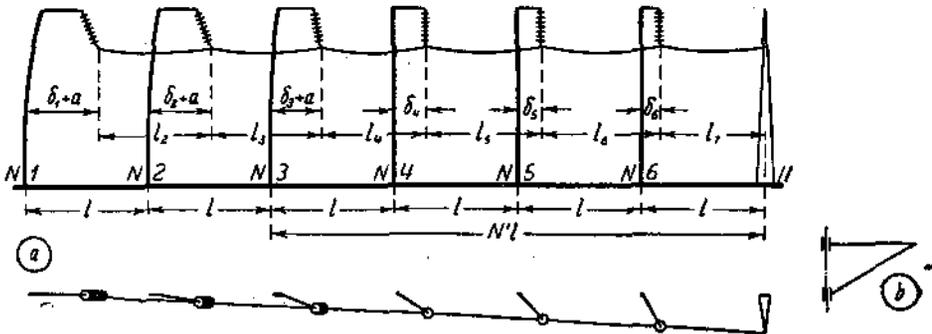
Стрела провеса в остальных пролетах будет равна

$$f_2 = \frac{l^2 \gamma_1}{8 \sigma_1} = \frac{175^2 \cdot 0,0089}{8 \cdot 8,36} = 4,08 \text{ м.}$$

§ 3. Поворотные кронштейны.

Применение поворотных кронштейнов преследует, примерно, ту же цель, что и применение скользящих клемм, а именно: поворотные кронштейны способствуют разгрузке линии передачи от продольных усилий при одностороннем обрыве проводов. Эта разгрузка происходит следующим образом: при неравенстве натяжений по проводам в смежных с какой-либо опорой пролетах к поворотному кронштейну этой опоры будет приложено усилие, равное разности этих натяжений и действующее в горизонтальной плоскости, в которой кронштейн, имеющий вертикальную ось вращения, может вращаться совершенно свободно, так как трение в подшипниках его можно практически считать отсутствующим. Очевидно, кронштейн повернется до тех пор, пока натяжения не выравняются. Последнее не всегда может иметь место и вполне возможны такие случаи, когда натяжения не будут выравнены и после максимального (90°) поворота кронштейна, а следовательно, разность их (правда, меньшая имевшей место до поворота) будет восприниматься опорой. Это обстоятельство, составляя основное отличие работы поворотных кронштейнов от работы скользящих клемм (при которых выравнивание натяжений всегда происходит до конца), вызывает необходимость для линии передачи с поворотными кронштейнами вводить в рассмотрение случай одностороннего обрыва проводов и по нему рассчитывать промежуточную опору. Случай же неравномерной нагрузки пролетов, при котором получающееся неравенство натяжений незначительно и целиком может быть уничтожено поворотом кронштейнов, мы рассматривать не будем, так как при нем роль поворотных кронштейнов ничем не отличается от роли скользящих клемм, а следовательно, все сказанное в предыдущем параграфе применимо и здесь.

Поворотные кронштейны с вертикальной осью вращения. Рассмотрим линию передачи, имеющую поворотные кронштейны с верти-



Фиг. 51.

кальной осью (фиг. 51b) и монтированную на подвесных изоляторах (фиг. 51a).

Разберем случай обрыва всех n проводов в первом пролете

Отклонение точки подвеса на опоре № 5 определится так:

$$\delta_5 = \Delta l_6 + \Delta l_7 = 2\Delta l_7,$$

и при выполнении условия

$$\delta_5 \leq a$$

будет опять-таки достигнуто только поворотом кронштейна, а следовательно, натяжение S_5 не будет отличаться от найденных выше натяжений S_6 и S_7 .

Повторяя эти рассуждения применительно и к другим пролетам, увидим, что прогиб и отклонение гирлянды первой испытает та опора, N -я с конца (на чертеже взята опора № 3 — четвертая с конца), для которой отклонение точки подвеса провода, равное сумме сокращений длин предшествующих пролетов, будет больше длины кронштейна a . Очевидно, номер N этой опоры найдется из неравенства:

$$N\Delta l_7 \geq a > (N-1)\Delta l_7,$$

причем предшествующие ей с конца N пролетов будут иметь одинаковые натяжения.

Обозначив прогиб этой опоры и отклонение гирлянды в сумме через δ_3 , получим отклонение точки подвеса провода в виде выражения $\delta_3 + a$, равного сумме сокращений длин предшествующих пролетов, т. е.

$$\delta_3 + a = N\Delta l_7$$

или

$$\delta_3 = N\Delta l_7 - a.$$

Определив по этому выражению величину δ_3 , откладываем ее в виде горизонтального отрезка AB ($S_4 = S_7$) и по кривой II находим отрезок CD , который, очевидно, даст разность натяжений, действующую на опору № 3, т. е.

$$CD = S_4 - S_3.$$

Отложив от точки B вниз отрезок BE , равный CD , получим величину натяжения в третьем пролете, т. е.

$$DE = S_3$$

и, следовательно, отрезок FK даст сокращение длины этого пролета, т. е.

$$FK = \Delta l_3.$$

Из фиг. 51 имеем:

$$\delta_2 + a + l_3 = l + \delta_3 + a$$

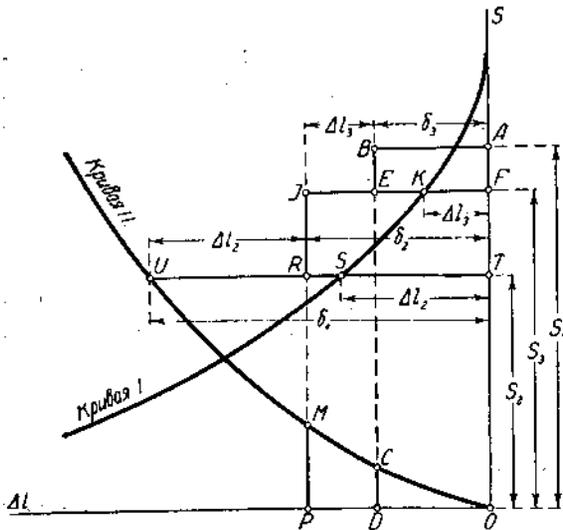
или

$$\delta_2 = \delta_3 + \Delta l_3.$$

Поэтому, отложив от точки E по горизонтали отрезок EJ , равный FK , найдем отрезок FJ , который и даст отклонение δ_2 , т. е.

$$FJ = \delta_2.$$

(фиг. 51). Очевидно, при этом кронштейны на ближайших к месту обрыва опорах повернутся до направления, совпадающего с направлением



Фиг. 52.

провода (практически угол поворота их можно считать равным 90°), но все же не смогут своим поворотом уничтожить разности натяжений в смежных пролетах, которая и вызовет изгиб опор и отклонение гирлянд. Эта разность, по мере удаления от места обрыва, будет уменьшаться и, наконец, для какой-либо опоры (на чертеже взята опора № 4) сойдет на нет и, следовательно, натяжения по проводам во всех последующих пролетах будут

одинаковы и равны натяжению в пролете, находящемся перед этой опорой.

Определение натяжений производим графическим методом, предложенным автором настоящей книги, для чего строим две кривые.

Кривую I (фиг. 52), дающую зависимость натяжения по проводу от изменения длины пролета, для которой исходным уравнением является

$$\frac{l_1^2 \gamma_0^2}{24\sigma_1^2} - L_0 \beta \sigma_1 = L_0 (1 - \beta \sigma_0) - l_1,$$

и кривую II, дающую суммарное отклонение опоры и гирлянды в зависимости от соответствующей для данной опоры разности натяжений по проводам и определяемую уравнением

$$\delta = K_N (S_N - S_{N-1}) + \lambda \frac{S_N - S_{N-1}}{\sqrt{(P + Q_1)^2 + (S_N - S_{N-1})^2}}.$$

В обоих этих уравнениях все обозначения сохранены совершенно теми же, что и раньше (см. главу IV, § 5).

После этого задаемся натяжением в последнем пролете, т. е. для случая, изображенного на фиг. 51, задаемся S_7 и по кривой I фиг. 52 находим сокращение этого пролета Δl_7 . Очевидно, если это сокращение меньше длины кронштейна a , то оно будет достигнуто только поворотом кронштейна и поэтому опора никакого усилия испытывать не будет. Отсюда вытекает, что натяжение по проводу S_6 в соседнем пролете будет то же самое, а следовательно, и сокращение длины следующего пролета отличаться от Δl_7 не будет, т. е.

$$\Delta l_6 = \Delta l_7.$$

Отклонение точки подвеса на опоре № 5 определится так:

$$\delta_5 = \Delta l_6 + \Delta l_7 = 2\Delta l_7,$$

и при выполнении условия

$$\delta_5 \leq a$$

будет опять-таки достигнуто только поворотом кронштейна, а следовательно, натяжение S_5 не будет отличаться от найденных выше натяжений S_6 и S_7 .

Повторяя эти рассуждения применительно и к другим пролетам, увидим, что прогиб и отклонение гирлянды первой испытает та опора, N -я с конца (на чертеже взята опора № 3 — четвертая с конца), для которой отклонение точки подвеса провода, равное сумме сокращений длин предшествующих пролетов, будет больше длины кронштейна a . Очевидно, номер N этой опоры найдется из неравенства:

$$N\Delta l_7 > a > (N-1)\Delta l_7,$$

причем предшествующие ей с конца N пролетов будут иметь одинаковые натяжения.

Обозначив прогиб этой опоры и отклонение гирлянды в сумме через δ_3 , получим отклонение точки подвеса провода в виде выражения $\delta_3 + a$, равного сумме сокращений длин предшествующих пролетов, т. е.

$$\delta_3 + a = N\Delta l_7$$

или

$$\delta_3 = N\Delta l_7 - a.$$

Определив по этому выражению величину δ_3 , откладываем ее в виде горизонтального отрезка AB ($S_6 = S_7$) и по кривой II находим отрезок CD , который, очевидно, даст разность натяжений, действующую на опору № 3, т. е.

$$CD = S_6 - S_3.$$

Отложив от точки B вниз отрезок BE , равный CD , получим величину натяжения в третьем пролете, т. е.

$$DE = S_3$$

и, следовательно, отрезок FK даст сокращение длины этого пролета, т. е.

$$FK = \Delta l_3.$$

Из фиг. 51 имеем:

$$\delta_2 + a + l_3 = l + \delta_3 + a$$

или

$$\delta_2 = \delta_3 + \Delta l_3.$$

Поэтому, отложив от точки E по горизонтали отрезок EJ , равный FK , найдем отрезок FJ , который и даст отклонение δ_2 , т. е.

$$FJ = \delta_2.$$

По кривой II находим соответствующую разность натяжений, действующую на опору № 2 и выражаемую отрезком PM , т. е.

$$PM = S_3 - S_2.$$

Отложив отрезок JR , равный MP , найдем величину натяжения S_2 во втором пролете, т. е.

$$S_2 = RP = TO,$$

и по кривой I находим соответствующее сокращение пролета

$$\Delta l_2 = TS.$$

Из фиг. 51 можем написать:

$$\delta_1 + a + l_2 = l + \delta_2 + a$$

или

$$\delta_1 = \delta_2 + \Delta l_2.$$

Откладывая и здесь от точки R горизонтальный отрезок

$$RU = TS = \Delta l_2,$$

получим отрезок TU , который, очевидно, и даст отклонение δ_1 гирлянды и опоры № 1, т. е.

$$\delta_1 = TR + RU = TU.$$

Таким образом, натяжения во всех пролетах и соответствующие отклонения гирлянд и опор найдены.

Критерием правильности выбора натяжения S_2 служит местоположение точки U , которая при правильном выборе указанной величины должна попасть на кривую II , так как уравнение последней удовлетворяется координатами δ_1 и S_2 этой точки.

При невыполнении этого условия необходимо задаться другим значением натяжения в последнем пролете и построение проделать сначала.

Поворотные кронштейны с наклонной осью вращения. До сих пор мы рассматривали кронштейны с вертикальной осью вращения, когда поворот их не требовал затраты работы (трением пренебрегаем) и, следовательно, приложения добавочной силы. Но иногда ось вращения кронштейна делают наклонной с таким расчетом, чтобы нормальное положение его являлось бы положением устойчивого равновесия, т. е. отвечало бы наимизшему положению центра тяжести кронштейна (см. фиг. 53). Очевидно, при этом для поворота кронштейна на некоторый угол φ должна быть совершена работа, а следовательно, приложена сила; величина, обратная этой силе, будет стремиться повернуть кронштейн в нормальное положение и потому может рассматриваться, как тормозящее усилие.

Создание этого тормозящего усилия и является целью устройства кронштейнов с наклонной осью вращения, так как при этом всякое неравенство натяжений по проводам воспринимается опорой не в виде

ударной нагрузки, а в виде нагрузки постепенно возрастающей, что весьма важно при обрыве проводов, когда ударная нагрузка достигает значительных величин.

Определение натяжений по проводам в случае обрыва их в одном из пролетов при наличии описанных кронштейнов произведем методом, разработанным А. Ф. Иванчиким.

Рассмотрим сначала условия равновесия самого кронштейна при повороте его на некоторый угол φ (фиг. 53).

Очевидно, на кронштейн при любом его положении будут действовать следующие силы: 1) вес кронштейна G , приложенный в центре тяжести его C , 2) вес провода на длине двух полупролетов P и все гирлянды Q , которые можно считать приложенными в точке A , и 3) разность горизонтальных натяжений по проводам $S_N - S_{N-1}$, которую точно так же можно считать приложенной в точке A .

Для удобства расчета вес кронштейна G заменяем весом

$$G_1 = \frac{b}{a_1} G,$$

приложенным в той же точке A .

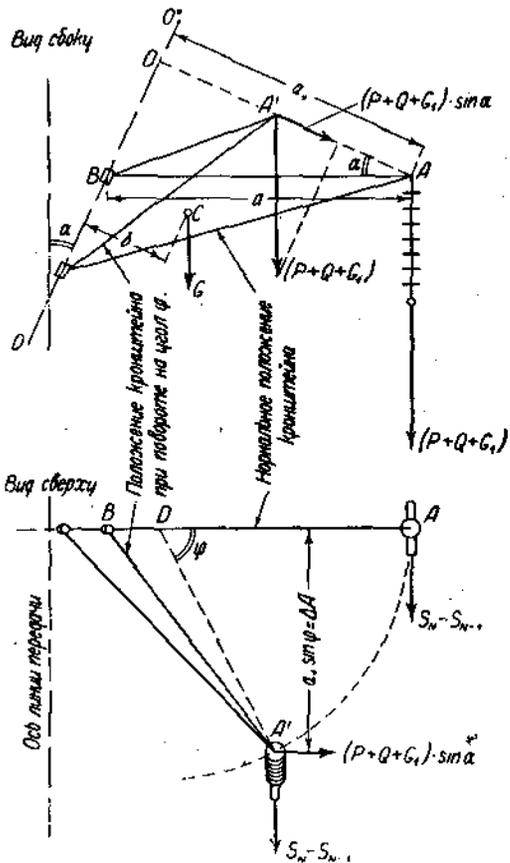
Так как кронштейн представляет систему с одной степенью свободы (поворот около оси OO''), то он будет иметь только одно условие равновесия, а именно: равенство нулю суммы моментов всех приложенных сил относительно оси вращения.

При повороте кронштейна на угол φ момент вертикальных сил $P + Q + G_1$ относительно оси вращения OO'' может быть выражен так: проекция силы $P + Q + G_1$ на плоскость, перпендикулярную оси вращения, т. е. на плоскость вращения точки A , очевидно, не зависит от положения кронштейна и определяется выражением

$$(P + Q + G_1) \sin \alpha.$$

Плечо, с которым действует эта последняя сила относительно оси OO'' , будет равно

$$a_1 \sin \varphi = a \cos \alpha \sin \varphi.$$



Фиг. 53.

Поэтому момент силы $P + Q + G_1$ относительно оси OO'' будет:

$$M_1 = (P + Q + G_1) \sin \alpha \cos \alpha \sin \varphi,$$

где a — вылет кронштейна
 α — угол наклона оси вращения к вертикали } конструктивные вели-
 чины.

Момент же горизонтальной силы $S_N - S_{N-1}$ при том же положении кронштейн равен

$$M_2 = (S_N - S_{N-1}) a \cos \varphi \cos \alpha. \quad (151)$$

Поэтому уравнение моментов относительно оси вращения кронштейна напишется так:

$$(P + Q + G_1) \sin \alpha \cos \alpha \sin \varphi - (S_N - S_{N-1}) a \cos \alpha \cos \varphi = 0. \quad (152)$$

Решая это уравнение относительно $S_N - S_{N-1}$, найдем ту разность натяжений по проводам, которая должна существовать, чтобы уравновесить кронштейн в данном положении, характеризуемом углом φ .

Таким образом получаем:

$$S_N - S_{N-1} = (P + Q + G_1) \sin \alpha \operatorname{tg} \varphi. \quad (153)$$

При повороте кронштейна на угол φ горизонтальное перемещение точки закрепления гирлянды A в направлении оси линии передачи будет

$$\Delta A = a \cos \alpha \sin \varphi. \quad (154)$$

Совместное решение уравнений (153) и (154) приведет к следующему выражению для этого перемещения, а именно:

$$\Delta A = a \cos \alpha \frac{S_N - S_{N-1}}{\sqrt{(P + Q + G_1)^2 \sin^2 \alpha + (S_N - S_{N-1})^2}}. \quad (155)$$

Суммарное перемещение точки подвеса проводов в направлении оси линии передачи, получающееся благодаря прогибу опоры, отклонения гирлянды и поворота кронштейна, напишется так:

$$\delta = Kn(S_N - S_{N-1}) + \lambda \frac{S_N - S_{N-1}}{\sqrt{(P + Q_1)^2 + (S_N - S_{N-1})^2}} + a \cos \alpha \frac{S_N - S_{N-1}}{\sqrt{(P + Q + G_1)^2 + (S_N - S_{N-1})^2}}. \quad (156)$$

Из полученного выражения нетрудно усмотреть, что задача определения натяжений по проводам при обрыве их в каком-либо пролете для случая линии передачи с поворотными наклонными кронштейнами ничем по существу не отличается от таковой же задачи для линии с жесткими (неповорачивающимися) кронштейнами, рассмотренной в главе IV (§ 5).

Здесь, как и раньше, строим две кривые, а именно:

1) кривую I изменения натяжения по проводу в зависимости от изменения длины пролета [формула (105)]

$$S = f(\Delta l);$$

2) кривую II изменения разности натяжений по проводам в смежных пролетах в зависимости от отклонения точки подвеса проводов

$$S_N - S_{N-1} = f(\delta);$$

причем последнюю кривую строим пользуясь не уравнением (120'), а уравнением (156).

Дальнейшие построения, производимые для определения натяжений, ничем не отличаются от изложенных в указанном выше параграфе и потому описание их здесь не приводится.

Пример 25. Имеется трехфазная линия передачи с медными проводами сечением $q = 50 \text{ мм}^2$, проложенная на опорах с поворотными кронштейнами, ось вращения которых вертикальна. При температуре $t = -5^\circ \text{C}$ и добавочных нагрузках на провода от ветра со скоростью $v = 20 \text{ м/сек}$ и слое льда с толщиной стенки $b = 10 \text{ мм}$, произошел обрыв двух проводов в пролете, примыкающем к анкерной опоре. От содрасения проводов в момент обрыва гололед со всех уцелевших проводов линии на участке между двумя анкерными опорами сброшен. Требуется определить, пренебрегая влиянием уцелевших проводов в поврежденном пролете, натяжение по проводам в различных пролетах после обрыва. Пролет линии $l = 140 \text{ м}$. Коэффициент гибкости опоры $K = 0,0007 \text{ м/кг}$. Длина гирлянды подвесных изоляторов $\lambda = 0,7 \text{ м}$ и вес ее $Q = 30 \text{ кг}$. Вылет кронштейна $a = 1,5 \text{ м}$. Анкерные опоры расположены через каждые 7 пролетов.

Определяем критический пролет.

$$l_k = \sigma_m \sqrt{\frac{24\alpha(t_2 - t_1)}{\gamma_7^2 - \gamma_1^2}} = 18 \sqrt{\frac{24 \cdot 17 \cdot 10^{-4}(-5 + 30)}{0,0242^2 - 0,0089^2}} = 81 \text{ м}$$

Так как критический пролет меньше выбранного 140 м, то максимальное напряжение $\sigma_{\max} = 18 \text{ кг/мм}^2$ принимаем при $t = -5^\circ \text{C}$ и дополнительных нагрузках на провод. При той же температуре, но при сброшенном гололеде напряжение материала провода найдется из уравнения

$$\sigma_1 - \frac{\gamma_6^2 l^2}{24\sigma_1^2 \beta} = \sigma_2 - \frac{\gamma_7^2 l^2}{24\beta\sigma_2^2};$$

$$\sigma_1 - \frac{140^2 \cdot 0,0099^2}{24 \cdot 0,77 \cdot 10^{-4} \sigma_1^2} = 18 - \frac{140^2 \cdot 0,0242^2}{24 \cdot 0,77 \cdot 10^{-4} \cdot 18^2}$$

или

$$\sigma_1 - \frac{1040}{\sigma_1^2} = 1,15,$$

откуда

$$\sigma_1 = 9,77 \text{ кг/мм}^2.$$

Стрела провеса при этом будет:

$$f = \frac{l^2 \gamma_6}{8\sigma_1} = \frac{140^2 \cdot 0,0099}{8 \cdot 9,77} = 2,48 \text{ м}$$

и длина провода в пролете

$$L_0 = l + \frac{8}{3} \frac{f^2}{l} = 140 + \frac{8}{3} \frac{2,48^2}{140} = 140,1172 \text{ м.}$$

Подставляя найденную величину L_0 в уравнение (105)

$$\frac{l^3 \gamma_0^2}{24 \sigma^2} - L_0 \beta \sigma = L_0 (1 - \beta \sigma_0) - l,$$

получим:

$$\frac{l^3 \cdot 0,0099^2}{24 \sigma^2} - 140,1172 \cdot 0,77 \cdot 10^{-4} \sigma = 140,1172 (1 - 0,77 \cdot 10^{-4} \cdot 9,77) - l$$

или

$$408 \cdot 10^{-8} \frac{l^3}{\sigma^2} - 0,0108 \sigma = 140,0117 - l.$$

Задаваясь различными значениями l , находим соответствующие значения напряжения в проводе, а следовательно, и величину натяжения по всему проводу.

По этому уравнению строим кривую I (фиг. 54).

Координаты кривой II найдутся из уравнения (120'):

$$\delta = K n (S_N - S_{N-1}) + \lambda \frac{S_N - S_{N-1}}{\sqrt{(P + Q_1)^2 + (S_N - S_{N-1})^2}};$$

подставляя в него $K = 0,0007 \text{ м/кг}$, $n = 2$, $\lambda = 0,7$, $Q_1 = \frac{Q}{2} = \frac{30}{2} =$

$\text{кг} = 15 \text{ кг}$ и $P = \gamma_0 q l = 0,0099 \cdot 50 \cdot 140 = 480 = 69,3 \text{ кг}$, получим

$$\delta = 0,0007 \cdot 2 \cdot \Delta S + \frac{0,7 \Delta S}{\sqrt{(69,3 + 15)^2 + \Delta S^2}}.$$

или

$$\delta = 0,0014 \Delta S + \frac{0,7 \Delta S}{\sqrt{7106 + \Delta S^2}}$$

Кривая II , соответствующая последнему уравнению, нанесена на фиг. 54.

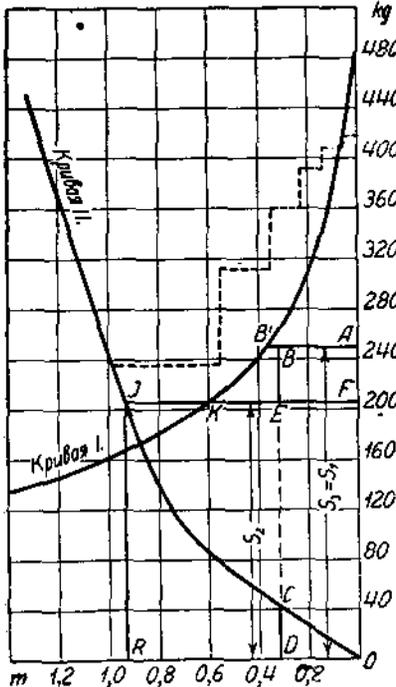
Имея обе эти кривые, приступим к определению натяжений по проводам.

Задаемся натяжением в последнем пролете $S_7 = 250 \text{ кг}$ (отрезок AO фиг. 54) и по кривой первой находим соответствующее этому натяжению сокращение пролета

$$\Delta l_7 = AB' = 0,364 \text{ м.}$$

Из неравенства

$$N \Delta l_7 \geq a \geq (N-1) \Delta l_7$$



Фиг. 54.

находим

$$N > \frac{a}{\Delta l_7}; \quad N > \frac{1,5}{0,364}; \quad N > 4,1;$$

так как N должно быть ближайшим большим целым числом, то получим

$$N = 5.$$

Следовательно, 5-я с конца опора (фиг. 51), т. е. опора № 2 (обрыв произошел в пролете № 1) прогнется, и ее гирлянда отклонится от вертикали. Отклонение точки подвеса провода на этой опоре найдется из уравнения:

$$\delta_2 = N \Delta l_7 - a = 5 \cdot 0,364 - 1,5 = 0,32 \text{ м.}$$

Нанося $\delta_2 = AB$ на фиг. 54 способом, указанным в теории, находим распределение натяжений по проводам.

На фиг. 54 обозначены:

отклонения точек подвеса

$$\delta_2 = AB = FE$$

$$\delta_1 = FJ$$

сокращения пролетов

$$\Delta l_2 = FK = EJ$$

разность натяжений

$$\Delta S_2 = S_3 - S_1 = CD = BE$$

натяжения

$$S_7 = S_6 = S_5 = S_4 = S_3 = OA$$

$$S_2 = OF$$

На том же чертеже пунктиром дано распределение натяжений в пролетах для такой же линии, выполненной на таких же столбах, но при жестких кронштейнах. Результаты расчетов сопоставлены в табл. XXXIV.

ТАБЛИЦА XXXIV.

Натяжения в пролетах	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7
При поворотных кронштейнах (kg)	—	206	250	250	250	250	250
При обыкновенных кронштейнах (kg)	—	236	312	360	392	408	418

Сопоставляя эти цифры, видим, что максимальное усилие, приходящееся на опору (S_2), в случае обыкновенных кронштейнов больше на 14,5% чем при поворотных кронштейнах.

Пример 26. На трехфазной линии электропередачи с медными проводами сечением $q = 70 \text{ мм}^2$, подвешенными на металлических опорах с поворотными кронштейнами, при $t = -5^\circ \text{C}$ и добавочных нагрузках на провода от ветра со скоростью $v = 20 \text{ м/сек}$ и слоя льда с толщиной стенки $b = 10 \text{ мм}$ произошел обрыв двух проводов в пролете, примыкающем к анкерной опоре. Принимаем, что в момент обрыва голлед со всех уцелевших проводов линии на участке между двумя анкерными опорами сброшен. Требуется определить натяжение по проводам в различных пролетах после обрыва. Пролет линии $l = 220 \text{ м}$. Длина гир-

ленты подвесных изоляторов $\lambda = 1,3$ м и вес ее $Q = 50$ kg. Вылет кронштейна $a = 2,0$ м, угол наклона его оси вращения к вертикали $\alpha = 15^\circ$. Вес кронштейна, отнесенный к точке укрепления гирлянды, $G_1 = 20$ kg. Анкерные опоры расположены через каждые 7 пролетов.

Так как критический пролет равен $l_{kp} = 99$ м (см. пример 7, стр. 42), то натяжение по проводу при $t = -5^\circ$ С и добавочных нагрузках будет равно 18 kg/mm². Тогда при той же температуре и том же ветре, но при сброшенном гололеде напряжение материала провода будет (подсчеты не приводятся):

$$\sigma_1 = 9,83 \text{ kg/mm}^2.$$

Стрела провеса при этом определится

$$f = \frac{l^2 \gamma_6}{8 \sigma_1} = \frac{220^2 \cdot 0,0097}{8 \cdot 9,83} = 6 \text{ м},$$

а длина провода в пролете найдется

$$L_0 = l + \frac{8}{3} \frac{f^2}{l} = 220 + \frac{8}{3} \frac{6^2}{220} = 220,435 \text{ м}.$$

Подставляя эти величины в уравнение (105),

$$\frac{l^3 \gamma_6^2}{24 \sigma^2} - L_0 \beta \sigma = L_0 (1 - \beta \sigma) - l,$$

получим

$$\frac{l^3 \cdot 0,0097^2}{24 \sigma^2} - 220,435 \cdot 0,77 \cdot 10^{-4} \sigma = 220,435 (1 - 0,77 \cdot 10^{-4} \cdot 9,83) - l,$$

или

$$396 \cdot 10^{-8} \frac{l^3}{\sigma^2} - 0,017 \sigma = 220,268 - l.$$

С помощью этого уравнения построена кривая I фиг. 55.

Коэффициент гибкости металлических промежуточных опор примем равным нулю. Тогда уравнение (156) примет вид:

$$\delta = \delta' + \delta'' = \lambda \frac{S_N - S_{N-1}}{\sqrt{(P + Q_1)^2 + (S_N - S_{N-1})^2}} + \\ + a \cos \alpha \frac{S_N - S_{N-1}}{\sqrt{(P + Q + G_1)^2 \sin^2 \alpha + (S_N - S_{N-1})^2}}$$

Подставляя в это уравнение

$$P = l \gamma_6 = 220 \cdot 70 \cdot 0,0097 = 149 \text{ kg}$$

и

$$Q_1 = Q : 2 = 25 \text{ kg},$$

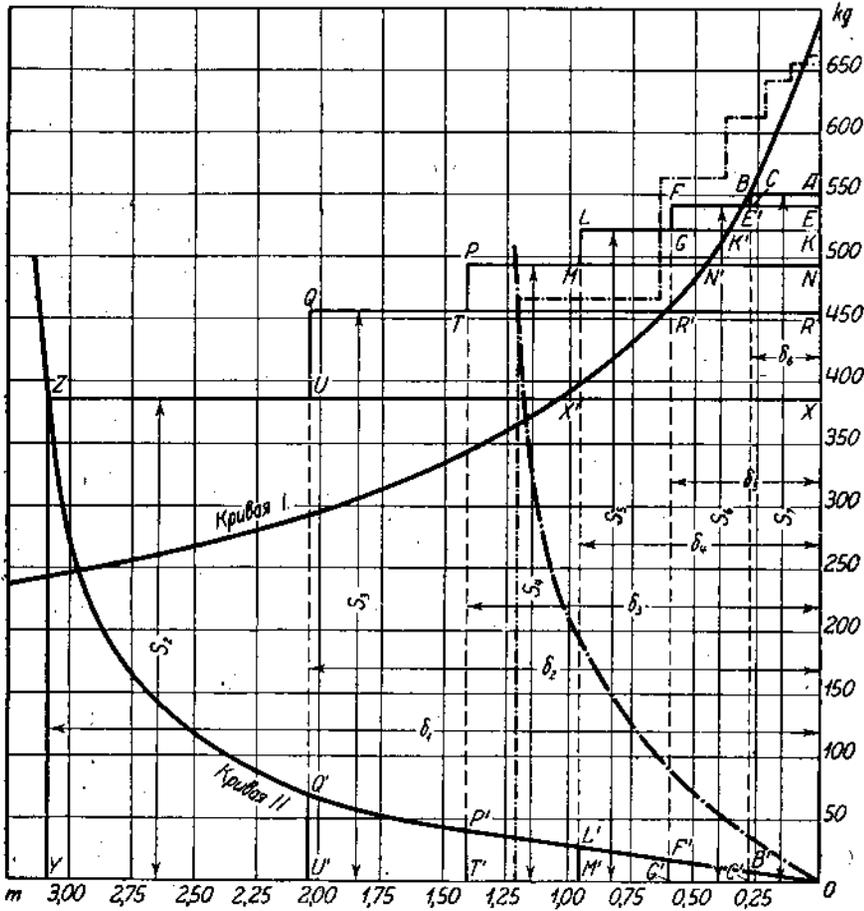
получим

$$\delta = 1,3 \frac{\Delta S}{\sqrt{(149 + 25)^2 + \Delta S^2}} + 2 \cos 15^\circ \frac{\Delta S}{\sqrt{(149 + 50 + 20)^2 \sin^2 15^\circ + \Delta S^2}}$$

или

$$\delta = \frac{1,3 \Delta S}{\sqrt{30276 + \Delta S^2}} + \frac{1,932 \Delta S}{\sqrt{50,1^2 + \Delta S^2}}$$

Пользуясь этим уравнением строим кривую II (фиг. 55).



Фиг. 55.

Имея обе кривые I и II находим распределение натяжений в пролетах. Результаты подсчетов приведены в табл. XXXV под № 1.

На том же чертеже пунктиром дано распределение натяжений в пролетах для этой же линии, выполненной на металлических опорах, но при неподвижных кронштейнах. Распределение натяжений по проводам в пролетах в этом случае приведены в той же табл. XXXV под № 2.

ТАБЛИЦА XXXV.

№N	Натяжение по проводу в пролетах	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7
1	При поворотных кронштейнах (kg)	—	386	456	494	522	542	552
2	При обыкновенных кронштейнах (kg)	—	466	564	612	641	656	662

Сопоставляя эти цифры, видим, что максимальное усилие, приходящееся на опору, в случае обыкновенных кронштейнов больше на 20%, чем при поворотных кронштейнах.

§ 4. Натяжения и стрелы провеса проводов в пролетах, подвешенных на оттяжных гирляндах изоляторов, при изменяющихся атмосферных условиях.

Общие сведения. Применение оттяжных гирлянд изоляторов делает каждый пролет линии передачи совершенно независимым в смысле режима работы проводов его от соседних пролетов. К такому устройству приходится прибегать при особо ответственных условиях работы линии передачи, например, при пересечении железных дорог, рек, линий слабого тока и т. д., причем в этих случаях на оттяжных гирляндах обычно подвешивается только один пролет проводов и в нем применяется так называемая двойная подвеска провода (параллельно две гирлянды изоляторов или два штыревых изолятора).

Подвеска провода на оттяжных гирляндах осуществляется следующим образом: к каждой гирлянде (или, точнее, к двум) крепится один конец провода только для данного пролета. (с соседним пролетом он соединяется ненапрянутой перемычкой) и поэтому она под влиянием одностороннего натяжения отклоняется от вертикали и занимает положение равновесия, определяемое ее весом, весом провода и натяжением его (ось гирлянды почти совпадает с осью провода).

Очевидно, при таком устройстве изменение режима работы проводов в каком-либо пролете, вплоть до обрыва их, совершенно не повлияет на работу проводов данного пролета, при условии, конечно, что соответствующие опоры выполнены анкерного типа (жесткие). Поэтому расчет каждого пролета при натяжных гирляндах приходится производить совершенно самостоятельно, (т. е. независимо от других пролетов), делая пересчеты натяжений и стрел провеса при разных атмосферных условиях.

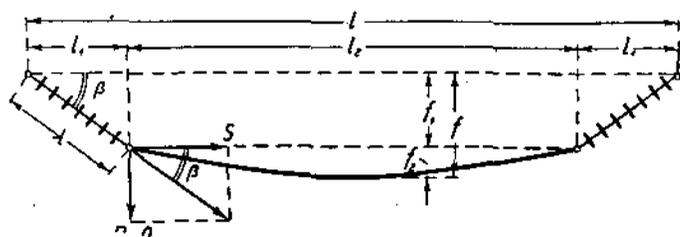
Необходимо отметить, что, согласно Союзных Норм, в пролетах, пересекающих железные дороги и т. д., допустимое напряжение материала провода не должно превышать $\frac{1}{3}$ временного сопротивления.

Для определения стрел провеса провода и напряжения материала его при оттяжных гирляндах предложено много способов; мы остановимся здесь на изложении метода, данного Кржижановским, желающих же ознакомиться с вопросом более подробно, отсылаем к статье инж. Каценеленбогена (журн. „Электричество“, № 9 за 1926 г.).

Натяжение по проводу при различных атмосферных условиях. Автор этого метода исходит из предположения, что сама гирлянда изоляторов представляет жесткий прямой стержень и, следовательно, при отклонении не меняет формы.

Очевидно, при этом предположении, гирлянда под действием одностороннего натяжения провода займет положение, совпадающее по на-

правлению с направлением результирующей трех сил: горизонтального натяжения провода S , половины веса гирлянды Q_1 (см. главу IV, § 4)



Фиг. 56.

и веса P провода с добавочными нагрузками на длине полупролета (см. фиг. 56).

Сохраняя ранее принятые обозначения и вводя новые, указанные на чертеже, можно написать для каких-либо атмосферных условий, определяемых температурой t и удельной нагрузкой γ , следующие зависимости.

Стрела провеса провода относительно точек закрепления его к гирлянде изоляторов

$$f_2 = \frac{l_2^2 \gamma}{8\sigma}. \quad (25')$$

Вертикальная проекция гирлянды изоляторов равна

$$t_1 = \lambda \sin \beta;$$

но так как

$$\sin \beta = \frac{P_1 + Q_1}{\sqrt{(P_1 + Q_1)^2 + S^2}},$$

то, следовательно,

$$f_1 = \lambda \frac{P_1 + Q_1}{\sqrt{(P_1 + Q_1)^2 + S^2}}. \quad (157)$$

Стрела провеса провода относительно точек закрепления гирлянд на опоре будет

$$f = f_1 + f_2. \quad (158)$$

Длина пролета между точками закрепления провода определится:

$$l_2 = l - 2l_1,$$

где l_1 — горизонтальная проекция гирлянды, равная

$$l_1 = \lambda \cos \beta = \lambda \frac{S}{\sqrt{(P_1 + Q_1)^2 + S^2}},$$

и, следовательно,

$$l_2 = l - \frac{2\lambda S}{\sqrt{(P_1 + Q_1)^2 + S^2}}. \quad (159)$$

Длина провода в пролете будет

$$L = l_2 + \frac{8}{3} \frac{f_2^2}{l_2}. \quad (27')$$

Все эти зависимости можно, конечно, написать и для некоторых исходных атмосферных условий, определяемых температурой t_0 и удельной нагрузкой γ_0 , причем все входящие в эти уравнения величины, изменяющиеся с изменением атмосферных условий, должны быть снабжены индексом 0.

Очевидно, длина провода в пролете при изменении атмосферных условий с t_0 и γ_0 на t и γ изменится с L_0 на L_1 , причем материал провода будет работать с новым напряжением σ .

Это изменение длины провода может быть выражено с достаточной точностью, как известно, следующим образом:

$$L - L_0 = (t - t_0) \alpha L_0 + (\sigma - \sigma_0) \beta L_0,$$

где

α — температурный коэффициент линейного расширения,

β — коэффициент упругого удлинения.

То же изменение длины провода в пролете, согласно уравнения (27'), может быть написано в другом виде так:

$$L - L_0 = l_2 + \frac{8}{3} \cdot \frac{f_2^2}{l_2} - l_{20} - \frac{8}{3} \cdot \frac{f_{20}^2}{l_{20}}.$$

Приравнивая правые части этих выражений, получаем общее уравнение состояния провода

$$l_2 + \frac{8}{3} \cdot \frac{f_2^2}{l_2} - l_{20} - \frac{8}{3} \cdot \frac{f_{20}^2}{l_{20}} = (t - t_0) \alpha L_0 + (\sigma - \sigma_0) \beta L_0. \quad (160)$$

Решая это уравнение относительно l и подставляя в него значение f_2 из уравнения (25'), получим:

$$t = \frac{l_2 + \frac{\gamma^2 l_2^3}{24 \sigma^2}}{\alpha L_0} - \frac{1}{\alpha} + t_0 - (\sigma - \sigma_0) \frac{\beta}{\alpha}. \quad (161)$$

Это уравнение и служит для определения напряжения σ в проводе при изменении атмосферных условий. Аналитическое решение этого уравнения невозможно, так как оно является относительно σ уравнением пятой степени. Поэтому для определения напряжения при любых атмосферных условиях, зная его при исходных условиях γ_0 и t_0 , поступают так.

При удельной нагрузке γ задаются рядом значений напряжения материала провода σ и по уравнению (159) подсчитывают соответствующие длины пролета l_2 . Полученные значения l_2 и соответствующие σ подставляют в уравнение (161) и находят температуры t . Выполнив указанные подсчеты, можно построить кривую зависимости напряжения провода от температуры

$$\sigma = f(t)^1$$

¹⁾ Для построения кривой $\sigma = f(t)$ обычно бывает достаточно определить 4 или 5 ее точек.

при определенном, интересующем нас, значении удельной нагрузки q (Фиг. 57). По этой кривой и можно найти напряжение материала провода при любой температуре.

Зная же напряжение σ , легко определить и соответствующие стрелы провеса f_1 , f_2 и f провода, пользуясь уравнениями (25'), (157), (158) и (159).

Недостатком изложенного метода является невозможность пользоваться счетной линейкой при подсчетах, производимых по уравнению (161), ибо в нем левая часть (т. е. температуры t) представляет одно или двузначное число, правая же часть дает обычно разность пятизначных величин и поэтому они должны быть вычислены, по крайней мере, с точностью до одной десятой.

Пример 27. При переходе линии электропередачи с медными проводами сечением $q = 70 \text{ mm}^2$ через железную дорогу, пролет ее выбран $l = 80 \text{ m}$. Провода подвешены с помощью двойных оттяжных гирлянд изоляторов, длиной $\lambda = 1,45 \text{ m}$ и весом $Q = 57 \text{ kg}$ каждая. Требуется определить для атмосферных условий средней полосы РСФСР (ветер $v = 20 \text{ m/sec}$, $t_{\text{max}} = +40^\circ \text{ C}$, $t_{\text{min}} = -30^\circ \text{ C}$, гололед с толщиной стенки $b = 10 \text{ mm}$) максимальную стрелу провеса.

Так как линия проходит над железной дорогой, то максимально допустимое напряжение материала проводов не должно превышать $1/3$ временного сопротивления их на разрыв, т. е. для меди не должно быть более 13 kg/mm^2 .

Критический пролет при этих условиях будет

$$l_{\text{кр}} = 13 \sqrt{\frac{24 \cdot 17 \cdot 10^{-6} (-5 + 30)}{0,0204^2 - 0,0089^2}} = 71 \text{ m.}$$

Следовательно, максимальное натяжение в проводе наступит при $t = -5^\circ \text{ C}$ и дополнительных нагрузках в виде льда и ветра.

При пользовании формулами (157) и (159) необходимо знать вес полу-пролета провода P , который и может быть определен следующим образом:

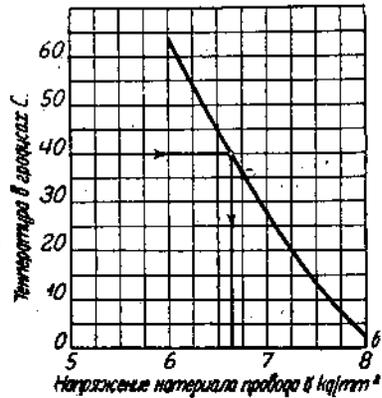
$$P_1 = \left(\frac{l}{2} - \lambda \right) q = \left(\frac{80}{2} - 1,45 \right) \cdot 70 \cdot 0,0204 = 55 \text{ kg.}$$

Тогда на основании уравнений (25') и (159) при $t = -5^\circ \text{ C}$ и добавочных нагрузках, получим:

$$f_1 = \lambda \frac{P_1 + Q_1}{\sqrt{(P_1 + Q_1)^2 + S^2}} = \frac{1,45 \cdot (55 + 57)}{\sqrt{(55 + 57)^2 + (13 \cdot 70)^2}} = 0,176 \text{ m}$$

(в этой формуле мы полагаем, что $Q_1 = \frac{2Q}{2} = 57 \text{ kg}$);

$$l_2 = l - \frac{2\lambda S}{\sqrt{(P_1 + Q_1)^2 + S^2}} = 80 - \frac{2 \cdot 1,45 \cdot 13 \cdot 70}{\sqrt{(57 + 55)^2 + (910)^2}} = 77,13 \text{ m.}$$



Фиг. 57.

Стрела провеса провода относительно точек его закрепления в клеммах, при тех же условиях, будет равна

$$f_2 = \frac{l_2^2 \gamma_1}{8\sigma} = \frac{77,13^2 \cdot 0,0204}{8 \cdot 13} = 1,165 \text{ м,}$$

а общая стрела провеса

$$f = f_1 + f_2 = 0,176 + 1,165 = 1,341 \text{ м.}$$

Длина же провода в пролете

$$L_0 = l_2 + \frac{8}{3} \cdot \frac{f^2}{l_2} = 77,13 + \frac{8}{3} \cdot \frac{1,165^2}{77,13} = 77,177 \text{ м.}$$

Как известно, наибольшая стрела провеса может иметь место или при наибольшей нагрузке или при наивысшей температуре окружающего воздуха. Поэтому определим стрелу провеса и для $t = +40^\circ \text{C}$.

Для построения кривой $t = f(\sigma)$, предварительно найдем зависимость пролета l_2 от напряжения материала провода, что осуществляется с помощью уравнения (159). Подставляя в него

$$P' = \left(\frac{l}{2} - \lambda\right) \gamma_1 = \left(\frac{80}{2} - 1,45\right) \cdot 70 \cdot 0,0089 = 24 \text{ кг,}$$

$$Q_1 = 57 \text{ кг и } \lambda = 1,45 \text{ м}$$

и давая $S = q\sigma$ различные значения, будем получать соответствующие величины пролета l_2 . Результаты подсчетов сведены в табл. XXXVI.

ТАБЛИЦА XXXVI.

Напряжение провода σ [кг/мм ²]	6	6,5	7	7,5	8
Натяжение провода S [кг]	420	455	490	525	560
Длина пролета [м]	77,19	77,17	77,14	77,13	77,125

Подставляя величины табл. XXXVI в уравнение (161), получим ряд значений для температуры t в зависимости от натяжения:

$$t = \frac{l_2 + \frac{\gamma_1^2 l_2^3}{24\sigma^2}}{\alpha L_0} - \frac{1}{\alpha} + t_0 - (\sigma - \sigma_0) \frac{\beta}{\alpha},$$

$$t = \frac{l_2 + \frac{0,0089^2 l_2^3}{24 \sigma^2}}{17 \cdot 10^{-3} \cdot 77,177} - \frac{1}{17 \cdot 10^{-3}} + (-5) - (\sigma - 13) \cdot \frac{0,77 \cdot 10^{-4}}{17 \cdot 10^{-3}}$$

Необходимо подчеркнуть, что выражение

$$l_2 + \frac{0,0089^2 l_2^3}{24 \sigma^2} \frac{1}{17 \cdot 10^{-6} \cdot 77,177} - \frac{1}{17 \cdot 10^{-6}}$$

обязательно должно быть подсчитано с помощью пятизначных логарифмов.

После преобразований, уравнение примет вид:

$$t = \frac{l_2}{17 \cdot 10^{-6} \cdot 77,177} - \frac{0,0089^2 l_2^3}{24 \cdot 17 \cdot 10^{-6} \cdot 77,167 \sigma^2} - 58769,12 - 4,529 \sigma.$$

Подставляя в это уравнение l_2 и соответствующее σ из табл. XXXVI, получим табл. XXXVII, по которой и построена кривая $t = f(\sigma)$ фиг. 57.

ТАБЛИЦА XXXVII.

Напряжение провода σ [kg] . . .	6	6,5	7	7,5	8
Температура [°C]	62,75	46,82	27,75	13,4	2

По кривой фиг. 57 находим при $t = +40^\circ \text{C}$ натяжение по проводу $\sigma = 6,65$ и $S = \sigma q = 6,65 \cdot 70 = 465 \text{ kg}$.

Тогда

$$f_1 = \frac{\lambda (P_1 + Q_1)}{\sqrt{(P_1 + Q_1)^2 + S^2}} = \frac{1,45 (24 + 57)}{\sqrt{(24 + 57)^2 + 465^2}} = 0,25 \text{ m},$$

$$l_2 = l - \frac{2lS}{\sqrt{(P_1 + Q_1)^2 + S^2}} = 80 - \frac{2 \cdot 1,45 \cdot 465}{\sqrt{(24 + 57)^2 + 465^2}} = 77,15 \text{ m},$$

$$f_2 = \frac{l_2^2 \gamma_1}{8\sigma} = \frac{77,15^2 \cdot 0,0089}{8 \cdot 6,65} = 0,995 \text{ m}$$

и

$$f = f_1 + f_2 = 0,25 + 0,995 = 1,245 \text{ m}.$$

Из приведенного подсчета видно, что наибольшая стрела провеса имеет место при $t = -5^\circ \text{C}$ и добавочных нагрузках.

§ 5. Неодинаковые пролеты.

Случай неодинаковых пролетов представляет интерес в том отношении, что при изменении атмосферных условий равенство между натяжениями по проводам отдельных пролетов, имевшее место при атмосферных условиях, соответствующих монтажу линии передачи, будет нарушено. Очевидно, при этом гирлянды изоляторов отклонятся от своего вертикального положения и тем самым могут создать опасность слишком близкого приближения провода к траверсе (фиг. 44), а вместе с тем и повлияют на распределение стрел провеса в различных пролетах.

Главной задачей настоящего изложения и является определение стрел провеса проводов и отклонений гирлянд в различных пролетах при изменении атмосферных условий.

Эту задачу рассмотрим применительно к линии передачи с четырьмя пролетами между анкерными опорами (фиг. 58), из которых первый пролет является наибольшим, остальные же равны между собой, применив для решения метод, предложенный автором настоящей книги.

Предположим, что для некоторых исходных атмосферных условий, определяемых температурой t_0 и удельной нагрузкой γ_0 , гирлянды изоляторов на всех промежуточных опорах занимают вертикальное положение, а следовательно, горизонтальные натяжения по проводам (в нижней точке их) во всех пролетах равны, т. е.

$$S_{1_0} = S_{2_0} = S_{3_0} = S_{4_0}$$

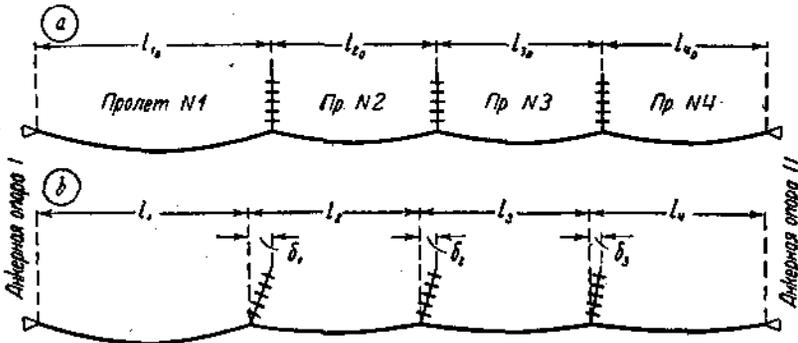
или, что то же,

$$\sigma_{1_0} = \sigma_{2_0} = \sigma_{3_0} = \sigma_{4_0}.$$

Согласно сказанному выше, можно еще написать:

$$l_2 = l_3 = l_4.$$

Предположим далее, что атмосферные условия изменились следующим образом: температура понизилась с t_0 на t , а удельная нагрузка увеличилась с γ_0 на γ . Очевидно, натяжения по проводам увеличатся во всех пролетах, причем это увеличение в первом пролете будет наибольшим, а следовательно, гирлянда изоляторов на опоре № 1 отклонится в сторону первого большого пролета (фиг. 58b) и тем самым вызовет отклонение гирлянд на остальных опорах в том же направлении.



Фиг. 58.

Для определения отклонений гирлянд и натяжений по проводам в различных пролетах, будем пользоваться графическим методом.

Строим следующие кривые.

1. Кривые зависимости натяжения по проводам от изменения длины пролета, причем для первого (наибольшего) пролета берем уменьшения длины; его $(- \Delta l)$, а для остальных пролетов — увеличения длины их

(фиг. 59, кривые I и I'). Исходными для построения уравнениями будут:

для первого пролета

$$\frac{l_1^3 \gamma^2}{24 \sigma_1^2} - L_0 \beta \sigma_1 = L_0 (1 - \beta \sigma_0) - l_1 \quad (\text{кривая } I),$$

для остальных пролетов

$$\frac{l_2^3 \gamma^2}{24 \sigma_2^2} - L_0 \beta \sigma_2 = L_0 (1 - \beta \sigma_0) - l_2 \quad (\text{кривая } I'),$$

где L_0 и σ_0 — длина провода и напряжение в первом пролете при длине пролета равном l_0 , но при новых атмосферных условиях γ и l ; то же можно сказать и относительно L_0 и σ_0 .

2. Кривые зависимости отклонения гирлянд от разности натяжений в соседних пролетах при удельной нагрузке провода γ (фиг. 59, кривые II и II'). Исходными уравнениями для них являются:

для первого пролета

$$\delta' = \lambda \frac{S_2 - S_1}{\sqrt{(P' + Q_1)^2 + (S_2 - S_1)^2}} \quad (\text{кривая } II),$$

для остальных пролетов

$$\delta'' = \lambda \frac{S_N - S_{N-1}}{\sqrt{(P'' + Q_1)^2 + (S_N - S_{N-1})^2}} \quad (\text{кривая } II'),$$

где P' — вес провода с добавочными нагрузками на длине полупролетов в пролетах № 1 и № 2,

P'' — вес провода с добавочными нагрузками на длине одного из остальных пролетов.

Другие обозначения те же, что и раньше.

Выполнив указанные построения, поступаем следующим образом.

Задаемся натяжением S_4 и находим по кривой I' сокращение длины четвертого пролета (фиг. 59):

$$\Delta l_4 = AB.$$

Из фиг. 58 b имеем:

$$\Delta l_4 = \delta_3,$$

и, следовательно, отрезок CD , найденный по кривой II' , даст разность натяжений в четвертом и третьем пролетах, т. е.

$$CD = S_3 - S_4.$$

Отложив отрезок AE , равный CD , находим

$$OE = S_3,$$

и, следовательно, отрезок EF даст увеличение длины третьего пролета, т. е.

$$EF = \Delta l_3.$$

Но так как (фиг. 58 b)

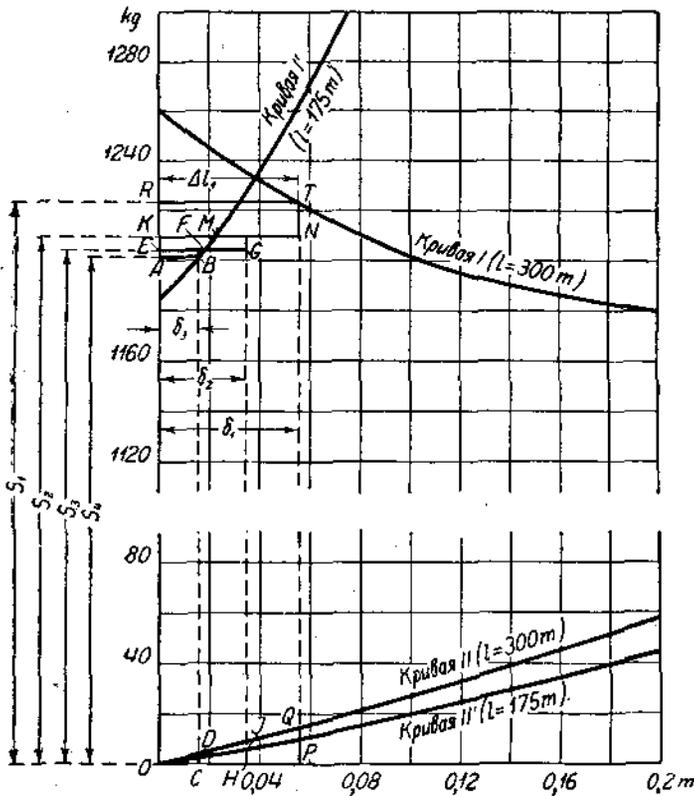
$$\delta_2 = \Delta l_3 + \Delta l_4,$$

то, отложив отрезок FG , равный AB , получим отрезок

$$EG = \delta_2$$

и по кривой II' найдем отрезок

$$HJ = S_2 - S_2.$$



Фиг. 59.

Отложив отрезок EK , равный HJ , получим отрезок

$$OK = S_2$$

и по кривой I' находим отрезок

$$KM = \Delta l_2.$$

Из фиг. 58 b можем написать:

$$\delta_1 = \Delta l_2 + \delta_2$$

и, следовательно, отложив отрезок MN , равный EG , получим отрезок

$$KN = \delta_1$$

и по кривой II найдем отрезок

$$PQ = S_1 - S_2.$$

Оложив отрезок KR , равный PQ , находим натяжение в первом пролете

$$S_1 = OR$$

и по нему находим сокращение первого пролета

$$\Delta l_1 = RT.$$

Очевидно, это сокращение может быть получено за счет отклонения гирлянды на промежуточной опоре № 1 (фиг. 58b), так как гирлянда анкерной опоры I отклонения получить не может. Из сказанного вытекает, что отрезки KN и RT , выражающие собой соответственно величины δ_1 и Δl_1 , должны быть между собой равны (фиг. 59).

Равенство указанных отрезков и служит критерием правильности выбора величины натяжения S_1 .

Зная величины натяжений по проводам, легко уже найти отклонения гирлянд изоляторов и стрелы провеса проводов.

Эта же самая задача может быть решена и графо-аналитическим методом, подобно тому, как это было описано в § 1 этой главы.

Пример 28. На линии электропередачи с медными проводами сечением $q = 70 \text{ мм}^2$ пролет, примыкающий к анкерной опоре (пролет № 1), выполнен длиной $l_1 = 300 \text{ м}$, а все остальные пролеты — длиной $l_2 = 175 \text{ м}$. Монтаж линии производился при температуре $t = +10^\circ\text{C}$ и в отсутствии добавочных нагрузок на провода. Требуется определить распределение натяжений по проводам при $t = -5^\circ\text{C}$ и добавочных нагрузках в виде льда с толщиной стенки $b = 10 \text{ мм}$ и давления ветра, скорость которого $v = 20 \text{ м/сек}$. Длина гирлянды изоляторов $\lambda = 1,3 \text{ м}$, а ее вес $Q = 50 \text{ кг}$. Анкерные опоры расположены через каждые 4 пролета.

Определим напряжение в проводе при монтаже, исходя из условия, что максимальное напряжение во всех пролетах провода при $t = -5^\circ\text{C}$ и добавочных нагрузках не должно превышать 18 кг/мм^2 . Для этого задаемся этой величиной при $t = -5^\circ\text{C}$ и добавочных нагрузках, и для пролетов $l_1 = 300 \text{ м}$ и $l_2 = 175 \text{ м}$ по уравнению (50) находим напряжение в проводе при $t = +10^\circ\text{C}$ и из двух полученных значений выбираем меньшее.

Уравнение

$$\sigma_1 - \frac{l_1^2 \gamma_1^2}{24\beta\sigma_1^2} = \sigma_0 - \frac{l_2^2 \gamma_2^2}{24\beta\sigma_0^2} - \frac{\alpha}{\beta} (t_1 - t_2)$$

для пролета № 1, равного 300 м, примет вид:

$$\sigma_1 - \frac{300^2 \cdot 0,0089^2}{24 \cdot 0,77 \cdot 10^{-4} \cdot \sigma_1^2} = 18 - \frac{300^2 \cdot 0,0204^2}{24 \cdot 0,77 \cdot 10^{-4} \cdot 18^2} - \frac{17 \cdot 10^{-6}}{0,77 \cdot 10^{-4}} (10 + 5),$$

$$\sigma_1 - \frac{3860}{\sigma_1^2} = -47,8,$$

откуда

$$\sigma_1 = 8,30 \text{ кг/мм}^2,$$

для остальных пролетов $l = 175$ м;

$$\sigma_1 - \frac{175^2 \cdot 0,0089^2}{24 \cdot 0,77 \cdot 10^{-4}} = 18 - \frac{175^2 \cdot 0,0204^2}{18^2 \cdot 24 \cdot 0,77 \cdot 10^{-4}} - \frac{17 \cdot 10^{-6}}{0,77 \cdot 10^{-4}} (10 + 5),$$

откуда

$$\sigma_1 = 9,17 \text{ kg/mm}^2.$$

Следовательно, при монтаже напряжение провода должно быть

$$\sigma_1 = 8,30 \text{ kg/mm}^2.$$

Тогда при $t = -5^\circ\text{C}$ и добавочных нагрузках напряжение в проводе в пролетах с $l_2 = 175$ м, при условии, что гирлянды не отклонятся, определится из уравнения:

$$\sigma_1 - \frac{175^2 \cdot 0,0204^2}{24 \cdot 0,77 \cdot 10^{-4} \sigma_1^2} = 8,30 - \frac{175^2 \cdot 0,0089^2}{24 \cdot 0,77 \cdot 10^{-4} \cdot 8,30^2} + \frac{17 \cdot 10^{-6}}{0,77 \cdot 10^{-4}} (5 + 10),$$

$$\sigma_1 - \frac{6900}{\sigma_1^2} = 7,4;$$

откуда

$$\sigma_1 = 16,90 \text{ kg/mm}^2.$$

Стрела провеса и длина провода в пролете $l_2 = 175$ м при этих условиях будут равны:

$$f = \frac{\gamma_1 l_2^2}{8\sigma_1} = \frac{175^2 \cdot 0,0204}{8 \cdot 16,90} = 4,6 \text{ м}$$

и

$$L_0 = 175 + \frac{8}{3} \cdot \frac{4,6^2}{175} = 175,322 \text{ м.}$$

Подставляя найденное значение L_0 в уравнение (105), получим:

$$\frac{l^2 \gamma_1^2}{24\sigma^2} - L_0 \beta \sigma = L_0 - L_0 \beta \sigma_1 - l,$$

$$\frac{0,0204^2 l^2}{24\sigma^2} - 175,322 \cdot 0,77 \cdot 10^{-4} \cdot \sigma = 175,322 - 175,322 \cdot 0,77 \cdot 10^{-4} \cdot 16,90 - l,$$

$$1730 \cdot 10^{-8} \frac{l^2}{\sigma^2} - 0,0135 \sigma = 175,094 - l.$$

Задаваясь в этом уравнении значением $l > 175$ м, получим соответствующие значения σ , и по этим данным построим нужную нам кривую I' (фиг. 59).

Такая же кривая, но только для случая уменьшения пролета, должна быть построена и для пролета $l_1 = 300$ м.

При $t = -5^\circ\text{C}$ и добавочных нагрузках стрела провеса и длина провода в пролете будут равны:

$$f = \frac{l_1^2 \gamma_1}{8\sigma} = \frac{300^2 \cdot 0,0204}{8 \cdot 18} = 12,75 \text{ м}$$

и

$$L'_0 = l + \frac{8f^2}{3l} = 300 + \frac{8}{3} \cdot \frac{12,75^2}{300} = 301,435 \text{ м;}$$

тогда

$$\frac{l^3 \gamma^2}{24 \sigma^2} - L' \beta \sigma = L' - L' \beta \sigma_1 - l,$$

$$\frac{l^3 0,0204^2}{\sigma^2 \cdot 24} - 301,435 \cdot 0,77 \cdot 10^{-4} \cdot \sigma = 301,435 - 301,435 \cdot 0,77 \cdot 10^{-4} \cdot 18 - l$$

или

$$\frac{1730}{\sigma^2} \cdot l^3 \cdot 10^{-8} - 0,0232 \sigma = 301,018 - l.$$

По последнему уравнению построена кривая I, нанесенная на фиг. 59.

Помимо этих кривых, необходимо построить с помощью уравнения (115) еще две кривые зависимости отклонения гирлянды от разности натяжения по проводам соответственно для первого и остальных пролетов.

Для первого пролета будем иметь:

$$P' = \frac{l_1}{2} \gamma_1 q + \frac{l_2}{2} \gamma_2 q = \frac{300}{2} \cdot 0,0204 \cdot 70 + \frac{175}{2} \cdot 0,0204 \cdot 70 = 340 \text{ kg.}$$

Тогда уравнение (115) примет вид:

$$\sigma_1 = \frac{\lambda (S_2 - S_1)}{\sqrt{(P' + Q_1)^2 + (S_2 - S_1)^2}} = \frac{1,3 \Delta S}{\sqrt{(340 + 25)^2 + \Delta S^2}} \quad (\text{кривая II}).$$

Аналогично для остальных пролетов

$$P' = l_2 \gamma_2 q = 175 \cdot 0,0204 \cdot 70 = 250 \text{ kg}$$

и

$$\sigma_2 = \frac{\lambda (S_N - S_{N-1})}{\sqrt{(P' + Q_1)^2 + (S_N - S_{N-1})^2}} = \frac{1,3 \Delta S_N}{\sqrt{(250 + 25)^2 + \Delta S_N^2}} \quad (\text{кривая III}).$$

С помощью этих уравнений построены кривые II и III фиг. 59.

Имея все четыре кривые, можно способом, указанным в § 5 этой главы, найти распределение натяжений в отдельных пролетах, а также интересующие нас величины отклонений точек подвеса проводов.

Так как все обозначения на фиг. 59, по которой производился графический расчет, вполне совпадают с обозначениями, приведенными в теории, то здесь не дается описания построения, в табл. XXXVIII приведены лишь конечные результаты.

ТАБЛИЦА XXXVIII.

Натяжения по проводам (kg)				Отклонение точек подвеса (m)		
S_1	S_2	S_3	S_4	δ_1	δ_2	δ_3
1223	1209	1204	1201	0,056	0,034	0,016

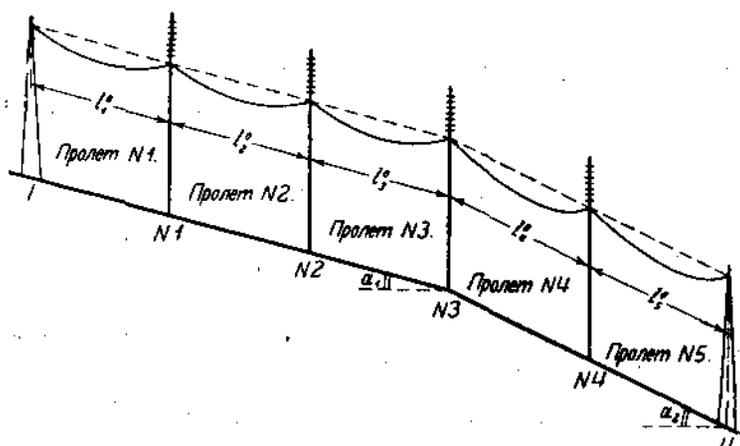
§ 6. Натяжения и стрелы провеса проводов на линиях с подвесными изоляторами, проложенных в гористых местностях.

Линии передачи, идущие по гористым местностям, весьма часто приходится по местным условиям выполнять с неодинаковыми пролетами. Это обстоятельство создает опасность получения значительных отклонений гирлянд изоляторов при изменении атмосферных условий, что может, в свою очередь, повести к большому провисанию проводов в некоторых пролетах. Решение задачи определения стрел провеса при изменении атмосферных условий осложняется в некоторых частных случаях еще тем, что трасса линии передачи на участке между двумя анкерами может изменять свой уклон. Кроме того, весьма вероятной (по климатическим условиям гористых местностей) является возможность неодинаковой нагрузки различных пролетов.

Приняв во внимание только что отмеченные обстоятельства, рассмотрим задачу определения стрел провеса при изменении атмосферных условий, сделав следующие предположения:

- 1) изменение удельных нагрузок неодинаково для всех пролетов рассматриваемого участка линии передачи между двумя анкерами;
- 2) не все пролеты линии передачи равны между собой;
- 3) разность высот точек подвеса проводов неодинакова для всех пролетов.

Сообразно сказанному, возьмем участок линии передачи, имеющий пять пролетов (см. фиг. 60), причем первые три из них равны между



Фиг. 60.

собой, но не равны двум последним. Кроме того, уклон трассы линии передачи для первых трех и последних двух пролетов возьмем неодинаковыми.

Для общности рассуждений вместо длин пролетов и горизонтальных

натяжений введем расстояния по прямой между точками подвеса проводов и натяжения в средней точке провода (см. § 6, гл. III), причем напомним, что при введении этих величин основные формулы для провода, имеющего точки подвеса на разной высоте, имеют тот же самый вид, что и для провода с точками подвеса, лежащим на одной горизонтали.

Предположим, что при некоторых атмосферных условиях, характеризующихся удельной нагрузкой γ_0 и температурой t_0 , гирлянды изоляторов занимают вертикальное положение. Очевидно, для этого должно быть выполнено равенство горизонтальных натяжений по проводам во всех пролетах, которое в общей форме может быть выражено следующим образом:

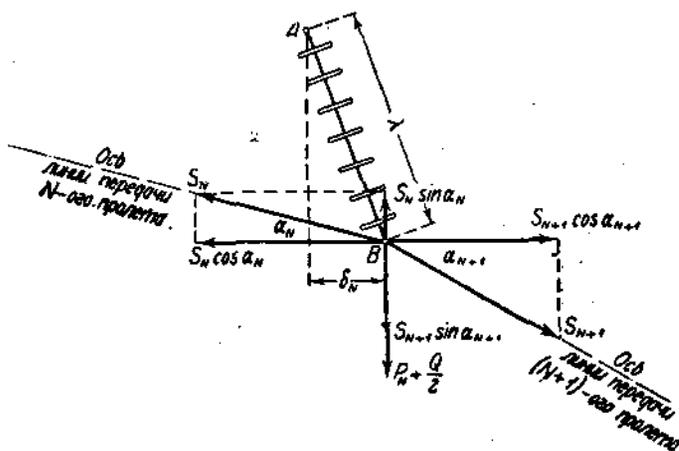
$$S_0 \cos \alpha_N = \text{const},$$

где S_{0N} — натяжение в средней точке провода N -го пролета при γ_0 и t_0 °C, α_N — угол наклона оси линии передачи к горизонту в том же пролете.

Предположим, далее, что атмосферные условия изменились, причем температура стала равной t °C, удельная же нагрузка стала неодинаковой для всех пролетов; обозначим новое значение ее для N -го пролета через γ_N .

Прежде чем приступить к определению натяжений при новых атмосферных условиях, рассмотрим условия равновесия гирлянды изоляторов.

Непосредственно из фиг. 61 можно написать в качестве условия



Фиг. 61.

равновесия гирлянды изоляторов уравнение всех действующих на нее сил, а именно:

$$\begin{aligned} & \left(P_N + \frac{Q}{2} + S_{N+1} \sin \alpha_{N+1} - S_N \sin \alpha_N \right) d_N = \\ & = (S_{N+1} \cos \alpha_{N+1} - S_N \cos \alpha_N) \sqrt{\lambda^2 - \delta_N^2}, \end{aligned} \quad (162)$$

- где P_N —вес провода с добавочными нагрузками на длине двух полу-
 пролетов,
 Q —вес гирлянды изоляторов,
 S_N и S_{N+1} —натяжения в средней точке провода смежных с гирляндой
 пролетов,
 δ_N —горизонтальное отклонение гирлянды изоляторов,
 λ —длина гирлянды изоляторов,
 α_N и α_{N+1} —углы наклона оси линии передачи к горизонту в смежных
 с гирляндой изоляторов пролетах.

Теперь перейдем к решению основной задачи, для чего прежде всего подсчитаем напряжения материала проводов в различных пролетах, которые наступят при новых атмосферных условиях (γ_N и t), если гирлянды изоляторов сохраняют свое вертикальное положение и, следовательно, расстояния между точками подвеса проводов (l_{0N}) не изменяются. Очевидно этот пересчет можно сделать по основному уравнению состояния провода, а именно:

$$\sigma_{0N} - \frac{l_{0N}^2 \gamma_0^2}{24 \beta \sigma_{0N}^2} = \sigma'_N - \frac{l_{0N}^2 \gamma_N^2}{24 \beta \sigma_N'^2} - \frac{\alpha}{\beta} (t_0 - t), \quad (163)$$

- где σ_{0N} —напряжение материала провода в средней точке его при начальных атмосферных условиях (γ_0 и t_0),
 l_{0N} —расстояние по прямой между точками подвеса провода при вертикальном положении гирлянд изоляторов,
 σ'_N —напряжение материала провода в средней точке его при новых атмосферных условиях (γ_N и t) и при вертикальном положении гирлянд изоляторов.

Найдя по уравнению (163) напряжение σ'_N определим длину провода в любом пролете при вертикальном положении гирлянд изоляторов;

$$L'_N = l_{0N} + \frac{l_{0N}^2 \gamma_N^2}{24 \sigma_N'^2}. \quad (164)$$

После этого строим для каждого пролета (если, конечно, все они друг от друга чем-нибудь отличаются) кривую зависимости натяжения по проводу от изменения расстояния между точками подвеса его. Это построение выполняем по ранее выведенному уравнению:

$$\frac{l_N^3 \gamma_N^2}{24 \sigma_N^2} - L'_N \beta \sigma_N = L'_N (1 - \beta' \sigma_N) - l_N, \quad (165)$$

- где l_N —расстояние между точками подвеса провода,
 σ_N —напряжение в средней точке провода,
 L'_N —длина провода при вертикальном положении гирлянд изоляторов, найденная по уравнению (164),
 σ'_N —напряжение в средней точке провода, подсчитанное по уравнению (163).

Полученные кривые будут иметь вид, представленный на фиг. 31. Выполняя для каждого пролета указанные построения, приступаем

к определению натяжений, производя его графо-аналитическим методом. Задаемся натяжением S_1 (или σ_1) в первом пролете и по соответствующей кривой находим расстояние l_1 между точками подвеса. Для упрощения рассуждений предположим здесь (как и для всех последующих пролетов), что отклонение гирлянды изоляторов не меняет наклона прямой, соединяющей точки подвеса провода, т. е. угол α для данного пролета остается величиной, постоянной при любом положении гирлянд изоляторов.

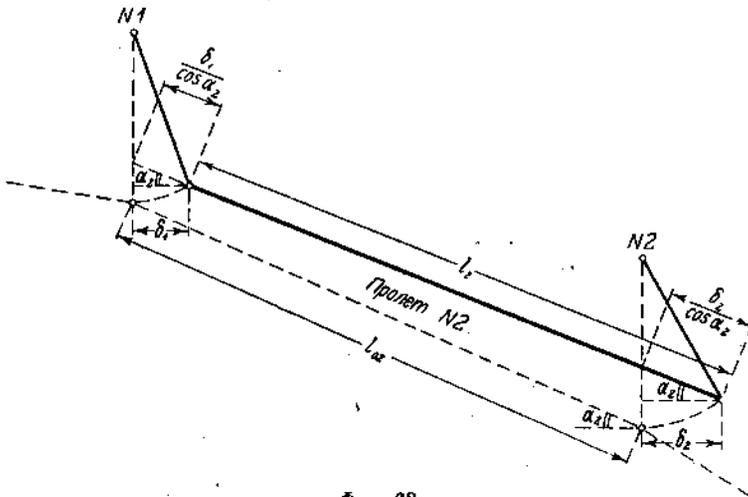
При сделанном допущении можно, очевидно, написать равенство:

$$l_1 - l_{01} = \frac{\delta_1}{\cos \alpha_1},$$

где δ_1 — горизонтальное отклонение гирлянды изоляторов на первой промежуточной опоре.

Из последнего соотношения можно найти δ_1 , а затем, воспользовавшись уравнением (162), написанным применительно к опоре № 1, определить натяжение S_2 по проводу в средней точке его для второго пролета.

Зная S_2 , определяем по соответствующей пролету № 2 кривой [уравнение (165)] расстояние l_2 между точками подвеса провода второго про-



Фиг. 62.

лета, которое выражается (фиг. 62) через отклонение гирлянд изоляторов (при сделанном нами допущении) следующим образом:

$$l_2 - l_{02} = \frac{\delta_2}{\cos \alpha_2} - \frac{\delta_1}{\cos \alpha_2}.$$

Из полученного соотношения находим отклонение δ_2 гирлянды изоляторов на второй опоре.

Поступая аналогично для всех последующих пролетов, мы найдем величины натяжений в средней точке провода S_N , новые значения величин l_N и соответствующих им отклонений δ_N гирлянд изоляторов для всех пролетов. Критерием правильности выбора величины S_1 будет служить равенство нулю отклонения гирлянды изоляторов на анкерной опоре II.

Необходимо отметить, что при неизменном уклоне трассы линии

передачи на рассматриваемом участке ее, когда угол α одинаков для всех пролетов, задача определения натяжений решается несколько проще помощью графического метода. Для этого нужно, кроме кривых $S = f(l)$ построить для каждой опоры (если условия, в которых они находятся, неодинаковы) еще кривые отклонения гирлянды изоляторов в зависимости от разности натяжений в средней точке провода двух смежных с гирляндой пролетов. Построение этих кривых производим по уравнению (162), которое после решения его относительно δ_N , примет при $\alpha_N = \text{const} = \alpha$ следующий вид:

$$\delta_N = \lambda \frac{\cos \alpha (S_{N+1} - S_N)}{\sqrt{\left[P_N + \frac{Q}{2} + \sin \alpha (S_{N+1} - S_N) \right]^2 + \cos^2 \alpha (S_{N+1} - S_N)^2}} \quad (166)$$

По существу графический метод в данном случае ничем не отличается от изложенных ранее (см. гл. IV). Применение его иллюстрируется нижеприведенным примером.

После того, как натяжения S_N в средних точках провода найдены для всех пролетов, то легко уже могут быть определены стрелы провеса провода, приближение его к траверсе опоры и т. д., пользуясь для этого формулами, приведенными в книге.

Пример 29. Между двумя анкерными опорами линии электропередачи с медными проводами сечением $q = 70 \text{ mm}^2$, проложенной в горизонтальной местности, первые три пролета (пролеты №№ 1, 2, 3 — фиг. 60) имеют длину $l_1 = 110 \text{ m}$ и разность высот точек подвеса провода на двух соседних опорах $h_1 = 18 \text{ m}$ (что соответствует углу наклона линии к горизонту $\alpha_1 = 9^\circ 32'$), а остальные два пролета длину $l_2 = 174,5 \text{ m}$ и разность высот точек подвеса провода на двух соседних опорах $h_2 = 10 \text{ m}$ ($\alpha_2 = 3^\circ 17'$). Монтаж линии производился при температуре $t_1 = +10^\circ \text{C}$, причем гирлянды изоляторов занимали вертикальное положение. Требуется определить распределение натяжений по проводам в пролетах при $t_2 = -5^\circ \text{C}$ и ветре со скоростью $v = 20 \text{ m/sec}$, если в пролетах № 1 и № 2 провода свободны от гололеда, а в остальных пролетах провода покрыты слоем льда с толщиной стенки $b = 10 \text{ mm}$. Максимальное допускаемое напряжение в материале провода в нижней точке его $\sigma_{\text{max}} = 18 \text{ kg/mm}^2$. Длина гирлянды $\lambda = 1,3 \text{ m}$, а вес ее $Q = 50 \text{ kg}$. Наивысшая температура данной местности $t_3 = -30^\circ \text{C}$.

Введем за исходные величины, как это указывалось в теории, расстояния между точками подвеса провода и напряжение материала провода в середине пролетов его.

В рассматриваемом случае для пролетов № 1, № 2 и № 3 этими величинами будут:

$$l_{01} = \frac{l_1}{\cos \alpha_1} = \frac{110}{\cos 9^\circ 29'} = 111,7 \text{ m}$$

и

$$\sigma'_{\text{max}} = \frac{\sigma_{\text{max}}}{\cos \alpha_1} = \frac{18}{\cos 9^\circ 29'} = 18,25 \text{ kg/mm}^2,$$

а для пролетов № 4 и № 5

$$l_{02} = \frac{l_2}{\cos \alpha_2} = \frac{174,5}{\cos 3^\circ 17'} = 175 \text{ м}$$

и

$$\sigma''_{\max} = \frac{\sigma_{\max}}{\cos \alpha_2} = \frac{18}{\cos 3^\circ 17'} = 18,05 \text{ кг/мм}^2.$$

Определим напряжение в средней точке провода, которое должно быть допущено при монтаже линии ($t = +10^\circ \text{C}$), исходя из условия, чтобы максимальное напряжение в нижней точке провода во всех пролетах было бы не более 18 кг/мм^2 . Так как при атмосферных условиях примера критический пролет для медного провода сечением $q = 70 \text{ мм}^2$ равен $l_{кр} = 99 \text{ м}$ (см. пример 7), то наибольшее напряжение в материале провода будет при $t_1 = -5^\circ \text{C}$ и добавочных нагрузках.

Напряжение материала провода при $t_1 = +10^\circ \text{C}$ и неизменяющемся пролете определится:

для пролетов № 1, № 2 и № 3

$$\sigma_1 - \frac{l_{01}^2 \gamma_1^2}{24 \beta \sigma_1^2} = \sigma'_{\max} - \frac{l_{02}^2 \gamma_2^2}{24 \beta \sigma_1^2} - \frac{\alpha}{\beta} (t_1 - t_2),$$

$$\sigma_1 - \frac{111,7^2 \cdot 0,0089^2}{24 \cdot 0,77 \cdot 10^{-4} \sigma_1^2} = 18,25 - \frac{111,7^2 \cdot 0,0204^2}{24 \cdot 0,77 \cdot 10^{-4} \cdot 18,25^2} - \frac{17 \cdot 10^{-6}}{0,77 \cdot 10^{-4}} (10 + 5),$$

откуда

$$\sigma_1 = 11,12 \text{ кг/мм}^2,$$

а для пролетов № 4 и № 5

$$\sigma_2 - \frac{175^2 \cdot 0,0089^2}{24 \cdot 0,77 \cdot 10^{-4} \sigma_2^2} = 18,05 - \frac{175^2 \cdot 0,0204^2}{24 \cdot 0,77 \cdot 10^{-4} \cdot 18,05^2} - \frac{17 \cdot 10^{-6}}{0,77 \cdot 10^{-4}} (10 + 5),$$

откуда

$$\sigma_2 = 9,18 \text{ кг/мм}^2.$$

Следовательно, монтаж линии должен производиться при температуре $t_1 = +10^\circ \text{C}$ с таким расчетом, чтобы напряжение материала провода в средней точке пролета ее для пролетов № 4 и № 5 было равно:

$$\sigma_2 = 9,18 \text{ кг/мм}^2,$$

а для пролетов № 1, № 2 и № 3 найденное из уравнения $S_0 = S_1 \cos \alpha_1 = S_2 \cos \alpha_2$, где S_1 и $\cos \alpha_1$ — натяжение по проводу и наклон трассы линии передачи в пролете № 1, а S_2 и $\cos \alpha_2$ — то же в пролете № 4; S_0 — горизонтальное натяжение по проводам, равное при монтаже для всех пролетов.

Таким образом, имеем

$$\sigma_1 \cos 9^\circ 32' = 9,18 \cos 3^\circ 17'$$

или

$$\sigma_1 = \frac{9,18 \cdot 0,9983}{0,9862} = 9,28 \text{ кг/мм}^2.$$

Перейдем теперь к построению кривых зависимости изменения натяжения по проводу от длины пролета при $t_2 = -5^\circ \text{C}$: для пролетов № 3, № 4 и № 5 при $\gamma_7 = 0,0204 \text{ kg/m}\cdot\text{mm}^2$, а для пролетов № 1 и № 2 при $\gamma_6 = 0,00966 \text{ kg/m}\cdot\text{mm}^2$ (удельные нагрузки — см. табл. XI).

Из рассмотрения фиг. 60 и условий распределения добавочных нагрузок по пролетам, можно заранее сказать, что пролеты № 1 и № 2 удлинятся, а пролеты № 4 и № 5 сократятся. Что же касается пролета № 3, то определенного заключения заранее сделать нельзя, а поэтому для него должны быть построены обе ветви (увеличение и уменьшение пролета) кривой $S = f(\pm \Delta l)$.

Уравнение кривой $S = f(\Delta l)$ для пролетов № 4 и № 5 при $t_2 = -5^\circ \text{C}$ и добавочных нагрузках найдется из следующих соотношений:

$$f_{02} = \frac{l_{02}^3 \gamma_7}{8\sigma''_{\text{max}}} = \frac{174^3 \cdot 0,0204}{8 \cdot 18,05} = 4,34 \text{ m}$$

и

$$L_0 = l_{02} + \frac{8}{3} \frac{f_{02}^3}{l_{02}} = 175 + \frac{8}{3} \frac{4,34^3}{175} = 175,29 \text{ m.}$$

Подставляя эти соотношения в уравнение (105), получим:

$$\frac{l^3 \gamma_7^2}{24\sigma^2} - L_0 \beta \sigma = L_0 (1 - \beta \sigma_0) - l \quad (105)$$

или

$$\frac{l^3 0,0204^2}{24 \sigma^2} - 175,29 \cdot 0,77 \cdot 10^{-4} \sigma = 175,29 (1 - 0,77 \cdot 10^{-4} \cdot 18,05) - l,$$

$$1735 \cdot 10^{-8} \frac{l^3}{\sigma^2} - 0,0135 = 175,04 - l.$$

С помощью этого уравнения построена кривая I фиг. 63.

Для построения такой же кривой $S = f(\Delta l)$ для пролета № 3, необходимо предварительно найти напряжение в средней точке провода при $t = -5^\circ \text{C}$. Из уравнения (163)

$$\sigma_1 - \frac{l_{01}^3 \gamma_7^2}{24 \cdot 0,77 \cdot 10^{-4} \sigma_1^2} = \sigma_0 - \frac{l_{01}^3 \gamma_7^2}{24 \cdot 0,77 \cdot 10^{-4} \sigma_0^2} - \frac{\alpha}{\beta} (t_2 - t_1)$$

имеем

$$\sigma_1 - \frac{111,7^3 \cdot 0,0204^2}{24 \cdot 0,77 \cdot 10^{-4} \sigma_1^2} = 9,28 - \frac{111,7^3 \cdot 0,0089^2}{24 \cdot 0,77 \cdot 10^{-4} \cdot 9,28^2} - \frac{17 \cdot 10^{-6}}{0,77 \cdot 10^{-4}} (10 + 5);$$

откуда имеем

$$\sigma_1 = 16,57 \text{ kg/mm}^2.$$

При этих условиях

$$f_{02} = \frac{l_{02}^3 \gamma_7}{8\sigma} = \frac{111,7^3 \cdot 0,0204}{8 \cdot 16,57} = 1,90 \text{ m}$$

и

$$L_{02} = l_{01} + \frac{8f_{02}^3}{3l_{01}} = 111,7 + \frac{8}{3} \frac{1,90^3}{111,7} = 111,787 \text{ m;}$$

подставляя эти величины в уравнение (105), получим:

$$\frac{0,0204^2 l^2}{24 \sigma^2} - 111,787 \cdot 0,77 \cdot 10^{-4} \sigma = 111,787 \cdot (1 - 0,77 \cdot 10^{-4} \cdot 16,57)$$

или

$$\frac{1730 l^2 10^{-8}}{\sigma^2} - 0,0086 \sigma = 111,645 - l.$$

По этому уравнению построены кривые II' и II'' фиг. 63 (для случая удлинения и сокращения пролета).

Аналогично, для пролетов № 1 и № 2 имеем:

$$\sigma_1 - \frac{111,7^2 \cdot 0,00966^2}{24 \cdot 0,77 \cdot 10^{-4} \sigma_1^2} = 9,28 - \frac{111,7^2 \cdot 0,0089^2}{24 \cdot 0,77 \cdot 10^{-4} \cdot 9,28^2} - \frac{17 \cdot 10^{-6}}{0,77 \cdot 10^{-4}} (10 + 5);$$

откуда

$$\sigma_1 = 11,3 \text{ kg/mm}^2$$

и

$$l_{01} = \frac{111,7^2 \cdot 0,00966}{8 \cdot 11,3} = 1,33 \text{ м},$$

$$L_{01} = 111,7 + \frac{8}{3} \frac{1,33^2}{111,7} = 111,7423 \text{ м}.$$

Подставляя найденные величины в уравнение (105), получим:

$$\frac{0,00966^2 l^2}{24 \cdot \sigma^2} - 111,7423 \cdot 0,77 \cdot 10^{-4} \sigma = 111,7423 (1 - 0,77 \cdot 10^{-4} \cdot 11,3) - l,$$

$$\frac{388 \cdot 10^{-8} l^2}{\sigma^2} - 0,0086 \sigma = 111,645 - l.$$

По этому уравнению построена кривая III (фиг. 63).

Вследствие того, что на рассматриваемом участке линии имеются всего лишь два уклона, задачу целесообразнее будет решить с помощью графического метода (за исключением нахождения величины S_4). Для этого, пользуясь уравнением (166), построим для пролетов $l_{01} = 111,7$ м и $l_{02} = 175$ м, $\gamma_7 = 0,0204 \text{ kg/m} \cdot \text{mm}^2$ и $\gamma_8 = 0,00966 \text{ kg/m} \cdot \text{mm}^2$ кривые зависимости $\delta_0 = f(\Delta S)$, где δ_0 есть отклонение точки подвеса по отношению к прямой, соединяющей точки подвеса, связанное с горизонтальным отклонением точки подвеса отношением

$$\delta_{0N} = \frac{\delta_N}{\cos \alpha_N}.$$

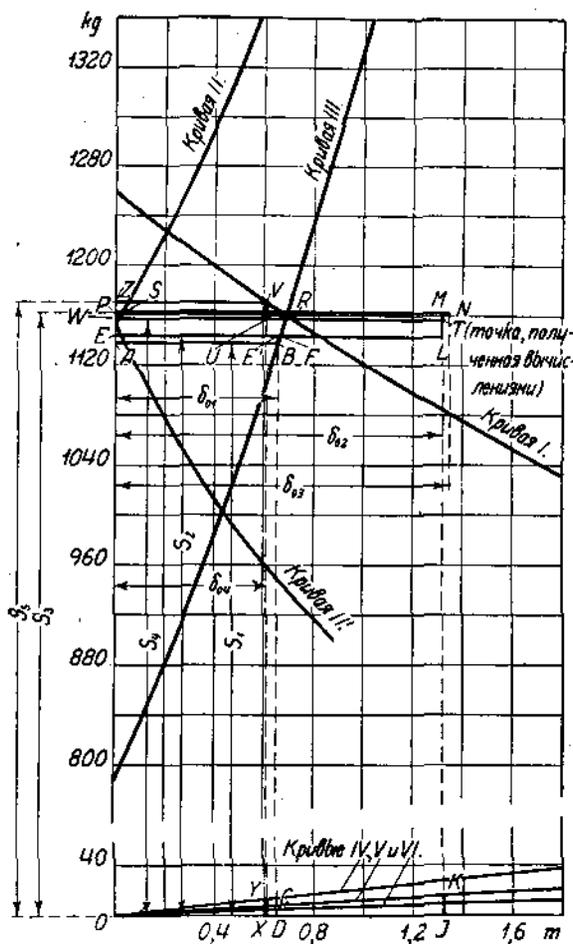
Для опоры № 4 будем иметь:

$$\delta_{04} = \frac{\delta_4}{\cos \alpha_4} = \frac{(S_{N+1} - S_N) \lambda}{\sqrt{\left[P_N + \frac{Q}{2} + \sin \alpha (S_{N+1} - S_N) \right]^2 + \cos^2 \alpha (S_{N+1} - S_N)^2}}; \quad (166)$$

подставляя в него $P_N = l_0 q \gamma_7 = 0,0204 \cdot 70 \cdot 175 = 250$ kg, $\lambda = 1,3$ m, $Q = 50$ kg и $\alpha = 3^\circ 17'$, получим уравнение

$$\delta_{01} = \frac{1,3 \Delta S_N}{\sqrt{\left(250 + \frac{50}{2} + 0,057 \Delta S_N\right)^2 + 0,9983^2 \Delta S_N^2}}$$

по которому и построена кривая IV (Фиг. 63).



Фиг. 63.

Для опоры № 2 в уравнение (166) необходимо подставить

$$P = l_0 q \frac{\gamma_6 + \gamma_7}{2} = 111,7 \cdot 70 \cdot \frac{0,00966 + 0,0204}{2} = 119 \text{ kg}, Q = 50 \text{ kg}, \lambda = 1,3 \text{ m}$$

и $\alpha = 9^\circ 31'$. Тогда уравнение примет вид:

$$\delta_{01} = \frac{\delta_2}{\cos \alpha_1} = \frac{1,3 \Delta S}{\sqrt{\left(119 + \frac{50}{2} + 0,16476 \Delta S\right)^2 + 0,986^2 \Delta S^2}}$$

По этому уравнению построена кривая V (Фиг. 63).

Наконец, для построения кривой VI для опоры № 1 подставляем в уравнение $P = 0,00966 \cdot 70 \cdot 111,7 = 75,5$ kg, $Q = 50$ kg, $\lambda = 1,3$ m, $\alpha = 9^\circ 32'$ и получаем

$$\delta_{01} = \frac{\delta_1}{\cos \alpha_1} = \frac{1,3 AS}{\sqrt{\left(75,5 + \frac{50}{2} + 0,16476 AS\right)^2 + 0,986^2 AS^2}}$$

С помощью этих шести кривых находим распределение натяжений по проводам в пролетах. Задаемся натяжением $S_1 = 1138$ kg (см. фиг. 63) и обычным путем находим натяжения по проводам в первых трех пролетах и отклонения первых точек подвеса. На фиг. 63 обозначены:

натяжения по про- водам	сокращения и удли- нения пролетов
$S_1 = AO$	$\Delta l_{01} = AB$
$S_2 = OE = LJ = E'D$	$\Delta l_{02} = EF = E'L$
$S_3 = OP$	$\Delta l_{03} = PS = MN$
разность натяжений	отклонения точек подвеса
$\Delta S_1 = CD = BE'$	$\delta_0 = AB$
$\Delta S_2 = JK = ML$	$\delta_{01} = EL$
	$\delta_{02} = PN$

В результате этих построений находим:

$$S_2 = 1162 \text{ kg}, \quad \delta_{02} = 0,135 \text{ m.}$$

Соответствующее этой величине δ_{02} — горизонтальное отклонение точки подвеса у опоры № 3 (δ_3) будет:

$$\delta_3 = \delta_{02} \cos \alpha_1 = 0,135 \cdot 0,986 = 0,133 \text{ m.}$$

Найденные значения S_3 и δ_3 необходимо вставить в уравнение (162), написанное применительно к опоре № 3. Из условия задачи видно, что на гирлянду опоры № 3 приходится вес двух полупролетов проводов, из коих один имеет длину $l_{01} = 111,7$ m, а другой $l_{02} = 175$ m. Вследствие этого

$$P_N = 0,0204 \cdot 70 \cdot \frac{175 + 111,7}{2} = 205 \text{ kg.}$$

Подставляя все величины в уравнение (162), получим:

$$\begin{aligned} \left(P_N + \frac{Q}{2} + S_1 \sin \alpha_2 - S_3 \sin \alpha_1 \right) \delta_3 &= (S_1 \cos \alpha_2 - S_3 \cos \alpha_1) \sqrt{\lambda^2 - \delta_3^2}, \\ \left(205 + \frac{50}{2} + S_1 \sin 3^\circ 17' - 1162 \sin 9^\circ 32' \right) 0,135 &= \\ &= (S_1 \cos 3^\circ 17' - 1162 \cos 9^\circ 32') \sqrt{1,3^2 - 0,135^2} \end{aligned}$$

или

$$(230 + 0,057 S_4 - 1162 \cdot 0,1656) 0,135 = \\ = (S_4 \cdot 0,9983 - 1162 \cdot 0,986) \sqrt{1,3^2 - 0,135^2};$$

откуда находим

$$S_4 = 1157.$$

Хотя абсолютная величина $S_4 < S_3$, но горизонтальная слагающая $S_4 \cos \alpha_1 > S_3 \cos \alpha_2$ и, следовательно, гирлянда отклонится по направлению к анкерной опоре № 2.

Зная S_4 , находим по кривой $\Delta l_4 = 0,0717$. Согласно фиг. 62 для нашего пролета имеем:

$$l_0 - l_4 = -\Delta l_4 = \frac{\delta_4}{\cos \alpha_2} - \frac{\delta_2}{\cos \alpha_2};$$

откуда интересующая нас величина

$$\frac{\delta_4}{\cos \alpha_2} = \frac{\delta_2}{\cos \alpha_2} - \Delta l_4.$$

Так как δ_2 есть горизонтальное отклонение точки подвеса, то, следовательно,

$$\frac{\delta_2}{\cos \alpha_2} = \delta_{02} \frac{\cos \alpha_1}{\cos \alpha_2};$$

подставляя в это уравнение ранее найденные величины, получим:

$$\delta_{04} = \frac{\delta_4}{\cos \alpha_2} = 0,135 \frac{0,9862}{0,9983} - 0,0717 = 0,0613.$$

После произведенных вычислений откладываем отрезок (фиг. 63)

$$TW = \delta_{02} \frac{\cos \alpha_1}{\cos \alpha_2}$$

параллельно оси абсцисс, отстоящий от нее на расстоянии $S_4 = 1157$ kg и обычным способом находим остальные величины, которые обозначены на фиг. 63:

натяжения по про- водам $S_4 = OW$ $S_5 = OZ = VX$	сокращения проле- тов $\Delta l_{01} = WR = TU$ $\Delta l_{02} = ZW$
разность натяжений по проводам $\Delta S_1 = S_5 - S_1 = XY = VU$	отклонения точек подвеса $\delta_{04} = PU = ZW$ $\delta_{01} = 0$

Выполнение условия $\delta_{01} = 0$, указывает на то, что величиной $S_1 = 1134$ kg задались правильно.

Результаты подсчетов приведены в табл. XXXIX.

ТАБЛИЦА XXXIX.

Натяжения по проводам kg					Отклонения точек подвеса m			
S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	ξ_{01}	ξ_{02}	ξ_{03}	ξ_{04}
1134	1142	1162	1157	1170	0,065	0,13	0,135	0,063

Наибольшая стрела провеса, очевидно, будет в пролете № 5. Для ее нахождения определим сперва наибольшее расстояние по вертикали от провода до прямой, соединяющей точки подвеса:

$$f_3 = \frac{l_3^2 \gamma_7}{8 \sigma_{01}} = \frac{(175 - 0,0063)^2 \cdot 0,0204}{\frac{8 \cdot 1170}{70}} = 4,68 \text{ м.}$$

Подставив эту величину в формулу:

$$F_N = f_N \left(1 + \frac{h_N}{4f_N} \right)^2,$$

получим:

$$F_5 = 4,68 \left(1 + \frac{10}{4 \cdot 4,68} \right)^2 = 11 \text{ м.}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ.

Нормы механического расчета электрических воздушных линий сильного тока ¹⁾.

(Утверждены IX Всесоюзным Электротехническим Съездом).

Нормы механического расчета электрических воздушных линий сильного тока.

§ 1. Ниже помещенные нормы относятся ко всем воздушным проводам сильного тока как голым, так и изолированным, за исключением контактного оборудования железных дорог.

Примечание. Участки линий сильного тока, проходящие по заселенным местам или пересекающие железные или шоссейные дороги, судоходные или славные реки, телеграфные, телефонные и сигнализационные провода, а также провода для передачи электрической энергии, должны быть спроектированы с повышенной надежностью по особым правилам, утвержденным ВЭС или ЦЭС.

§ 2. Для воздушных линий сильного тока могут применяться деревянные, железные и железобетонные опоры. Провода линии должны быть закреплены на анкерных опорах, расстояние между которыми не должно превышать 3 км в случае применения жестких промежуточных опор и 1,5 км в случае применения гибких промежуточных опор.

§ 3. Провода могут быть выполнены из меди, бронзы, алюминия, стали и железа.

Могут применяться и биметаллические провода.

Провода, как правило, должны быть многопроволочные; однако, для линий сельско-хозяйственного назначения с рабочим напряжением не свыше 22 кV допускается применение однопроволочных проводов сечением не свыше 16 мм². Провода алюминиевые должны быть всегда многопроволочные.

Сечение проводов не должно быть меньше:

для меди при низком напряжении	6 мм ²
" " " высоком " 	10 "
для железа при низком напряжении	10 "
" " " высоком " 	10 "
для стали и бронзы при низком напряжении	6 "
" " " " " высоком " 	10 "
для алюминия при низком напряжении	16 "
" " " высоком " 	25 "

¹⁾ Приведенные ниже нормы являются общими нормами. Нормы при пересечении линий слабого тока и других особых случаев см. специальные издания.

(Примечание автора).

Примечание 1. Низким считается напряжение не свыше 250 В по отношению к земле.

Примечание 2. Ввиду того, что железная, стальная и бронзовая проволока различаются в сортаментах не по площади сечения, а по диаметру, следует считать за наименьший допустимый диаметр для однопроволочных железных проводов 3,5 мм (что отвечает площади сечения 9,62 мм²), для однопроволочных стальных и бронзовых проводов — 2,75 мм (что отвечает площади сечения 5,94 мм²).

§ 4. При наибольшем провисании провода расстояние наименьшей точки его от земли не должно быть менее:

а) при пересечении мощевых и шоссежных дорог 6 м для проводов низкого и 7 м — для проводов высокого напряжения;

б) при пересечении грунтовых дорог постоянного пользования 6 м как для проводов низкого, так и для проводов высокого напряжения;

в) при пересечении несудоходных и несплавных рек 5 м для проводов низкого и 6 м для проводов высокого напряжения, считая от уровня льда зимой, но не менее 3 м над уровнем высоких вод в половодье;

г) во всех остальных случаях (кроме предусмотренных особыми правилами) 5 м для проводов низкого и 6 м для проводов высокого напряжения.

§ 5. Если для районов, в которых предполагается сооружение линии передачи энергии, имеется достаточно продолжительный и надежный ряд наблюдений над скоростью ветра и его направлением, над температурой воздуха и над интенсивностью гололеда, могущего образоваться на проводах, то при определении наименьшего сочетания внешних сил, действующих на линию передачи энергии, и температур надлежит исходить из означенных данных.

При отсутствии наблюдений надлежит принимать для средних климатических условий СССР: за скорость ветра при гололеде, при опорах высотой до 30 м, 20 м/сек, наивысшую температуру +40° С, наименьшую температуру —30° С, толщину слоя гололеда 1 см при удельном весе льда 0,9.

В районах, где по условиям местности могут быть ожидаемы особенно сильные ветры, особенно сильный гололед, особенно высокие или низкие температуры, приведенные выше нормы должны быть соответственно изменены.

В районах же, где заведомо могут быть особенно сильные гололеды, надлежит принимать толщину слоя гололеда 2 см при удельном весе льда 0,9.

Надлежит для таких районов провода располагать в одной горизонтальной плоскости.

§ 6. Давление ветра на опоры, провода и троссы вычисляется по формуле $P = \alpha v^2 F$, где P — давление ветра в килограммах на опору или провод, F — площадь в квадратных метрах проекции опоры или провода на плоскость, нормальную направлению ветра, v — скорость ветра в метрах в секунду, α — коэффициент, зависящий от формы поверхности, на которую действует ветер.

Коэффициент α принимается:

для плоских поверхностей 0,09

для цилиндрических поверхностей 0,06

При учете давления ветра принимается, что последний действует горизонтально.

Для решетчатых опор в расчет вводятся две решетки: передняя наветренная и задняя подветренная, причем давление ветра на обе решетки считается по фактической площади стержней каждой решетки.

Примечание. При средней скорости ветра в 20 м/сек принимается давление ветра на 1 м² проекции, перпендикулярной направлению ветра: для плоских поверхностей 36 кг/м², для цилиндрических поверхностей 24 кг/м².

§ 7. Допускаемое напряжение для однопроволочных проводов и троссов из любого материала, в условиях нормальной службы линии, не должно превышать

одной трети, а для многопроволочных проводов и троссов—половины временного сопротивления проволоки на разрыв, определяемого техническими условиями на поставку провода и тросса и соответственными испытаниями проволоки.

Для стальных защитных троссов, поддерживающих при обрыве проводов конструкцию опор, напряжение при обрыве проводов не должно превышать 0,7 временного сопротивления проволоки разрыву.

Для проводов биметаллических надлежит проверить наибольшие напряжения в каждом из металлов, с тем, чтобы они при крайних колебаниях нагрузки и температуры не превосходили допускаемых, указанных выше величин.

При отсутствии предварительных данных о свойствах проволоки, из которой изготовлен провод или тросс, следует при расчетах руководствоваться данными, приводимыми в нижеследующей таблице:

	Медь твердотя- нутая	Алюминий твердотя- нутый	Железо	Сталь
1. Удельный вес	8,95	2,7 + 2,75	7,8	7,95
2. Коэффициент линейного рас- ширения	$17 \cdot 10^{-6}$	$23 \cdot 10^{-6}$	$12 \cdot 10^{-6}$	$12,5 \cdot 10^{-6}$
3. Модуль упругости (kg/mm ²)	13 000	7 000	19 000	20 000 + 21 000
4. Временное сопротивление (kg/mm ²)	40	20	44	70 + 120
5. Проводимость при + 15° С .	57	34,5	7,2	6,25 + 5,7

Примечание. При расчете линий передач с многопроволочными проводами и троссами, значение модуля упругости для них принимается такое же, что и для проволоки.

§ 8. Расчет прочности проводов и троссов надлежит производить, исходя из следующих предположений: а) для пролетов, больших критического: провод покрыт гололедом, температура — 5° С, ветер действует нормально к направлению линии передачи на данном участке; б) для пролетов, меньших критического: ветер и гололед отсутствуют, температура—наивысшая в данной местности.

Примечание. Требования §§ 8—9 и 11—16 относятся к случаю средних климатических условий СССР, указанных в § 5.

§ 9. Определение максимального провисания проводов и троссов надлежит производить для того из упоминаемых ниже двух случаев, который дает наибольшую стрелу провеса проводов и троссов:

1) провода и троссы покрыты слоем гололеда, температура — 5°С, ветер отсутствует;

2) ветер и гололед отсутствуют, температура наивысшая.

§ 10. По своему назначению опоры делятся на:

1) промежуточные или поддерживающие опоры, назначение которых поддерживать провода; применяются на прямых участках линии;

2) угловые опоры, назначение которых выдерживать натяжение проводов, образующих между собой угол; применяются в местах поворота линии;

3) анкерные опоры, назначение которых создавать на линии неподвижные точки;

4) конечные опоры, подверженные натяжению только с одной стороны;

5) опоры специального назначения, например, для транспортировки проводов, установки секционных разъединителей и пр.

Угловые опоры могут одновременно служить в качестве анкерных, но в таком случае они должны быть соответственно рассчитаны.

§ 11. Для определения высоты опор надлежит исходить из наименьшего допускаемого § 4 расстояния наименьшей точки провода от земли и из наибольшей стрелы провеса провода, определяемой согласно § 9.

§ 12. Анкерные опоры должны быть рассчитаны для следующих случаев нагрузки:

- 1) провода и троссы не оборваны;
- 2) оборваны все провода одного пролета при необорванных троссах;
- 3) оборваны все троссы одного пролета при необорванных проводах;
- 4) оборваны два провода одного пролета, дающие наибольший крутящий момент на опору; троссы не оборваны.

Принимается, что обрыв проводов и троссов происходит при -5°C и ветре, причем гололед считается сброшенным.

В районах, где завело могут быть особенно сильные гололеды, нагрузка по пункту 2 § 12 изменяется следующим образом: оборваны две трети всех проводов одного пролета при необорванных троссах. При этом принимается, что во всех случаях обрыв происходит при -5°C , причем гололед считается не сброшенным.

§ 13. Все остальные не анкерные опоры должны быть рассчитаны для следующих случаев нагрузки:

- 1) провода и троссы не оборваны;
- 2) оборваны два провода в одном пролете, дающие наибольший изгибающий момент на опору; троссы не оборваны;
- 3) оборваны два провода в одном пролете, дающие наибольший крутящий момент на опору; троссы не оборваны.

Принимается, что обрыв проводов происходит при -5°C и ветре, причем гололед считается сброшенным.

Примечание 1. Конечные опоры рассчитываются только по п. 1 настоящего параграфа.

Примечание 2. Элементы опоры должны быть рассчитаны на наибольшие усилия, полученные из указанных в §§ 12 и 13 случаев нагрузки.

§ 14. Силами, действующими на опору при необорванных проводах, надлежит считать:

- 1) собственный вес опоры;
- 2) вес изоляторов и покрытых гололедом проводов и троссов, приходящийся на данную опору;
- 3) давление ветра на опору, действующего перпендикулярно к направлению линии;
- 4) давление ветра на обледенелые провода и троссы, действующего перпендикулярно к направлению линии.

При расчете угловых опор направление ветра следует принимать либо по равнодействующей угла, либо нормально к большему пролету, в зависимости от того какой из этих случаев вызывает большие усилия в опоре.

При угловых опорах во всех случаях, а также при всех опорах, у которых натяжения с обеих сторон неодинаковы, следует к перечисленным усилиям прибавить равнодействующую натяжений всех проводов и троссов в обоих пролетах.

Если оба смежных пролета, или хотя бы один из них, менее критического, то в таком случае следует проверить опору на действие усилий, имеющих место при наименьшей температуре при отсутствии ветра и гололеда.

§ 15. Силами, действующими на анкерную опору при всех оборванных проводах одного пролета, следует считать:

- 1) собственный вес опоры;
- 2) вес изоляторов и свободных от гололеда проводов и троссов, приходящийся на данную опору;

3) равнодействующую натяжения всех проводов или же всех троссов одного из пролетов при -5°C , ветре и сброшенном гололеде;

4) давление ветра на опору, действующего нормально направлению необорванных проводов;

5) давление ветра на необледенелые необорванные провода и троссы, действующего нормально направлению проводов.

В районах, где заведомо могут быть особенно сильные гололеды, силами, действующими на анкерную опору при обрыве двух третей проводов одного пролета, следует считать:

1) собственный вес опоры;

2) вес обледеневших изоляторов, проводов и троссов, приходящихся на одну опору;

3) равнодействующее натяжение всех проводов и троссов при обрыве двух третей проводов в одном пролете при несброшенном гололеде;

4) давление ветра на опору, действующего нормально направлению необорванных проводов;

5) давление ветра на обледеневшие необорванные провода и троссы, действующие нормально направлению проводов.

§ 16. Силами, действующими на все остальные не анкерные опоры — промежуточные, угловые с равным или неравным натяжением в смежных пролетах — при обрыве двух проводов в одном из пролетов, следует считать:

1) собственный вес опоры;

2) вес изоляторов и свободных от гололеда проводов и троссов, приходящийся на данную опору;

3) равнодействующую натяжений всех необорванных проводов и троссов обоих пролетов при -5°C , ветре и сброшенном гололеде;

4) давление ветра на опору, действующего нормально к направлению линии;

5) давление ветра на необледенелые необорванные провода и троссы, действующего нормально к направлению линии.

При расчете угловых опор направление ветра следует принимать либо по равнодействующей угла, либо нормально к одному из пролетов, в зависимости от того, какой из этих случаев вызывает большие усилия в опоре.

§ 17. При расчете всех опор, кроме анкерных, на случай обрыва проводов может быть принято во внимание поддерживающее действие троссов и необорванных проводов, но при этом добавочные усилия, передающиеся от опор троссам и проводам, должны быть учтены при расчете этих последних.

§ 18. При расчете прочности металлических, деревянных и железобетонных опор для всех случаев, указанных в §§ 14 и 15, надлежит принимать нижеследующие величины допускаемых напряжений $[n_1]$ на растяжение, $[n_2]$ на сжатие и $[n'_2]$ на изгиб:

а) для литого железа:

$$[n_1] = [n_2] = [n'_2] = k : 2,5.$$

В этой формуле k — временное сопротивление, составляющее в среднем на растяжение и на сжатие 40 kg/mm^2 ;

б) для пропитанного и непропитанного дерева:

на растяжение	$[n_1] = k_1 : 5,$
на сжатие	$[n_2] = k_2 : 4,$
на изгиб	$[n'_2] = k_2 : 3,5;$

для воздушно-сухого дерева следует принимать временное сопротивление вдоль волокна:

для ели или сосны	$k_1 = 720 \text{ kg/cm}^2$ и $k_2 = 350 \text{ kg/cm}^2,$
для дуба соответственно . . .	$k_1 = 900 \text{ kg/cm}^2$ и $k_2 = 500 \text{ kg/cm}^2;$

в) для бетона в железобетонных опорах:

на сжатие $[n_2] = k_2 : 3,5$,
 на сжатие при изгибе $[n'_2] = k_2 : 3,0$.

При предварительных подсчетах, в случае отсутствия опытных данных о временном сопротивлении бетона, надлежит руководствоваться нижеследующей таблицей:

Состав бетона	1:1,5:3,0	1:2:4	1:2,5:5	1:3:6	1:4:8
k_2	200	180	140	100	80
$[n_2]$	60	55	40	30	25
$[n'_2]$	70	60	45	35	25

§ 19. При расчете опор, в случае действия нагрузок согласно § 16, указанные в § 18 величины допускаемых напряжений могут быть повышены, а именно: при расчетах на растяжение $[n_1]$, изгиб $[n'_2]$ и простое сжатие $[n_2]$ — на 25%; при расчетах на продольный изгиб (см. § 20) — на 50% с тем, однако, чтобы величина $[n_2]$ не превосходила предела упругости материала.

Примечание к §§ 18, 19, 20. При расчетах на растяжение, простое сжатие и изгиб фактические напряжения определяются с учетом ослабления сечения заключочными отверстиями, врубками и пр. (netto).

При расчетах на продольный изгиб напряжения определяются по площади неослабленного сечения (brutto).

§ 20. В сжатых элементах, расчетная длина в которых превосходит более, чем в 10 раз, наименьшую величину радиуса инерции поперечного сечения, т. е. для которых отношение

$$\beta = \frac{l}{r} > 10,$$

величины допускаемых напряжений подлежат снижению против указанных в § 18 значений путем помножения на коэффициент

$$\varphi = \frac{1}{a + b\beta^2}.$$

В этой формуле β имеет указанное ранее значение, а коэффициенты a и b соответственно равны величинам, приведенным в нижеследующей таблице:

Коэффициенты	a	b
для железа	0,9916	0,000080
для дерева	0,9826	0,000174
для железобетона	0,9912	0,000088

Если отношение $\beta = \frac{l}{r}$ превосходит для железа величину $\beta = 105$, а для дерева $\beta = 100$, то коэффициент φ , вместо указанной выше, исчисляется по формуле

$$\varphi = \frac{10 E}{\beta^2 k_2}.$$

Таблица коэффициентов β , β' и β'' .

β	β'	β''	Железо	Дерево	Железобетон
10	2,89	2,50	1,000	1,000	1,000
15	4,33	3,75	0,990	0,979	0,989
20	5,77	5,00	0,976	0,950	0,974
25	7,21	6,25	0,960	0,916	0,955
30	8,66	7,50	0,940	0,878	0,934
35	10,10	8,75	0,917	0,836	0,910
40	11,54	10,00	0,893	0,793	0,883
45	12,99	11,25	0,866	0,749	0,855
50	14,43	12,50	0,839	0,705	0,826
55	15,88	13,75	0,811	0,663	0,795
60	17,32	15,00	0,781	0,622	0,764
65	18,76	16,25	0,752	0,582	0,731
70	20,21	17,50	0,722	0,545	0,703
75	21,65	18,75	0,694	0,510	0,673
80	23,09	20,00	0,665	0,477	0,643
85	24,54	21,25	0,636	0,446	0,615
90	25,98	22,50	0,610	0,418	0,587
95	27,42	23,75	0,582	0,392	0,560
100	28,87	25,00	0,558	0,367	0,534
105	30,31	26,25	0,534	0,333	0,510
110	31,75	27,50	0,482	0,303	0,486
115	33,20	28,75	0,441	0,277	0,464
120	34,64	30,00	0,405	0,254	0,443
130	37,53	32,50	0,345	0,217	0,404
140	40,41	35,00	0,298	0,187	0,368
150	43,30	37,50	0,259	0,163	0,337
160	46,19	40,00	0,228	0,143	0,308
170	49,07	42,50	0,202	0,127	0,283
180	51,96	45,00	0,180	0,113	0,260
200	57,74	50,00	0,146	0,092	0,222

В этой формуле E (модуль упругости) и k_2 (временное сопротивление) принимаются соответственно равными:

$$\begin{aligned} \text{для железа } E &= 21\,000 \text{ кг/мм}^2 \text{ и } k_2 = 36 \text{ кг/мм}^2, \\ \text{для дерева } E &= 110\,000 \text{ кг/см}^2 \text{ и } k_2 = 300 \text{ кг/см}^2. \end{aligned}$$

Коэффициент снижения для железобетона всегда исчисляется по первой из вышеприведенных формул.

При расчетах стержней прямоугольного и круглого сечений, вместо отношения $\beta = l:r$, можно пользоваться отношениями $\beta' = l:l_0$ и $\beta'' = l:d$, причем под l_0 разумеется меньшая из сторон прямоугольного сечения, а под d — диаметр круглого сечения.

В таблице (см. стр. 169) приведены значения φ при разных величинах β и соответствующих им β' и β'' .

§ 21. При совместном действии центрально приложенной сжимающей силы и изгибающего момента в случае, если не производится точный расчет напряжений, повиженню по нормам § 20 подлежит только часть напряжения, зависящая от центрально приложенной силы, т. е. уравнение прочности напишется в форме

$$\frac{[n_2']}{[n_2]} \cdot \frac{n_2^0}{\varphi} + n_2' \leq [n_2'].$$

В этой формуле n_2^0 — фактическое напряжение, вызываемое центрально приложенной силой, остальные буквы имеют указанные ранее значения.

§ 22. Основанием опор предполагается естественный грунт. В случае слабого грунта (болотистого и т. д.) допускается устройство искусственного основания.

При расчетах фундаментов усилиями, действующими на опоры, считаются силы, указанные в §§ 14 — 17.

Нижние основания фундаментов и опорные подушки анкеров должны быть заложены ниже уровня промерзания грунта за исключением тех случаев, когда фундамент располагается на скале или грунт по природным своим свойствам исключает возможность выпучивания.

§ 23. Определение размеров поперечного сечения и глубины заложения фундамента одноной опоры производится в зависимости от допускаемого давления со стороны фундамента на грунт и в предположении полной заделки конца опоры в грунте, причем в расчете допускается принимать реакцию грунта как по подошве так и по боковым граням фундамента.

Допускаемое давление на грунт на нижней горизонтальной грани фундамента не должно превосходить максимального допускаемого давления для данного грунта на глубине заложения фундамента.

Для определения ширины фундамента и глубины его заложения может быть применен следующий метод.

Пусть

R — допускаемое давление на грунт в тоннах на кв. метр;

P — равнодействующая горизонтальных сил, действующих на опору, в тоннах;

l — высота равнодействующей над уровнем грунта в метрах;

b — ширина фундамента в метрах с плоскими гранями; при цилиндрической форме фундамента под b следует понимать $0,75d$, где d — диаметр фундамента в метрах;

H — глубина заложения фундамента в метрах;

h — глубина точки нулевого давления в метрах.

Тогда

$$R = k_1 \frac{P}{b}, \quad (1)$$

$$H = k_2 l, \quad (2)$$

$$h = k_3 H. \quad (3)$$

Задаваясь значением R , по данным P , b , l , находят из формулы (1) значение k_1 и из помещаемой ниже таблицы соответствующие ему значения k_2 и k_3 , после чего с помощью формул (2) и (3) находят H и h .

k_1	k_2	k_3
0	∞	0,699
0,143	27,04	0,693
0,502	8,474	0,679
1,000	4,712	0,667
1,698	3,097	0,654
2,685	2,203	0,643
4,102	1,636	0,632
6,169	1,247	0,621
9,246	0,964	0,610
13,94	0,751	0,600
21,30	0,586	0,590
33,26	0,456	0,581
53,56	0,350	0,571
89,91	0,265	0,562
159,61	0,196	0,554
305,80	0,141	0,546
651,90	0,0957	0,537
1 627	0,0605	0,529
5 233	0,0338	0,522
26 820	0,0150	0,514
432 220	0,0038	0,507
∞	0	0,500

В земляных грунтах наибольшее давление на грунт в точке $\frac{h}{2}$ для анкеровых и их заменяющих угловых опор не должно превосходить $\frac{\varphi h}{2}$ kg/cm^2 , где φ — вес 1 m^3 земли в тоннах, h — глубина в метрах; для всех остальных, т. е. промежуточных и угловых, не заменяющих анкеровых, наибольшее давление на грунт в килограммах на кв. сантиметр не должно превосходить глубины заложения фундамента в метрах и во всяком случае не должно превосходить 2 kg/cm^2 .

§ 24. Размеры поперечных сечений и глубины заложения фундаментов двуногих опор для противодействия усилиями, нормальным к плоскости, проходящей через обе ноги опоры, определяются согласно указаниям, данным в § 23 для одноногих опор.

Размеры поперечных сечений и глубины заложения фундаментов и опорных подушек анкеров двуногих опор для противодействия усилиями, расположенным

в плоскости, проходящей через обе ноги опоры, определяются на основании расчета устойчивости опоры против опрокидывания и исчисления наибольшего давления на грунт.

Опрокидывание опоры при фундаментах в виде столбов принимается вокруг места заделки одной ноги в фундамент, а при анкерных основаниях — вокруг оси, проходящей через одну ногу опоры на глубине заложения анкерной подушки.

При расчете, силами, противодействующими опрокидыванию опоры, считаются

1) при фундаментах анкерного типа:

а) вес объема грунта в виде усеченного конуса или усеченной пирамиды, расположенной над опорной подушкой анкера, с образующей конуса или гранями пирамиды, наклоненными к вертикали под углом, зависящим от свойства данного грунта,

б) вес опоры,

в) вес проводов, тросов и изоляторов, приходящийся на опору;

2) при фундаментах в виде столбов:

а) вес фундамента одной ноги,

б) вес опоры,

в) вес проводов, тросов и изоляторов, приходящийся на опору.

г) вес объема грунта, расположенного над фундаментом, если последний ступенчатой формы (исчисляется согласно пункта 1а настоящего параграфа).

Коэффициент устойчивости опоры на опрокидывание при действии нагрузки согласно § 14 должен быть не менее 1,25 для промежуточных и 1,5 для анкерных и угловых. При обрыве проводов, т. е. при действии нагрузки согласно §§ 15 и 16 коэффициент устойчивости должен быть соответственно не менее 1,0 и 1,25.

Допускаемое давление на грунт определяется условиями, указанными в § 23.

Примечание. Как среднее значение для грунтов можно принять наклон образующей конуса или граней пирамиды к вертикали в 30°.

В случае, если наибольшие усилия, действующие на опору в плоскости, проходящей через обе ноги ее, получаются при обледенелых проводах и тросах, то и при определении сил, противодействующих опрокидыванию опоры, провода и тросы следует считать обледенелыми.

25. Определение размеров поперечного сечения и глубины заложения фундаментов для трех-, четырех- и многоногих опор производится во всем аналогично § 24 для двуногих опор, для случая действующих внешних сил в плоскости, в которой, т. е. исходя из сопротивления на опрокидывание опоры и сопротивления грунта сдвигу.

1-РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА БССР

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА БССР

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА БССР

69764

11386