

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра теплогазоснабжения и нефтегазового дела

## **РАСЧЕТ НА МЕХАНИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ ПРОВОДОВ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ**

### **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

*к выполнению курсовой работы по дисциплине  
«Технология монтажа линий электропередачи»  
для студентов направления подготовки  
13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»  
всех форм обучения*

Воронеж 2026

УДК 621.315(07)  
ББК 31.279я7

**Составители**

*М. Н. Жерлыкина, С. А. Яременко, К. В. Гармонов*

**Расчет на механическую прочность проводов линий электропередач:** методические указания к выполнению курсовой работы по дисциплине «Технология монтажа линий электропередачи» для студентов направления подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» всех форм обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост.: М. Н. Жерлыкина, С. А. Яременко, К. В. Гармонов. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2026. – 25 с.

Методические указания содержат методику проектирования механической части воздушных линий электропередач.

Предназначены для студентов направления 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» (профиль «Проектирование и строительство городских систем энергосбережения») всех форм обучения.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле МУ\_РНМППЛЭ\_КР.pdf.

Ил. 2. Табл. 16. Библиогр.: 7 назв.

**УДК 621.315(07)**  
**ББК 31.279я7**

*Рецензент – М. С. Кононова, канд. техн. наук, доцент кафедры жилищно-коммунального хозяйства ВГТУ*

*Издается по решению редакционно-издательского совета Воронежского государственного технического университета*

## ВВЕДЕНИЕ

Линия электропередачи (ЛЭП) – один из компонентов электрической сети, система энергетического оборудования, предназначенная для передачи электроэнергии посредством электрического тока. Также электрическая линия в составе такой системы, выходящая за пределы электростанции или подстанции.

Воздушная линия электропередачи (ВЛ) – устройство, предназначенное для передачи или распределения электрической энергии по проводам, находящимся на открытом воздухе и прикрепленным с помощью траверс (кронштейнов), изоляторов и арматуры к опорам или другим сооружениям (мостам, путепроводам). Конструкция ВЛ, её проектирование и строительство регулируются Правилами устройства электроустановок (ПУЭ) и Сводом правил (СП).

**Цель курсовой работы** изучить технологию монтажа, расчет на механическую прочность проводов линий электропередач, ремонт и обслуживание воздушных линий.

### **Задачи:**

- ✓ описать общие сведения о воздушных линиях;
- ✓ изучить применение опор воздушных линий;
- ✓ изучить монтаж изоляторов, провода и троса;
- ✓ определить виды монтажа воздушных линий электропередач;
- ✓ выполнить расчет на механическую прочность проводов линий электропередач.

На воздушных линиях электропередачи (ВЛ) подвешиваются голые (неизолированные) провода, состоящие из одной или нескольких проволок. К материалу проводов предъявляют следующие требования: высокую электрическую проводимость, достаточную прочность, антикоррозионную стойкость. Основными материалами для проводов служат алюминий и сталь, из них изготавливают алюминиевые и комбинированные сталеалюминиевые провода. Опоры ВЛ делятся на две основные группы: промежуточные и анкерные. Промежуточные опоры устанавливаются на прямых участках трассы. В нормальном режиме они воспринимают вертикальные нагрузки от массы проводов, изоляторов, арматуры и горизонтальные нагрузки от давления ветра на провода и опоры.

При обрыве одного или нескольких проводов промежуточные опоры воспринимают дополнительную нагрузку, направленную вдоль линии, и подвергаются кручению и изгибу. Поэтому они изготавливаются с определенным запасом прочности. Число промежуточных опор на ВЛ составляет до 80 %. Анкерные опоры устанавливаются на прямых участках трассы для перехода ВЛ через инженерные сооружения или естественные препятствия. Их конструкция жестче и прочнее, так как они воспринимают продольную нагрузку от разности тяжения проводов и тросов в смежных анкерных пролетах, а при монтаже – от тяжения подвешенных с одной стороны проводов. Деревянные опоры с пропиткой антисептиком применяются там, где использование древесины экономически выгодно. Преимущество деревянных опор обусловлено их низкой стоимостью, доста-

точно высокой механической прочностью, высокими электроизоляционными свойствами, дешевизной. Главный недостаток – недолговечность. Железобетонные опоры используются в условиях равнинной местности, где металлические опоры экономически нецелесообразны. Железобетонные опоры не разрешается применять на ВЛ, проходящей в горной или сильно пересеченной местности. Железобетонные опоры обладают высокой механической прочностью, долговечны, дешевы в эксплуатации, изготовлении и сборке по сравнению с металлическими. Их недостатком является большая масса, что увеличивает транспортные расходы. Металлические опоры позволяют создавать конструкции, рассчитанные на большие нагрузки и любые климатические условия, обладают высокой механической прочностью при относительно небольшой массе. Однако они достаточно дороги и подвержены коррозии.

## 1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Номер варианта принимается по заданию преподавателя. Исходные данные определяются по табл. 1 и включают:

- ✓ номинальное напряжение, кВ;
- ✓ материал опоры;
- ✓ число цепей;
- ✓ характер местности (населенная «насел.» или ненаселенная «ненас.»);
- ✓ марка и сечение провода.

Таблица 1

Исходные данные для проектирования

№ вар	U <sub>НОМ</sub> , кВ	Материал опоры	Число цепей	Местность	Сечение провода АС, мм					
					а	б	в	г	д	е
1	35	ж/б	1	насел.	-	95	95	-	150	150
2	35	мет.	1	насел.	70	95	95	120	150	150
3	35	ж/б	2	ненас.	-	95	95	-	150	150
4	35	мет.	2	ненас.	70	95	-	120	150	150
5	110	ж/б	1	насел.	70	95	120	150	185	240
6	110	мет.	1	насел.	70	95	120	150	185	240
7	110	ж/б	2	ненас.	70	95	120	150	185	240
8	110	мет.	2	ненас.	70	95	120	150	185	240
9	220	ж/б	1	насел.	-	-	300	300	400	400
10	220	мет.	1	ненас.	-	-	300	300	400	400
11	220	мет.	2	ненас.	-	-	300	300	400	400

Климатологические характеристики района строительства определяются по табл. 2 и включают:

- ✓ район по ветру;
- ✓ район по гололёду;

- ✓ максимальная температура, °С;
- ✓ минимальная температура, °С;
- ✓ средняя температура, °С.

Таблица 2

## Исходные данные для проектирования

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Район по ветру	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	III
Район по гололеду	IV	III	II	I	IV	III	II	I	IV	III	II
$t_{\max}$ , °С	20	25	30	35	40	20	25	30	35	40	30
$t_{\min}$ , °С	-40	-30	-25	-20	-10	-30	-40	-40	-10	-20	-25
$t_{\text{cp}}$ , °С	-5	0	0	5	5	-5	-5	-5	0	5	0

*Физико-механическая характеристика провода* определяются по табл. 3 и включают:

- ✓ площадь сечения алюминиевой части, мм<sup>2</sup>;
- ✓ площадь сечения стальной части, мм<sup>2</sup>;
- ✓ суммарная площадь сечения, мм<sup>2</sup>;
- ✓ диаметр провода, мм;
- ✓ количество алюминиевых проволок, шт.;
- ✓ диаметр алюминиевых проволок, мм;
- ✓ количество стальных проволок, шт.;
- ✓ диаметр стальных проволок, мм;
- ✓ количество повивов алюминиевой части, шт.;
- ✓ количество повивов стальной части, шт.;
- ✓ масса 1 км провода, кг;
- ✓ модуль упругости, Н/мм<sup>2</sup>;
- ✓ температурный коэффициент линейного удлинения, град<sup>-1</sup>;
- ✓ предел прочности при растяжении, Н/мм<sup>2</sup>;
- ✓ удельная нагрузка от собственного веса провода, Н/м·мм<sup>2</sup>;
- ✓ напряжение при среднегодовой температуре, Н/мм<sup>2</sup>;
- ✓ допустимое напряжение при низшей температуре, Н/мм<sup>2</sup>;
- ✓ допустимое напряжение при наибольшей нагрузке, Н/мм<sup>2</sup>.

*Тип опоры* определяется по марке провода и климатологическим характеристикам из табл. 4. Габаритные размеры опор представлены на рис. 1.

*Техническая характеристика опоры* определяются по табл. 5 и включают:

- ✓ пролёт габаритный, м;
- ✓ пролёт ветровой, м;
- ✓ пролёт весовой, м.

Таблица 3

## Физико-механические характеристики проводов [3]

Характеристика	Марка провода							
	АС70/11	АС95/16	АС120/19	АС150/24	АС185/29	АС240/32	АС300/39	АС400/51
1. Сечение, мм <sup>2</sup> :								
алюминиевой части	68	95,4	118	149	181	244	301	394
стальной части	11,3	15,9	18,8	24,2	29	31,7	38,6	54,1
суммарное	79,3	111,3	136,8	173,2	210	275,7	339,6	448,1
2. Диаметр провода, мм	11,4	13,6	15,2	17,1	18,8	21,6	24	27,5
3. Количество и диаметр проволок:								
алюминиевых, шт×мм	6×3,8	6×4,5	26×2,4	26×2,7	26×3	24×3,6	24×4	54×3,05
стальных, шт×мм	1×3,8	1×4,5	7×1,85	7×2,1	7×2,3	7×2,4	7×2,65	7×3,05
4. Количество повивов, шт:								
алюминиевой части	1	1	2	2	2	2	2	3
стальной части	-	-	1	1	1	1	1	1
5. Вес провода, даН/км	274	384	471	600	728	921	1132	1490
6. Модуль упругости, даН/мм <sup>2</sup>	8,25×10 <sup>3</sup>	8,25×10 <sup>3</sup>	8,25×10 <sup>3</sup>	8,25×10 <sup>3</sup>	8,25×10 <sup>3</sup>	7,7×10 <sup>3</sup>	7,7×10 <sup>3</sup>	7,7×10 <sup>3</sup>
7. Температурный коэффициент линейного удлинения, град <sup>-1</sup>	19,2×10 <sup>-6</sup>	19,2×10 <sup>-6</sup>	19,2×10 <sup>-6</sup>	19,2×10 <sup>-6</sup>	19,2×10 <sup>-6</sup>	19,8×10 <sup>-6</sup>	19,8×10 <sup>-6</sup>	19,8×10 <sup>-6</sup>
8. Предел прочности, даН/мм <sup>2</sup>	29	29	29	29	29	27	27	27
9. Удельная нагрузка от собствен- ного веса, даН/м×мм <sup>2</sup>	3,46×10 <sup>-3</sup>	3,46×10 <sup>-3</sup>	3,46×10 <sup>-3</sup>	3,46×10 <sup>-3</sup>	3,46×10 <sup>-3</sup>	3,34×10 <sup>-3</sup>	3,34×10 <sup>-3</sup>	3,34×10 <sup>-3</sup>
10. Допустимое напряжение, даН/мм <sup>2</sup> :								
при среднегодовой температуре	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,1	8,1	8,1
при низшей температуре	11,6	11,6	13,0	13,0	13,0	12,2	12,2	12,2
при наибольшей нагрузке	11,6	11,6	13,0	13,0	13,0	12,2	12,2	12,2

Таблица 4

## Основные размеры и область применения унифицированных железобетонных и металлических промежуточных опор

Шифр опоры	Рис. 1	Размеры, м								Марка провода	Район по гололеду
		H	h <sub>1</sub>	h <sub>2</sub>	h <sub>3</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	в		
П110-1	а	25,0	2,0	19,0	4,0	2,0	4,1	2,0	2,5	АС70-АС95	I-II
П110-3	а	25,0	2,0	19,0	4,0	2,1	4,2	2,1	2,8	АС120-АС240	I-II
П110-5	а	28,0	3,0	19,0	6,0	2,1	4,2	2,1	2,8	АС70-АС240	III-IV
П110-2	б	31,0	4,0	19,0	4,0	2,0	4,1	2,0	2,5	АС70-АС95	I-II
П110-4	б	31,0	4,0	19,0	4,0	2,1	4,2	2,1	2,8	АС120-АС240	I-II
П110-6	б	35,0	4,0	19,0	6,0	2,1	4,2	2,1	2,8	АС70-АС240	III-IV
П220-3	а	36,0	4,0	25,5	6,5	3,9	6,1	3,5	5,0	АС300-АС400	I-IV
П220-2	б	41,0	5,5	22,5	6,5	4,2	6,4	3,5	5,4	АС300-АС400	I-IV
ПБ110-1	в	22,6	2,0	14,5	3,0	2,0	3,5	2,0	3,0	АС70-АС150	I-II
ПБ110-3	в	22,6	2,0	14,5	3,0	2,0	3,5	2,0	3,0	АС185-АС240	I-II
ПБ110-5*	в	22,6	2,0	14,5	4,0	2,0	3,5	2,0	3,0	АС70-АС240	III-IV
ПБ110-2*	г	22,6	2,7	13,5	3,0	2,0	3,5	2,0	3,0	АС70-АС120	I-II
ПБ110-4	г	26,0	3,0	13,5	3,0	2,0	3,5	2,0	3,3	АС120-АС240	I-II
ПБ110-6*	г	22,6	2,7	11,5	4,0	2,0	3,5	2,0	3,0	АС70-АС120	III-IV
ПБ110-8*	г	26,0	3,0	13,5	4,0	2,0	3,5	2,0	3,3	АС150-АС240	III-IV
ПБ220-1*	в	26,0	2,5	16,0	5,5	2,8	4,8	2,8	3,3	АС300-АС400	I-III
ПБ220-1*	в	26,0	2,5	14,5	7,0	2,8	4,8	2,8	3,3	АС300-АС400	IV
ПБ35-1*	в	22,6	2,0	15,5	3,0	1,0	2,5	1,0	3,0	АС95-АС150	I-II
ПБ35-3*	в	22,6	2,0	14,5	4,0	1,75	1,75	1,0	3,0	АС95-АС150	III-IV
ПБ35-2*	г	22,6	3,7	12,5	3,0	1,75	2,5	1,75	3,0	АС95-АС150	I-II
ПБ35-4*	г	22,6	3,7	10,5	4,0	1,75	2,5	1,75	3,0	АС95-АС150	III-IV
П35-1	а	21,0	3,0	14,0	4,0	2,0	3,3	2,0	1,8	АС70-АС150	I-IV
П35-2	б	23,0	3,0	12,0	4,0	2,0	3,3	2,0	1,8	АС70-АС150	I-IV

**Примечание.** Размер h<sub>1</sub> показывает расстояние от верхней траверсы до места подвески троса. Для железобетонных опор высотой H = 22,6 м (26 м) верхний и нижний диаметры стоек соответственно равны 440 и 650 мм (416 и 650 мм).

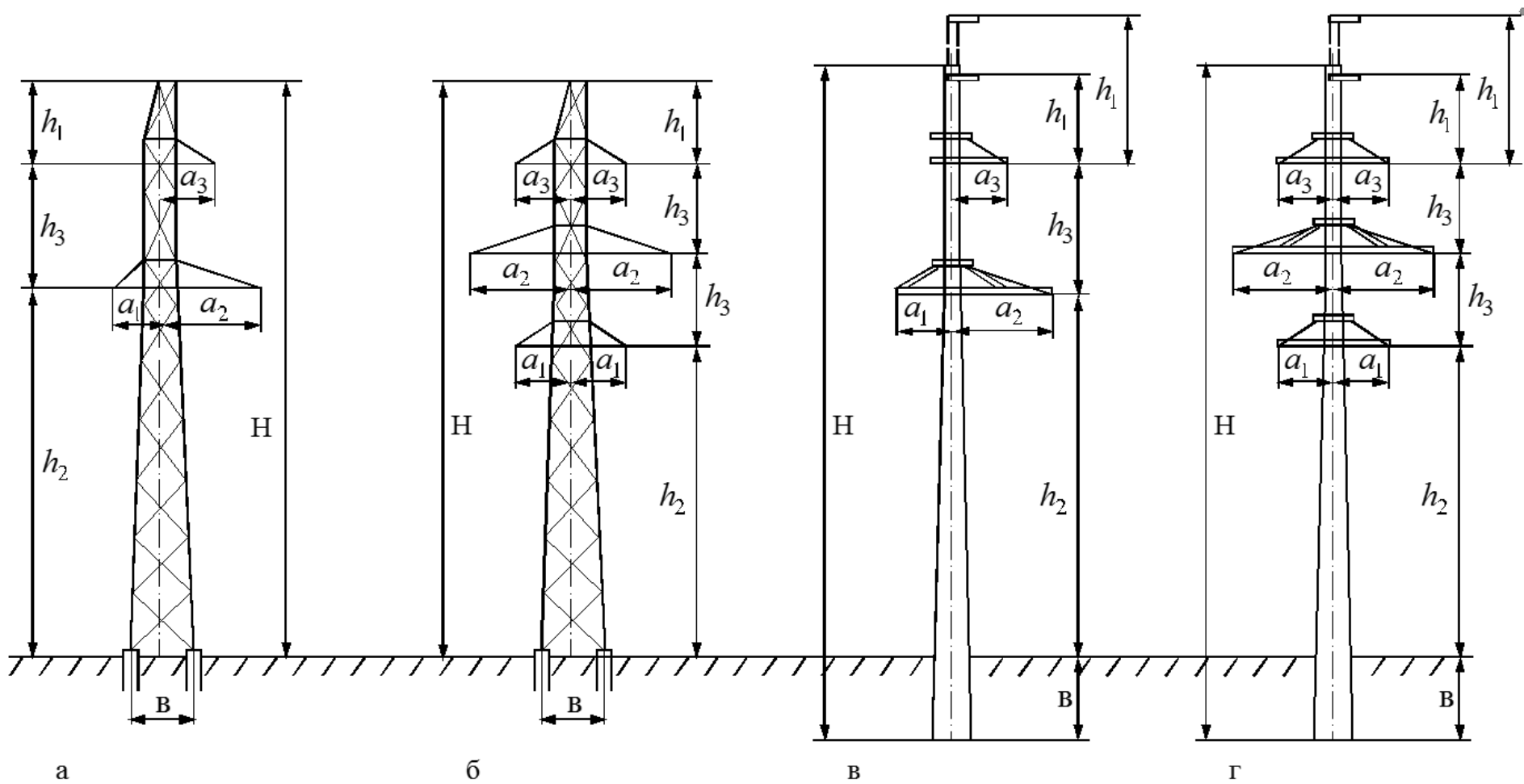


Рис. 1. Унифицированные стальные (а, б) и железобетонные и железобетонные (в, г) промежуточные опоры

Таблица 5

## Технические характеристики унифицированных опор [3]

Шифр опоры	Марка провода	Район по гололеду	Пролет, м			Масса, т
			габаритный	ветровой	весовой	
1	2	3	4	5	6	7
П110-1	до АС70	I,II	355;280	355	445;380	1,95
	до АС95	I,II	375;305	375	470;380	
П110-3	АС120	I,II	405;345	405	505;430	2,55
	АС150	I,II	405;365	405	505;455	
	АС185	I,II	405;380	405	505;475	
	АС240	I,II	395;380	395	495;475	
П110-5	АС70	III,IV	225;190	225	280;240	2,67
	АС95	III,IV	250;210	250	315;265	
	АС120	III,IV	290;285	290;245	305	
	АС150	III,IV	310;265	310	390;330	
	АС185	III,IV	325;280	325	405;380	
	АС240	III,IV	330;290	330	415;380	
П110-2	АС70	I,II	355;280	355	445;380	2,73
	АС95	I,II	375;305	375	470;380	
П110-4	АС120	I,II	405;345	405	505;430	3,31
	АС150	I,II	405;365	405	505;455	
	АС185	I,II	405;380	405	505;475	
	АС240	I,II	395;380	395	495;475	
П110-6	АС70	III,IV	225;190	225	280;240	3,86
	АС95	III,IV	250;210	250	315;265	
	АС120	III,IV	290;245	290	365;305	
	АС150	III,IV	310;265	310	390;330	
	АС185	III,IV	325;280	325	405;350	
	АС240	III,IV	330;290	330	415;360	
П220-3	АС400	I,II	475	475	595	4,85
		III,IV	475	475	545;490	
П220-2	АС300	I,II	425;420	425	530;525	6,32
		III,IV	375;330	425	470;415	
	АС400	I,II	425	425	530	
		III,IV	390;385	425	490;440	
ПБ110-1	АС70	I,II	275;215	300	345;270	4,82
	АС95	I,II	285;240	335	355;300	
	АС120	I,II	300;270	350	375;340	
	АС150	I,II	300;285	325	375;355	
ПБ110-3	АС185	I,II	305;295	350	380;370	5,24
	АС240	I,II	295;285	335	370	
ПБ11-5	АС70	III,IV	175;145	245;205	220;180	5,28
	АС95	III,IV	195;165	275;230	250;200	
	АС120	III,IV	225;190	305;235	260;240	
	АС150	III,IV	240;210	286;225	300;260	
	АС185	III,IV	305;295	350	380;370	
	АС240	III,IV	295	335	370	
ПБ110-2	АС70	I,II	250;200	280	310;250	5,5
	АС95	I,II	260;220	245	325;275	
	АС120	I,II	275;250	220	275	

1	2	3	4	5	6	7
ПБ110-4	АС120	I,II	275;250	335	345;315	7,4
	АС150	I,II	275;260	365	345;330	
	АС185	I,II	275	285	345	
	АС240	I,II	275	275	330	
ПБ110-6	АС70	III,IV	135;110	185;145	170;135	5,1
	АС95	III,IV	150;125	175;140	185;155	
	АС120	III,IV	170;145	160;130	210;180	
ПБ110-8	АС150	III,IV	225;190	250;205	280;240	7,5
	АС185	III,IV	235;205	240;200	295;255	
	АС240	III,IV	240;215	235;195	295;245	
ПБ220-1	АС300	I,II	290	360	360	6,45
		III,IV	260;230	280;230	325;285	
	АС400	I,II	290	315	360	
		III,IV	280;220	270;225	340;275	
ПБ35-1	АС95	I,II	325;265	455;370	405;330	4,78
	АС150	I,II	340;315	400	420;400	
ПБ35-3	АС95	III,IV	205;175	330;280	255;220	4,77
	АС150	III,IV	255;215	355;270	320;270	
ПБ35-2	АС95	I,II	255;215	340	320;270	5,37
	АС150	I,II	265;255	265	330;320	
ПБ35-4	АС95	III,IV	145;120	205;170	180;150	4,91
	АС150	III,IV	175;150	200;160	220;190	
П35-1	АС70	I,II	295;235	295	370;295	1,53
		III,IV	180;145	295	225;180	
	АС95	I,II	310;255	295	390;320	
		III,IV	195;165	295	245;205	
	АС120	III,IV	225;190	325	280;240	
	АС150	I,II	330;310	330	410;390	
П35-2	АС70	I,II	275;220	275	345;275	1,78
		III,IV	160;125	275	190;155	
	АС95	I,II	290;240	290	360;300	
		I,II	305;270	305	380;340	
	АС150	III,IV	190;165	305	240;205	
		I,II	305;290	305	380;360	
		III,IV	210;180	305	260;255	

## 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ СТЕНКИ ГОЛОЛЕДА НА ПРОВОДЕ И ВЕЛИЧИНЫ ВЕТРОВОГО ДАВЛЕНИЯ

Для определения нагрузок на элементы ВЛ принимаются наиболее неблагоприятные сочетания климатических условий, наблюдаемых не реже одного раза в пять лет для линий напряжением до 3 кВ, одного раза в 10 лет для линий напряжением 6...330 кВ и одного раза в 15 лет для линий напряжением 500 кВ и выше.

Расстояние от проводов до земли меняется по длине пролета. Высота приведенного центра тяжести проводов,  $h_{np}$ , м, определяется по формуле:

$$h_{np} = h_{cp} - \frac{2}{3}[f], \quad (1)$$

где  $h_{cp}$  – средняя высота подвеса проводов на опоре, м;  $[f]$  – допустимая стрела провеса провода, м.

Значение  $h_{cp}$ , м, для проводов определяется по формуле:

$$h_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^m h_i}{m} - \lambda, \quad (2)$$

где  $h_i$  – расстояние от земли до  $i$ -й траверсы опоры, м;  $m$  – количество проводов на опоре;  $\lambda$  – длина гирлянды изоляторов, м: для ВЛ 35 кВ – 0,6 м; для ВЛ 110 кВ – 1,3 м; для ВЛ 220 кВ – 2,4 м.

Значение  $h_{cp}^m$  для троса определяется высотой подвеса троса:

$$h_{cp}^m = h_2 + n \cdot h_3 + h_1, \quad (3)$$

где  $h_2, h_3, h_1$  – расстояния по рис. 1, м;  $n$  – число цепей.

Допустимая стрела провеса провода, м, определяется по формуле:

$$[f] = h_2 - \lambda - \Gamma, \quad (4)$$

где  $h_2$  – расстояние от земли до нижней траверсы, м;  $\Gamma$  – габаритный размер, м, значения габаритного размера приведены в табл. 6.

Таблица 6

Значения габарита определены из соображений безопасной эксплуатации ВЛ

Характер местности	Расстояние от провода до земли (габарит), м, при номинальном напряжении ВЛ				
	до 35 кВ	110 кВ	220 кВ	330 кВ	500 кВ
Ненаселенная	6,0	6,0	7,0	7,5	8,0
Населенная	7,0	7,0	8,0	8,0	8,0
Труднодоступная	5,0	5,0	6,0	6,5	7,0

Допустимая стрела провеса троса, м, определяется по формуле:

$$[f^m] = h_{cp}^m - (\Gamma + n \cdot h_3 + z), \quad (5)$$

где  $z$  – наименьшее допустимое расстояние по вертикали между проводом и тросом в середине пролета, м.

Расстояние  $z$  определяется в зависимости от расчетной длины пролета. Промежуточные значения определяются путем линейной интерполяции.

Таблица 7

Наименьшее допустимое расстояние по вертикали между проводом и тросом

Длина пролета $l_p$ , м	100	150	200	300	400	500	600
Расстояние $z$ , м	2,0	3,2	4,0	5,5	7,0	8,5	10,0

При определении ветровых нагрузок на провода и тросы ВЛ принято использовать не скорость ветра  $V$ , а скоростной напор ветра  $q$ , который определяется по формуле:

$$q = \frac{V^2}{16}. \quad (6)$$

Скоростной напор ветра представляет собой давление воздуха, движущегося со скоростью  $V$ , на один квадратный метр (табл. 8).

Таблица 8

Величины скоростного напора ветра

Район по ветру	Нормативное значение $q$ , даН/м <sup>2</sup> , при повторяемости	
	1 раз в 5 лет	1 раз в 10 лет
1	27	40
2	35	40
3	45	50
4	55	65
5	70	80
6	85	100
7	100	125

Поскольку скорость ветра увеличивается с увеличением высоты, то для  $h_{np} \leq 15$  м значения  $q$  берутся непосредственно из табл. 8. При  $h_{np} > 15$  м вводится поправочный коэффициент  $k_B > 1$  (табл. 9) и  $q_{max} = q \cdot k_B$ .

Таблица 9

Значения поправочного коэффициента  $k_B$

Высота $h_{np}$ , м	до 15	20	40	60	100	200	350 и выше
Коэффициент $k_B$	1,0	1,25	1,55	1,75	2,1	2,6	3,1

В табл. 10 приведены значения нормативной толщины стенки гололеда  $C$  для различных районов.

Таблица 10

Нормативной толщины стенки гололеда

Район по гололеду	Нормативное значение $C$ , мм, при повторяемости	
	1 раз в 5 лет	1 раз в 10 лет
1	5	5
2	5	10
3	10	15
4	15	20
особый	20 и более	более 22

Для  $h_{np} \leq 25$  м значения  $C$  берутся непосредственно из табл. 10. При  $h_{np} > 25$  м вводятся поправочные коэффициенты на высоту  $k_{Г1}$  (табл. 11) и диаметр провода  $k_{Г2}$  (табл. 12).

Таблица 11

Значения поправочного коэффициента на высоту провода

Высота $h_{ГР}$ , м	до 25	30	50	70	100	200
Коэффициент $k_{Г1}$	1,0	1,4	1,6	1,8	2,0	3,0

Таблица 12

Значения поправочного коэффициента на диаметр провода

Диаметр провода (или троса) $d$ , мм	5	10	20	30	50	70
Коэффициент $k_{Г2}$	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6

Таким образом, максимальное значение толщины стенки гололеда при  $h_{np} > 25$  м определяется так:

$$C_{max} = k_{Г1} \cdot k_{Г2} \cdot C. \quad (7)$$

Температура окружающей среды сказывается на работе ВЛ путем прямого влияния на степень натяжения и провисания проводов и тросов. При расчетах проводов и тросов на механическую прочность принимаются во внимание следующие температуры:

- ✓ высшая температура –  $t_{max}$ , при которой провод может иметь максимальное удлинение и, следовательно, максимальную стрелу провеса;
- ✓ низшая температура –  $t_{min}$ , при которой провод имеет наименьшую длину, а температурные напряжения могут достигать наибольших значений;
- ✓ среднегодовая температура  $t_{cp}$ , при которой провод работает наиболее длительное время;
- ✓ температура гололеда –  $t_{Г}$ , при наибольшей скорости ветра и при гололеде, как правило, эта температура принимается равной  $-5$  °С;
- ✓ температура грозы –  $t_{15}$ , при которой определяется надежность защиты всех элементов ВЛ тросом в условиях грозового режима, равная  $+15$  °С.

### 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ НА ПРОВОД

Провода и тросы ВЛ испытывают действие нагрузок – вертикальных (вес провода и гололеда) и горизонтальных (давление ветра). В результате этих нагрузок в металле проводов возникают растягивающие напряжения. При расчетах на механическую прочность пользуются удельными нагрузками на провода и тросы:

- 1) удельная нагрузка от собственного веса провода (троса) -  $\gamma_1$ :

$$\gamma_1 = \frac{G_{II}}{F}, \quad (8)$$

где  $G_{II}$  – вес одного метра провода или троса, даН;  $F$  – фактическое сечение провода или троса, мм<sup>2</sup>.

2) удельная нагрузка от веса гололеда  $\gamma_2$  определяется исходя из условия, что гололедные отложения имеют цилиндрическую форму плотностью  $g_0 = 0,9 \cdot 10^{-3} \frac{\text{даН}}{\text{м} \cdot \text{мм}^2}$ :

$$\gamma_2 = \frac{g_0 \cdot \pi \cdot C_{max} \cdot (d + C_{max})}{F}, \quad (9)$$

где  $C_{max}$  – толщина стенки гололеда, мм;  $d$  – диаметр провода или троса, мм;  $F$  – фактическое сечение провода или троса, мм<sup>2</sup>.

3) удельная нагрузка от собственного веса провода (троса) и веса гололеда –  $\gamma_3$

$$\gamma_3 = \gamma_1 + \gamma_2. \quad (10)$$

4) удельная нагрузка от давления ветра, действующего перпендикулярно проводу, при отсутствии гололеда –  $\gamma_4$ :

$$\gamma_4 = \frac{q_{max} \cdot k_l \cdot k_H \cdot C_X \cdot d}{F} \cdot 10^{-3}, \quad (11)$$

где  $q_{max}$  – скоростной напор ветра,  $\frac{\text{даН}}{\text{м}^2}$ ;  $k_l$  – коэффициент, учитывающий влияние длины пролета на ветровую нагрузку (табл. 13);  $k_H$  – коэффициент, учитывающий неравномерность скоростного напора ветра по пролету (табл. 14);  $C_X$  – коэффициент лобового сопротивления, равный 1,1 – для проводов диаметром 20 мм и более, свободных от гололеда; 1,2 – для всех проводов, покрытых гололедом, и для проводов диаметром меньше 20 мм, свободных от гололеда.

Таблица 13

Влияние длины пролета на ветровую нагрузку

Длина пролета, м	до 50	100	150	250 и более
Коэффициент $k_l$	1,2	1,1	1,05	1,0

Таблица 14

Неравномерность скоростного напора ветра по пролету

Скоростной напор ветра, даН/м <sup>2</sup>	до 27	40	55	76 и выше
Коэффициент $k_H$	1,0	0,85	0,75	0,7

5) удельная нагрузка от давления ветра, действующего перпендикулярно проводу, при наличии гололеда –  $\gamma_5$ :

$$\gamma_5 = \frac{q' \cdot k_l \cdot k_H \cdot C_X \cdot (d + 2C_{max})}{F} \cdot 10^{-3}, \quad (12)$$

где  $q' = 0,25 \cdot q_{max}$  – для районов с толщиной стенки гололеда до 15 мм;  
 $q' = 0,25 \cdot q_{max}$ , но не менее  $14 \frac{\text{даН}}{\text{м}^2}$  – для районов с толщиной стенки гололеда  
 более 15 мм.

б) удельная нагрузка от давления ветра и веса провода без гололеда –  $\gamma_6$ :

$$\gamma_6 = \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_4^2}. \quad (13)$$

7) удельная нагрузка от давления ветра и веса провода (или троса), покрытого гололедом –  $\gamma_7$ :

$$\gamma_7 = \sqrt{\gamma_3^2 + \gamma_5^2}. \quad (14)$$

*Примечание.*  $\frac{\text{даН}}{\text{м} \cdot \text{мм}^2}$ , где 1 даН = 10 Н  $\approx$  1 кг.

#### 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ ПРОЛЕТОВ

Для определения исходного режима используется понятие «критические пролеты». На напряжение в проводе или тросе оказывают влияние нагрузка и температура окружающей среды. Их влияние проявляется в большей или меньшей степени в зависимости от длины пролета. При малых пролетах на напряжение в проводе значительное влияние оказывает температура, при больших пролетах – нагрузка. Граничный пролет, при котором влияние температуры и нагрузки на напряжения в проводе оказывается равноопасным, называется критическим.

Условия ограничения напряжения в проводе в трех указанных выше режимах определяют три критических пролета [3].

Первый критический пролет ( $l_{к1}$ ) – это такой пролет, при котором напряжение в проводе в режиме среднегодовой температуры равно допустимому при среднегодовой температуре, а в режиме низшей температуры – допустимому напряжению при низшей температуре и определяется по формуле:

$$l_{к1} = \frac{2 \cdot [\sigma_{tcp}]}{\gamma_1} \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot \left[ \frac{1}{E} ([\sigma_{tcp}] - [\sigma_{t min}]) + \alpha(t_{cp} - t_{min}) \right]}{1 - \left( \frac{[\sigma_{tcp}]}{[\sigma_{t min}]} \right)^2}}. \quad (15)$$

Второй критический пролет ( $l_{к2}$ ) – это такой пролет, при котором напряжение в проводе при наибольшей нагрузке равно допустимому напряжению при наибольшей нагрузке, а в режиме низшей температуры – допустимому напряжению при низшей температуре и определяется по формуле:

$$l_{к2} = \frac{2 \cdot [\sigma_{\gamma max}]}{\gamma_1} \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot \alpha \cdot (t_{гол} - t_{min})}{\left(\frac{\gamma_{max}}{\gamma_1}\right)^2 - 1}}, \quad (16)$$

где  $t_{гол}$  – температура гололеда, равная минус  $5^0C$  (при  $t_{cp} \leq -5^0C$   $t_{гол} = -10^0C$ ).

Третий критический пролет ( $l_{к3}$ ) – это такой пролет, при котором напряжение в проводе в режиме среднегодовой температуры равно допустимому при среднегодовой температуре, а в режиме наибольшей нагрузки равно допустимому напряжению при наибольшей нагрузке и определяется по формуле:

$$l_{к3} = \frac{2 \cdot [\sigma_{\gamma max}]}{\gamma_1} \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot \left[ \frac{1}{E} ([\sigma_{\gamma max}] - [\sigma_{tcp}]) + \alpha (t_{гол} - t_{cp}) \right]}{\left(\frac{\gamma_{max}}{\gamma_1}\right)^2 - \left(\frac{[\sigma_{\gamma max}]}{[\sigma_{tcp}]}\right)^2}}. \quad (17)$$

Для определения исходного режима по соотношению критических и расчетного пролетов можно воспользоваться табл. 15.

Таблица 15

Условия выбора исходного режима

Соотношение $l_{к1}, l_{к2}, l_{к3}$	Соотношение $l$ и $l_k$	Параметры исходного режима
$l_{к1} < l_{к2} < l_{к3}$	$l < l_{к1}$	$[\sigma_{t min}], \gamma_1, t_{min}$
	$l_{к1} < l < l_{к3}$	$[\sigma_{tcp}], \gamma_1, t_{cp}$
	$l > l_{к3}$	$[\sigma_{\gamma max}], \gamma_{max}, t_{гол}$
$l_{к1} > l_{к2} > l_{к3}$	$l < l_{к2}$	$[\sigma_{t min}], \gamma_1, t_{min}$
	$l > l_{к2}$	$[\sigma_{\gamma max}], \gamma_{max}, t_{гол}$
$l_{к1}$ - мнимый	$l < l_{к3}$	$[\sigma_{tcp}], \gamma_1, t_{cp}$
	$l > l_{к3}$	$[\sigma_{\gamma max}], \gamma_{max}, t_{гол}$
$l_{к3}$ - мнимый	$l < l_{к1}$	$[\sigma_{t min}], \gamma_1, t_{min}$
	$l > l_{к1}$	$[\sigma_{tcp}], \gamma_1, t_{cp}$
$l_{к1}$ и $l_{к3}$ - мнимые	-	$[\sigma_{tcp}], \gamma_1, t_{cp}$

## 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В МАТЕРИАЛЕ ПРОВОДА

Расчет проводов и тросов ВЛ на механическую прочность включает в себя определение напряжений при различных условиях работы. При изменении климатических условий меняются удельные нагрузки, температура провода и напряжение в его материале. Для определения напряжений в материале провода

при разных климатических условиях используют уравнение состояния провода, которое имеет следующий вид:

$$\sigma_P - \frac{\gamma_P^2 \cdot l_P^2 \cdot E}{24 \cdot \sigma_P^2} = \sigma_{II} - \frac{\gamma_u^2 \cdot l_P^2 \cdot E}{24 \cdot \sigma_u^2} - \alpha \cdot E \cdot (t_P - t_u), \quad (18)$$

где  $\sigma_u, \gamma_u, t_u$  – напряжение в материале провода, удельная нагрузка и температура в исходном режиме;  $\sigma_P, \gamma_P, t_P$  – напряжение в материале провода, удельная нагрузка и температура в рассчитываемом режиме;  $E, \alpha$  – модуль упругости и температурный коэффициент линейного удлинения материала провода;  $l_P$  – расчетная длина пролета.

Относительно неизвестной величины  $\sigma_P$  уравнение состояния является неполным кубическим уравнением вида:

$$\sigma_P^3 \pm B\sigma_P^2 - D = 0, \quad (19)$$

где  $B$  и  $D$  – числовые коэффициенты, полученные в результате подстановки в уравнение состояния всех известных параметров.

Расчет проводов и тросов ВЛ на механическую прочность ведется методом допустимых напряжений. Суть этого метода заключается в том, что напряжения в проводе или тросе в любом из эксплуатационных режимов не должны превышать допустимых напряжений. При выполнении этого условия материал провода или троса работает в пределах упругих деформаций. Допустимые напряжения задаются в процентах от предела прочности провода или троса для трех режимов:

- 1) наибольшей нагрузки -  $[\sigma_{\gamma max}]$ ;
- 2) низшей температуры -  $[\sigma_{t min}]$ ;
- 3) среднегодовой температуры -  $[\sigma_{tcp}]$ .

Значения допустимых напряжений приведены в табл. 16.

Таблица 16

Допустимые механические напряжения в проводах и тросах

Провода и тросы	Допустимые напряжения от предела прочности при растяжении, %		Предел прочности, даН/мм <sup>2</sup>
	при наибольшей нагрузке или низшей температуре	при среднегодовой температуре	
Алюминиевые провода А, АКП	35-45	30	15-16
Сталеалюминиевые провода АС, АСКС, АСКП, АСК	35-45	30	24-33
Стальные провода ПС	50	35	62
Тросы ТК	50	35	120

Допустимые напряжения при наибольшей нагрузке и наименьшей температуре принимаются больше соответствующих напряжений при среднегодовой

температуре. Это обусловлено относительной кратковременностью первых двух режимов.

При определении исходного (начального) режима принимается любой режим, для которого известны удельная нагрузка, температура и напряжение. Однако при эксплуатации проводов напряжения в них не должны превышать соответствующих допустимых напряжений для режимов максимальной нагрузки, низшей и среднегодовой температур. Чтобы выполнить это условие, целесообразно при расчете в качестве исходного выбрать режим, в котором напряжение может достигать допустимого.

## 6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРЕЛЫ ПРОВЕСА ПРОВОДА В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ

Определение стрелы провеса провода в режимах гололёда без ветра высшей температуры  $t_{\max}$  и грозового режима определяется по формуле:

$$f = \frac{\gamma_i \cdot l_\phi^2}{8 \cdot \sigma_i}, \quad (20)$$

где  $l_\phi$  - длина фактического пролета, полученного в результате расстановки опор по трассе, м; где  $\gamma_i$  и  $\sigma_i$  – удельные нагрузка и напряжение в проводе в соответствующем режиме.

Допустимая стрела провеса при высшей температуре:

$$f_{\max} = \frac{\gamma_1 \cdot l_\phi^2}{8 \cdot \sigma_{\max}}. \quad (21)$$

Допустимая стрела провеса при низшей температуре:

$$f_{\min} = \frac{\gamma_1 \cdot l_\phi^2}{8 \cdot \sigma_{\min}}. \quad (22)$$

Допустимая стрела провеса при средней температуре:

$$f_{cp} = \frac{\gamma_1 \cdot l_\phi^2}{8 \cdot \sigma_{cp}}. \quad (23)$$

Допустимая стрела провеса при гололеде без ветра:

$$f_{zol} = \frac{\gamma_3 \cdot l_\phi^2}{8 \cdot \sigma_{zol}}. \quad (24)$$

Допустимая стрела провеса при грозовом режиме:

$$f_{гроз} = \frac{\gamma_1 \cdot l_\phi^2}{8 \cdot \sigma_{гроз}}. \quad (25)$$

Допустимая стрела провеса при режиме наибольших нагрузок:

$$f_{н.н} = \frac{\gamma_7 \cdot l_\phi^2}{8 \cdot \sigma_{н.н}}. \quad (26)$$

## 7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОБЛЮДЕНИЯ ТРЕБУЕМЫХ РАССТОЯНИЙ ОТ НИЗШЕЙ ТОЧКИ ПРОВИСАНИЯ ПРОВОДА ДО ЗЕМЛИ

Проверить соблюдение требуемых расстояний от низшей точки провисания провода до земли по условию:

$$\begin{aligned}f_{\max} &\leq [f]; \\f_{\min} &\leq [f]; \\f_{\text{cp}} &\leq [f]; \\f_{\text{зол}} &\leq [f]; \\f_{\text{спроз}} &\leq [f]; \\f_{\text{н.н}} &\leq [f],\end{aligned}$$

где  $[f]$  – допустимая стрела провеса провода.

Если условия выполняются, то расстояние от нижнего провода до земли будет не менее габаритного размера.

## 8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ГРОЗОЗАЩИТНОГО ТРОСА

Для расчета грозозащитного троса используются методы и приемы расчета проводов. Кроме того, расположение троса на опоре должно быть таким, чтобы гарантировать защиту проводов от ударов молнии. Во избежание перекрытия изоляции между тросом и проводом во время удара молнии должны соблюдаться соответствующие расстояния между тросом и проводами в середине пролета. Напряжения в тросе при наибольшей нагрузке, низшей и среднегодовой температурах не должны превышать соответствующих допустимых напряжений. Защитный угол троса учитывается при разработке конструкций опор.

Наименьшие допустимые расстояния между тросом и проводом в середине пролета ( $z$ ) без учета отклонения их ветром приведены в табл. 7. Допустимые расстояния должны соблюдаться для условий грозового режима, когда на провода и тросы воздействуют нагрузки от собственного веса, ветер отсутствует и температура воздуха равна плюс 15°C. Поэтому указанный режим принимается в качестве исходного для механического расчета троса. С учетом этого обстоятельства рекомендуется выполнять расчет троса на механическую прочность в следующем порядке:

1) определить стрелу провеса троса в грозовом режиме (рис. 2) по формуле, м:

$$f_{\text{зр}}^m = f_{\text{зр}}^n + h_1 + \lambda - z, \quad (27)$$

где  $f_{\text{зр}}^n$  – стрела провеса провода в середине пролета в грозовом режиме, м;  $h_1$  – расстояние по вертикали между верхней траверсой и точкой крепления троса, м;  $\lambda$  – длина гирлянды изоляторов, м;  $z$  – допустимое расстояние между

тросом и проводом в середине пролета, м.

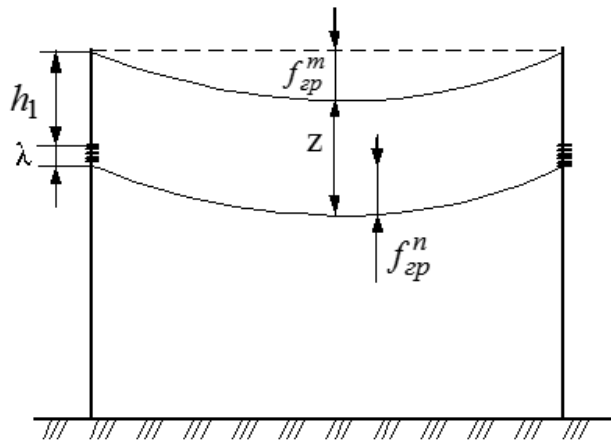


Рис. 2. Соотношение стрел провеса провода и троса

2) определить напряжение в тросе в грозовом режиме:

$$\sigma_{zp}^m = \frac{\gamma_1^m \cdot l^2}{8 \cdot f_{zp}^m}. \quad (28)$$

3) принять в качестве исходного грозовой режим с известными параметрами:  $\sigma_{zp}^m, \gamma_1^m, t = 15^0 C$ . По уравнению состояния провода (18) определить напряжение в тросе для режимов максимальной нагрузки, низшей и среднегодовой температуры ( $\sigma_{\gamma max}^m, \sigma_{t min}^m, \sigma_{tcp}^m$ ).

4) проверить условия механической прочности троса:

$$\sigma_{\gamma max}^m \leq [\sigma_{\gamma max}^m]; \quad \sigma_{t min}^m \leq [\sigma_{t min}^m]; \quad \sigma_{tcp}^m \leq [\sigma_{tcp}^m].$$

Если условия выполняются, то можно сделать вывод о пригодности выбранного троса для условий проектируемой линии в нормальных режимах работы. В противном случае необходимо изменить сечение троса, увеличить высоту его подвеса или предусмотреть другие мероприятия.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При строительстве линий электропередач руководствуются следующими базовыми параметрами: длина пролёта, тяжесть провода, угол поворота линии, стрела провеса, габариты, каждое из которых очень важно.

Изменение температуры воздуха вызывает увеличение или уменьшение длины провода с одновременным изменением стрелы провеса и тяжести. При положительной температуре воздуха увеличивается длина провода, снижается тяжесть и напряжение материала. При отрицательной температуре – уменьшается длина провода и увеличивается тяжесть и напряжение материала. При температурах  $-5...0^{\circ}\text{C}$  с наветренной стороны провода образуется слой льда или изморозь.

Нагрузка складывается из массы льда и нагрузки, создаваемой давлением ветра на площадь обледененного цилиндра. Ветровая нагрузка зависит от скорости ветра, направления относительно трассы и площади поверхности, на которую направлено действие ветра.

Вибрация провода возникает при не порывистом ветре, наиболее интенсивна при скорости ветра  $3...5$  м/сек. В воздухе, обтекающем провод, образуются завихрения, вызывающие колебания провода в вертикальной плоскости. Чем сильнее натянут провод, тем больше он подвержен вибрации. Пляска проводов возникает при сильном порывистом ветре в районах, подверженных гололёду. Провод порывом сильного ветра подбрасывается вверх и на нем образуется бегущая волна.

Процесс определения нагрузок от гололёда, ветра и других неблагоприятных метеорологических условий весьма трудоёмкий и требует высокой точности проведения расчёта, так как нельзя допустить обрыва провода и, вследствие чего, прекращения подачи электроэнергии.

Таким образом, выполненные расчеты позволяют оценить механическую прочность проводов воздушных линий электропередач и сделать вывод о достаточной прочности для их безопасной эксплуатации. Тем не менее, рекомендуется проводить регулярный мониторинг состояния проводов и конструкций, а также соблюдать все установленные нормы и правила эксплуатации.

Следовательно, исследования, выполненные в рамках курсовой работы, имеют практическое значение для обеспечения надежной работы воздушных линий электропередач и предупреждения чрезвычайных ситуаций, связанных с их разрушением.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. От чего зависит средняя высота подвеса провода на опоре?
2. Каким образом определено наименьшее расстояние по вертикали от провода до поверхности земли при расчете допустимой стрелы провеса провода?
3. В зависимости от каких параметров определены нормативная толщина гололеда и давления по ветру?
4. Назовите нагрузки на провод, обозначьте наибольшее и наименьшее значение.
5. От чего зависит коэффициент надежности по ответственности для воздушных линий?
6. Каким образом увеличение длины пролета влияет на ветровую нагрузку?
7. Объясните, что означает первый, второй и третий критический пролет.
8. Объясните выбор параметров исходного режима при определении напряжений в материале провода.
9. Поясните методику определения искомого значения максимального, минимального и среднего напряжений в материале провода.
10. Назовите режимы, при которых необходимо рассчитать допустимые значения стрелы провеса провода.
11. Назовите условия, при которых полученные расстояния от низшей точки провисания провода до земли соответствуют требуемым.
12. От чего зависит наименьшее допустимое расстояние между тросом и проводом в середине пролета без учета отклонения ветром?
13. Поясните, при каких условиях обеспечивается механическая прочность троса.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 839 - 2019. Провода неизолированные для воздушных линий электропередачи. Технические условия. – М: Изд-во стандартов, 2002. – 21 с. 165
2. Беленя, Е. И. Металлические конструкции / Е. И. Беленя, В. А. Балдин, Г. С. Веденников и др. – М.: Стройиздат, 1985. – 560 с.
3. Вихарев, А. П. Проектирование механической части ЛЭП: учебное пособие / А П. Вихарев. – Киров: Изд-во ВятГУ, 2009. – 140 с.
4. Дядищев, Б. А. Справочник по эксплуатации и ремонту высоковольтных линий электропередач / Б. А. Дядищев, П. И. Хоменко. – Киев: Техника, 1984. – 192 с.
5. Короткевич, М. А. Проектирование линий электропередачи. Механическая часть / М. А. Короткевич. – Минск : Высшая школа, 2010. – 572 с.
6. Крюков, К. П. Конструкции и механический расчет ЛЭП / К. В. Крюков, Б. П. Новгородцев. – Л.: Энергия, 1979. – 310 с.
7. Федин, В. Т. Основы расчета механической части воздушных линий / В. Т. Федин. – Минск: БПИ, 1977. – 35 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
1. Исходные данные.....	4
2. Определение толщины стенки гололеда на проводе и величины ветрового давления.....	10
3. Определение удельной нагрузки на провод.....	13
4. Определение критических пролетов .....	15
5. Определение напряжений в материале провода.....	16
6. Определение стрелы провеса провода в различных режимах.....	18
7. Определение соблюдения требуемых расстояний от низшей точки провисания провода до земли.....	19
8. Определение механической прочности грозозащитного троса.....	19
Заключение.....	21
Контрольные вопросы.....	22
Библиографический список.....	23

# **РАСЧЕТ НА МЕХАНИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ ПРОВОДОВ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ**

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к выполнению курсовой работы  
для студентов направления подготовки  
13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»  
всех форм обучения

### **Составители:**

**Жерлыкина Мария Николаевна**  
**Яременко Сергей Анатольевич**  
**Гармонов Кирилл Валерьевич**

Издается в авторской редакции

Подписано к изданию 22.04.2026.

Уч.-изд. л. 1,3.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический  
университет»

394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84