



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**Белорусский национальный
технический университет**

**Кафедра «Детали машин и подъёмно-транспортные машины
и механизмы»**

**В. Л. Николаенко
Т. Н. Микулик**

**РАСЧЁТ
ОДНОЦЕПНОЙ ПОРТАЛЬНОЙ ОПОРЫ
НА ОТТЯЖКАХ**

Учебно-методическое пособие

**Минск
БНТУ
2017**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Детали машин и подъёмно-транспортные машины
и механизмы»

В. Л. Николаенко
Т. Н. Микулик

РАСЧЁТ ОДНОЦЕПНОЙ ПОРТАЛЬНОЙ ОПОРЫ
НА ОТТЯЖКАХ

Учебно-методическое пособие
к курсовому проектированию по дисциплине
«Механика» для студентов специальности
1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию
в области энергетики и энергетического оборудования*

Минск
БНТУ
2017

УДК 621.81(075.8)

ББК 32.279я7

Н64

Рецензенты:

кафедра «Теоретическая механика и теория механизмов и машин»

БГАТУ (зав. кафедрой д-р техн. наук, профессор *А. Н. Орда*);

профессор кафедры «Инженерная графика» БГУИР *В. М. Сурин*

Николаенко, В. Л.

Н64 Расчет одноцепной порталной опоры на оттяжках: учебно-методическое пособие к курсовому проектированию по дисциплине «Механика» для студентов специальности 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети» / В. Л. Николаенко, Т. Н. Микулик. – Минск : БНТУ, 2017. – 82 с.

ISBN 978-985-583-124-3.

Излагается последовательность расчета и конструирования одноцепных порталных опор энергосетей при выполнении курсового проекта.

Приводятся необходимые справочные материалы, а также список рекомендуемых литературных источников.

Рекомендуется студентам энергетических специальностей дневной и заочной форм обучения.

УДК 621.81(075.8)

ББК 32.279я7

ISBN 978-985-583-124-3

© Николаенко В. Л., Микулик Т. Н., 2017

© Белорусский национальный
технический университет, 2017

1. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ПОРТАЛЬНЫХ ОПОР

В курсовом проектировании по дисциплине «Механика» для специальности 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети» проводится расчет порталных опор на оттяжках.

Расчет порталных опор на оттяжках имеет свои особенности. Опоры такого типа относятся к так называемым вантовым конструкциям, в которых нагрузки вызывают в основном растягивающие или сжимающие усилия, воспринимаемые четко разграниченными элементами.

В сжатых элементах таких опор возникают и изгибающие моменты, например от ветровой нагрузки на стойки или от тяжения грозозащитного троса при одностороннем обрыве, но в правильно сконструированной опоре изгибающие моменты сравнительно невелики, не являются решающими для расчета конструкции опор и мало влияют на устойчивость конструкции в целом

Портальные опоры на оттяжках состоят из порталной конструкции и системы оттяжек. В таком типе опор используются шарнирные соединения.

Отличительным свойством опор на оттяжках является разделение в этих конструкциях растянутых и сжатых элементов.

За исходные данные в расчете порталных опор на оттяжках принимаются номинальное напряжение линии и климатические условия, т. е. ветровой район, район по гололедности, повторяемость скоростного напора и гололедности.

Расчет начинается с выбора марки проводов, тросов, шифра опоры и типа изоляторов, удовлетворяющих заданным данным.

На основании марки проводов по справочнику выбираются габаритный и весовой пролеты, необходимые для расчета стрелы провеса провода и троса:

$$l = \frac{l^2 \gamma}{8\sigma}, \text{ м,}$$

где l – габаритный пролет, м;

γ – удельная нагрузка в рассматриваемом режиме, даН/м·мм²;

σ – допускаемое напряжение при наибольшей нагрузке и низкой температуре, даН/мм².

Важным этапом в расчете опоры является определение расчетных нагрузок от проводов и тросов. Эти расчеты включают в себя определение:

а) нагрузок от собственного веса провода или троса

$$P_1^H = m \cdot 10^{-3}, \text{ даН/м,}$$

где m – масса провода или троса на километр;

$$G_1^H = p_1^H l, \text{ даН;}$$

б) нормативной нагрузки от веса гололеда на проводах и тросах

$$P_2^H = \pi c \gamma (d + c) \cdot 10^{-3}, \text{ даН/м,}$$

где c – толщина гололедных отложений, мм;

γ – удельный вес льда, даН/мм²;

d – диаметр провода или троса, мм.

$$G_2^H = P_2^H l, \text{ даН;}$$

в) нормативной горизонтальной нагрузки от давления ветра на провода и тросы

$$P_3^H = (\alpha K_\alpha c_x q d \sin^2 \varphi) \cdot 10^{-3}, \text{ даН/м,}$$

где α – коэффициент неравномерности распределения ветра по длине пролета;

K_α – коэффициент, учитывающий влияние длины пролета на ветровую нагрузку;

c_x – коэффициент лобового сопротивления;

q – скоростной напор, определяемый по заданным данным с помощью справочника на заданной высоте, даН/м²;

φ – угол между направлением ветра и проводами ВЛ.

Расчеты ведутся при углах 45 и 90°.

Полученные расчетные нагрузки на опору от проводов и тросов для удобства дальнейших расчетов сводятся в таблицу с учетом коэффициентов сочетания и перегрузки.

Следующим этапом является расчет ветровой нагрузки на конструкцию опоры в соответствии с указанием СНиП.

Расчетная ветровая нагрузка находится с учетом коэффициента динамичности β , учитывающего порывы ветра, и коэффициента перегрузки n и рассчитывается в двух режимах: при ветре, направленном перпендикулярно оси линии и под углом 45° к оси линии.

Особенностью этого этапа является то, что нагрузки высчитываются на отдельные части опоры: половину траверсы, одну тросостойку, одну стойку, так как опора симметрична. Стойка для удобства разбивается на верхнюю, среднюю или нижнюю секции.

Нагрузка определяется по формуле

$$W^P = C_{\text{пр}} F_{\beta} n q, \text{ даН},$$

где $C_{\text{пр}}$ – аэродинамический коэффициент:

$$C_{\text{пр}} = C_{\text{ф}} (1 + \eta);$$

$$\eta \approx 1,$$

$C_{\text{ф}} = 1,4\phi$ – аэродинамический коэффициент плоской фермы;

ϕ – коэффициент заполнения;

F – площадь по контуру, м^2 ;

n – коэффициент перегрузки;

q – скоростной напор на заданной высоте, $\text{даН}/\text{м}^2$.

Важной частью рассматриваемого типа опор являются оттяжки, которым в расчете уделяется большое внимание. Оттяжки выполняются из двойного или тройного стального каната и должны обладать достаточной прочностью.

Расчет оттяжек начинают с определения тригонометрических характеристик схемы опоры на основе выбранных геометрических размеров.

Далее выполняют непосредственный расчет оттяжек на прочность, причем он ведется в четырех режимах:

а) нормальный режим без гололеда при ветре, направленном под 45° к оси линии;

б) нормальный режим без гололеда при ветре, направленном перпендикулярно оси к линии;

в) нормальный режим с гололедом, ветер направлен перпендикулярно оси линии;

г) аварийный режим, обрыв проводов крайней фазы.

Во всех рассматриваемых режимах определяется суммарная расчетная нагрузка на стойку P^p на основе предыдущих расчетов, а с помощью ее – усилия в рабочих оттяжках:

$$T = \frac{1}{2} (P^p f_1 - 2V^p f_2) + T_0,$$

где f_1 и f_2 – тригонометрические коэффициенты;

V^p – суммарная расчетная нагрузка на траверсу, даН;

T_0 – монтажное напряжение, даН.

Из четырех режимов выбираются максимальные усилия, и затем по ним производят расчет оттяжек на прочность.

Следующим этапом является расчет стойки. Стойка проверяется на сжатие с прогибом в предельном состоянии. Для этого определяются поперечная нагрузка на стойку и величина изгибающего момента. Расчет ведется на основе ранее рассчитанных нагрузок и выбранных геометрических размеров.

Критическая сила стойки определяется из выражения

$$N_{кр} = 4F\sigma_t\phi, \text{ даН,}$$

где F – площадь сечения пояса стойки, см^2 ;

ϕ – коэффициент продольного изгиба, соответствующий приведенной гибкости стойки.

Решетка стойки должна быть рассчитана на действие:

а) реальной поперечной силы;

б) условной поперечной силы.

Траверса опоры является объемной деталью, но для удобства расчет проводят для передней грани траверсы, приняв ее в качестве плоской фермы.

Расчет фермы следует начать с определения значений опорных реакций, для чего используется условие равновесия сил, приложенных к ферме. Так как значения усилий в заданных стержнях требуется определить от трех нагрузок (постоянной и временных слева и справа), то при нахождении опорных реакций, а затем – усилий каждую из нагрузок рассматривают как независимую, не принимая во внимание остальные.

Подобранные стержни траверсы проверяются на прочность.

Если условие

$$\sigma_{\text{расч}} \leq [\sigma]$$

выполняется, то уголки подобраны правильно.

Важной частью расчета опор является расчет соединений на прочность. Раскосы решеток прикрепляются к поясам внахлестку в основном фланговыми швами, поперечные лобовые швы добавляются лишь в исключительных случаях, когда прочность фланговых швов недостаточна.

Расчет *сварного соединения* производится для стержня по формуле

$$\sigma = \frac{N^p}{\sigma_{\text{ш}} l_{\text{ш}}} \leq R_Y^{\text{св}},$$

где $R_Y^{\text{св}}$ – расчетное сопротивление сварного шва на растяжение или сжатие;

$\sigma_{\text{ш}}$ – расчетная толщина шва, равная меньшей из толщины свариваемых элементов:

$$\sigma_{\text{ш}} = \beta \omega h,$$

β – коэффициент, при ручной сварке равный 0,7;

$l_{\text{ш}}$ – длина сварного шва, равная ширине элемента минус 1 см (на непровар): $l_{\text{ш}} = \sigma - 1$, см;

h – ширина элемента.

Болтовое соединение траверсы со стойкой проверяется на срез и смятие. Условие прочности при срезе

$$N^P \leq \frac{\pi d^2}{4} n m_c R_{cp},$$

где d – диаметр болта;

n – количество болтов в соединении;

m_c – количество срезов;

R_{cp} – расчетное сопротивление соединения срезу.

Условие прочности на смятие

$$N^P \leq d n \sigma_{\Sigma} R_{cm},$$

где σ_{Σ} – минимальная суммарная толщина листов соединения, сминаемых болтом в одном направлении;

R_{cm} – расчетное сопротивление смятию.

Анкерные болты проверяются на растяжение с помощью условия прочности:

$$\frac{U}{n F_{пт}} \leq R_p^{\sigma},$$

где U – расчетная продольная сила, действующая на болтовое соединение;

n – число болтов;

$F_{пт}$ – площадь сечения болта:

$$F_{пт} = \frac{\pi}{16} (d_2 - d_3)^2,$$

где d_2 – номинальный средний диаметр резьбы;

$$d_3 = d_1 - \frac{H}{6},$$

где d_1 – номинальный внутренний диаметр резьбы;

H – высота болта;

R_p^σ – расчетное сопротивление растяжению болта.

Таким образом, приведенные особенности расчета позволяют рассчитать на прочность и сконструировать порталные опоры на оттяжках.

2. КЛАССИФИКАЦИЯ ПОРТАЛЬНЫХ ОПОР ЛЭП

Стальные опоры, применяемые на линиях электропередачи на 35 кВ и выше, по конструктивному решению ствола и в зависимости от способа подвески проводов делятся [1, 2]:

1) на опоры промежуточные, на которых провода закрепляются в поддерживающих зажимах;

2) опоры анкерного типа, служащие для натяжения проводов.

По конструктивному решению ствола опоры могут быть отнесены к двум основным схемам:

1) башенным или одностоечным;

2) порталным, а по способу закрепления на фундаментах – к свободностоящим опорам и опорам на оттяжках.

Портальные опоры (рис. 2.1) относятся к группе промежуточных опор и бывают:

а) прямые;

б) угловые.

По количеству цепей линии электропередачи порталные опоры делятся на одноцепные, двухцепные и многоцепные. Количество цепей определяется схемой электроснабжения в зависимости от передаваемой мощности, напряжения электропередачи и необходимости резервирования.

Решетка стоек порталных опор на оттяжках выполняется по схеме в «елку», а траверсы изготавливаются балочными или шпренгельными. Шпренгельные траверсы применяются также и для свободностоящих порталных опор. Стойки, имеющие в поперечном сечении размеры в пределах $0,8 \times 0,8$ м, выполняются сварными и оцинкованными целиком.

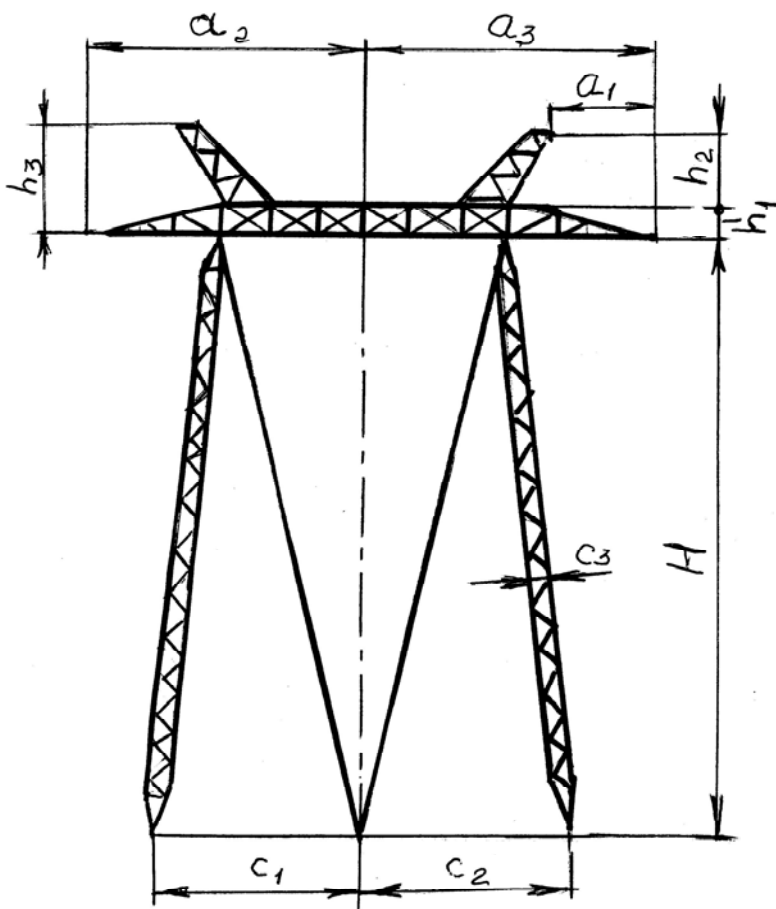


Рис. 2.1. Портальная опора

На линиях напряжением 110 кВ и выше применяются угловые опоры, рассчитанные, как правило, на углы поворота до 10° . Портальные опоры на оттяжках ВЛ 500 кВ применяются для углов поворота 5° . Опоры этого типа отличаются вылетами траверс, увеличенными с учетом отклонения гирлянды в поперечном направлении, и усиленной конструкцией ствола, на который помимо ветровых нагрузок действуют нагрузки от тяжений проводов и тросов.

По статическим схемам все опоры делятся на следующие группы:

1) свободностоящие опоры одностоечные, порталные, АП-образные;

2) опоры с оттяжками порталные, Т-образные, одностоечные.

Принципиально первые и вторые конструкции представляют собой консоли, заделанные тем или иным способом в грунте, однако они имеют и существенную разницу, так как башенные опоры относятся к жестким, а узкобазные металлические и одностоечные железобетонные опоры – к гибким конструкциям.

Портальные опоры могут быть с двумя или тремя стойками. Первые могут иметь рамное жесткое или шарнирное соединение с ригелем (траверсой), а также иметь внутренние связи, повышающие поперечную жесткость конструкций. Опоры с тремя стойками выполняются только с шарнирно опирающимися на стойки легкими траверсами, предназначенными для подвески ободных гирлянд и, следовательно, представляют собой три отдельные башенные или одностоечные опоры.

Опоры с оттяжками выполняются со стойками, шарнирно опирающимися на фундамент. Они получили распространение на линиях высокого и сверхвысокого напряжения (330 кВ и выше). Опоры с оттяжками для линий 220 кВ и ниже могут иметь как стойки с шарнирным опиранием на фундаменты, так и стойки, закрепленные непосредственно в грунте. С точки зрения статических расчетов такое закрепление увеличивает степень статической неопределимости расчетной схемы опоры.

Все опоры на оттяжках являются статически неопределимыми системами с порядком неопределенности, зависящим от конструктивной схемы опоры и числа оттяжек.

3. РАСЧЕТ СТАЛЬНОЙ ПОРТАЛЬНОЙ ОПОРЫ НА ОТТЯЖКАХ

3.1. Расчет нагрузок на опору от проводов и тросов

Расположение проводов на опоре – горизонтальное. По заданному напряжению ЛЭП – 500 кВ выбираем тип опоры – ПБ-2 (табл. 3.1).

Принимаем марку провода $3 \times \text{АС } 400/51$, что при заданных климатических условиях соответствует габаритному пролету 460 м (см. табл. 3.1). Ветровой пролет

$$l_{\text{ветр}} = l_{\text{габ}} = 460 \text{ м,}$$

а весовой пролет

$$l_{\text{вес}} = A l_{\text{ветр}} = 1,25 \cdot 460 = 575 \text{ м,}$$

где $A = \text{const} = 1,25$.

Находим стрелу провеса провода:

$$f_{\text{п}} = \frac{l_{\text{габ}}^2 \gamma}{8 \sigma_3} = \frac{460^2 \cdot 3,34 \cdot 10^{-3}}{8 \cdot 8,1} = 10,91 \text{ м,}$$

где $l_{\text{габ}}$ – габаритная длина пролета, м;

γ – удельная нагрузка в рассматриваемом режиме, даН/(м·мм²), берется в режиме без гололеда, при среднегодовой температуре: $\gamma = 3,34 \cdot 10^{-3}$ даН/(м·мм²), табл. 3.2;

σ_3 – допускаемое напряжение в рассматриваемом режиме:

$\sigma_3 = 8,1$ даН/мм² (см. табл. 3.2).

Для данного напряжения применим изолятор типа ПС 120-А, причем длина гирлянды изоляторов с арматурой составляет $S = 4,5$ м (табл. 3.3).

Т а б л и ц а 3.1

Рекомендуемые размеры промежуточных одноцепных порталных стальных опор на оттяжках

Номинальное напряжение, кВ	Тип опоры	Марка провода	Район гололедности	Длины пролетов, м			Высоты, м			
				габаритного	весаого	ветрового	H	h ₁	h ₂	h ₃
330	П 330	2 × (АС300/39-400/51)	I	470-495	568-620	470-495	25,5	0,9	3,9	4,8
		2 × (АС300/39-400/51)	II	445-470	556-588	445-470	25,5	1,0	3,8	4,8
		2 × (АС300/39-400/51)	III	420-445	525-556	420-445	25,5	1,1	3,7	4,8
		2 × (АС300/39-400/51)	IV	390-420	488-525	390-420	25,5	1,1	3,9	5,0
		2 × (АС300/48-400/64)	Особ.	365-390	456-488	365-390	25,5	1,2	3,8	5,0
		3 × (АС400/51-500/64)	I	480-490	600-612	480-490	27,0	1,0	4,0	5,0
500	ПБ-20	3 × (АС400/51-500/64)	II	470-480	588-600	470-480	27,0	1,3	3,7	5,0
		3 × (АС400/51-500/64)	III	460-470	575-588	460-470	27,0	1,3	3,7	5,0
		3 × (АС400/51-500/64)	IV	450-460	562-575	450-460	27,0	1,5	3,5	5,0
		3 × (АС400/51-500/64)	Особ.	440-450	560-562	440-450	27,0	2,0	4,0	6,0
		4 × АС400/93, 5 × АС240/39	I	535-550	570-688	535-550	32,0	2,0	6,6	7,6
		4 × АС400/93, 5 × АС240/39	II	520-535	650-670	520-535	32,0	2,2	6,4	7,6
750	ПО	4 × АС400/93, 5 × АС240/39	III	505-520	630-650	505-520	32,0	2,4	6,2	7,6
		4 × АС400/93, 5 × АС240/39	IV	490-505	612-630	490-505	32,0	2,6	6,0	8,6
		4 × АС400/93, 5 × АС240/39	Особ.	475-490	594-612	475-490	32,0	2,8	5,8	8,6

Окончание табл. 2.1

Номинальное напряжение, кВ	Тип опоры	Марка провода	Район гололёдности	Вылеты траверс, м			Расстояния по анкерным болтам, м		База средней секции
				a_1	a_2	a_3	c_1	c_2	
330	П 330	2 × (АС300/39-400/51)	I	3,2	9,6	9,6	7,3	7,3	0,7
		2 × (АС300/39-400/51)	II	3,2	9,6	9,6	7,3	7,3	0,7
		2 × (АС300/39-400/51)	III	3,2	9,6	9,6	7,3	7,3	0,7
		2 × (АС300/39-400/51)	IV	3,6	10,0	10,0	7,5	7,5	0,8
		2 × (АС300/48-400/64)	Особ.	3,6	10,0	10,0	7,5	7,5	0,8
		3 × (АС400/51-500/64)	I	3,9	11,0	11,0	8,7	8,7	0,8
500	ПБ-20	3 × (АС400/51-500/64)	II	3,9	12,0	12,0	8,7	8,7	0,9
		3 × (АС400/51-500/64)	III	4,2	12,0	12,0	8,7	8,7	0,9
		3 × (АС400/51-500/64)	IV	4,5	12,0	12,0	8,7	8,7	0,9
		3 × (АС400/51-500/64)	Особ.	4,5	12,8	12,8	9,2	9,2	1,1
		4 × АС400/93, 5 × АС240/39	I	6,0	18,5	18,5	13,6	13,6	1,2
		4 × АС400/93, 5 × АС240/39	II	6,0	18,5	18,5	13,6	13,6	1,2
750	ПО	4 × АС400/93, 5 × АС240/39	III	6,0	18,5	18,5	13,6	13,6	1,2
		4 × АС400/93, 5 × АС240/39	IV	6,5	19,0	19,0	13,8	13,8	1,3
		4 × АС400/93, 5 × АС240/39	Особ.	6,5	19,0	19,0	13,8	13,8	1,4
		4 × АС400/93, 5 × АС240/39		6,5	19,0	19,0	13,8	13,8	1,4

Т а б л и ц а 3.2

Механические характеристики проводов и тросов

Марки и сечения, мм ²	Удельная нагрузка от собственного веса γ , 10^{-3} даН/(м·мм ²)	Нормативные допускаемые напряжения	
		При наибольшей нагрузке и низшей температуре σ_T , даН/мм ²	При среднегодовой температуре σ_s , даН/мм ²
АС с сечениями 120/19, 150/24, 185/29, 240/39, 300/48, 400/64	3,46	13,0	8,7
150/19, 185/24, 240/32, 300/39, 330/43, 400/51, 450/56, 500/64	3,34	12,2	8,1
120/27, 150/34, 185/43, 240/56, 300/66, 400/93	3,71	14,9	9,9
240/56, 300/66, 400/93, 185/128, 300/204, 500/336	4,84	25,0	16,5
Стальные канаты всех сечений	8,0	62,0	42,0

Т а б л и ц а 3.3

Основные характеристики изоляции на промежуточных опорах воздушных линий

Номинальное напряжение, кВ	Тип изолятора	Количество изоляторов	Высота изолятора или длина гирлянды с арматурой S , м	Масса изолятора с арматурой, кг
330	ПФ 70-В	19	3,0	118,0
	ПС 70-В	21	3,2	111,0
	ПС 120-А	17	3,1	130,0
500	ПФ 120-А	21	4,9	238,0
	ПС 120-А	24	4,5	185,0
750	ПС 120-А	31	5,9	240,0

Высота крепления гирлянд изоляторов в траверсе составляет $H = 27$ м, а полная высота опоры

$$H_1 = H + h_1 + h_2 = 32 \text{ м (см. табл. 3.1).}$$

Высота подвеса проводов

$$h_{\text{подв.п}} = H - S = 27 - 4,5 = 22,5 \text{ м.}$$

Высота центра тяжести проводов

$$h_{\text{цт.п}} = h_{\text{подв.п}} - \frac{2}{3} f_{\text{п}} = 22,5 - \frac{2}{3} \cdot 10,91 = 15,2 \text{ м.}$$

Находим высоту центра тяжести тросов.

Стрела провеса троса

$$f_{\text{тр}} = f_{\text{п}} - (0,5 \dots 1,5) = 10,91 - 1 = 9,91 \text{ м.}$$

Высота центра тяжести троса

$$h_{\text{цт.т}} = h_{\text{подв.т}} - \frac{2}{3} f_{\text{тр}};$$

$$h_{\text{подв.т}} = H_1 = 32 \text{ м.}$$

Следовательно,

$$h_{\text{цт.т}} = 32 - \frac{2}{3} \cdot 9,91 = 25,39 \text{ м.}$$

Нормативный скоростной напор для проводов при $h_{\text{цт.п}} = 15,2$ м находим по формуле

$$q_{\text{пр}} = qn,$$

где q – нормативный скоростной напор на высоте 15 м (табл. 3.4);

n – коэффициент увеличения скоростных напоров по высоте (табл. 3.5).

Т а б л и ц а 3.4

Нормативные скоростные напоры, даН/м²,
и приближенные скорости ветра, м/с,
для высоты до 15 м над поверхностью земли

Ветровой район	Повторяемость					
	1 раз в 5 лет		1 раз в 10 лет		1 раз в 15 лет	
	<i>q</i>	<i>v</i>	<i>q</i>	<i>v</i>	<i>q</i>	<i>v</i>
I	27	21	40	25	55	30
II	35	24	40	25	55	30
III	45	27	50	29	55	30
IV	55	30	65	32	80	36
V	70	33	80	36	80	36
VI	85	37	100	40	100	40
VII	100	40	125	45	125	45

Т а б л и ц а 3.5

Коэффициенты увеличения скоростных напоров
и скоростей ветра по высоте

Зона по высоте, м	Скоростной напор ветра	Скорость ветра
До 15	1,0	1,0
20	1,25	1,12
40	1,55	1,24
60	1,75	1,32
100	2,1	1,45
200	2,6	1,61
350 и выше	3,1	1,76

Промежуточные значения определяются путем линейной интерполяции.

Принимаем $q = 100$ даН/м²,

$n = 1,02$ (для провода),

$$q_{\text{пр}} = 100 \cdot 1,02 = 102 \text{ даН/м}^2.$$

Нормативный скоростной напор при $h_{\text{шт.т}} = 25,39$ м, $n = 1,35$ (для троса)

$$q_{\text{тр}} = qn = 100 \cdot 1,35 = 135 \text{ даН/м}^2.$$

Определяем расчетные нагрузки на опору от проводов и тросов.

1. Масса провода данной марки $M_{\text{пр}} = 1490$ кг/км (табл. 3.6).

Нагрузка от собственного веса провода

$$P_1^H = M_{\text{пр}} \cdot 10^{-3} = 1490 \cdot 10^{-3} = 1,49 \text{ даН/м.}$$

Нормативная вертикальная нагрузка от собственного веса провода на опору

$$G_1^H = P_1^H l_{\text{вес}} = 1,49 \cdot 575 = 856,75 \text{ даН.}$$

2. Нормативная нагрузка от веса гололёда на проводах

$$G_2^H = P_2^H l_{\text{вес}}, \text{ даН,}$$

где P_2^H – нормативная нагрузка от веса гололёдных отложений на 1 м провода:

$$P_2^H = \pi c \gamma_0 (d + c) \cdot 10^{-3}, \text{ даН/м,}$$

где c – толщина гололедных отложений: $c = 15$ м (табл. 3.7);

d – диаметр провода: $d = 27,5$ м (см. табл. 3.6);

γ_0 – удельный вес льда: $\gamma_0 = \text{const} = 0,9$ даН/м.

$$P_2^H = 3,14 \cdot 15 \cdot 0,9 \cdot (27,5 + 15) \cdot 10^{-3} = 1,802 \text{ даН/м;}$$

$$G_2^H = 1,802 \cdot 575 = 1036,15 \text{ даН.}$$

Сталеалюминевые провода марок АС

Номинальное сечение алюминий-стальной стальной проволоки, мм ²	Число и диаметр проволок, мм		Сечение, мм ²			Диаметр проволоки d , мм	Электрическое сопротивление постоянному току при 20 °С, Ом/км, не более	Ток, А	Разрывное усилие, для проводов из алюминиевой проволоки, кгс, не менее		Масса провода $m_{пр}$, кг/км	Строительная длина, м
	алюминевых	стальных	алюминия	стали	Всего				АТ	АТп		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
С отношением $A : C = 6,0$												
10/1,8	6 × 1,5	1 × 1,5	10,6	1,77	12,37	4,5	2,695	80	371	396	42,7	3000
16/2,7	6 × 1,85	1 × 1,85	16,1	2,69	18,78	5,6	1,772	105	572	602	65,0	3000
25/4,2	6 × 2,30	1 × 2,30	24,9	4,15	29,05	6,9	1,146	130	871	894	100	3000
35/6,2	6 × 2,80	1 × 2,80	36,9	6,15	43,05	8,4	0,773	175	1274	1323	148	3000
50/8,0	6 × 3,20	1 × 3,20	48,2	8,04	56,24	9,6	0,592	210	1632	1675	194	3000
70/11	6 × 3,80	1 × 3,80	68,0	11,3	79,3	11,4	0,420	265	2298	2329	274	3000
95/16	6 × 4,50	1 × 4,50	95,4	15,9	111,3	13,6	0,292	330	3185	3270	386	1500
С отношением $A : C = 6,11-6,25$												
95/15	26 × 2,12	7 × 1,65	91,7	15,0	106,7	13,5	0,314	330	3202	3385	370	1500
120/19	26 × 2,40	7 × 1,85	118	18,8	136,8	15,2	0,245	380	4064	4182	471	1500
150/24	26 × 2,70	7 × 2,10	149	24,2	173,2	17,1	0,194	445	5108	5431	600	2000
185/29	26 × 2,98	7 × 2,30	181	29,0	210,0	18,3	0,159	510	6081	6353	728	2000
240/39	26 × 3,40	7 × 2,65	236	38,6	274,6	21,6	0,122	610	8013	8249	952	2000

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
300/48	26 × 3,80	7 × 2,95	295	47,8	342,8	24,1	0,098	690	9969	10116	1186	2000
400/64	26 × 4,37	7 × 3,40	390	63,5	453,5	27,7	0,074	835	12783	13173	1572	1500
С отношением A : C = 7,71–8,04												
150/19	24 × 2,80	7 × 1,85	148	18,8	166,8	16,8	0,195	450	4500	4722	554	2000
185/24	24 × 3,15	7 × 2,10	187	24,2	211,2	18,9	0,154	505	5735	5922	705	2000
205/27	24 × 3,30	7 × 2,20	205	26,6	231,6	19,8	0,140	-	6295	6500	774	2000
240/32	24 × 3,60	7 × 2,40	244	31,7	275,7	21,6	0,118	605	7409	7653	921	2000
300/39	24 × 4,00	7 × 2,65	301	38,6	339,6	24,0	0,096	690	8935	9236	1132	2000
330/43	54 × 2,80	7 × 2,80	332	43,1	375,1	25,2	0,087	-	10078	10575	1255	2000
400/51	54 × 3,05	7 × 3,05	394	54,1	445,1	27,5	0,073	825	11766	12160	1490	1500
450/56	54 × 3,20	7 × 3,20	434	56,3	490,3	28,8	0,067	-	12962	13396	1640	1500
500/64	54 × 3,40	7 × 3,40	490	63,5	553,5	30,6	0,059	945	14628	15118	1852	1500
550/71	54 × 3,60	7 × 3,60	549	71,2	620,2	32,4	0,053	-	16395	16944	2076	1200
600/72	54 × 3,70	19 × 2,20	580	72,2	652,2	33,2	0,050	1050	17732	18312	2170	1200
650/79	96 × 2,90	19 × 2,30	634	78,9	712,9	34,7	0,046	-	19156	20107	2372	1000
700/86	96 × 3,02	19 × 2,40	687	85,9	772,9	36,2	0,042	1220	20902	21832	2575	1000
750/93	96 × 3,15	19 × 2,50	748	93,2	841,2	37,7	0,039	-	22633	23351	2800	1000
800/105	96 × 3,30	19 × 2,65	821	105	926	39,7	0,035	-	25118	25938	3092	1000
С отношением A : C = 4,29–4,39												
120/27	30 × 2,22	7 × 2,20	116	26,6	142,6	15,5	0,249	375	4885	5117	528	2000
150/34	30 × 2,50	7 × 2,50	147	34,3	181,3	17,5	0,196	450	6086	6306	675	2000
185/43	30 × 2,80	7 × 2,80	185	43,1	288,1	19,6	0,156	515	7652	7930	846	2000
240/56	30 × 3,20	7 × 3,20	241	56,3	297,3	22,4	0,120	610	9778	10019	1106	2000

Окончание табл. 3.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
300/66	30 × 3,50	19 × 2,10	288	65,8	353,8	24,5	0,100	705	12191	12479	1313	2000
400/93	30 × 4,15	19 × 2,50	406	93,2	499,2	29,1	0,071	850	16767	17173	1851	1500
С отношением $A : C = 1,46$												
185/128	54 × 2,10	37 × 2,10	187	128	315	23,1	0,155	–	17649	18023	1525	4000
300/204	54 × 2,65	37 × 2,65	298	204	502	29,2	0,097	–	27398	27845	2428	3500
500/336	54 × 3,40	61 × 2,65	490	336	826	37,5	0,059	–	45112	45602	4005	3000
Специальные усиленные с отношением $A : C = 0,65-0,95$												
70/72	18 × 2,20	19 × 2,20	68,4	72,2	140,6	15,4	0,420	–	9325	9462	755	4000
95/141	24 × 2,20	37 × 2,20	91,2	141	232,2	19,8	0,316	–	17490	17673	1357	4000
Специальные ослабленные с отношением $A : C = 12,22-18,09$												
330/27	84 × 2,22	7 × 2,20	325	26,6	351,6	24,4	0,089	–	8437	9087	1106	2000
400/22	76 × 2,57	7 × 2,00	394	22,0	416,0	26,6	0,073	–	8910	9500	1261	1500
500/27	76 × 2,84	7 × 2,20	481	26,6	507,6	29,4	0,060	–	10849	11570	1537	1500

Т а б л и ц а 3.7

Нормативная толщина стенки гололеда s , мм,
для высоты 15 м над поверхностью земли

Район гололедности	Повторяемость	
	1 раз в 5 лет	1 раз в 10 лет
I	5	5
II	5	10
III	10	15
IV	15	20
Особый	20 и более	Более 22

3. Нормативная горизонтальная нагрузка от давления ветра на провода:

а) при отсутствии гололеда

$$P_4^H = P_4^H l_{\text{ветр}}, \text{ даН},$$

где P_4^H – нормативная нагрузка от давления ветра на 1 м провода:

$$P_4^H = (\alpha K_\alpha c_x q_{\text{пр}} d \sin^2 \varphi) \cdot 10^{-3},$$

где α – коэффициент неравномерности распределения ветра по длине пролета: $\alpha = 0,7$ (табл. 3.8);

K_α – коэффициент, учитывающий влияние длины пролета на ветровую нагрузку, при длине пролета 250 м равный 1 (см. табл. 3.8);

c_x – коэффициент лобового сопротивления (см. табл. 3.8): $c_x = 1,1$;

d – диаметр провода;

φ – угол между направлением ветра и проводами воздушной линии;

$q_{\text{пр}}$ – нормативный скоростной напор ветра на провода: $q_{\text{пр}} = 102 \text{ даН/м}^2$.

Поправочные коэффициенты

Длина пролета, м	До 50	100	150	250 и более
K_α	1,2	1,1	1,05	1
Скоростной напор ветра, даН/м ²	27	40	55	76 и более
Коэффициент неравномерности скоростного напора по пролету α	1	0,85	0,75	0,7
Диаметр проводов и тросов, мм	Менее 20		20 и более	
Коэффициент лобового сопротивления c_x	1,2		1,1	

Направление ветра перпендикулярно линии электропередачи:
при $\varphi = 90^\circ$

$$p_4^H = (0,7 \cdot 1 \cdot 1,1 \cdot 102 \cdot 27,5 \sin^2 90^\circ) \cdot 10^{-3} = 2,16 \text{ даН/м};$$

$$P_4^H = 460 \cdot 2,16 = 993,6 \text{ даН};$$

при $\varphi = 45^\circ$

$$p_4^H = (0,7 \cdot 1 \cdot 1,1 \cdot 102 \cdot 27,5 \sin^2 45^\circ) \cdot 10^{-3} = 1,08 \text{ даН};$$

$$P_4^H = 460 \cdot 1,08 = 496,8 \text{ даН};$$

б) с гололедом

$$P_5^H = p_5^H l_{\text{ветр}},$$

где p_5^H – нормативное давление ветра на 1 м провода:

$$p_5^H = \alpha K_\alpha c_x \frac{q_{\text{пр}}}{4} (d + 2c) \sin^2 \varphi \cdot 10^{-3},$$

где c – толщина стенки гололеда.

Берется $\frac{1}{4}$ часть от всего скоростного напора.

При $\varphi = 90^\circ$

$$p_5^H = 0,7 \cdot 1 \cdot 1,1 \cdot 102 (27,5 + 2 \cdot 15) \sin^2 90^\circ \cdot 10^{-3} = 1,129 \text{ даН/м},$$

$$P_5^H = 1,129 \cdot 460 = 519,3 \text{ даН}.$$

4. Нагрузка от тяжения проводов

$$T_{\text{max}} = F \sigma_3,$$

где F – площадь поперечного сечения провода: $F = 445,1 \text{ мм}^2$ (см. табл. 3.6);

σ_3 – напряжение в проводе при среднегодовой температуре:
 $\sigma_3 = 8,1 \text{ даН/мм}^2$ (см. табл. 3.2).

$$T_{\text{max}} = 445,1 \cdot 8,1 = 3605,31 \text{ даН}.$$

Нормативная нагрузка по аварийному режиму

$$T_H = T_{\text{max}} b,$$

где b – коэффициент нормативной нагрузки (выбирается в зависимости от сечения провода): $b = 0,4$ (табл. 3.9).

Т а б л и ц а 3.9

Коэффициент нормативной нагрузки и понижающий коэффициент

Сечение провода и троса, мм	Коэффициент нормативной нагрузки b	Число проводов в фазе	Понижающий коэффициент K
240 и выше	0,4	1	1
185 и ниже	0,5	2	0,8
		3	0,7
		4	0,6

С учетом понижающего коэффициента K , при расщеплении фазы на три провода равного $0,7$ (см. табл. 3.9):

$$T_{\Pi} = bKT_{\max} = 0,4 \cdot 0,7 \cdot 3604,5 = 1009,3 \text{ даН.}$$

5. Для данного напряжения линии применяется трос марки С-70, массой $G = 0,623$ кг/м, площадь поперечного сечения $72,6 \text{ мм}^2$, диаметр 11 мм (табл. 3.10).

Т а б л и ц а 3.10

Стальные канаты (по ГОСТ 3062–69, 3063–66, 3064–66)

Марка троса	Число и диаметр проволок, шт. × мм	Диаметр каната, мм	Площадь сечения, мм ²	Масса каната G , кг/м	Разрывное усилие каната R , даН
С-35	1 × 2,8 6 × 2,6	8,0	38,01	0,330	4890
С-50	1 × 1,9 18 × 1,8	9,1	48,64	0,4175	6120
С-70 (220 кВ и выше)	1 × 2,3 18 × 2,2	11,0	72,58	0,623	9135 (7838)
–	1 × 1,9 36 × 1,8	12,5	94,44	0,806	11 200
–	1 × 2,1 36 × 2,0	14,0	116,66	0,9945	13 650
–	1 × 2,3 36 × 2,2	15,5	141,0	1,205	16 700
–	1 × 2,5 36 × 2,4	17,0	167,77	1,435	19 900
–	1 × 2,8 36 × 2,6	18,5	197,29	1,685	23 450
–	1 × 3,2 36 × 3,0	21,0	262,51	2,240	31 200

Для канатов из проволоки с временным сопротивлением разрыву 140 кгс/мм^2 значение в скобках дано при 120 кгс/мм^2 .

Как правило, в качестве грозозащитных тросов на воде ВЛ 35 кВ применяются канаты 8,0-Н-120-1-СС ГОСТ 3062–69, на ВЛ 110 и 150 кВ – канаты 9,1-Г-1-СС-Н-140 ГОСТ 3063–66, на ВЛ напряжением 220 кВ и выше – канаты 11,0-Г-1-СС-Н-140 ГОСТ 3063–66.

Пояснение обозначений:

Г – грузовые;

1 – первой марки;

СС – из оцинкованной проволоки для средних условий работы;

Н – нераскручивающиеся.

Расчет троса выполняется аналогично расчету проводов.

Нагрузка от собственного веса троса

$$p_{1\text{ тр}}^{\text{H}} = 0,623 \text{ даН/м.}$$

Нормативная вертикальная нагрузка от собственного веса

$$G_{1\text{ тр}}^{\text{H}} = p_{1\text{ тр}}^{\text{H}} l_{\text{вес}} = 0,623 \cdot 575 = 358,2 \text{ даН.}$$

6. Нормативная нагрузка от веса гололеда на тросах

$$G_{2\text{ тр}}^{\text{H}} = p_{2\text{ тр}}^{\text{H}} l_{\text{вес}};$$

$$p_{2\text{ тр}}^{\text{H}} = 3,14 \cdot 0,9 \cdot 15 (11 + 15) \cdot 10^{-3} = 1,102 \text{ даН/м;}$$

$$G_{2\text{ тр}}^{\text{H}} = 1,102 \cdot 575 = 633,7 \text{ даН.}$$

7. Нормативная горизонтальная нагрузка от давления ветра на трос:

а) при отсутствии гололеда:

при $\varphi = 90^\circ$

$$p_{4\text{ тр}}^{\text{H}} = 0,7 \cdot 1 \cdot 1,2 \cdot 135 \cdot 11 \cdot \sin^2 90^\circ \cdot 10^{-3} = 1,247 \text{ даН/м,}$$

$$P_{4\text{ тр}}^{\text{H}} = p_{4\text{ тр}}^{\text{H}} l_{\text{ветр}} = 1,247 \cdot 460 = 573,8 \text{ даН;}$$

при $\varphi = 45^\circ$

$$P_{4 \text{ тр}}^H = 0,7 \cdot 1 \cdot 1,2 \cdot 135 \cdot 11 \cdot \sin^2 45^\circ \cdot 10^{-3} = 0,624 \text{ даН/м,}$$

$$P_{4 \text{ тр}}^H = 0,624 \cdot 460 = 286,9 \text{ даН;}$$

б) с гололедом

$$P_{5 \text{ тр}}^H = 0,7 \cdot 1 \cdot 1,2 \cdot 135/4 \cdot (11 + 2 \cdot 15) \cdot \sin^2 90^\circ \cdot 10^{-3} = 1,16 \text{ даН/м,}$$

$$P_{5 \text{ тр}}^H = 1,16 \cdot 460 = 534,7 \text{ даН.}$$

8. Нагрузки от тяжения троса

$$T_{\max} = F\sigma_r = 72,6 \cdot 62 = 4501,2 \text{ даН,}$$

где F – площадь поперечного сечения троса, мм^2 : $F = 72,6 \text{ мм}^2$;

σ_r – напряжение в тросе при наибольшей нагрузке и низшей температуре: $\sigma_r = 62 \text{ даН/мм}^2$ (см. табл. 3.2).

При аварийном режиме

$$T_{\text{тр}} = 0,5T_{\max}.$$

С учетом понижающего коэффициента сочетания 0,8

$$T_{\text{тр}} = 0,5 \cdot 0,8 \cdot 4501,2 = 1800 \text{ даН.}$$

9. Масса выбранного ранее изолятора ПС 120-А вместе с массой арматуры $m = 185 \text{ кг}$ (см. табл. 3.3).

Следовательно, вес гирлянды, состоящей из 24 тарелок: $G_r = 185 \text{ даН}$.

Расчетные нагрузки на опору от проводов и тросов сведены в табл. 3.12 с учетом коэффициентов сочетания, перегрузки и количества проводов в фазе (табл. 3.11).

Т а б л и ц а 3.11

Коэффициенты перегрузки в нормальных и аварийных режимах

Наименование нагрузок	Коэффициенты перегрузки m
От собственного веса строительных конструкций, проводов, тросов и оборудования ВЛ	1,1 (0,9)*
От веса гололеда на проводах и тросах	2,0
От веса гололеда на конструкции опоры	1,3
От давления ветра на конструкции опор: при отсутствии гололеда на проводах и тросах	1,2
при наличии гололеда на проводах и тросах	1,0 (1,2)**
От давления ветра на провода и тросы: свободные от гололеда	1,2
покрытые гололедом	1,4
Горизонтальные нагрузки от тяжения проводов и тросов, свободных от гололеда или покрытых гололедом	1,3

* Значение, указанное в скобках, должно приниматься в случаях, когда уменьшение вертикальной постоянной нагрузки ухудшает условия работы конструкции (например, при расчете анкерных болтов, фундаментов и оснований при выдергивании).

** Значение, указанное в скобках, принимается в случаях учета гололедных отложений на конструкциях опор.

Т а б л и ц а 3.12

Расчетные нагрузки, даН, на промежуточную опору проводов и тросов

Наименование нагрузки	Обозначение	Нормальный режим. Ветер без гололеда, направлен перпендикулярно оси линии	Нормальный режим. Ветер без гололеда, направлен под 45° к оси линии	Нормальный режим. Ветер с гололедом. Направлен перпендикулярно оси линии	Аварийный режим. Обрыв крайней фазы. Гололеда и ветра нет	Аварийный режим. Обрыв троса. Гололеда и ветра нет
1	2	3	4	5	6	7
Вес проводов фазы	G_{Φ}	942,4·3 = 2827,2	942,4·3 = 2827,2	–	942,4·3 = 2827,2	942,4·3 = 2827,2

1	2	3	4	5	6	7
Вес троса	$G_{тр}^p$	394	394	–	394	394
Вес проводов фазы с гололедом	G_{ϕ}^{1p}	–	–	$3785,9 \cdot 3 = 11357,1$	–	–
Вес троса с гололедом	$G_{тр}^{1p}$	–	–	1983,8	–	–
Вес гирлянды изоляторов	$G_{Г}^p$	203,5	203,5	203,5	203,5	203,5
Ветровая нагрузка на провода фазы	P_{ϕ}^p	$1192,3 \cdot 3 = 3576,9$	$596,1 \cdot 3 = 1788,3$	$727 \cdot 3 = 2181$	–	–
Ветровая нагрузка на трос	$P_{тр}^p$	688,6	341,2	748,4	–	–
Тяжение проводов фазы при обрыве	T_{ϕ}^p	–	–	–	1312,1	–
Тяжение троса при обрыве	$T_{тр}^p$	–	–	–	–	2256,8

3.2. Расчет ветровой нагрузки на конструкцию опоры

Произведем расчет ветровой нагрузки на конструкцию опоры в соответствии с указаниями СНиП 11–6–76 (нормы проектирования, нагрузки и воздействия). Ветер перпендикулярен оси линии.

Расчетная ветровая нагрузка находится с учетом коэффициента динамичности β , учитывающего порывы ветра, и с коэффициентом перегрузки m (при ветре без гололеда): $\beta = 1,65$; $m = 1,2$ (для опор на оттяжках). Нагрузки определяют на одну тросостойку, одну стойку и на половину траверсы.

1. При ветре, направленном перпендикулярно оси линии:
 - а) половина траверсы

$$W_{\text{трав.}\perp}^p = 0,45W_{\text{трав}}^p = 0,45c_{\text{пр}}F\beta mq' =$$

$$= 0,45 \cdot 0,328 \cdot 13,5 \cdot 1,65 \cdot 1,2 \cdot 135 = 532,6 \text{ даН}$$

(значения и названия всех коэффициентов см. в табл. 3.13);

б) тросостойка

$$W_{\text{тр.ст.}\perp}^{\text{P}} = c_{\text{пр}} F \beta m q' = 0,606 \cdot 2,19 \cdot 1,65 \cdot 1,2 \cdot 140 = 367,9 \text{ даН};$$

в) верхняя секция стойки опоры

$$W_{\text{в.с.}\perp}^{\text{P}} = c_{\text{пр}} F \beta m q' = 0,606 \cdot 1,21 \cdot 1,65 \cdot 1,2 \cdot 134 = 194,6 \text{ даН};$$

г) средняя секция стойки опоры

$$W_{\text{с.с.}\perp}^{\text{P}} = c_{\text{пр}} F \beta m q' = 0,366 \cdot 19,56 \cdot 1,65 \cdot 1,2 \cdot 100 = 1417,5 \text{ даН};$$

д) нижняя секция стойки опоры

$$W_{\text{н.с.}\perp}^{\text{P}} = c_{\text{пр}} F \beta m q' = 0,606 \cdot 1,21 \cdot 1,65 \cdot 1,2 \cdot 100 = 145,2 \text{ даН}.$$

2. При ветре под углом 45° к оси линии

а) $W_{\text{трав.х}}^{\text{P}} = 0,65 W_{\text{трав}}^{\text{P}} = 0,65 c_{\text{пр}} F \beta m q' = 0,65 \cdot 0,328 \cdot 13,5 \cdot 1,65 \times$
 $\times 1,2 \cdot 135 = 769,3 \text{ даН};$

$$W_{\text{трав.у}}^{\text{P}} = 0,45 W_{\text{трав}}^{\text{P}} = W_{\text{трав.}\perp}^{\text{P}} = 532,6 \text{ даН};$$

б) $W_{\text{тр.ст.х}} = W_{\text{тр.ст.у}}^{\text{P}} = 0,8 W_{\text{тр.ст.}\perp}^{\text{P}} = 0,8 \cdot 367,9 = 294,3 \text{ даН};$

в) $W_{\text{в.с.х}}^{\text{P}} = W_{\text{в.с.у}}^{\text{P}} = 0,8 W_{\text{в.с.}\perp}^{\text{P}} = 0,8 \cdot 194,5 = 155,6 \text{ даН};$

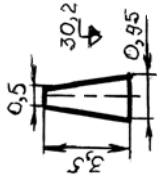

г) $W_{\text{с.с.х}}^{\text{P}} = W_{\text{с.с.у}}^{\text{P}} = 0,8 W_{\text{с.с.}\perp}^{\text{P}} = 0,8 \cdot 1417,5 = 1134 \text{ даН};$

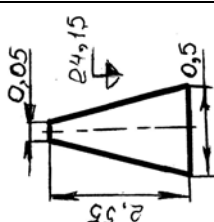
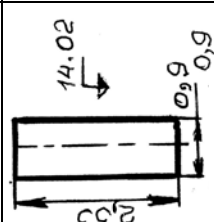
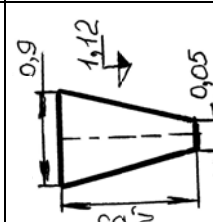
д) $W_{\text{н.с.х}}^{\text{P}} = W_{\text{н.с.у}}^{\text{P}} = 0,8 W_{\text{н.с.}\perp}^{\text{P}} = 0,8 \cdot 145,2 = 116,2 \text{ даН}.$

Данные к расчету ветровой нагрузки и результаты расчета сведены в табл. 3.13.

Таблица 3.13

Ветровая нагрузка на конструкцию опоры

Наименование секции	Эскиз и средняя отметка секции, м	Коэффициент увеличения скорости роста ного напора по высоте n	Нормативный скоростной напор $q = q_n$	Площадь элементов фермы $f_f, м^2$	Площадь по контуру $F, м^2$	Коэффициент заполнения $\varphi = f_f/F$	Аэродинамический коэффициент $c_\varphi = 1,4\varphi$	η при $b/h = 1$ (табл. 3.14)	Аэродинамический коэффициент $c_{np} = c_\varphi(1 + \eta)$	Расчетная ветровая нагрузка, даН, с учетом $\beta = 1,65$ и $m = 1,2$		
										При ветре, направленном перпендикулярно оси линии, W_x^p	При ветре, под углом 45° к оси линии, W_y	При ветре, W_z^p
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Тросостойка		1,4	140	0,54	2,19	0,25	0,35	0,73	0,606	367,9	294,3	294,3
Половина траверсы		1,35	235	2,95	13,5	0,22	0,168	0,85	0,328	532,6	769,3	532,6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
Верх- няя секция		1,34	134	0,23	1,21	0,25	0,35	0,73	0,606	194,5	155,6	155,6	
Сред- няя секция		1,0	100	2,68	19,56	0,135	0,189	0,94	0,366	1417,5	1134	1134	
Ниж- няя секция		1,0	100	0,23	1,21	0,25	0,35	0,73	0,606	145,2	116,1	116,1	
Суммарная нагрузка на половину конструкции опоры											2657,7	2469,3	2232,6

φ	Значение η для ферм из профилей при b/h, равном				
	1,2	1	2	4	6
0,1	0,93	0,99	1	1	1
0,2	0,85	0,81	0,87	0,90	0,93
0,3	0,56	0,65	0,73	0,78	0,83
0,4	0,38	0,48	0,59	0,65	0,72
0,5	0,19	0,32	0,44	0,52	0,61
0,6	0	0,15	0,30	0,40	0,50

h – длина наименьшей стороны контура;

b – расстояние между соседними фермами.

3.1. Расчет оттяжек на прочность

Определяем тригонометрические характеристики схемы опоры, рис. 3.1.

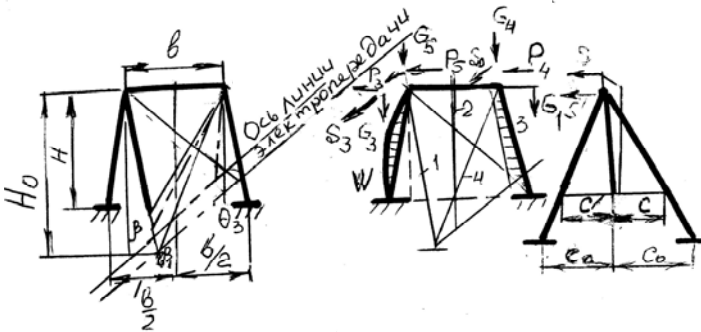


Рис. 3.1. Расчетная схема portalной опоры на оттяжках

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{H_0}{\sqrt{\left(\frac{b}{2}\right)^2 + c_0^2}} = \frac{27 + 2,42}{6^2 + 9^2} = 2,72;$$

$$\frac{b}{2} = \frac{12}{2} = 6 \text{ м};$$

$$c_0 = 9,0 \text{ м},$$

$$\beta = 69,8^\circ, \quad \cos\beta = 0,341, \quad \sin\beta = 0,95;$$

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{2c_0}{b} = \frac{2 \cdot 9}{12} = 1,5;$$

$$\theta = 56^\circ 3';$$

$$\cos\theta = 0,555;$$

$$\sin\theta = 0,832;$$

$$\operatorname{tg}\beta_0 = \frac{H}{b_0 - \frac{b}{2}} = \frac{27}{8,7 - \frac{12}{2}} = 10;$$

$$\beta_0 = 84^\circ 29';$$

$$\cos\beta_0 = 0,099;$$

$$\sin\beta_0 = 0,995.$$

Вычисляем коэффициенты уравнений:

$$\nu = 1 + \frac{\operatorname{tg}\beta}{\operatorname{tg}\beta_0 \cos\theta} = 1 + \frac{2,75}{\sqrt{10} \cdot 0,555} = 1,5;$$

$$f_1 = \frac{1}{\nu \cos\beta \cdot \cos\theta} = \frac{1}{1,5 \cdot 0,341 \cdot 0,555} = 3,52;$$

$$f_2 = \frac{1}{\cos\beta \cdot \sin\theta} = \frac{1}{0,32 \cdot 0,832} = 3,76;$$

$$f_3 = \frac{f_1}{\operatorname{tg}\beta_0} = \frac{1}{\nu \operatorname{tg}\beta_0 \cdot \cos\beta \cdot \cos\theta} = \frac{1}{1,5 \cdot 10 \cdot 0,341 \cdot 0,555} = 0,352.$$

Определяем усилия в оттяжках по расчетным нагрузкам, указанным в табл. 3.12.

3.3.1. Нормальный режим без гололеда. Ветер направлен перпендикулярно линии

Расчетная нагрузка, действующая вдоль оси траверсы, является суммой горизонтальных сил, направленных вдоль оси траверсы или приведенных к отметке траверсы. Приведенными нагрузками являются (рис. 3.2):

а) нагрузки от ветра на трос и тросостойку. Изгибающий момент от этих нагрузок относительно оси траверсы заменяется моментом сил V на плече b ; сами нагрузки складываются с силами, действующими непосредственно вдоль траверсы;

б) нагрузки от ветра на стойки опоры. Реакция от этих нагрузок передается вдоль оси траверсы, при малом угле наклона стойки к вертикали ее можно принимать равной половине давления ветра на стойку.

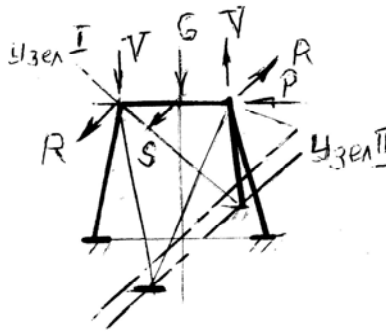


Рис. 3.2. Схема приведенных нагрузок

Таким образом, суммарная расчетная нагрузка вдоль оси траверсы:

$$\begin{aligned}
 P^P &= 2P_{\text{тр}}^P + 3P_{\text{ф}}^P + 2W_{\text{тр.ст.1}}^P + 2W_{\text{трав.1}}^P + 2 \cdot \frac{1}{2} (W_{\text{б.с.1}}^P + W_{\text{н.с.1}}^1 + W_{\text{с.с.1}}^P) = \\
 &= 2 \cdot 688,6 + 3 \cdot 3576,7 + 2 \cdot 367 \cdot 9 + 2 \cdot 532,6 + \\
 &+ 2 \cdot \frac{1}{2} (194,6 + 145,2 + 1417,5) = 15,67 \cdot 10^3 \text{ даН};
 \end{aligned}$$

$$V_1^p = \frac{2P_{\text{тр}}^p \frac{b}{2} + 2W_{\text{тр.ст}}^p \frac{b}{4}}{b} = \frac{2 \cdot 688,6 \cdot 6 + 2 \cdot 367,9 \cdot 3}{12} = 0,873 \cdot 10^3 \text{ даН.}$$

При ветре, направленном слева направо, остаточное натяжение будет в оттяжках 3 и 4 (см. рис. 3.1). Усилия в рабочих оттяжках 1 и 2 находим по формуле

$$T_1^p = T_2^p = \frac{1}{2} (P^p f_1 + 2V^p f_3) + kT_0 =$$

$$= \frac{1}{2} (15,67 \cdot 3,69 - 2 \cdot 0,873 \cdot 0,388) + kT_0 = 28,5 + kT_0.$$

Оттяжки выполняются из двойного стального каната диаметром 21,0 мм (для нашего случая) по ГОСТ 3064–66. Выбор диаметра каната оттяжки осуществляется конструктивно в зависимости от климатических условий и расчетных нагрузок и должен быть не менее диаметра грозозащитного троса (в данном расчете не менее 11 мм). Для выбора канатов оттяжки см. табл. 3.10.

Расчетное сопротивление оттяжки

$$R = \frac{nR^1}{k_{\sigma}},$$

где n – число стальных канатов в оттяжке;

R^1 – разрывное усилие каната, даН (см. табл. 3.10):

$$R = \frac{2 \cdot 31\,200}{1,8} = 34\,667 \text{ даН;}$$

k_{σ} – коэффициент безопасности: для всех видов оттяжек:
 $k_{\sigma} = 1,6 - 1,8.$

Натяжение в оттяжке

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{T_1^p}{\omega},$$

где T_1^p – усилие в рабочих оттяжках: $T_1^p = 28\,500$ даН;

ω – площадь поперечного сечения оттяжки:

$$\omega = 2 \cdot 262,5 = 525 \text{ мм}^2;$$

$$\sigma_{\max} = \frac{28\,500}{525} = 54,28 \text{ даН/мм}^2.$$

Монтажное натяжение $T_0 = 1570$ даН (330 кВ–1500 даН, 750 кВ = 500 кВ–1570 даН). Следовательно, монтажное натяжение в оттяжке

$$\sigma_0 = \frac{T_0}{\omega} = \frac{1570}{525} = 2,99 \text{ даН/мм}^2.$$

Погонный вес оттяжки

$$q_0 = 2G = 2 \cdot 2,24 = 4,48 \text{ даН/м},$$

где $G = 2,24$ даН/м – вес 1 м каната данного типа (см. табл. 3.10).

Длина оттяжки

$$a = \frac{H + 0,2}{\sin\beta} = \frac{27 + 0,2}{0,95} = 28,63 \text{ м}.$$

Приведенная нагрузка на оттяжку

$$p = \frac{q_0 \cos\beta}{\omega} = \frac{4,48 \cdot 0,341}{525} = 2,91 \cdot 10^{-3} \text{ даН/(мм}^2 \cdot \text{м)}.$$

Остаточное натяжение в оттяжках 3 и 4 определяем, пользуясь табл. 3.15.

Т а б л и ц а 3.15

Значение коэффициента k для определения остаточного натяжения
в зависимости от величины σ_{\max} и коэффициентов m и n

σ_{\max} , даН/мм ²	$m, 10^{-3}$	n				
		0	0,1	0,2	0,3	0,4
60	5	0,015	0,018	0,023	0,028	0,035
	10	0,032	0,036	0,043	0,50	0,65
	20	0,064	0,072	0,083	0,098	0,120
	40	0,127	0,138	0,155	0,178	0,206
30	5	0,023	0,026	0,032	0,036	0,05
	10	0,045	0,051	0,060	0,068	0,089
	20	0,09	0,1	0,113	0,130	0,153

Определяем параметры:

$$m = \frac{aP}{\sigma_0};$$

$$n = \frac{\sigma_0}{\sigma_{\max}},$$

где a – длина оттяжки: $a = 28,63$ м;

P – поперечная приведенная нагрузка на оттяжку, даН/(м·мм²);

σ_0 – предварительное (монтажное) напряжение в оттяжке, даН/мм².

$$m = \frac{28,63 \cdot 2,91 \cdot 10^{-3}}{3,11} = 26,79 \cdot 10^{-3};$$

$$n = \frac{3,11}{56,43} = 55,1 \cdot 10^{-3}.$$

По табл. 3.15 находим $k = 0,068$.

Следовательно,

$$T_1^P = T_2^P = 28,5 + 1,57 \cdot 0,068 = 28,61 \cdot 10^3 \text{ даН};$$

$$T_3^P = T_4^P = kT_0 = 0,068 \cdot 1,57 = 0,11 \cdot 10^3 \text{ даН}.$$

**3.3.2. Нормальный режим без гололеда.
Ветер направлен под углом 45° к оси линии**

$$\begin{aligned} P^P &= 2P_{\text{тр}} + 3P_{\phi}^P + 2W_{\text{тр.ст.х}}^P + 2W_{\text{трав.у}} + 2 \cdot \frac{1}{2} (W_{\text{в.с.х}}^P + W_{\text{с.с.х}}^P + W_{\text{н.с.х}}^P) = \\ &= 2 \cdot 341,2 + 3 \cdot 1788,5 + 2 \cdot 294,3 + 2 \cdot 532,6 + 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot (155,6 + 1134 + 116,1) = \\ &= 9,11 \text{ даН} \cdot 10^3; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V^P &= \frac{2 \frac{b}{2} P_{\text{тр}}^P + 2 \frac{W_{\text{тр.ст.х}}^P \frac{b}{2}}{1}}{b} = \\ &= \frac{2 \cdot 6341,2 + 294,3 \cdot 6}{12} = 488,4 \text{ даН} = 0,49 \cdot 10^3 \text{ даН}. \end{aligned}$$

Горизонтальная нагрузка S , действующая поперек оси траверсы (вдоль оси линии), складывается из ветровых нагрузок на элементы опоры:

$$\begin{aligned} S &= 2W_{\text{тр.ст.х}}^P \frac{2 \left(\frac{H+b}{4} \right)}{H} + W_{\text{трав.х}} + 2 \cdot \frac{1}{2} (W_{\text{в.с.х}}^P + W_{\text{с.с.х}}^P + W_{\text{н.с.х}}^P) = \\ &= 2 \cdot 294,3 \cdot \frac{2 \cdot (27,0 + 3)}{27} + 769,3 \cdot 2 + 2 \cdot \frac{1}{2} (155,6 + 1134 + 116,1) = \\ &= 4252,3 \text{ даН} = 4,25 \cdot 10^3 \text{ даН}. \end{aligned}$$

Остаточное натяжение при этой схеме нагрузок будет в оттяжке 4. Усилия в остальных оттяжках определяем по формулам:

$$T_1 = \frac{1}{2}(P^P f_1 - 2V^P f_3) + kT_0 = \frac{1}{2}(9,11 \cdot 3,69 - 2 \cdot 0,49 \cdot 0,388) +$$

$$+ kT_0 = 16,62 + kT_0;$$

$$T_2 = \frac{1}{2}(Sf_2 + P^P f_1 - 2V^P f_3) + kT_0 =$$

$$= \frac{1}{2}(4,25 \cdot 3,74 + 9,11 + 3,69 - 2 \cdot 0,49 \cdot 0,388) + kT_0 = 24,56 + kT_0;$$

$$T_3 = \frac{1}{2}Sf_2 + kT_0 = \frac{1}{2} \cdot 4,25 \cdot 3,74 + kT_0 = 7,95 + kT_0;$$

$$\sigma_{\max} = \frac{T_2}{\omega} = \frac{24\,560}{525} = 48,78 \text{ даН/мм}^2;$$

$$m = \frac{ap}{\sigma_0} = \frac{28,63 \cdot 2,91 \cdot 10^{-3}}{2,99} = 28 \cdot 10^{-3};$$

$$n = \frac{\sigma_0}{\sigma_{\max}} = \frac{3,11}{48,63} = 64 \cdot 10^{-3}.$$

По табл. 3.15 принимаем $k = 0,068$.

Следовательно,

$$kT_0 = 0,068 \cdot 1,57 = 0,107 \cdot 10^3 \text{ даН};$$

$$T_1 = 16,65 + 0,107 = 16,72 \cdot 10^3 \text{ даН};$$

$$T_2 = 24,67 \cdot 10^3 \text{ даН};$$

$$T_3 = 8,05 \cdot 10^3 \text{ даН};$$

$$T_4 = kT_0 = 0,107 \cdot 10^3 \text{ даН}.$$

**3.3.3. Нормальный режим. Гололед.
Ветер направлен перпендикулярно оси линии**

Суммарная нагрузка

$$\begin{aligned}
 P^P &= 2P_{\text{тр}}^P + 3P_{\text{ф}}^P + 0,25 \left(2W_{\text{тр.сг.1}}^1 + 2W_{\text{трав.1}}^P + \frac{1}{2} \cdot 2 \left(W_{\text{в.с.1}}^P + W_{\text{с.с.1}}^P + W_{\text{н.с.1}}^P \right) \right) = \\
 &= 2 \cdot 748,4 + 3 \cdot 2181 + 0,25 (2 \cdot 367,9 + 2 \cdot 532,6 + 194,6 + 1417,5 + 145,2) = \\
 &= 8929,4 \text{ даН} = 8,93 \cdot 10^3 \text{ даН};
 \end{aligned}$$

$$V^P = 0,25V_1^P = 0,25 \cdot 0,873 = 0,22 \cdot 10^3 \text{ даН.}$$

Усилия в оттяжках

$$\begin{aligned}
 T_1 = T_2 &= \frac{1}{2} (P^P f_1 - 2Vf_3) + kT_0 = \\
 &= \frac{1}{2} (8,93 \cdot 3,69 - 2 \cdot 0,22 \cdot 0,388) + kT_0 = 16,39 + kT_0;
 \end{aligned}$$

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{T_1}{\omega} = \frac{16390}{525} = 31,22 \text{ даН/мм}^2.$$

Вес гололеда на оттяжке (двойной)

$$2q_c = 2\pi c \gamma (d + c) = 2 \cdot 3,14 \cdot 15 \cdot 0,9 \cdot (21,0 + 15) \cdot 10^{-3} = 3,052 \text{ даН/м.}$$

Вес оттяжки с гололедом

$$g_{\Gamma} = g + 2g_c = 4,48 + 3,052 = 7,53 \text{ даН/м,}$$

где $g = 2G = 2 \cdot 2,24 = 4,48 \text{ даН/м}$ – вес оттяжки ($G = 2,24 \text{ кг/м}$, см. табл. 3.10),

$$p^p = \frac{g_r \cos \beta}{\omega} = \frac{7,53 \cdot 0,341}{525} = 4,89 \cdot 10^{-3};$$

$$m = \frac{ap^p}{\sigma_0} = \frac{28,63 \cdot 4,89 \cdot 10^{-3}}{2,99} = 46,8 \cdot 10^{-3};$$

$$n = \frac{\sigma_0}{\sigma_{\max}} = \frac{2,99}{32,45} = 0,092.$$

По таблице $k = 0,19$.

Тогда

$$T_1 = T_2 = 10,39 + 0,19 \cdot 1,57 = 16,69 \cdot 10^3 \text{ даН};$$

$$T_3 = T_4 = 0,19 \cdot 1,57 = 0,3 \cdot 10^3 \text{ даН}.$$

Как видно из расчета, при наименьшей нагрузке остаточное напряжение в разгружающейся оттяжке возрастает.

3.3.4. Аварийный режим. Обрыв проводов крайней фазы. Ветра и гололеда нет

$$S = T_{\phi} = 1312,1 \text{ даН} = 1,31 \cdot 10^{-3} \text{ даН}.$$

Расчетное сопротивление

$$R = S \frac{b/2 + C}{b} = 1312 \frac{6 + 9,0}{12,0} = 1640 \text{ даН} = 1,64 \cdot 10^3 \text{ даН}.$$

Остаточное тяжение в оттяжке

$$T_1 = kT_0;$$

$$T_2 = \left(R + \frac{S}{2} \right) f_2 + kT_0 = \left(1,64 + \frac{1,31}{2} \right) \cdot 3,74 + kT_0 = 8,58 + kT_0;$$

$$T_3 = \frac{1}{2} S f_2 + kT_0 = \frac{1}{2} \cdot 1,31 \cdot 3,74 + kT_0 = 2,45 + kT_0;$$

$$T_4 = Rf_2 + kT_0 = 1,64 \cdot 3,74 + kT_0 = 6,13 + kT_0;$$

$$\sigma_{\max} = \frac{T_2}{\omega} = \frac{8,58 \cdot 10^3}{525} = 16,3 \text{ даН/мм}^2;$$

$$n = \frac{3,11}{17,0} = 0,183;$$

$$m = 0,026; \quad k = 0,114.$$

Отсюда получим

$$T_1 = 0,114 \cdot 1,57 = 0,179 \cdot 10^3 \text{ даН};$$

$$T_2 = 8,58 + 0,179 = 8,76 \cdot 10^3 \text{ даН};$$

$$T_3 = 2,45 + 0,179 = 2,64 \cdot 10^3 \text{ даН};$$

$$T_4 = 6,13 + 0,179 = 6,31 \cdot 10^3 \text{ даН}.$$

Аварийный режим в случае обрыва троса является расчетным при определении усилий в тросостойке и расчетах диафрагмы траверсы.

Результаты расчета усилий в оттяжках сведены в табл. 3.16.

Т а б л и ц а 3.16

Результаты расчета усилий в оттяжках, даН · 10³

Режим нагрузки и схемы	T_1	T_2	T_3	T_4
Нормальный режим, ветер направлен перпендикулярно оси линии	28,61	28,61	0,11	0,11
Нормальный режим, ветер под углом 45° к оси линии	16,72	16,72	8,05	0,107
Нормальное режим, с гололедом, ветер направлен перпендикулярно оси линии	16,69	16,69	0,3	0,3
Аварийный режим, обрыв проводов крайней фазы	0,179	8,76	2,64	6,31

Как видно из таблицы, расчетным для проверки прочности оттяжек в данном случае является нормальный режим, без гололеда, ветер направлен перпендикулярно оси линии:

$$T_{\max}^p = 28\,610 \text{ даН} < R' = 0,9R = 31\,200 \text{ даН} \text{ (см. табл. 3.10).}$$

Условие выполняется, следовательно, оттяжки выдержат все нагрузки.

3.4. Расчет стойки на прочность и прогиб

Далее расчетными будут:

- 1) для стоек – нормальный режим при ветре, направленном перпендикулярно оси линии;
- 2) для траверсы – нормальный режим при ветре с гололедом и аварийный режим при обрыве проводов фазы;
- 3) для тросостойки и диафрагмы траверсы – аварийный режим при обрыве троса.

Определяем усилия в стойках.

Конструктивно выбираем уголки, из которых будет состоять проектируемая опора, и по их массе определяем вес всей опоры и отдельных ее частей (уголки выбирать, исходя из климатических условий и действующих нагрузок, т. е. чем жестче условия, тем прочнее должны быть уголки). Если есть масса типовой опоры, то можно придерживаться ее (как в данном случае, масса опоры ПБ-2 – 6969 кг). Следовательно, вес опоры $G_{\text{оп}} = 6,97 \cdot 10^3$ даН.

По формулам геометрии находим объем каркаса всех элементов опоры и, умножая на коэффициент заполнения ϕ , находим массу отдельных ее частей. С учетом коэффициента перегрузки $m = 1,1$ получим вес стойки $G_c = 1,73 \cdot 10^3$ даН; вес траверсы $G_{\text{трав}} = 3,99 \cdot 10^3$ даН; вес тросостойки $G_{\text{тр. ст}} = 0,425 \cdot 10^3$ даН.

Усилие в стойке I

$$N_1 = \frac{1}{\sin\beta_0} \left((T_1 + T_2) \sin\beta + \left(\frac{G_0^r}{2} + V_1^p \right) \right),$$

где $G_0^r = 2G_{тр}^r + 3G_{ф}^p + 3G_r^p + G_{оп}^p$;

$$G_{тр}^p = 0,394 \cdot 10^3 \text{ даН};$$

$$G_r^p = 0,204 \cdot 10^3 \text{ даН};$$

$$G_{ф}^p = 2,827 \cdot 10^3 \text{ даН};$$

$$V_1^p = 0,873 \cdot 10^3 \text{ даН};$$

$$N_1 = \frac{1}{0,995} / (28,61 + 28,61) \cdot 0,95 + 1/2 (2 \cdot 0,394 + 3 \cdot 2,827 + 3 \cdot 0,204) + 0,873 = 63,7 \cdot 10^3 \text{ даН}.$$

Усилие в стойке 2

$$N_2 = \frac{1}{\sin\beta_0} \left((T_3 + T_4) \sin\beta + \left(\frac{1}{2} G_0^p + V_1^p \right) \right) =$$
$$= \frac{1}{0,995} / (0,11 + 0,11) \cdot 0,95 + 8,43 + 0,873 = 9,56 \cdot 10^3 \text{ даН}.$$

Стойка 2 изгибается силой ветра и составляющей собственного веса, стойка 1 изгибается разностью этих величин.

Поперечная нагрузка на стойку 2

$$W_2^p = \frac{\sin\beta_0}{H} (W_{в.с.\perp}^p + W_{с.с.\perp}^p + W_{н.с.\perp}^p + G_{ст} \cos\beta_0) =$$
$$= \frac{0,995}{27} \cdot (194,6 + 1417,5 + 145,2 + 1,73 \cdot 0,099) = 0,0726 \cdot 10^3 \text{ даН/м}.$$

Дальнейший расчет производим для стойки 1. Стойка проверяется на сжатие с изгибом по деформированной схеме в предельном состоянии. Изгибающий момент, действующий на стойку 1, определяется по формуле, учитывающей влияние продольной силы на прогиб от поперечной нагрузки W :

поперечная нагрузка на стойку l

$$W_l^P = \frac{\sin\beta_0}{H} (W_{B.C.\perp}^P + W_{C.C.\perp}^P + W_{H.C.\perp}^P - G_c \cos\beta_0) =$$
$$= \frac{0,995}{27} \cdot (1,76 - 1,73 \cdot 0,099) = 57,1 \text{ даН/м.}$$

Изгибающий момент

$$M^P = \frac{W_l^P l_c^2}{8} + \frac{N_l^P f_c^P}{1 - \frac{N_l^P}{N_{кр}}},$$

где l_c – длина стойки: $l_c = 28,1$ м;

f_c – прогиб стойки;

$N_{кр}$ – критическая сила стойки:

$$N_{кр} = 4F_{\Pi} \sigma_T \varphi,$$

где F_{Π} – площадь сечения пояса стойки, см²;

σ_T – предел текучести стали (для С38/23 – 2300 даН, С44/29 – 2900 даН, С46/33 – 3300 даН);

φ – коэффициент продольного изгиба, соответствующих приведенной гибкости стойки $\lambda_{пр} = \mu\lambda_{пр}$;

$\lambda_{пр}$ – приведенная гибкость составного стержня постоянного сечения;

μ – коэффициент, учитывающий форму стойки и принимаемый по табл. 3.17, где l_c – длина стойки:

$$l_c = l_{\Pi} + 2l_k;$$

l_{Π} – длина призматической части;

l_k – длина концов стойки.

Значение коэффициента μ

$l_{\text{п}}/l_{\text{с}}$	μ
0	1,69
0,2	1,44
0,4	1,23
0,6	1,07
0,8	1,01

Значения коэффициента μ в табл. 3.17 приведены для стоек, конструктивная база которых в верхнем и нижнем концах составляет около 0,1 базы стойки в ее призматической части.

Прогиб стойки опоры от поперечной нагрузки

$$f_{\text{с}} = f_{\text{п}}^{\text{р}} \left[1 + 8 \cdot \left(\frac{l_{\text{к}}}{l_{\text{п}}} + \frac{144}{5} \cdot \left(\frac{l_{\text{к}}}{l_{\text{п}}} \right)^2 + \frac{384}{5} \cdot \left(\frac{l_{\text{к}}}{l_{\text{п}}} \right)^3 + \frac{192}{5} \left(\frac{l_{\text{к}}}{l_{\text{п}}} \right)^4 \right) \right],$$

где $f_{\text{п}}^{\text{р}} = \frac{5}{384} \cdot \frac{W l_{\text{п}}^4}{E J_{\text{п}}}$;

$$J_{\text{п}} = F_{\text{п}} b_{\text{п}}^2.$$

Ширина стойки $b_{\text{п}}$ в нашем случае равна 90 см, пояса выполнены из уголка 80 × 60. Площадь сечения пояса $F_{\text{п}} = 9,38 \text{ см}^2$ (выбирается из таблиц уголков в учебниках по сопротивлению материалов и других пособиях).

$$J_{\text{п}} = 9,38 \cdot 90^2 = 75\,978 \text{ см}^4.$$

Проверяем сжатую стойку:

$$f_{\text{п}}^{\text{р}} = \frac{5}{384} \cdot \frac{W l_{\text{п}}^4}{E J_{\text{п}}},$$

где $l_{\text{п}}$ – длина призматической части стойки;

E – модуль упругости; для стали $E = 2,1 \cdot 10^6$ даН = $2,1 \cdot 10^5$ МПа.

$$F_{\text{п}}^{\text{п}} = \frac{5}{384} \cdot \frac{57,1 \cdot 10^{-2} \cdot 2295^4}{2,1 \cdot 10^6 \cdot 7,5978 \cdot 10^4} = 1,292 \text{ см.}$$

В нашем случае

$$\frac{b_k}{l_{\text{п}}} = \frac{2,55}{22,95} = 0,11;$$

$$\frac{l_{\text{п}}}{l} = \frac{22,6}{28,1} = 0,82.$$

Прогиб стойки

$$f_c = 12,92 \left(1 + 8 \left(0,11 + 0,35 + \frac{384}{5} \cdot 0,11^3 + \frac{192}{5} \cdot 0,11^4 \right) \right) = 7,12 \text{ см.}$$

Определяем приведенную гибкость стойки.

Решетка выполнена из уголков 40×4 , площадь $F_p = 3,08 \text{ см}^2$.
Угол наклона раскоса $\beta = 45^\circ$. Гибкость прямоугольной стойки с базой $b_{\text{п}} = 90 \text{ см}$

$$\lambda_0 = \frac{l_c}{b_{\text{п}}} \cdot 2 = \frac{28,1}{0,9} \cdot 2 = 62,44.$$

Приведенная гибкость призматической стойки

$$\lambda_{\text{пр}} = \sqrt{\lambda_0^2 + 2 \frac{\sum F_{\text{п}}}{\sum F_p} \cdot k},$$

где $F_{\text{п}}$ – суммарная площадь поясов:

$$\sum F_{\text{п}} = 4 \cdot 9,38 = 37,52 \text{ см}^2;$$

$\sum F_p$ – суммарная площадь раскосов в двух параллельных гранях:

$$\sum F_p = 2 \cdot 3,08 = 6,16 \text{ см}^2;$$

k – безразмерный коэффициент, зависящий от угла наклона раскоса:

если $\beta = 30^\circ$, $k = 45$;

$\beta = 45^\circ \Rightarrow k = 31$;

$\beta = 45\text{--}60^\circ \Rightarrow k = 27$.

Тогда

$$\lambda_{пр} = \sqrt{62,44^2 + 2 \frac{37,52}{6,16} \cdot 31} = 65,39.$$

По табл. 3.17 определяем коэффициент длины $\mu = 1,01$.

Приведенная гибкость стойки

$$\lambda_{пр.с} = 1,01 \cdot 62,4 = 71,8.$$

По табл. 3.18 находим коэффициент $\varphi = 0,77$.

Т а б л и ц а 3.18

Коэффициенты φ продольного изгиба
центрально сжатых элементов

Гибкость элементов λ	Коэффициенты φ для сталей классов		Гибкость элементов λ	Коэффициенты φ для сталей классов	
	С 38/23	С 46/33		С 38/23	С 46/33
0	1,0	1,0	120	0,488	0,350
20	0,97	0,968	140	0,348	0,256
40	0,908	0,888	160	0,70	0,200
60	0,820	0,780	180	0,216	0,160
80	0,715	0,637	200	0,175	0,129
90	0,655	0,563	220	0,146	0,108
100	0,582	0,482			
110	0,512	0,413			

Тогда

$$N_{кр} = 4F_{II} \delta_{T, \varphi} = 4 \cdot 9,38 \cdot 3300 \cdot 0,77 = 95,34 \cdot 10^3 \text{ даН.}$$

Изгибающий момент

$$M = \frac{57,1 \cdot 28,1^2}{8} + \frac{63\,700 \cdot 7,12 \cdot 10^{-2}}{1 - \frac{63\,700}{66\,450}} =$$
$$= 5635,8 + 109\,600 = 115,24 \cdot 10^3 \text{ даН.}$$

Напряжение в поясах стойки

$$\sigma = \frac{N}{4F_{II}} + \frac{M}{2b_{II} F_{II}} = \frac{63\,700}{4 \cdot 9,38} + \frac{109\,593}{2 \cdot 90 \cdot 9,38} =$$
$$= 1697,8 + 68,3 = 1766 \frac{\text{даН}}{\text{см}^2} < R = 2900 \text{ даН/см}^2,$$

где R – напряжение при изгибе, для марки стали С38/23 $R = 2100 \text{ даН/см}^2$, С44/29 – 2600 даН/см^2 , С46/33 – 2900 даН/см^2 .

Проверить стойку квадратного сечения на устойчивость из плоскости изгиба не требуется.

Решетка стойки должна быть проверена на действие:

а) реальной поперечной силы

$$Q = \frac{W_{cl}}{4} = \frac{1757,3}{4} = 439,3 \text{ даН,}$$

где $W_{cl} = W_{вcl} + W_{сcl} + W_{нcl}$;

б) условной поперечной силы по СНИП 11-19-62:

$$Q_{усл} = \frac{1}{2} nkF_{II},$$

где n – число поясов: $n = 4$ для четырехгранных опор;

k берется из табл. 3.19 в зависимости от выбранной марки стали (в нашем примере С46/33).

Т а б л и ц а 3.19

Значение коэффициента k

Для конструкций из стали марок	Для четырехгранных стержней
С 38/23	20
С 46/33	40

Следовательно,

$$Q_{\text{усл}} = \frac{1}{2} \cdot 4 \cdot 40 \cdot 9,38 = 750,4 \text{ даН.}$$

Поскольку условная поперечная сила больше, расчет производим по ней.

Усилие в раскосе

$$D = \frac{Q_{\text{max}}}{\cos\beta} = \frac{750,4}{\cos 45^\circ} = 1061,2 \text{ даН.}$$

Усилие в поясе панели

$$U = \sigma F_{\Pi} = 1766 \cdot 9,38 = 16\,565 \text{ даН.}$$

3.5. Предварительный расчет траверсы

Определяем распор X по схеме нормального режима при ветре, направленном перпендикулярно оси линии:

$$\begin{aligned}
 X_{\text{трав}} &= (T_1 + T_2) \frac{1}{f_1} + \left(\frac{G'_x}{2} + \gamma \right) \text{ctg}\beta_0 = \\
 &= (28,61 + 28,61) \frac{1}{3,69} + (8,43 + 0,873) \frac{1}{10} = 15,5 + 0,914 = 16,41 \text{ даН,}
 \end{aligned}$$

где $G'_x = G_T^p + G_{\phi} + G_r$.

Определяем крутящий момент, действующий на траверсу в аварийном режиме при обрыве крайней фазы:

$$M_{кр} = \frac{Rb}{\left(\Psi_{\frac{1}{2}k \text{ тр}} + \Psi_{ил} \frac{1}{\sin\beta^\circ}\right)b\omega E_{ст.т} \sin\beta \cos^2\beta \sin^2\theta + \frac{b}{H'}}$$

где R – расчетное сопротивление при аварийном режиме;

b – расстояние между узлами 1 и 2 по оси траверсы: $b = 12$ м;

$\Psi_{\frac{1}{2}k \text{ тр}}$ – угол закручивания половины траверсы от крутящего

момента, равного единице;

$\Psi_{ил}$ – угол поворота стойки от изгибающего момента, равного единице и приложенного в вершине стойки;

ω – площадь поперечного сечения оттяжки;

$E_{ст.т}$ – модуль упругости стального троса;

H' – высота оси траверсы над плоскостью нижних опорных шарниров.

Предварительно находим угол поворота стойки и угол закручивания траверсы от единичных моментов.

Так как в плоскости, перпендикулярной плоскости портала, стойка в верхней части имеет параллельные пояса, то угол поворота ее единичного изгибающего момента, приложенного в узле сопряжения с траверсой, можно определить как для стойки с постоянным моментом инерции:

$$\Psi_{ил} = \frac{l_c}{3EJ} = \frac{28100}{3 \cdot 2,1 \cdot 10^6 \cdot 75978} = 5,86 \cdot 10^{-8} \frac{1}{\text{даН} \cdot \text{см}}$$

Ввиду небольшой разницы между сторонами поперечного сечения траверсы ее можно считать квадратной с базой:

$$b_{\text{трав}} = \frac{1,5 + 0,9}{2} = 1,2 \text{ м,}$$

и угол закручивания от единичного момента определять по формуле

$$\Psi_{\frac{1}{2}k \text{ тр}} = \frac{1}{F_p E} \cdot \frac{n \sqrt{(b_{\text{тр}}^2 + h_1^2)^3}}{b_{\text{тр}}^4},$$

где h_1 – высота полупанели при треугольной решетке:

$$h_1 = \frac{b/2}{n} = \frac{6}{6} = 1 \text{ м};$$

n – число полупанелей: $n = 6$.

Решетка выполнена из уголков 50×5 с площадью сечения $F_p = 4,8 \text{ см}^2$.

Вычисляем

$$\Psi_{\frac{1}{2}k \text{ тр}} = \frac{1}{4,8 \cdot 2,1 \cdot 10^6} \cdot \frac{6 \sqrt{(1,2^2 + 1^2)^3}}{1,2^4} = 1,09 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{даН} \cdot \text{см}}.$$

Подставляя полученные значения и принимая $E_{\text{ст.т}} = 2,2 \cdot 10^6 \text{ даН/м}$ при площади сечения оттяжки $\omega = 5,05 \text{ см}^2$, найдем

$$M_{\text{кр}} = (1640 \cdot 1200) \left/ \left(\left(1,09 \cdot 10^{-6} + \frac{5,86 \cdot 10^{-6}}{0,995^2} \right) \cdot 1200 \cdot 50 \cdot 2,2 \cdot 10^6 \cdot 0,95 \times \right. \right. \\ \left. \left. \times 0,32^2 \cdot 0,832^2 + \frac{1200}{2780} \right) \right) = 0,019 \cdot 10^3 \text{ даН}.$$

Как видно из расчета, крутящий момент, действующий на траверсу, очень мал, и им в расчете можно пренебречь. Соотношение слагаемых в знаменателе показывает, что уменьшение момента произошло из-за очень небольшой жесткости (относительно большого угла поворота) траверсы при действии крутящего момента.

3.6. Подбор сечений уголков решетки опоры

Определяем усилия в поясах стволов 1 и 2 опоры. Они равны, поэтому рассчитываем усилие в поясах ствола 1.

Усилия в поясах при ветре, направленном под углом 45° к оси линии, определим по формуле

$$U_M = \frac{\sum M_{Tx}^P}{2b_{Tx}k_0 \cos \gamma} + \frac{\sum M_{Ty}^P}{2b_{Ty} \cos \gamma} + \frac{\sum G_T^P}{4 \cos^2 \gamma},$$

где $\sum M_{Tx}^P$ – суммарный изгибающий момент в расчетном сечении от нагрузок, перпендикулярных оси линии;

$\sum M_{Ty}^P$ – суммарный изгибающий момент в расчетном сечении от нагрузок, направленных вдоль оси линии;

$\sum G_T^P$ – суммарный вес всех элементов выше расчетного сечения;

k_0 – коэффициент, учитывающий роль оттяжек в гашении изгибающего момента: $k_0 = 3-4$; в нашем случае берем $k_0 = 4$.

Если ветер направлен перпендикулярно оси линии, то $\sum M_{Ty} = 0$. Суммарные изгибающие моменты, подсчитанные на всю опору, воспринимаются двумя параллельными гранями стойки опоры и поэтому делятся на 2. По этой же причине вес, подсчитанный для всей опоры, разделен на 4.

Для средней секции

$$U_{2n} - \cos \gamma = 1,$$



так как $\gamma = 0$ (γ – угол схождения граней); для U_{1n} и $U_{3n} - \gamma = 90^\circ$ (рассчитываем по формулам геометрии) $\cos 90^\circ = 0,988$.

Для верхней секции расчетным является нормальный режим при ветре с гололедом, направление ветра перпендикулярно оси линии.

Определяем усилие в поясах секции.

Верхняя секция:

$$\begin{aligned} \Sigma M_{3пх} = & \frac{1}{2} W_{\text{трав. гол. у}} \left(h_{\text{вс}} + \frac{1}{2} h_{\text{трав}} \right) + \frac{1}{2} W_{\text{вс. гол}}^p h_{\text{вс}} + W_{\text{тр. ст. у}}^p \times \\ & \times \left(h_{\text{вс}} + h_{\text{трав}} + \frac{1}{2} h_{\text{тр. ст}} \right) + P_{\text{тр}}^p \left(h_{\text{вс}} + h_{\text{тр}} + h_{\text{тр. ст}} \right) + \frac{3}{2} P_{\text{ф}}^p \left(h_{\text{вс}} - S \right) + \\ & + \left(G_{\text{ф}}^p - G_{\text{г}}^p \right) l_{\text{вылета трав 1}} + G_{\text{тр}}^{\text{1р}} \text{ вылета тросостойки,} \end{aligned}$$

где S – длина изолятора с линейной арматурой.

Принимают, что центры тяжести ветровых нагрузок расположены на середине элемента опоры.

Расчетную ветровую нагрузку на конструкцию при ветре, направленном перпендикулярно, и гололеде определяют на основании расчетов ветровой нагрузки без гололеда с учетом различных коэффициентов перегрузки по формуле

$$W_{\text{гол}}^p = \frac{W^p}{1,2 \cdot 4} = 0,208 W^p,$$

где 1,2 – коэффициент перегрузки.

Следовательно,

$$\begin{aligned} \Sigma M_{3пх} = & \frac{1}{2} 0,208 \cdot 532,6 \cdot (2,55 + 0,75) + \frac{1}{2} \cdot 0,208 \cdot 155,6 \cdot 2,55 + \\ & + 294,3 \cdot \left(2,55 + 1,5 + \frac{1}{2} 3,5 \right) + 748,7 \cdot (2,55 + 1,5 + 3,5) + \frac{3}{2} \cdot 2181 \times \\ & \times (2,55 - 4,5) + (10817 + 203,5) \cdot 5,95 + 1983,8 \cdot 1,5 = 69,8 \cdot 10^3 \text{ даН.} \end{aligned}$$

Расчетный вес опоры на основании предварительных расчетов принят

$$G_{\text{оп}}^p = 6969 \text{ даН.}$$

Расчетный вес погонного метра опоры

$$G_{\text{пог. м}} = \frac{6969}{32} = 217,8 \text{ даН/м};$$

$$\begin{aligned} \sum G_{3\text{п}}^{\text{Iр}} &= 7,85 \cdot G_{\text{пог. м}} + G_{\text{тр}}^{\text{Iр}} + G_{\text{ф}}^{\text{Iр}} = \\ &= 7,85 \cdot 217,8 + 1983,8 + 10817,1 = 14,5 \cdot 10^3 \text{ даН}, \end{aligned}$$

$$G_{\text{тр}}^{\text{Iр}} = 7,85 \cdot 217,8 = 1983,8 \text{ даН};$$

$$G_{\text{ф}}^{\text{Iр}} = 10817,1 \text{ даН}.$$

Расчетная база в сечении $b_{1\text{п}} = 0,9 \text{ м}; \cos \gamma = 0,988$.

Усилие в поясе

$$U_{3\text{п}} = \frac{69,8}{4 \cdot 1,8 \cdot 0,988} + \frac{14,5}{4 \cdot 0,988^2} = 12,6 \cdot 10^3 \text{ даН}.$$

Расчетным режимом для поясов $U_{1\text{п}}$ и $U_{2\text{п}}$ является нормальный режим при ветре без гололеда, направленном перпендикулярно оси линии.

$$\begin{aligned} \Sigma M_{2\text{пх}} &= W_{\text{трав. у}}^{\text{р}} \left(\frac{1}{2} h_{\text{сс}} + h_{\text{вс}} + \frac{1}{2} h_{\text{трав}} \right) + W_{\text{вс. у}}^{\text{р}} \cdot \frac{1}{2} (h_{\text{вс}} + h_{\text{сс}}) + \\ &+ W_{\text{тр. ст. у}} \left(h_{\text{вс}} + h_{\text{трав}} + \frac{1}{2} (h_{\text{тр. ст}} + h_{\text{сс}}) \right) + \frac{1}{2} W_{\text{сс}} h_{\text{сс}} + \\ &+ P_{\text{г}}^{\text{р}} \left(h_{\text{вс}} + h_{\text{трав}} + h_{\text{тр. ст}} + \frac{1}{2} h_{\text{сс}} \right) + P_{\text{ф}}^{\text{р}} \left(\frac{1}{2} h_{\text{сс}} + h_{\text{вс}} - S \right) + \\ &+ \left(G_{\text{ф}}^{\text{р}} - G_{\text{г}}^{\text{р}} \right) l_{\text{вылета трав 2}} + G_2^{\text{р}} l_{\text{вылета тросостойки относ. сечения 2}} = \\ &= 532,6 \cdot (2,55 + 0,75 + 10,9) + \frac{1}{2} \cdot 155,6 \cdot (2,55 + 21,74) + 294,3 \times \\ &\times \left(2,55 + 1,5 + \frac{1}{2} (3,5 + 21,74) \right) + \frac{1}{2} 1134 \cdot 21,74 + 688,6 \times \end{aligned}$$

$$\times \left(2,55 + 1,5 + 3,5 + \frac{1}{2} \cdot 21,74 \right) + 3576,7 \left(\frac{1}{2} \cdot 21,74 + 2,55 - 4,5 \right) + \\ + (2827,2 + 394) \cdot 4,5 + 203,5 \cdot 0,4 = 84,4 \cdot 10^3 \text{ даН.}$$

Суммарный вес выше рассматриваемого сечения

$$\Sigma G_{2п}^{1п} = 217,8 \cdot 30,5 + 394 + 2827,2 = 9,86 \cdot 10^3 \text{ даН,}$$

где $G_{т}^п = 394 \text{ даН;}$

$$G_{ф}^п = 2827,2 \text{ даН.}$$

Расчетная база в сечении $b_{2п} = 0,9 \text{ м; } \cos \gamma = 1$. Усилие в поясе

$$U_{2п} = \frac{84,4}{4 \cdot 1,8 \cdot 1} + \frac{9,86}{4 \cdot 1} = 19,13 \cdot 10^3 \text{ даН.}$$

Рассчитаем пояс:

$$\Sigma M_{1п \ y} = W_{трав}^п \left(\frac{1}{2} h_{трав} + h_{вс} + h_{сс} + \frac{1}{2} h_{нс} \right) + W_{тр. ст}^п \left(\frac{1}{2} h_{нс} + h_{вс} + h_{сс} + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} h_{тр. ст} \right) + W_{вс \ y}^п \left(\frac{1}{2} (h_{вс} + h_{нс}) + h_{сс} \right) + \frac{1}{2} W_{сс \ y}^п (h_{нс} + h_{сс}) + \frac{1}{2} W_{нс \ y}^п \times \\ \times h_{нс} + P_{тр}^п \left(h_{сс} + \frac{1}{2} h_{нс} + h_{вс} + h_{трав} + h_{тр. ст} \right) + P_{ф}^п \left(h_{сс} + \frac{3}{2} h_{вс} - S \right) + \\ + (G_{ф}^п + G_{тр}^п) \cdot l_{\text{вылета трав}} + G_{т} l_{\text{вылета тростойки}} = 532,6 \cdot (0,75 + 1,5 \times \\ \times 2,55 + 21,74) + 294,3 \cdot (1,5 \cdot 2,55 + 1,5 + 1,75) + 155,6 \cdot (2,55 + 21,74) + \\ + 0,5 \cdot 1134 \cdot (2,55 + 21,74) + 0,5 \cdot 116,1 \cdot 2,55 + 688 \cdot (1,5 \cdot 2,55 + 21,74 + \\ + 1,5 + 3,5) + 3376,7 \cdot (21,74 + 1,5 \cdot 2,55 - 4,5) + (2827,2 + 394) \times \\ \times 2,9 + 394 \cdot 1,2 = 145,8 \cdot 10^3 \text{ даН.}$$

Расчетная база в сечении $b_{1m} = 0,9$ м; $\cos\gamma = 0,988$.

Следовательно,

$$\Sigma G_{1n}^p = 217,8 \cdot 32 + 394 + 2827,2 = 10,19 \cdot 10^3 \text{ даН.}$$

Усилия в поясе U_{1n} :

$$U_{1n} = \frac{145,8}{4 \cdot 0,8 \cdot 0,988} + \frac{10,19}{4 \cdot 0,988^2} = 44,8 \cdot 10^3 \text{ даН.}$$

Усилие в поясе U_{1n} необходимо для расчёта прочности опорного узла на сжатие. При подборе сечения пояса нижней секции проверку нужно производить в панели, гибкость которой больше. Усилие в этой панели будет несколько меньше усилия U_{1n} . Однако ввиду незначительной разницы сечение пояса нижней секции допустимо выбирать по усилию U_{1n} , разница в усилиях идет в запас прочности.

При расчете действие крутящего момента заменяем действием двух пар сил, которые приложены непосредственно к граням опоры. Как видно из схемы совместного действия тяжения T и пар сил $T_{кр}$, заменяющих крутящий момент, в одной из граней сила $T/2$ складывается с силой $T_{кр}$. Эта грань и является расчетной. Сначала находят моменты кручения, а затем усилия в раскосах.

При выборе решетки необходимо проверить ее на действие реальной поперечной силы, условной поперечной силы, найти усилия в раскосах, поясах панели, определить распор (этот расчет производили раньше, см. п. 3.4).

Рассмотрим подбор сечения на примере верхней секции. Выбираем, что пояса всей стойки выполнены из уголка 80×7 .

В поясе U_{3n} крайние точки рассматриваемой панели закреплены только в одной грани, а между этими точками закрепления сжатый пояс может изгибаться только параллельно закреплению в средней точке, поэтому гибкость определяется по радиусу инерции

$$\rho_x = \sqrt{\frac{J_x}{F}},$$

где J_x – момент инерции, вычисляемый по таблице для уголков (см. в книгах по сопромату или других пособиях).

В данном случае уголку 80×7 соответствует $J_x = 65,3 \text{ см}^4$.

Тогда

$$\rho_x = \sqrt{\frac{65,3}{9,38}} = 2,63 \text{ см};$$

$$\lambda = \frac{\mu l}{\rho_x} = \frac{1 \cdot 135}{2,63} = 51,33,$$

где μ – коэффициент длины, зависящий от заделки концов стержня: $\mu = 1$ (берется для всех опор);

l – геометрическая длина панели пояса.



При креплении раскосов к поясу одним болтом в расчетную длину пояса вводится коэффициент $\mu_{\Pi} = 1,14$ независимо от погонных жесткостей пояса.

При определении гибкости длина по геометрической схеме l_p умножается на коэффициент длины μ_p , который определяется в за-

висимости от гибкости $\frac{l_p}{\rho_y}$:

$$\lambda_{\Pi} = \mu_{\Pi} \lambda = 1,14 \cdot 51,33 = 58,5.$$

Значение критической силы определим по формуле

$$N_{кр} = \frac{\pi^2 EJ_x}{(\mu l)^2} = \frac{3,14^2 \cdot 2,2 \cdot 10^6 \cdot 65,3}{(1 \cdot 1,135)^2} = 174 \ 860 \text{ даН.}$$

Коэффициент продольного изгиба

$$\varphi = \varphi' \varphi'',$$

где φ' – собственно коэффициент продольного изгиба;

φ'' – коэффициент учета неизбежных случайных искривлений оси стержня:

$$\varphi' = \frac{N_{кр}}{F\sigma^p} = \frac{174860}{9,38 \cdot 1766} = 10,6;$$

$\varphi'' = 0,1-0,18$. Выбираем $\varphi'' = 0,18$.

$$\varphi = \varphi' \varphi'' = 106 \cdot 0,18 = 1,91.$$

Коэффициенты условий работы определяем по табл. 3.20: $m = 1$.

Т а б л и ц а 3.20

Коэффициенты условий работы элементов
стальных конструкций опор

Элементы опор	Элементы, соединяемые сваркой	Элементы, соединяемые болтами
П о я с а		
Сжатые пояса верхних и средних секций свободно стоящих опор и сжатые пояса опор на оттяжках	1,0	1,0
Сжатые пояса нижних секций свободно стоящих опор в первых двух панелей от опорного башмака	0,95	0,9
Растянутые пояса с проколотыми дырами	0,9	0,9
Сжатые пояса траверс при креплении к стволу через фасонку	0,75	0,75
Р а с к о с ы		
Сжатые раскосы треугольной решетки с узлами, не совмещенными в смежных гранях	0,8	0,75*
Сжатые раскосы треугольной решетки с распорками	1,0	0,75*
Сжатые раскосы перекрестной решетки с узлами, не совмещенными в смежных гранях	0,8	0,75*
То же с совмещенными узлами	0,9	0,75*
Сжатые составные элементы решетки из двух равнобоких уголков, прикрепляемых одной полкой	0,75	0,75

Элементы опор	Элементы, соединяемые сваркой	Элементы, соединяемые болтами
О т т я ж к и		
Оттяжки опор из стальных канатов или пучков высокопрочной проволоки: а) для промежуточных опор в нормальном режиме		0,9
то же в аварийном режиме		1,0
б) для анкерных и угловых опор в нормальном режиме		0,8
то же в аварийном режиме		0,9

* При установке в узле не менее двух болтов коэффициент принимается как для элементов, соединяемых сваркой.

Тогда

$$F_{\varphi m} = F_{\Pi} \varphi m = 9,38 \cdot 1 \cdot 1,91 = 17,9 \text{ см}^2.$$

Напряжение в сжатых стержнях

$$\sigma = \frac{N}{F_{\varphi m}} = \frac{U_{3\Pi}}{F_{\varphi m}} = \frac{12\,600}{17,9} = 704,0 \text{ даН} < R = 2900 \frac{\text{даН}}{\text{см}^2}.$$

Произведем расчет для раскоса $D_{1\Pi}$:

$$\rho_y = \sqrt{\frac{J_y}{F}} = \sqrt{\frac{27}{9,38}} = 1,7 \text{ см};$$

$$J_y = 27 \text{ см}^4;$$

$$\lambda = \frac{\mu l}{\rho_y} = \frac{1 \cdot 112,5}{1,7} = 66,18.$$

По таблице $\mu = 1$.

В зависимости от $\frac{l}{\rho_y}$ находим коэффициент $\mu_p = 1$ (табл. 3.21 и 3.22).

Т а б л и ц а 3.21

Значение коэффициента μ_p для сварных конструкций и для болтовых конструкций с прикреплением раскосов двумя и более болтами по длине раскоса

i_n / j_p	l_p / ρ						
	До 80	100	120	140	160	180	200
До 2	0,98	0,89	0,83	0,77	0,74	0,72	0,70
6 и выше	0,92	0,84	0,78	0,74	0,70	0,70	0,70

Т а б л и ц а 3.22

Значение коэффициента μ_p для болтовых конструкций с прикреплением раскосов одним болтом

$l_p / \rho_{y \min}$	μ_p	$l_p / \rho_{y \min}$	μ_p
До 80	1,0	160	0,80
100	0,94	180	0,78
120	0,88	200	0,77
140	0,83		

$$\lambda = \mu_p \lambda = 66,18;$$

$$N_{кр} = \frac{3,14^2 \cdot 2,1 \cdot 10^6 \cdot 27}{(1 \cdot 112,5)^2} = 44\,171 \text{ даН};$$

$$\varphi = 2,32; \quad m = 0,75;$$

$$F_{\varphi m} = 2,32 \cdot 0,75 \cdot 9,38 = 16,31 \text{ см}^2;$$

$$\sigma = \frac{N}{F_{\varphi m}} = \frac{44\,171}{16,3} = 2707 < 2900 \text{ даН/см}^2.$$

Расчет и выбор показаны только одного пояса и раскоса. В действительности рассчитывается каждый элемент опоры. Но мы опускаем это требование и вносим в табл. 2.33 только сечение уголка, площадь его профиля и расчетную длину.

Т а б л и ц а 3.23

Подбор сечений стержней опоры

Часть опоры		Обозначение	Сечение стержней	Площадь сечения F , см ²	Длина элемента по геометрической схеме, см
1	2	3	4	5	6
Верхняя секция	Пояс	$U_{3п}$	80 × 7	10,8	90
	Раскос	$D_{1п}$	40 × 4	3,08	112,5
Средняя секция	Пояс	$U_{2п}$	80 × 7	10,8	90
	Раскос	$D_{2п} - D_{16п}$	40 × 4	3,08	112,5
Нижняя секция	Пояс	$U_{1п}$	80 × 7	10,8	90
	Раскос	D_{19}	40 × 4	3,08	112,5
		D_{20}	40 × 4	3,08	94
Траверса	Пояс	U_1	110 × 7	15,2	150
		O_1	100 × 7	13,8	154,6
		U_2	110 × 7	15,2	200
		O_2	100 × 7	13,8	200
	Раскос	$D_{1п}$	50 × 5	4,8	250
		$D_{2п}$	50 × 5	4,8	250
	Распорка	$D_{3п}$	50 × 5	4,8	150
	Раскос	$D_{4п}$	40 × 4	3,08	174,9
		$D_{5п}$	40 × 4	3,08	134,6
	Распорка	S_1	40 × 4	3,08	90
Тросостойка	Пояс	U_3	75 × 6	8,78	381 – 420
	Раскос	d_1	56 × 5	5,41	60,6
		d_2	40 × 4	3,08	97

Окончание табл. 3.23

1	2	3	4	5	6
Тросо- стойка	Раскос	d_3	40×4	3,08	119
		d_4	40×4	3,08	169,5
	Распорка	d_5	50×6	5,2	75,2
	Распорка	d_6	50×5	4,8	115,8
		d_7	50×5	4,8	158,4
	Раскос	d_8	50×5	4,8	36,1
		d_9	50×5	4,8	50,5
		d_{10}	40×4	3,08	60,6
		d_{11}	40×4	3,08	75,3
		d_{12}	40×4	3,08	84,0
		d_{13}	40×4	3,08	94,0
		d_{14}	40×4	3,08	98,0
	Распорка	d_{15}	50×5	4,8	26,5
		d_{16}	40×4	3,08	33,2
		d_{17}	40×4	3,08	54,2
		d_{18}	40×4	3,08	72,2
		d_{19}	40×4	3,08	82,5
		d_{20}	40×4	3,08	88,0
	Раскос	d_{21}	50×5	4,8	72,0
		d_{22}	40×4	3,08	68,9
		d_{23}	40×4	3,08	74,8
		d_{24}	40×4	3,08	81,5
		d_{25}	40×4	3,08	88,9
		d_{26}	40×4	3,08	91,6
		d_{27}	40×4	3,08	102,8
	Распорка	d_{28}	40×4	3,08	28,2
		d_{29}	40×4	3,08	39,0
		d_{30}	40×4	3,08	43,8
		d_{31}	40×4	3,08	60,6
		d_{32}	40×4	3,08	71,0
		d_{33}	40×4	3,08	88,1

4. РАСЧЕТ ТРАВЕРСЫ НА ПРОЧНОСТЬ

Определим значения усилий от постоянных и временных нагрузок в стержнях траверсы и найдем наибольшее и наименьшее значения усилий в этих стержнях [4].

Для удобства расчет произведем для передней грани траверсы, приняв ее в качестве плоской фермы, рис. 4.1.

Расчет следует начинать с определения значений опорных реакций, для чего используются условия равновесия сил, приложенных к ферме. Так как значения усилий в заданных стержнях требуется определить от трех нагрузок (постоянной и временных слева и справа), то при нахождении опорных реакций, а затем и усилий каждую из нагрузок рассматриваем как независимую, игнорируя остальные.

Расчетный режим – обрыв проводов крайней фазы. Гололеда нет. Данные к расчету:

$$W_{\text{трав.у}}^p = 532,6 \text{ даН};$$

$$G_{\Gamma}^p = 203,5 \text{ даН};$$

$$G_{\text{тр}}^p = 394 \text{ даН};$$

$$G_{\text{тр.ст}}^p = 217,8 \cdot 3,5 = 762,3 \text{ даН};$$

$$G_{\Phi}^p = 2827,2 \text{ даН};$$

$$T_{\Phi}^p = 1312,1 \text{ даН};$$

$$p = G_{\text{трав}} = 3990 \text{ даН (вычислено раньше);}$$

$$X = 16,41 \text{ даН.}$$

Будем считать, что p – равномерно распределенная нагрузка с составляющими p' :

$$p = p' l_{\text{трав}};$$

$$p' = \frac{G_{\text{трав}}^p}{l_{\text{трав}}} = \frac{3990}{24,0} = 166,25 \text{ даН,}$$

где $l_{\text{трав}}$ – длина траверсы.

Так как траверса симметрична относительно OO' , то временные нагрузки слева равны по модулю нагрузкам справа. Поэтому усилия в симметричных относительно OO' стержнях равны.

Определим значения опорных реакций.

а. От постоянной нагрузки

$$\begin{aligned} \Sigma M_B = p'(0,8 \cdot (18 - 6) + 1,1 \cdot (16,5 - 4,5) + 1,4 \cdot (15 - 3) + 1,7(13,5 - 1,5) + \\ + 2(12 + 10 + 8 + 6 + 4 + 2)) + 18 \left(G_r^p + \frac{G_\phi^p}{2} \right) + \left(2p' + \frac{G_{тр}^p + G_{тр.ст}}{2} \right) \times \\ \times (12 + 10 + 2) + (G_r^p + G_\phi^p)(6 - 6) - V_A \cdot 12 = 0 \Rightarrow \end{aligned}$$

$$V_A = 6547,9 \text{ даН};$$

$$\begin{aligned} \Sigma M_A = p'(0,8(6 - 18) + 1,1(4,5 - 16,5) + 1,7(1,5 - 13,5)) - \\ - 2p'(12 + 10 + 8 + 6 + 4 + 2) - 18 \left(G_r^p + G_\phi^p \right) - \left(2p' + \frac{G_{тр}^p + G_{тр.ст}}{2} \right) \times \\ \times (12 + 10 + 2) - 6 \left(G_r^p + G_\phi^p \right) + 6 \left(G_r^p + \frac{G_\phi^p}{2} \right) - 12V_B = 0. \end{aligned}$$

Следовательно, $V_B = -7554,6$ даН.

П р о в е р к а. Сумма всех сил на ось Y должна быть равна 0. В данном случае равенство выполняется, т. е. $0 = 0$.

б. От переменной нагрузки справа:

$$W = W_{\text{трав } y}^p = 532 \text{ даН};$$

$$\Sigma M_B = 0,2W \cdot 1,5 + 0,2W \cdot 1,12 + 0,2W \cdot 0,75 + 0,2W \cdot 0,37 - V_A \cdot 12 = 0;$$

$$V_A = \frac{0,2 \cdot 532,6(1,5 + 1,1 + 0,7 + 0,37)}{12} = 32,6 \text{ даН};$$

$$V_B = -32,6 \text{ даН}.$$

в. От временной нагрузки слева:

$$V_A = -52,5 \text{ даН};$$

$$V_B = 32,5 \text{ даН}.$$

Теперь определим значения усилий в стержнях фермы. При узловой нагрузке в стержнях шарнирно-стержневых систем возникают только продольные силы. Для определения их значений применим способ моментной точки и способ вырезания узлов.

Чтобы найти значения продольных сил в 15 и 16 поясных стержнях, применим способ моментной точки (рис. 4.2). Для этого разделим ферму сечением I-I и воспользуемся условиями равновесия левой от сечения части. Так, значения продольной силы находятся из условия равенства нулю суммы моментов сил, приложенных к отсеченной части фермы относительно точки K, в которой пересекаются линии

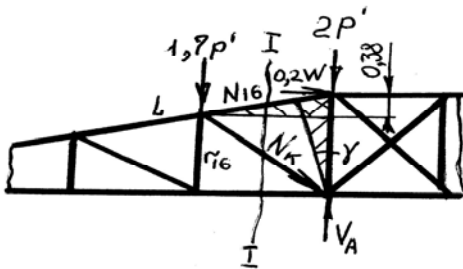


Рис. 4.2. Схема к расчету усилий в стержнях 15 и 16

действия сил N_K и N_{16} , т. е. двух из трех рассеченных стержней. Это приводит к уравнению одной неизвестной N_{15} , и точка K называется моментной точкой для усилия в стержне 15. Плечо силы N_{15} относительно точки K, т. е. r_{15} , определяется из подобия заштрихованных треугольников:

$$\frac{r_{15}}{1,5} = \frac{1,5}{1,546};$$

$$r_{15} = 1,45 \text{ м}.$$

Аналогично для стержня 16 моментной точкой является точка L, а $r_{15} = 1,12 \text{ м}$.

Определяем значения продольных сил:

а) от постоянной нагрузки

$$\sum_{\text{лев}} M_K = \left(G_r^p + \frac{G_\phi^p}{2} \right) \cdot 6 + 0,8p' \cdot 6 + 1,1p' \cdot 4,5 + \\ + 1,4p' \cdot 3,0 + 1,7p' \cdot 1,5 + N_{15}r_{15} = 0;$$

$$N_{15} = -8583,8 \text{ даН};$$

$$\sum_{\text{лев}} M_L = \left(G_r^p + \frac{G_\phi^p}{2} \right) \cdot 4,5 + 0,8p' \cdot 4,5 + 1,1p' \cdot 3 + 1,4p' \cdot 1,5 + N_{16}r_{16} = 0;$$

$$N_{16} = 7833,6 \text{ даН};$$

б) от временной нагрузки справа

$$\sum_{\text{лев}} M_L = N_{15}r_{15} = 0 \Rightarrow N_{15} = 0;$$

$$\sum_{\text{лев}} M_L = N_{16}r_{16} = 0 \Rightarrow N_{16} = 0;$$

в) от временной нагрузки слева

$$\sum_{\text{лев}} M_K = -N_{15}r_{15} - 0,2W \cdot 0 - 0,2W \cdot 0,37 - 0,2W \cdot 0,75 - 0,2W \cdot 1,12 = 0;$$

$$N_{15} = -164,6 \text{ даН};$$

$$\sum_{\text{лев}} M_L = N_{16}r_{16} + 0,2W \cdot 0,75 + 0,2W \cdot 0,37 = 0;$$

$$N_{16} = -104,8 \text{ даН}.$$

Для нахождения значений продольных сил в 12-м пояском и 3-м стержне решетки, принадлежащих консольной части фермы, рассмотрим ее по сечению II–II и воспользуемся условиями равновесия правой от сечения части фермы (рис. 4.3). Значения усилий в 12-м стержне определяются из уравнения моментов

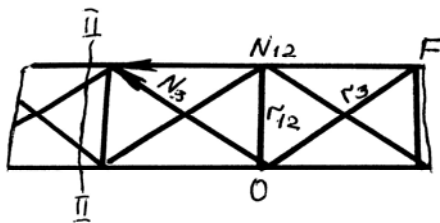


Рис. 4.3. Схема к расчету усилий в стержнях 12 и 3

продольной силы в 3-м стержне составим аналогичное уравнение относительно точки F .

$$r_{12} = 1,5 \text{ м}, \quad r_3 = 2,5 \text{ м}.$$

Определение значений продольных сил:

а) от постоянной нагрузки

$$\begin{aligned} \sum_{\text{прав}} M_D = N_{12} r_{12} - (G_r^p + G_\phi^p) \cdot 12 - 0,8 p' \cdot 12 - 1,1 p' \cdot 10,5 - \\ - 1,4 p' \cdot 9 - 1,7 p' \cdot 7,5 - 2 p' \cdot (6 + 4 + 2) - (2 p' + \left(\frac{G_{\text{тр}}^p + G_{\text{раст}}^p}{2} \right)) \times \\ \times 10 - 2 p' \cdot 2 + V_B \cdot 6 = 0. \end{aligned}$$

$$N_{12} = 9644,7 \text{ даН};$$

$$\begin{aligned} \sum_{\text{прав}} M_F = -N_3 r_3 - (G_r^p + G_\phi^p) \cdot 12 - 0,8 p' \cdot 12 - 1,1 p' \cdot 10,5 - \\ - 1,4 p' \cdot 9 - 1,7 p' \cdot 7,5 - 2 p' \cdot (6 + 4 + 2) - (2 p' - \left(\frac{G_{\text{тр}}^p + G_{\text{раст}}^p}{2} \right)) \times \\ \times (6 + 4) - 2 p' \cdot 2 + V_B \cdot 6 = 0. \end{aligned}$$

Следовательно, $N_3 = 3324,4 \text{ даН}$;

б) от временной нагрузки справа

$$\sum_{\text{пр}} M_B = V_B \cdot 6 + N_{12} r_{12} = 0;$$

$$N_{12} = -30218,4 \text{ даН};$$

$$\sum_{\text{пр}} M_F = N_3 \tau_3 + 4V_B - X \cdot 1,5 = 0;$$

$$N_3 = 12\,097 \text{ даН};$$

в) от временной нагрузки слева

$$N_{12} = -30218,4 \text{ даН};$$

$$N_3 = 12\,097 \text{ даН}.$$

Для нахождения значений продольных сил в 14-м пояском стержне и 13-м стержне решетки, принадлежащих консольной части фермы, рассечем ее по III–III и воспользуемся условиями равновесия левой от сечения части фермы. Значения усилий в стержне 14 определяются из уравнения моментов сил, приложенных к отсеченной части, относительно точки M , а для нахождения значений продольной силы в стержне 13 составим аналогичное уравнение относительно моментной точки N , рис. 4.4.

Предварительно из подобия заштрихованных треугольников найдем величины r_{14} и r_{13} :

$$\frac{r_{14}}{1,12} = \frac{1,546}{1,5};$$

$$r_{14} = 1,16 \text{ м};$$

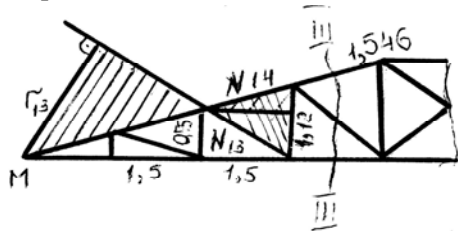


Рис. 4.4. Схема к расчету усилий в стержнях 14 и 13

$$\frac{r_3}{2\sqrt{0,38^2 + 1,5^2}} = \frac{1,12}{\sqrt{0,38^2 + 1,5^2}};$$

$$\tau_3 = 2,25 \text{ м}.$$

Определение значений продольных сил:

а) от постоянных нагрузок

$$\sum_{\text{лев}} M_N = N_{14}r_{14} + \left(G_{\Gamma}^P + \frac{G_{\Phi}^P}{2} \right) \cdot 4,5 + 0,8p' \cdot 4,5 + 1,1p' \cdot 3 + 1,4p' \cdot 1,5 = 0.$$

$$N_{14} = 13047,7 \text{ даН};$$

$$\sum M_M = N_{13}r_{13} - 1,1p' \cdot 1,5 - 1,4p' \cdot 3 - 1,7p' \cdot 4,5 = 0;$$

$$N_{13} = 997,8 \text{ даН};$$

б) от временных нагрузок справа:

$$\sum_{\text{пр}} M_N = -N_{14}r_{14} = 0; \quad N_{14} = 0;$$

$$\sum_{\text{пр}} M_M = N_{13}r_{13} = 0; \quad N_{13} = 0;$$

в) от временных нагрузок слева:

$$\sum_{\text{лев}} M_N = -N_{14}r_{14} - 0,2W \cdot 0,37 - 0,2W \cdot 0,75 - 0,2W \cdot 1,12 = 0;$$

$$N_{14} = -205,7 \text{ даН};$$

$$\sum_{\text{лев}} M_M = N_{13}r_{13} - 0,2W \cdot 0,37 - 0,2W \cdot 0,75 - 0,2W \cdot 1,12 = 0;$$

$$N_{13} = 53,02 \text{ даН}.$$

Значения продольных сил в стержнях 1, 2, 3 найдем способом вырезания узлов.

Рассчитаем стержень 1.

Вырежем узел А фермы, используем условия его равновесия (суммы проекций сил, приложенных к узлу, на оси выбранной системы координат должны быть равны 0).

$$\sin\alpha = \frac{0,38}{1,546} = 0,246;$$

$$\cos\alpha = \frac{1,5}{1,546} = 0,97.$$

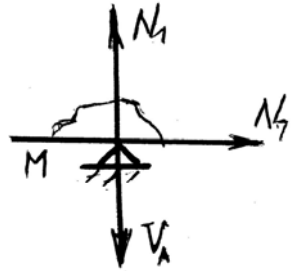
α и другие величины даны на предыдущих рисунках.

Усилия:

а) от постоянной нагрузки:

$$\Sigma Y = V_A + N_1 = 6547,9 + N_1 = 0;$$

$$N_1 = -6547,9 \text{ даН};$$



б) от временной нагрузки справа:

$$\Sigma Y = V'_A + N_1 = 32,6 + N_1 = 0;$$

$$N_1 = -32,6 \text{ даН};$$

в) от временной нагрузки слева:

$$\Sigma Y = V''_A + N_1 = -32,6 + N_1 = 0;$$

$$N_1 = 32,6 \text{ даН}.$$

Рассчитаем стержень 3:

$$\beta = 45^\circ;$$

$$\cos\beta = 0,707; \quad \sin\beta = 0,707;$$

Усилия от постоянной нагрузки:

$$\Sigma X = -N_3 \cos\beta + N_3 \cos\beta = 0, \quad N_3 = 0;$$

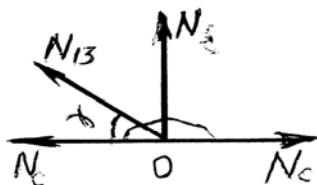
$$\Sigma Y = -N_3 \sin\beta - N_3 \sin\beta + 2p' - N_3 = 0;$$

$$N_3 = 2p' = 332,6 \text{ даН}.$$

Рассчитаем стержень 5:

$$\cos\gamma = \frac{1,5}{1,695} = 0,885;$$

$$\sin\gamma = \frac{0,746}{1,695} = 0,442;$$



Усилия:

а) от постоянных нагрузок:

$$\Sigma Y = -N_3 \sin\alpha - N_5 + 1,7 p' = 0;$$

$$N_5 = 282,7 \text{ даН};$$

б) от временных нагрузок справа:

$$N_5 = 0;$$

в) от временных нагрузок слева

$$\Sigma Y = -N_{13} \sin\alpha - N_5 = 0; \quad N_5 = 0.$$

Результаты расчета занесем в табл. 4.1, 4.2.

Т а б л и ц а 4.1

Усилия в стержнях траверсы

Номер стержня	Значения продольных сил в стержнях, даН				
	От постоянной нагрузки	От временной справа	От временной слева	Наибольшее	Наименьшее
Пояса 15	-8583,8	0	-164,6	-8583,8	-8748,4
16	-7833,6	0	-104,8	7833,6	-7938,4
12	9644,7	-30218,4	-30218,4	-30218,4	-20573,7
14	13047,7	0	-205,7	13047,7	12841,3
Стержня 3	3324,4	12097	12097	18745,8	3324,4
13	997,8	0	53,02	997,8	53,02
I	-6547,9	-32,6	32,6	-6547,9	-6580,5
III	332,6	0	0	665,6	332,6
V	282,1	0	0	282,1	282,1

Сечения стержней траверсы

Номер стержня	Сечение стержня	Площадь сечения F , см ²
15	100×7	13,75
16	110×7	15,15
12	110×7	15,15
3	50×5	4,8
14	100×7	13,75
13	40×4	3,08
I	50×5	4,8
III	50×5	4,8
V	40×4	3,08

Произведем расчет стержней на прочность.

Условие прочности

$$\sigma = \frac{N}{F} \leq [\sigma],$$

где F – площадь сечения уголка;

$$[\sigma] = 2900 \text{ даН/см}^2.$$

Проверяем стержни на прочность:

$$\sigma_{15} = -\frac{8583,8}{13,75} = -624,3 \frac{\text{даН}}{\text{см}^2} \leq 2900 \text{ даН/см}^2;$$

$$\sigma_{16} = -\frac{7833,6}{15,15} = -517,1 \frac{\text{даН}}{\text{см}^2} \leq 2900 \text{ даН/см}^2;$$

$$\sigma_{12} = \frac{9644,7}{15,15} = 636,6 \frac{\text{даН}}{\text{см}^2} \leq 2900 \text{ даН/см}^2;$$

$$\sigma_{14} = \frac{13047,7}{13,75} = 948,9 \frac{\text{даН}}{\text{см}^2} \leq 2900 \text{ даН/см}^2;$$

$$\sigma_3 = \frac{3324,4}{4,8} = 692,4 \frac{\text{даН}}{\text{см}^2} \leq 2900 \text{ даН/см}^2;$$

$$\sigma_{13} = \frac{997,8}{3,08} = 324,0 \frac{\text{даН}}{\text{см}^2} \leq 2900 \text{ даН/см}^2;$$

$$\sigma_1 = -\frac{6547,9}{4,8} = -1364,1 \frac{\text{даН}}{\text{см}^2} \leq 2900 \text{ даН/см}^2;$$

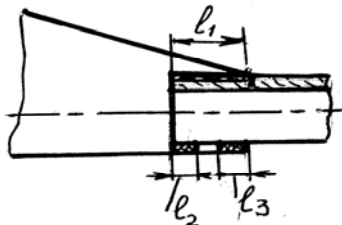
$$\sigma_3 = \frac{332,6}{4,8} = 69,3 \frac{\text{даН}}{\text{см}^2} \leq 2900 \text{ даН/см}^2;$$

$$\sigma_5 = \frac{282,1}{3,08} = 91,8 \frac{\text{даН}}{\text{см}^2} \leq 2900 \text{ даН/см}^2.$$

5. РАСЧЕТ СОЕДИНЕНИЙ НА ПРОЧНОСТЬ

5.1. Расчет сварного соединения

Раскосы решеток опор ЛЭП прикрепляются к поясам или фасонкам внахлестку в основном фланговыми швами, поперечные лобовые швы добавляются лишь в исключительных случаях, когда прочность фланговых швов недостаточна.



Прикрепление уголка к фасонке с помощью сварных швов

Прикрепление несимметричных элементов, например уголков, фланговыми швами последние следует располагать так, чтобы центр тяжести площади шва совпадал с центром тяжести профиля. Для уголка это условие соблюдается, когда шов, наложенный вдоль обушка, составляет 70 %, а вдоль пера – примерно 30 % общей необходимой длины шва.

На рисунке

$$l_1 = 0,7l_p + 1 \text{ см,}$$

$$l_2 + l_3 = 0,3l_p + 2 \text{ см.}$$

Расчет сварного соединения для стержня 13 траверсы (уголок 40 × 4) производится по формуле

$$\sigma = \frac{N^p}{\delta_{\text{ш}} l_{\text{ш}}} \leq R_y^{\text{св}},$$

где $R_y^{\text{св}}$ – расчетное сопротивление сварного шва на растяжение (сжатие);

$\delta_{\text{ш}}$ – расчетная толщина шва, равная меньшей из толщин свариваемых элементов: $\delta_{\text{ш}} = \beta h_{\text{ш}}$;

β – коэффициент, при ручной сварке равный 0,7;

$l_{\text{ш}}$ – длина сварного шва, равная ширине элемента минус 1 см (на непровар): $l_{\text{ш}} = \delta - 1$, см;

$\delta_{\text{ш}}$ – ширина элемента: $\delta_{\text{ш}} = 0,7 \cdot 4 = 2,8$ мм.

$$R_y^{\text{св}} = 1500 \text{ даН/см}^2;$$

$$l_{\text{ш}} = 4 - 1 = 3 \text{ см.}$$

Тогда

$$\sigma = \frac{997,8}{0,28 \cdot 3} = 1187,9 \frac{\text{даН}}{\text{см}^2} \leq 1500 \text{ даН/см}^2.$$

Условие выполняется, следовательно, сварной шов выдержит нагрузку.

5.2. Расчет болтового соединения

Четырехболтовое соединение (М-20) траверсы со стойкой с накладкой косынки проверим на срез и смятие.

1. Проверка на срез.

Условие прочности

$$N^P \leq \frac{\pi d^2}{4} n m_c R_{\text{ср}},$$

где $R_{\text{ср}}$ – расчетное сопротивление соединения среза:

$$R_{\text{ср}} = 1800 \text{ даН/см}^2.$$

d – диаметр болта, см.

$$N^P = 7833,6 \text{ даН};$$

$$7833,6 \leq \frac{3,14 \cdot 2^2}{4} \cdot 4 \cdot 3 \cdot 1800 = 87\,824 \text{ даН.}$$

В этой формуле n – количество болтов в соединении, m_c – количество срезов.

2. Проверка на смятие.
Условие прочности

$$N^P \leq d\delta_{\Sigma}nR_{\text{см}},$$

где δ_{Σ} – минимальная суммарная толщина листов соединения, сминаемых болтом в одном направлении;

$R_{\text{см}}$ – расчетное сопротивление смятию: $R_{\text{см}} = 3400 \text{ даН/см}^2$.

Тогда

$$7833,6 \text{ даН} \leq 2 \cdot 0,45 \cdot 4 \cdot 3400 = 12\,240 \text{ даН}.$$

6. РАСЧЕТ АНКЕРНЫХ БОЛТОВ

Усилие в поясе нижней секции составляет $U_1 = 43,6 \cdot 10^3 \text{ даН}$.

Это усилие воспринимается двумя анкерными болтами фундамента.

Произведем расчет анкерных болтов на растяжение.

Условие прочности

$$\frac{U}{nF_{\text{нт}}} \leq R_p^s,$$

где U – расчетная продольная сила, действующая на болтовое соединение;

$F_{\text{нт}}$ – площадь сечения болта, нетто, определяемая по формуле

$$F_{\text{нт}} = \frac{\pi}{16}(d_2 - d_3)^2,$$

где d_2 – номинальный средний диаметр резьбы;

$$d_3 = d_1 - \frac{H}{6};$$

d_1 – номинальный внутренний диаметр резьбы;

H – теоретическая высота болта;

R_p^s – расчетное сопротивление растяжению болта, равное 1700 даН/см².

$$\frac{U_1}{nR_p^s} = \frac{43,6 \cdot 10^3}{2 \cdot 1700} = 12,82 \text{ см}^2.$$

По таблице СНиП П-В.3–72 принимаем болт диаметром 32 мм с площадью сечения нетто $F_{нт} = 13,64 \text{ см}^2$.

Л и т е р а т у р а

1. Крюков, К. П. Конструкции и механический расчет линий электропередачи / К. П. Крюков, В. П. Новгородцев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ленинград: Энергия, Ленингр. отд-ние, 1979. – 310 с.
2. Справочник по проектированию линии электропередачи / М. В. Вязьменский [и др.]; под ред. М. А. Реута и С. С. Рокотина. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Энергия, 1980. – 296 с.
3. Электротехнический справочник: в 3 т. / под общ. ред. И. Н. Орлова (гл. ред.) [и др.]. – 7-е изд., испр. и доп. – Москва: Энергоатомиздат, 1998. – Т. 3; Кн. 1: Производство и распределение электрической энергии.
4. Справочник по электрическим установкам высокого напряжения / под ред. И. А. Баумштейна, С. А. Бансанова. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Энергоатомиздат, 1989.
5. Короткевич, М. А. Монтаж электрических сетей: учебное пособие / М. А. Короткевич. – Минск: Вышэйшая школа, 2012. – 511 с.
6. Короткевич, М. А. Проектирование линий электропередачи. Механическая часть: учебное пособие / М. А. Короткевич. – Минск: Вышэйшая школа, 2010. – 572 с.

С о д е р ж а н и е

1. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ПОРТАЛЬНЫХ ОПОР	3
2. КЛАССИФИКАЦИЯ ПОРТАЛЬНЫХ ОПОР ЛЭП	9
3. РАСЧЕТ СТАЛЬНОЙ ПОРТАЛЬНОЙ ОПОРЫ НА ОТТЯЖКАХ	12
3.1. Расчет нагрузок на опору от проводов и тросов.....	12
3.2. Расчет ветровой нагрузки на конструкцию опоры.....	29
3.3. Расчет оттяжек на прочность	33
3.3.1. Нормальный режим без гололеда. Ветер направлен перпендикулярно оси линии.....	35
3.3.2. Нормальный режим без гололеда. Ветер направлен под углом 45° к оси линии.....	39
3.3.3. Нормальный режим. Гололед. Ветер направлен перпендикулярно оси линии.....	41
3.3.4. Аварийный режим. Обрыв проводов крайней фазы. Ветра и гололеда нет	42
3.4. Расчет стойки на прочность и прогиб	44
3.5. Предварительный расчет траверсы.....	51
3.6. Подбор сечений уголков решетки опоры.....	54
4. РАСЧЕТ ТРАВЕРСЫ НА ПРОЧНОСТЬ	65
5. РАСЧЕТ СОЕДИНЕНИЙ НА ПРОЧНОСТЬ	77
5.1. Расчет сварного соединения	77
5.2. Расчет болтового соединения.....	78
6. РАСЧЕТ АНКЕРНЫХ БОЛТОВ.....	79
Л и т е р а т у р а	81

Учебное издание

НИКОЛАЕНКО Владимир Лаврентьевич
МИКУЛИК Татьяна Николаевна

**РАСЧЁТ ОДНОЦЕПНОЙ ПОРТАЛЬНОЙ ОПОРЫ
НА ОТТЯЖКАХ**

Учебно-методическое пособие
к курсовому проектированию по дисциплине
«Механика» для студентов специальности
1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети»

Редактор *Т. Н. Микулик*
Компьютерная верстка *Н. А. Школьниковой*

Подписано в печать 15.11.2017. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 4,82. Уч.-изд. л. 3,77. Тираж 100. Заказ 870.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.