

**Л.С. Сабитов¹,**

к.т.н., доцент, начальник службы экспертизы зданий и сооружений ООО «Инженерный центр «Энергопрогресс»

И.Л. Кузнецов²,

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой металлических конструкций и испытаний сооружений КГАСУ

И.Р. Бадертдинов³,

ведущий инженер ФГУП ВО «Безопасность», Казанский филиал

К вопросу о рациональном типе поперечного сечения опор

Рассматриваются опоры для линий электропередачи, сотовой связи, ветрогенераторных установок и т.д. Получены выражения для определения массы указанных опор сплошного сечения и решетчатых опор треугольного поперечного сечения. По критерию минимума массы предложено аналитическое условие для определения рациональной области применения рассматриваемых сечений и указано на целесообразность применения комбинированных по высоте сечений опор.

Ключевые слова: опора сплошного сечения, решетчатая опора треугольного поперечного сечения, критерий минимизации массы опор, аналитическое условие рациональной области применения.

В настоящее время в практике строительства опор линий электропередачи, опор для ветрогенераторных установок, для размещения светосигнального и телекоммуникационного оборудования используются конструкции опор сплошного (рис. 1а) и решетчатого (рис. 1б) сечения. При этом наиболее рациональными решетчатыми опорами являются опоры с треугольным поперечным сечением (рис. 2б). Конструктивные решения указанных типов сечения опор находятся в стадии дальнейшего совершенствования, о чем свидетельствует наличие современных технических решений [1, 2]. При проектировании опор возникает задача выбора типа сечения, поскольку каждая из них имеет свою рациональную область применения [3]. В данной статье рассматривается задача выбора рационального типа сечения рассматриваемых опор по критерию минимума их массы. При решении поставленной задачи были получены выражения для определения массы опоры сплошного сечения и решетчатой опоры треугольного поперечного сечения.

Масса опоры сплошного сечения [3]

$$G_{сп} = \psi_{сп} \cdot \gamma \cdot A \cdot H, \quad (1)$$

где $\psi_{сп} = (1,1-1,25)$ – конструктивный коэффициент массы опоры сплошного сечения; $\gamma = 7,85 \text{ т/м}^3$ – плотность стали; A – площадь поперечного сечения; H – высота опоры.

Площадь поперечного сечения опоры находим из условия [3]

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M}{W_x} = R_y \cdot \gamma_c, \quad (2)$$

где σ – нормальное напряжение, N – значение продольной силы; A – площадь поперечного сечения; M – значение изгибающего момента; W_x – момент сопротивления сечения опоры; R_y – расчетное сопротивление стали; γ_c – коэффициент условия работы.

Из (2) находим значение площади поперечного сечения

$$A = \frac{\left(N + \frac{M}{\rho} \right)}{R_y \cdot \gamma_c}, \quad (3)$$

¹ 420080, Россия, РТ, г. Казань, пр-кт Ямашева, д. 10.

² 420043, Россия, РТ, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

³ 420073, Россия, РТ, г. Казань, ул. Гвардейская, д. 15

где $\rho = W_x/A$ – ядровое расстояние.

С учетом (1) и (3) окончательное значение массы опоры сплошного сечения равно

$$G_{СП} = \psi_{СП} \cdot \gamma \cdot \left(N + \frac{M}{\rho} \right) \cdot \frac{H}{R_y \cdot \gamma_c} \quad (4)$$

Значение ядрового расстояния для заданного типа профиля принимается постоянным. Для трубчатых сечений, обеспечивающих местную устойчивость стенок, можно принять ρ , равным 0,2 м.

Масса решетчатой опоры треугольного поперечного сечения равна

$$G_{ТР} = \psi_{ТР} \cdot (G_{П} + G_{Р}) \quad (5)$$

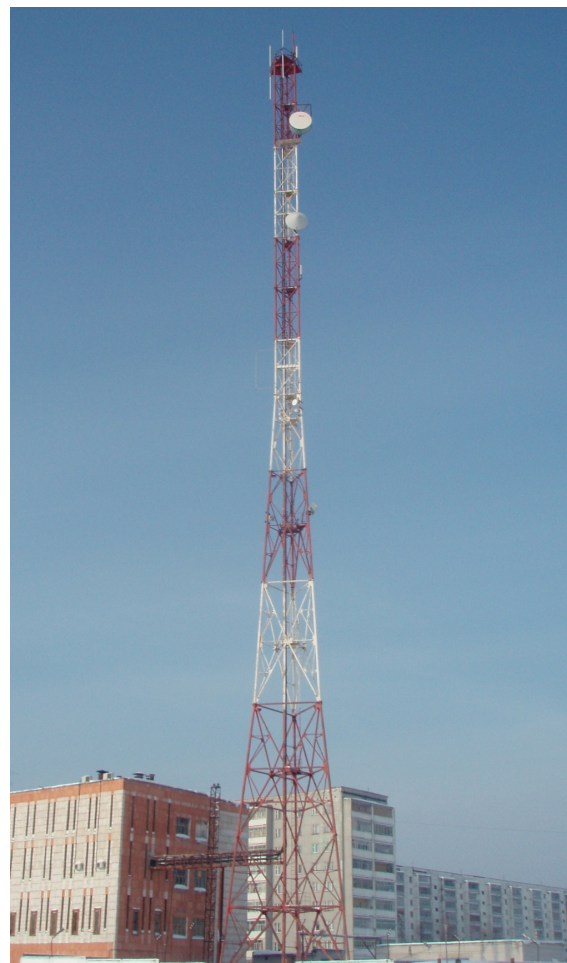
где $G_{П}$ – масса поясов опоры; $G_{Р}$ – масса элементов решетки; $\psi_{ТР} = 1,1-1,15$ – конструктивный коэффициент опоры треугольного поперечного сечения.

Масса однотипных поясов решетчатой опоры треугольного поперечного сечения равна

$$G_{П} = \psi_{П} \cdot 3 \cdot \gamma \cdot A \cdot H \quad (6)$$



а)



б)

Рис.1. Примеры строительства опор сплошного (а) и решетчатого треугольного поперечного сечения (б)

Площадь поперечного сечения одного пояса опоры

$$A = \psi_{II} \cdot \left(\frac{N_{II}}{R_y \cdot \gamma_c} + k_{II} \cdot d^2 \right) \quad (7)$$

здесь $\psi_{II} = 1,05-1,1$ конструктивный коэффициент поясов опоры; N_{II} – расчетное усилие в одностипном поясе опоры; R_y – расчетное сопротивление стали; γ_c – коэффициент условия работы; k_{II} – коэффициент, учитывающий продольный изгиб; d – длина панели пояса (расстояние между узлами решетки, рис. 2).

Значение расчетного усилия в поясе решетчатой опоры равно (рис. 2)

$$N_{II} = \frac{1}{3} \cdot N + \frac{M}{h_0}, \quad (8)$$

где N – значение продольной силы в рассматриваемом сечении опоры; M – значение изгибающего момента в этом же сечении; h_0 – высота поперечного сечения опоры.

Длина панели пояса (рис. 2) зависит от типа решетки и равна $d = h_0/m$ – для опоры с раскосной решеткой и $d = h_0/2m$ – для опоры с треугольной решеткой. Значение $m = \text{tg } \alpha$, где α – угол наклона стержня решетки.

Значение коэффициента k_{II} , учитывающего продольный изгиб, равно

$$k_{II} = \frac{\mu \cdot 1,9 \cdot 10^{-5} \cdot R_y}{n_c} \quad (\text{М/см}^2), \quad (9)$$

где μ – коэффициент расчетной длины панели пояса опоры; R_y – значение расчетного сопротивления, подставляемого как коэффициент, принимаемое его значение в т/см²; $n_c = i_{min}^2 / A$ – среднее значение коэффициента формы сечения [3], где i_{min} – минимальное значение радиуса инерции, рассматриваемого сечения пояса; A – площадь поперечного сечения этого профиля.

С учетом (6), (8), (9) масса одностипных поясов опоры равна

$$G_{II} = \psi_{II} \cdot \left(\frac{\gamma \cdot H}{R_y \cdot \gamma_c} \cdot \left[N + \frac{3M}{h_0} + \frac{3 \cdot n \cdot k_{II} \cdot R_y \cdot \gamma_c \cdot h_0^2}{m^2} \right] \right), \quad (10)$$

здесь $n=1$ для опор с раскосной решеткой и $n=2$ для опор с треугольной решеткой.

Масса стержней решетки, подобранной по предельной гибкости, равна

$$G_p = 3 \cdot \psi_p \cdot \gamma \cdot H \cdot C \cdot h_0^2 \cdot \xi, \quad (11)$$

здесь $\psi_p = 1,05-1,1$ – конструктивный коэффициент решетки;

$C = \frac{\mu^2}{n_c \cdot \lambda_{пред}}$, где $\lambda_{пред}$ – предельное значение гибкости (СНИП II-23-81*); ξ – коэффициент, зависящий от типа

решетки, для треугольной решетки (рис. 2б)

$$\xi = \frac{(1+m^2) \cdot \sqrt{1+m^2}}{m^2},$$

для раскосной решетки (рис. 2а)

$$\xi = \frac{(m + \sqrt{1+m^2}) \cdot (1+m^2)}{m^2}.$$

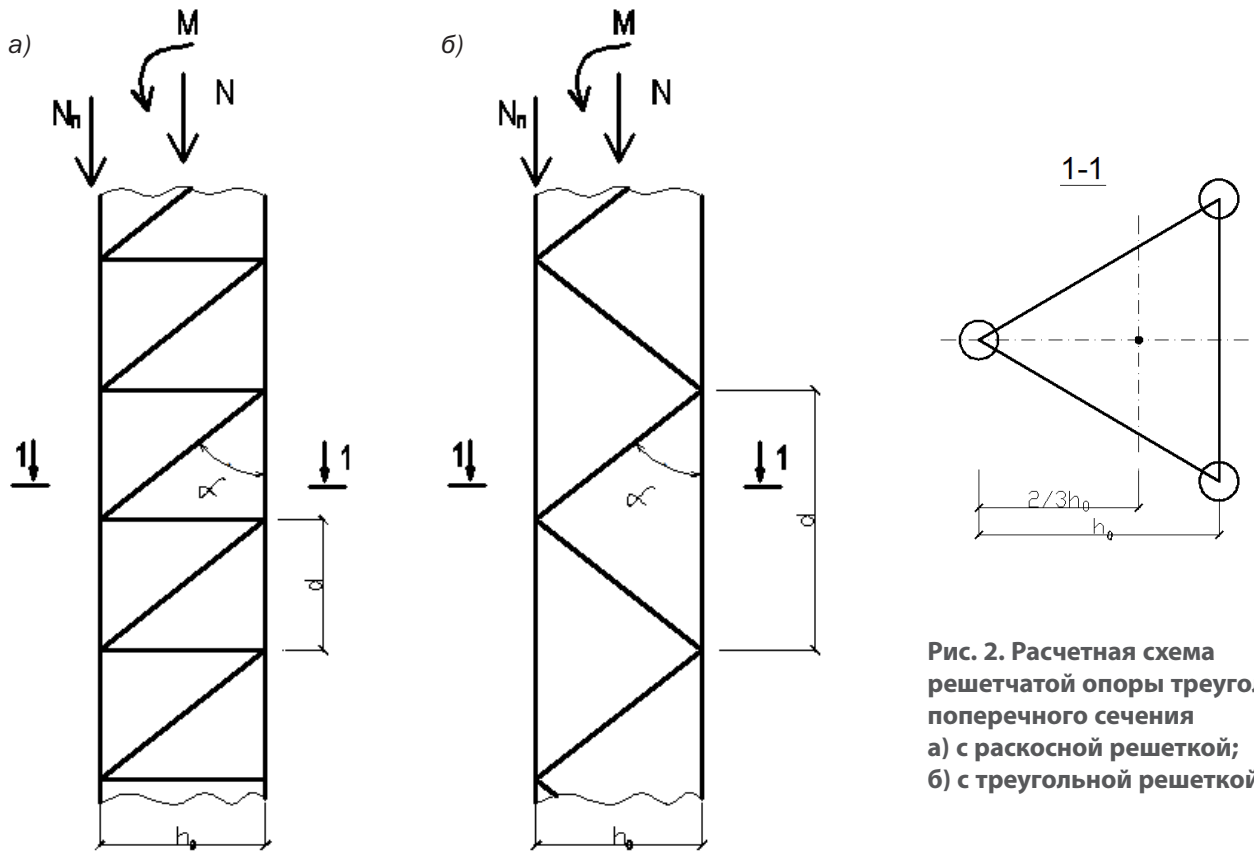


Рис. 2. Расчетная схема решетчатой опоры треугольного поперечного сечения
а) с раскосной решеткой;
б) с треугольной решеткой.

Окончательно масса решетчатой опоры треугольного поперечного сечения с треугольной или раскосной решеткой записывается в виде

$$G_{TP} = \psi_{TP} \cdot \left\{ \frac{\psi_{II} \cdot \gamma \cdot H}{R_y \cdot \gamma_c} \cdot \left[N + \frac{3M}{h_0} + \frac{3 \cdot n \cdot k_{II} \cdot R_y \cdot \gamma_c \cdot h_0^2}{m^2} \right] + 3\psi_P \cdot C \cdot h_0^2 \cdot \xi \right\}, \quad (12)$$

Минимальное значение массы решетчатой опоры достигается при оптимальной высоте поперечного сечения, определяемой из условий $dG_{TP} / dh_0 = 0$

$$h_{opt} = \sqrt[3]{\frac{\psi_{II} \cdot m^2 \cdot M}{2 \cdot \gamma_c \cdot R_y \cdot (n \cdot \psi_{II} \cdot k_{II} + \psi_P \cdot m^2 \cdot \xi \cdot C)}}. \quad (13)$$

При этом минимальная высота сечения опоры

$$h_{min} = \frac{4H}{\lambda_{пред}} = \frac{4H}{120} = 0,0333H.$$

Для определения рациональной границы применения опор сплошного сечения и решетчатых опор треугольного поперечного сечения (рис. 1) необходимо решить неравенство $G_{СП} > G_{TP}$, из которого получаем следующее условие

$$M > M_{усл} = \frac{3 \cdot h_0^3 \cdot \rho \cdot R_y \cdot \gamma_c}{\psi_{СП} \cdot h_0 - 3\psi_{II} \cdot \psi_{TP} \cdot \rho} \cdot \left(\frac{n \cdot \psi_{II} \cdot k_{II}}{m^2} + \psi_{TP} \cdot \psi_P \cdot C \cdot \xi \right). \quad (14)$$

Полученное условие (14) формулируется так: если изгибающий момент M в опоре больше условного $M_{усл}$, то по расходу стали целесообразно применять решетчатое сечение, и, наоборот, при невыполнении условия (14) рациональным сечением опоры является сплошное сечение.

Пример. Требуется спроектировать опору высотой 20 м. Опора рассчитывается на эквивалентную, равномерно распределенную ветровую нагрузку, равную 50 кг/м, и сосредоточенную горизонтальную нагрузку 300 кг, приложенную на высоте 15 м. Опора сплошного и решетчатого сечения выполняется из стальных круглых труб из стали класса С245.

Принимаем для опоры сплошного сечения:
 $\psi_{II} = 1,05$; $\rho = 0,2$ м; $R_y = 2450$ кг/см²; $\gamma_c = 0,9$.

Для решетчатой опоры треугольного поперечного сечения с треугольной решеткой из труб: $\psi_{TP} = 1,1$; $\psi_{II} = 1,05$; $k_{II} = 3,2 \cdot 10^{-5}$; $m = 1 (\alpha = 45^\circ)$; $\psi_P = 1,05$; $n = 2$; $R_y = 2450$ кг/см²; $\gamma_c = 1$, $h_0 = 0,8$ м; $\xi = 2,828$; $n_c = 1$; $C = 0,66 \cdot 10^{-5}$.

Значение условного изгибающего момента (14) $M_{ycl} = 4,04$ т·м. Значение фактического максимального момента в опоре на уровне фундамента равно 14,5 т·м. Следовательно, согласно (14), рациональным типом сечения опоры является решетчатое, поскольку $M = 14,5$ т·м $>$ $M_{ycl} = 4,04$ т·м.

Из приведенного примера следует также, что на высоте 10 м изгибающий момент равен 4 т·м, т.е. равен условному, поэтому в рассматриваемом примере целесообразно выполнять опору комбинированного сечения: до высоты 10 м опора выполняется решетчатой, а на высоте от 10 до 20 м сечение опоры целесообразно выполнить сплошным.

Выводы

Получено аналитическое условие (14), позволяющее определить рациональную границу применения сплошного или решетчатого сечения опоры. При этом данное условие указывает также на целесообразность проектирования в некоторых случаях опор комбинированного сечения, а именно в зоне, где изгибающий момент больше условного (14), следует применять решетчатое сечение, а на участке, где изгибающий момент меньше условного, целесообразно сплошное сечение опоры. Это частично реализуется на практике [4-6].

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент РФ №2248434. Стальная многогранная опора ЛЭП / Кулик В.В., Козаков С.Е., Винокуров М.А. и др.; опубл. 20.03.2005 г.
2. Патент РФ №2378469. Трехгранная решетчатая конструкция / Кузнецов И.Л., Исаев А.В., Бадертдинов И.Р.; опубл. 10.01.2008 г.
3. **Сабитов Л.С., Кузнецов И.Л., Пеньковцев С.А.** Выбор рационального типа поперечного сечения опор. *Приволжский научный журнал*. – 2014. – №4(32). – С. 90-94.
4. Патент РФ №2511239. Узел соединения трубчатых стержней / Кузнецов И.Л., Сабитов Л.С., Биктимиров А.А.; опубл. 10.04.2014 г.
5. **Сабитов Л.С.** Разработка и численные исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций из трубчатых стержней в энергетическом строительстве. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. – 2015. – №6(101). – С. 108-117.
6. **Хамидуллин И.Н., Сабитов Л.С., Кузнецов И.Л.** Разработка и исследование опор для ветрогенераторных установок. *Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура*. – 2015. – №2(38). – С. 34-40.

ABSTRACT

Discusses supports for power lines, cell phones, wind power installations, etc. the resulting expression for determining mass specified solid section poles and lattice towers of triangular cross-section. The criterion of minimum mass is proposed an analytical condition for the determination of rational scope of the sections and indicated the feasibility of using combined height sections supports.

Keywords: *the support of a solid section, the lattice tower with a triangular cross section, the criterion of minimising the mass of the supports, the analytical condition of a rational application.*