

МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПОР КОРОТКОВОЛНОВЫХ НАДУВНЫХ АНТЕНН

Лихтциндер Б.Я.¹, Сазанов В.П.²

¹Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

²Самарский национальный исследовательский университет имени С.П. Королева, Самара, РФ

E-mail: b.lihtcinder@psuti.ru, sazanow@mail.ru

В работе анализируются механические свойства цилиндрических опор антенн коротковолнового диапазона частот. Целью является разработка методики расчета требуемых размеров опоры и установления места крепления растяжек, обеспечивающих ее устойчивость. Предлагается метод определения коэффициента упругости опоры, основанный на определении ее прогиба под действием собственного веса при двухстороннем закреплении баллона. Определены аэродинамические свойства цилиндрических опор и рассмотрена методика расчета прогиба и угла поворота вершины опоры. Показаны граничные условия, при которых консольная часть крепления опоры теряет устойчивость. В расчетной части применены два способа определения перемещений в балках – интегрирование дифференциального уравнения упругой линии и интеграл Мора – способ Верещагина. Результаты расчета подтверждены экспериментально на основе натурных испытаний конструкции, разработанной и реализованной в производстве опоры коротковолновой антенны. Эксперименты подтвердили справедливость допущений, сделанных при расчетах.

Ключевые слова: антенны, надувные опоры, коэффициент жесткости, изгиб, потеря устойчивости, ветровая нагрузка

Введение

Быстро развертываемые антенные комплексы занимают важное место в составе сетей радиосвязи, в том числе резервных и полевых. Однако оперативность развертывания/свертывания традиционных антенн и возможности их адаптации при регулярном изменении рабочих частот станции уже не удовлетворяют современным требованиям.

Можно выделить несколько тенденций развития антенных систем для быстро развертываемых антенных комплексов. Прежде всего, отметим общую тенденцию к миниатюризации средств связи, в том числе, антенн. Вполне очевидно, что данная тенденция в радиосвязи наблюдается всегда, но особенно это актуально именно для быстро развертываемых антенных комплексов. Кроме того, уменьшается трудоемкость развертывания антенных комплексов и повышается их живучесть.

В связи с вышесказанным становится очевидной необходимость разработки новых, эффективных антенных систем для мобильных и быстро развертываемых комплексов, обеспечивающих возможность оперативной организации радиосвязи на различных частотах и на трассах различной протяженности. Одним из вариантов реализации быстро развертываемых антенн является исполь-

зование «упруго трансформируемых элементов в виде трубчатых или ленточных конструкций, которые с помощью специальных механизмов свертываются для хранения и развертываются в рабочее состояние с достаточно высокой несущей способностью» [1–10]. Несущие конструкции таких антенн (мачты) могут использоваться в качестве излучающих элементов. В последнее время появляется значительное число публикаций, относящихся к антеннам, выполняющим функции несущих конструкций. К антеннам подобного типа, например, можно отнести надувную УКВ-антенну GALAXY-INFL8-5. Это надувная антенна, которую можно быстро развернуть с помощью картриджа с CO₂ или ручной трубки, и надуть до высоты 1,6 м, чтобы создать антенну с полным уровнем усиления 3 дБ и дальностью действия, которая в три раза больше, чем у любой существующей винтовой аварийной антенны. Благодаря надувной конструкции антенну можно сдуть и безопасно спрятать в удобной сумке для хранения до тех пор, пока она снова не понадобится.

Положительные свойства надувных опор привели к созданию надувных антенн коротковолнового диапазона частот [11; 12]. Например, на рисунке 1 показана разработанная нами опора надувной антенны в развернутом состоянии.

Опора антенны имеет достаточно большую высоту. Для обеспечения устойчивости такой опоры применяются растяжки. Надувные опоры антенн имеют размеры, превышающие 10 метров и предъявляют особые требования к обеспечению их устойчивости к различным внешним воздействиям. Выполнение этих требований обеспечивается предварительным расчетом их механических и аэродинамических характеристик.



Рисунок 1. Надувная опора антенны

Определение коэффициента упругости

Опора представляет собою цилиндрический надуваемый баллон. Баллон под давлением рассматривается как балка из сплошного материала, имеющего соответствующий эквивалентный коэффициент упругости. Коэффициент упругости определяется по результатам прогиба балки под собственным весом, который известен. Схематически закрепление баллона показано на рисунке 2.

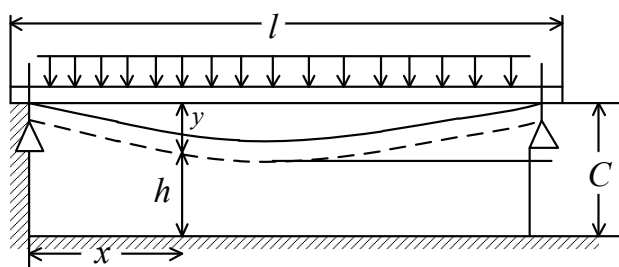


Рисунок 2. Схема двухстороннего закрепления баллона

Расчетная схема и эпюры показаны на рисунке 3.

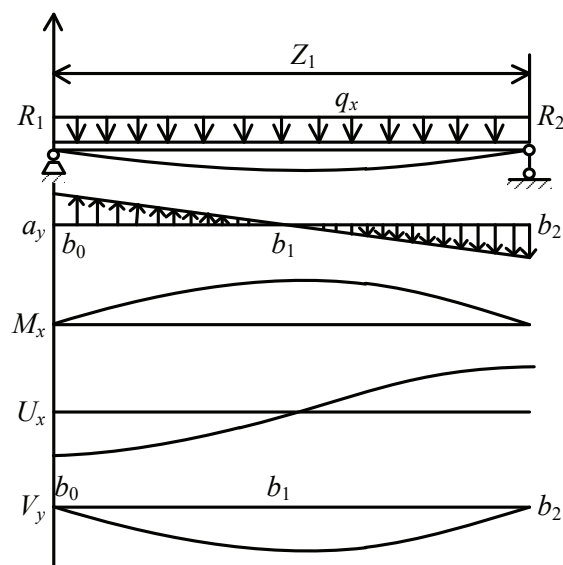


Рисунок 3. Расчетная схема и эпюры при двухстороннем закреплении баллона

Исходные данные:

G – вес баллона, $G = 80$ Н;

l – длина баллона, $l = 10$ м;

q – распределенная нагрузка:

$$q = \frac{G}{z} = 8 \text{ Н/м}.$$

Координаты точек:

$b_0 = 0$, $b_1 = 5$ м, $b_2 = 10$ м;

d – диаметр баллона, $d = 0,3$ м;

E – эквивалентный модуль упругости баллона, значение которого требуется определить;

J_y – момент инерции:

$$J_y = \frac{\pi d^4}{64} = \frac{3,14 \cdot 0,3^4}{64} = 0,00039 \text{ м}^4.$$

Расчет при двухстороннем закреплении баллона

Расчет прогибов балки на двух шарнирных опорах.

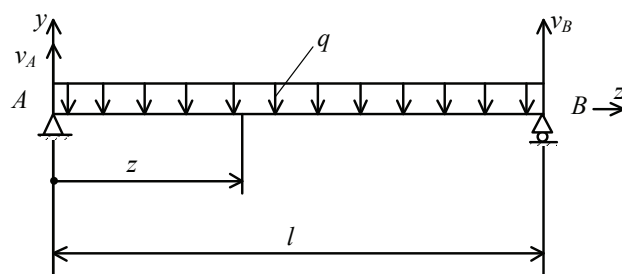


Рисунок 4. Расчетная схема

1. Определение реакций опор:

$$v_A = v_B = \frac{ql}{2}.$$

2. Дифференциальное уравнение упругой линии балки:

$$EI_y = M(z) = \frac{ql}{2}z - \frac{qz^2}{2}.$$

Интегрируем 2 раза:

$$EI_y = \frac{ql}{4}z^2 - \frac{qz^3}{6} + C. \quad (1)$$

$$EI_y = \frac{ql}{12}z^3 - \frac{qz^4}{24} + Cz + D. \quad (2)$$

Граничные условия:

- при $z = 0, y = 0$, подставляем в (2) $D = 0$;
- при $z = l, y = 0$, подставляем в (2):

$$\frac{ql}{12} \cdot l^3 - \frac{ql^4}{24} + Cl = 0;$$

$$\frac{ql^3}{12} - \frac{ql^3}{24} + C = 0;$$

$$C = -\frac{ql^3}{24}.$$

Уравнения (1) и (2) принимают вид:

- для угла поворота сечения:

$$EI_y = \frac{ql}{4}z^2 - \frac{qz^3}{6} - \frac{ql^3}{24};$$

- для прогиба:

$$EI_y = \frac{ql}{12}z^3 - \frac{qz^4}{24} - \frac{ql^3}{24} \cdot z.$$

Наибольший прогиб в середине пролета балки

при $z = \frac{l}{2}$:

$$\begin{aligned} EI_{y_{\text{наиб}}} &= \frac{ql}{12} \cdot \left(\frac{l}{2}\right)^3 - \frac{q}{24} \left(\frac{l}{2}\right)^4 - \frac{ql^3}{24} \cdot \frac{l}{2} = \\ &= \frac{ql^4}{12 \cdot 8} - \frac{ql^4}{24 \cdot 16} - \frac{ql^4}{48} = \\ &= \frac{ql^4}{96} - \frac{ql^4}{384} - \frac{ql^4}{48} = -\frac{5ql^4}{384}, \end{aligned}$$

где знак «-» означает прогиб вниз при $l = 10$ м, $q = 8$ н/м, $I = 0,00039$ м⁴, $y_{\text{наиб}} = 0,4$ м,

$$\begin{aligned} E &= \frac{5 \cdot 8 \cdot 10^4}{384 \cdot 0,4 \cdot 0,00039} = \\ &= 6677350,4 \text{ Н/м}^2 = 6,68 \text{ МПа}. \end{aligned}$$

Эквивалентный модуль упругости надувного баллона соответствует модулю упругости у

обычной резины, который составляет 2–18 МПа. В расчетах балок EI – это жесткость балки при изгибе. Поэтому целесообразно определять эквивалентную жесткость балки при изгибе, поскольку толщина ткани в расчете момента инерции некорректная, т.к. этот материал неоднородный (тканые нити и резина). Для верификации метода целесообразно при испытаниях снять показания прогибов через 1 метр ($z = 1, 2, 3, 4, 5$ м), чтобы проверить упругую линию (таблица 1) при $z = 5$ м (середина пролета).

$$y = \frac{1042}{6,68 \cdot 10^6 \cdot 0,00039} = 0,3997 \text{ м}.$$

Проверка показывает верный результат.

Аэродинамический расчет

Схема установки надувной опоры антенны показана на рисунке 5. Конструкция содержит не менее трех растяжек 2. Первый конец каждой из растяжек закрепляется с помощью 3 люверсов – к оболочке баллона 1, а вторые концы каждой из растяжек связываются с петлями 4, жестко закрепляемыми штырями 5 к грунту.

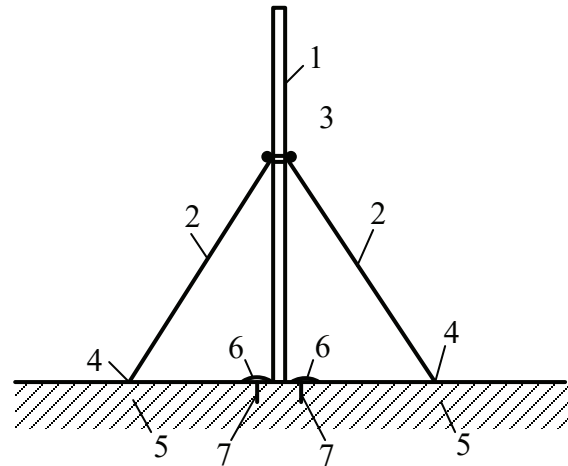


Рисунок 5. Схема установки опоры надувной антенны

Основание баллона также жестко закрепляется к грунту с помощью петель 6 и штырей 7. Местоположение креплений 3 относительно баллона 1 выбирается исходя из обеспечения максимальной устойчивости конструкции. (При необходимости может быть создана многоярусная конструкция растяжек.) Растяжки также могут

Таблица 1. Расчетная таблица прогибов

z , м	1	2	3	4	5
EI_y , Н × м ³	327,0	618,0	937,0	992,0	1042,0
y , м	0,126	0,237	0,360	0,380	0,400

быть выполнены токопроводящими и создавать дополнительные антенные элементы. Люверсы размещаются в верхней части на расстоянии одной трети длины баллона. Считается, что на эту часть опоры действует верховой ветер. (Действие ветра на нижнюю часть опоры лишь уменьшает отклонения верхней части.)

Расчет прогиба и угла поворота вершины опоры

Рассчитывается сила сопротивления ветровой нагрузке баллона цилиндрической формы:

D – диаметр цилиндра, $D = 0,3$ м;

L – длина цилиндра, $L = 3,3$ м;

C_x – коэффициент аэродинамического сопротивления для цилиндра, $C_x \approx 1$;

F – сила сопротивления, Н;

Q – скоростной напор;

ρ – плотность воздуха, $\rho = 1,2$ кг/м³;

S – площадь, м².

Сила ветровой нагрузки:

$$\begin{aligned} F &= C_x \frac{\rho V^2}{2} DL = \\ &= 1 \cdot \frac{1,2 \cdot 100}{2} \cdot 0,3 \cdot 3,3 = \\ &= 59,4 \text{ Н} = 59,4 \text{ кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}^2}, \end{aligned}$$

где V – интенсивность ветровой нагрузки (скорость обтекания):

$$V = 10 \text{ м/с};$$

$$S = D \cdot L;$$

$$F = C_x \frac{\rho V^2}{2} S = C_x \frac{\rho V^2}{2} DL.$$

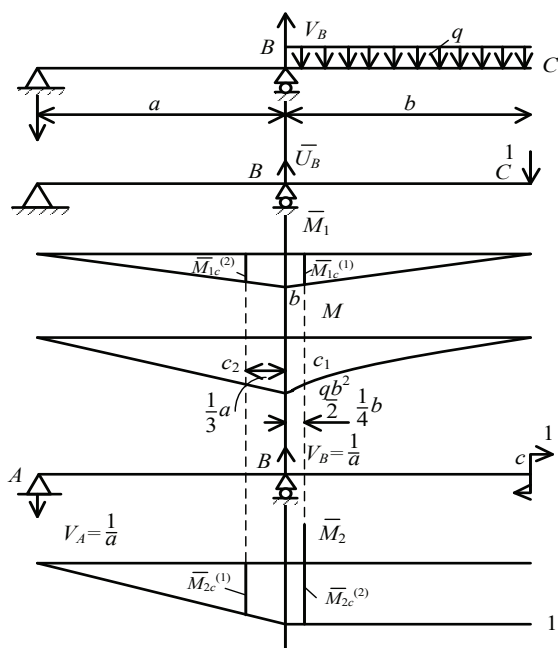


Рисунок 6. Расчетная схема балки

Распределенная ветровая нагрузка прикладывается к верхней части вертикально расположенной опоры (выше точек закрепления растяжек).

1. Определение реакций опоры.

$$\begin{aligned} \sum M_B &= V_A \cdot a - q \cdot b \cdot \frac{b}{2} = 0; \\ v_A &= \frac{qb^2}{2a}; \\ \sum Y &= -v_A + v_B - q \cdot b = 0; \\ v_B &= v_A + q \cdot b = \frac{qb^2}{2a} + qb = \\ &= \frac{qb^2 + 2qab}{2a} = \frac{qb \cdot (b + 2a)}{2a}. \end{aligned}$$

2. Определение прогиба y . Для определения прогиба используем способ Верещагина (определение интеграла Мора (графоаналитическим способом)).

$\bar{M}_l$ – изгибающий момент от единичного силового фактора, приложенного в направлении искомого перемещения;

Ω – площадь фигуры, ограниченная грузовой линией (рисунок 6):

$$EJy_c = \int_0^l M \bar{M}_l dz = \Omega \cdot \bar{M}_{lc},$$

где M – изгибающий момент от внешних сил;

$\bar{M}_{lc}$ – ордината изгибающего момента от единичного силового фактора под центром тяжести грузовой площади.

3. Строим опору M :

$$\begin{aligned} EJy_c &= \frac{1}{3} \cdot \frac{qb^2}{2} \cdot b \cdot \frac{3}{4}b + \frac{1}{2} \cdot \frac{qb^2}{2} \cdot a \cdot \frac{2}{3}b = \\ &= \frac{qb^4}{8} + \frac{qb^3 \cdot a}{6} = \frac{qb^3(3b + 4a)}{24}; \\ y_c &= \frac{qb^3(3b + 4a)}{24EJ}. \end{aligned}$$

Для определения угла поворота прикладываем единичную пару сил в сечении C и строим опору $\bar{M}_2$. Используем способ Верещагина:

$$\begin{aligned} EJ\theta_c &= \frac{1}{3} \cdot \frac{qb^2}{2} \cdot b \cdot 1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{qb^2}{2} \cdot a \cdot \frac{2}{3} \cdot 1 = \\ &= \frac{qb^3}{6} + \frac{qb^2 \cdot a}{6} = \frac{qb^2(a + b)}{6}; \\ \theta_c &= \frac{qb^2(a + b)}{6EJ}. \end{aligned}$$

Расчет:

$$q = \frac{F}{L} = 1,8 \text{ кгс/м} = 18 \text{ Н/м};$$

$$EJ = 1042 \text{ Нм}^2, a = 6,6 \text{ м}, b = 3,3 \text{ м}.$$

Прогиб:

$$y_c = \frac{qb^3(4a+3b)}{24EJ_x} = \frac{18 \cdot 3,3^3(4 \cdot 6,6 + 3 \cdot 3,3)}{24 \cdot 1042} = 0,921 \text{ м.}$$

Угол отклонения:

$$\theta_c = \frac{qb^2(a+b)}{6EJ_x} = \frac{18 \cdot 3,3^2 \cdot 10}{6 \cdot 1042} = 0,307 \text{ радиан} \approx 17,5^\circ.$$

Таким образом, при воздействии на опору верхового ветра со скоростью 10 метров в секунду, вершина опоры отклонится от вертикального положения почти на 1 метр и будет находиться под углом 17 градусов по отношению к вертикали.

Исследование условий потери устойчивости в консольной части баллона

Однако, значительная сила ветра может привести не только к большим отклонениям вершины от вертикального положения, но и к потере устойчивости консольной части баллона.

Основные характеристики баллона примем прежними, однако будем учитывать ветровую нагрузку по всей длине баллона. Расчетная схема баллона с распределенной ветровой нагрузкой q показана на рисунке 7.

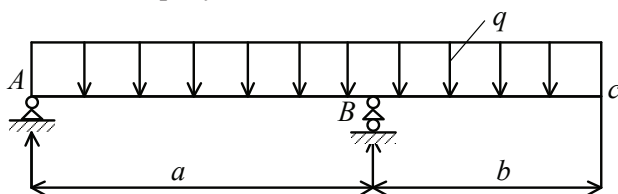


Рисунок 7. Расчетная схема потери устойчивости консольной части баллона

Опасное состояние возникает тогда, когда меридиональное (осевое) напряжение становится равным нулю (ткань работает только на растяжение). Обозначим через $\sigma_p = pD/4\delta$ – напряжение внутреннего давления, равномерно распределенное по сечению. Через $\sigma_u = M/W_u$ обозначим напряжение от изгибающего момента, распределенное по закону треугольника. Меридиональное (осевое) напряжение $\sigma = \sigma_u + \sigma_p$. Условием критического состояния является равенство нулю меридионального напряжения (рисунок 8).

Примем $W_u = \pi D^2 \delta / 4$, тогда, с учетом направлений, получим критическое значение ветровой нагрузки $q = \pi D^3 p / 8 b^2$. Например, при $p = 0,02$ МПа, $D = 0,3$ м, $b = 0,33$ м, $q = 19,5$ Н/м.

Очевидно, что при скорости ветра, превышающей 11–12 м/с, консольная часть опоры потеряет устойчивость (при скорости ветра 10 м/с распределенная нагрузка была $q = 18$ Н/м).

Расчеты показывают, что следует уменьшать длину b консольной части баллона.

Заключение

Разработанная методика расчета надувных опор антенн позволяет определить характеристики, обеспечивающие их основные эксплуатационные свойства.

Анализ показал, что аэродинамические силы ветра существенно влияют на характеристики надувных опор антенн и требуют весьма тщательных расчетов. При скорости ветра, превышающей определенное значение, консольная часть опоры, удерживаемая растяжками, может потерять устойчивость, даже в случае небольших отклонений ее от вертикали. При заданных геометрических размерах опоры устойчивость может быть обеспечена изменением места крепления растяжек и повышением давления внутри баллона, что требует

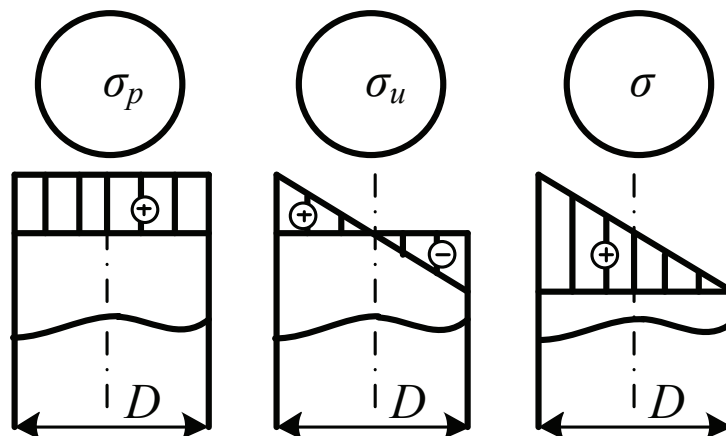


Рисунок 8. Эпюры напряжений: а) внутреннего давления σ_p , б) изгибающего момента σ_u , в) суммарное меридиональное σ

применения новых высокопрочных материалов при изготовлении оболочки опоры.

Литература

1. Специальная радиосвязь: развитие и модернизация оборудования и объектов / В.Ю. Аронов [и др.]; под ред. А.Л. Бузова, С.А. Букашкина. М.: Радиотехника, 2017. 448 с.
2. Extendable radio frequency transmission line and antenna structure: patent 3524190. United States. No 684907 / D.G. Killion (US); F.B. Shacklock (US); filed: 20.11.1967, published: 11.08.1970.
3. Storable waveguides for electronic systems: patent 3541568. United States. No 707725 / H. Lowenhar (US); filed: 23.02.1968, published: 17.11.1970.
4. Portable antenna having a mast formed of coaxial waveguide sections: patent 3569970. United States. No 764149 / R.C. Fenwick (US); D.L. Holzschuh (US); B.M. Wicker (US); P.B. Smithey (US); filed: 01.10.1968, published: 09.03.1971.
5. Tubular strain energy deployable linear element antenna with stitched wire conductors: patent 3978489. United States. No 05/583334 / R.M. Kurland (US); G.N. Frutkow (US); filed: 02.06.1975, published: 31.08.1976.
6. Method of forming transmission lines using tubular extendible structures: patent 4265690. United States. No 05/905651 / H. Lowenhar (US); filed: 15.05.1978, published: 05.05.1981.
7. Winding-type antenna and its winding mechanism: patent 4789867. United States. No 07/84148 / J.-W. Lee (US); filed: 12.08.1987, published: 06.12.1988.
8. Штыревая раздвигающаяся антенна: патент 2012108. Российская Федерация. № 5018560 / В.И. Куркин (RU); А.А. Злобин (RU); заявл. 24.12.1991; опубл. 30.04.1994, бюл. № 09.
9. Adjustable beam tilt antenna: patent 0575808. European Patent Off. No 93109147.4 / J. Hadzoglou (US); M.E. Warner (US); H.E. Stevens (US); filed: 07.06.1993, published: 29.12.1993.
10. Self-extending antenna: patent 3467328. United States. No 572743 / T.G. Berry (US); T.F. Kline (US); filed: 16.08.1966, published: 16.09.1969.
11. Надувная антенна. URL: <http://r3rt.ru/wp-content/uploads/2020/02/EREK4DxW4AA0IFe.jpg> (дата обращения: 23.10.2023).
12. Надувная переносная антенна // YouTube. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=mzKkEmRpYI0> (дата обращения: 20.12.2024).

Дата поступления 15.01.2025

Дата принятия 17.02.2025

Лихтциндер Борис Яковлевич, д.т.н., профессор, профессор кафедры сетей и систем связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики. 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 846 333-47-69. E-mail: lixt@psuti.ru

Сазанов Вячеслав Петрович, к.т.н., доцент, доцент кафедры сопротивления материалов Самарского национального исследовательского университета имени С.П. Королева. 443086, Российская Федерация, г. Самара, Московское шоссе, 34. Тел. +7 927 717-60-38. E-mail: sazanow@mail.ru

UDC 621.396.67

DOI: 10.18469/ikt.2025.23.1.03

MECHANICAL CHARACTERISTICS OF SHORT-WAVE INFLATABLE ANTENNA SUPPORTS

Likhttsinder B.Ya.¹, Sazanov V.P.²

¹*Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation*

²*Samara National Research University, Samara, Russian Federation*

E-mail: b.lihtcinder@psuti.ru, sazanow@mail.ru

The paper analyzes the mechanical characteristics of cylindrical antenna supports in the shortwave frequency range. The aim is to develop a methodology for calculating the required dimensions of the support and establishing the attachment point of the guy wires, ensuring its stability. A method for determining the coefficient of elasticity of a support is proposed, based on determining its deflection under the action of its own weight with a two-way securing the cylinders. The aerodynamic properties of cylindrical supports are determined and a method for calculating the deflection and angle of rotation of the top of the support is considered. The boundary conditions under which the cantilever part of

the support attachment loses stability are shown. In the calculation part, two methods for determining displacements in beams are used. They are integration of the differential equation of the elastic line and the Mohr integral - the Vereshchagin method. The calculation results were confirmed experimentally based on field tests of the design of a shortwave antenna support developed and implemented in production. Experiments have confirmed the validity of the assumptions made in the calculations.

Keywords: *antennas, inflatable supports, stiffness coefficient, bending, loss of stability, wind load*

Likhttsinder Boris Yakovlevich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Professor of Networks and Communication Systems Department; Doctor of Technical Science, Professor. Tel. +7 846 333-47-69. E-mail: lixt@psuti.ru

Sazanov Vyacheslav Petrovich, Samara National Research University, 34, Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russian Federation; Associate Professor of Materials Strength Department; PhD in Technical Science, Associate Professor. Tel. +7 927 717-60-38. E-mail: sazanow@mail.ru

References

1. Aronov V.Yu. et al. *Special Radio Communications: Development and Modernization of Equipment and Facilities*. Ed. by A.L. Buzov, S.A. Bukashkin. Moscow: Radiotekhnika, 2017. 448 p. (In Russ.)
2. Extendable radio frequency transmission line and antenna structure: patent 3524190. United States. No 684907 / D.G. Killion (US); F.B. Shacklock (US); filed: 20.11.1967, published: 11.08.1970.
3. Storable waveguides for electronic systems: patent 3541568. United States. No 707725 / H. Lowenhar (US); filed: 23.02.1968, published: 17.11.1970.
4. Portable antenna having a mast formed of coaxial waveguide sections: patent 3569970. United States. No 764149 / R.C. Fenwick (US); D.L. Holzschuh (US); B.M. Wicker (US); P.B. Smithey (US); filed: 01.10.1968, published: 09.03.1971.
5. Tubular strain energy deployable linear element antenna with stitched wire conductors: patent 3978489. United States. No 05/583334 / R.M. Kurland (US); G.N. Frukto (US); filed: 02.06.1975, published: 31.08.1976.
6. Method of forming transmission lines using tubular extendible structures: patent 4265690. United States. No 05/905651 / H. Lowenhar (US); filed: 15.05.1978, published: 05.05.1981.
7. Winding-type antenna and its winding mechanism: patent 4789867. United States. No 07/84148 / J.-W. Lee (US); filed: 12.08.1987, published: 06.12.1988.
8. Whip Deployable Antenna: patent 2012108. Russian Federation. No 5018560 / V.I. Kurkin (RU); A.A. Zlobin (RU); zayavl. 24.12.1991, publ. 30.04.1994, byul. no. 09. (In Russ.)
9. Adjustable beam tilt antenna: patent 0575808. European Patent Off. No 93109147 / J. Hadzoglou (US); M.E. Warner (US); H.E. Stevens (US); filed: 07.06.1993, published: 29.12.1993.
10. Self-extending antenna: patent 3467328. United States. No 572743 / T.G. Berry (US); T.F. Kline (US); filed: 16.08.1966, published: 16.09.1969.
11. Inflatable antenna. URL: <http://r3rt.ru/wp-content/uploads/2020/02/EREK4DxW4AA0IFe.jpg> (accessed: 23.10.2023). (In Russ.)
12. Inflatable portable antenna. *YouTube*. URL: <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=mzKkEmRpYI0> (accessed: 20.12.2024). (In Russ.)

Received 15.01.2025

Accepted 17.02.2025