# К вопросу определения основных параметров оболочки привязного аэростата, применяемого при строительстве и монтаже высотных объектов.

*А.В. Абузов*

*Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск*

**Аннотация:** В данной статье освещены вопросы применения привязных аэростатов при строительстве высотных объектов, где применение крановых установок или вертолетов не всегда целесообразно из-за технологических особенностей возводимых конструкций, или же по экономическим соображениям. Описана схема конструкции аэростатной системы, способной выполнять монтаж высотных конструкций, в частности промышленных дымовых труб. Приведены примеры монтажа конструкций высотных труб. Дана основа теоретических подходов, позволяющих определить характеристики оболочки, как основной составляющей грузовых аэростатных носителей. Приведена методика определения объема баллонета, как важного элемента в конструкции оболочки аэростата.
**Ключевые слова:** аэростат-кран, строительство высотных объектов, высотный монтаж, баллонет, аэростатная система, уравнение равновесия аэростата-крана.

Согласно проведенным аналитическим и практическим исследованиям, известно о целесообразности и актуальности применения привязных аэростатных систем в области строительства высотных объектов, в частности известно о положительном опыте использования привязного аэростата-крана ЭПАК-1 на монтажных работах промышленных дымовых труб [1, 2]. Пример применения аэростата-крана показан на рис. 1.

Данные воздушные грузовые системы являются альтернативной технологией между использованием вертолета и специализированных крановых установок, способных выполнять монтаж высотных конструкций или других трудно возводимых объектов строительства, требующих мобильности и оперативности выполняемых работ [3].

В связи с тем, что аэростат в процессе подъема и переноса груза в точку монтажа и обратно, с периодичностью меняет свое положение, направление и скорость перемещения, как в вертикальной, так и горизонтальной

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

плоскости, то применение аэростата аэродинамической формы, снижает его оперативность и точность выполняемых монтажно-строительных работ.

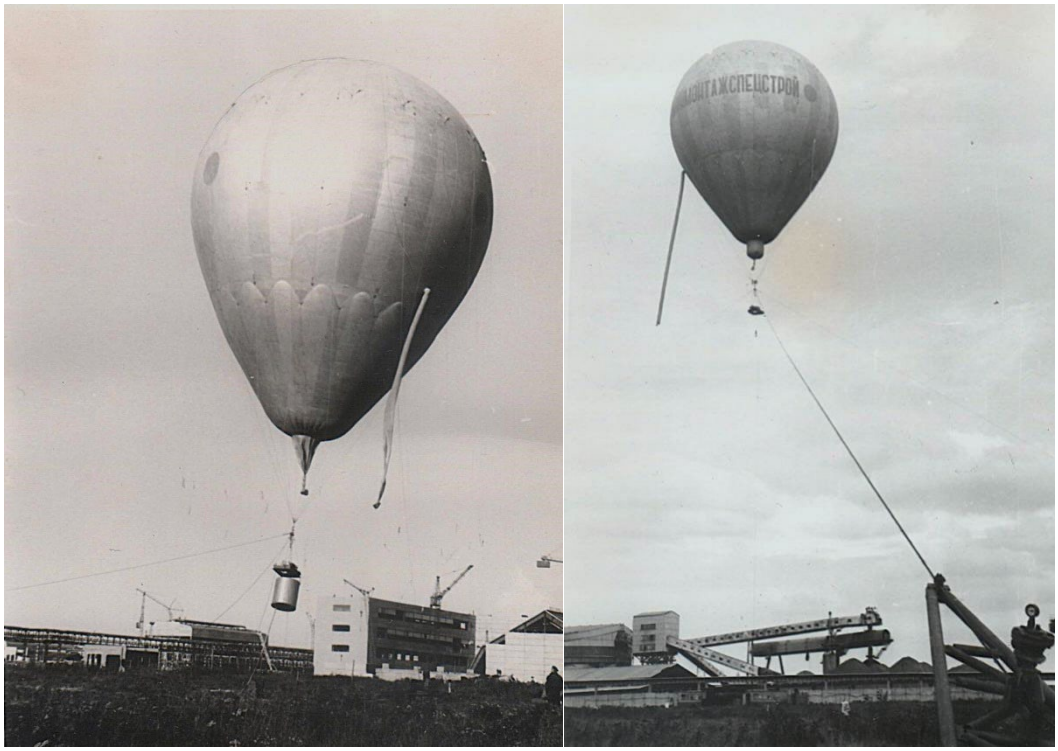


Рис. 1. – Пример использования аэростата-кран ЭПАК-1

Соответственно лучшие аэродинамические качества такого аэростата будут практически не востребованы. Также, при изменении скорости ветрового потока, особенно при внезапном, у аэростата аэродинамической формы будет возникать дополнительная положительная и отрицательная подъемная сила, которая является переменной величиной и не всегда может приняться в расчетах летно-технических характеристик аэростата, проводимых обычно перед началом строительно-монтажных работ [4, 5].

Исходя из вышеизложенного, аэростат-кран для выполнения работ по монтажу и строительству высотных объектов должен иметь естественной (луковичную) форму.

Базой, способной стать основой для современной монтажно-строительной установки, способной работать в автоматизированном режиме,

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

может стать трехлинейная аэростатно-канатная система, которая оснащена радио дистанционным управлением и автоматическим контролем видео наведения перемещаемого груза на объект монтажа. [6].

Рабочая схема аэростатно-канатной системы представлена на рис. 2.

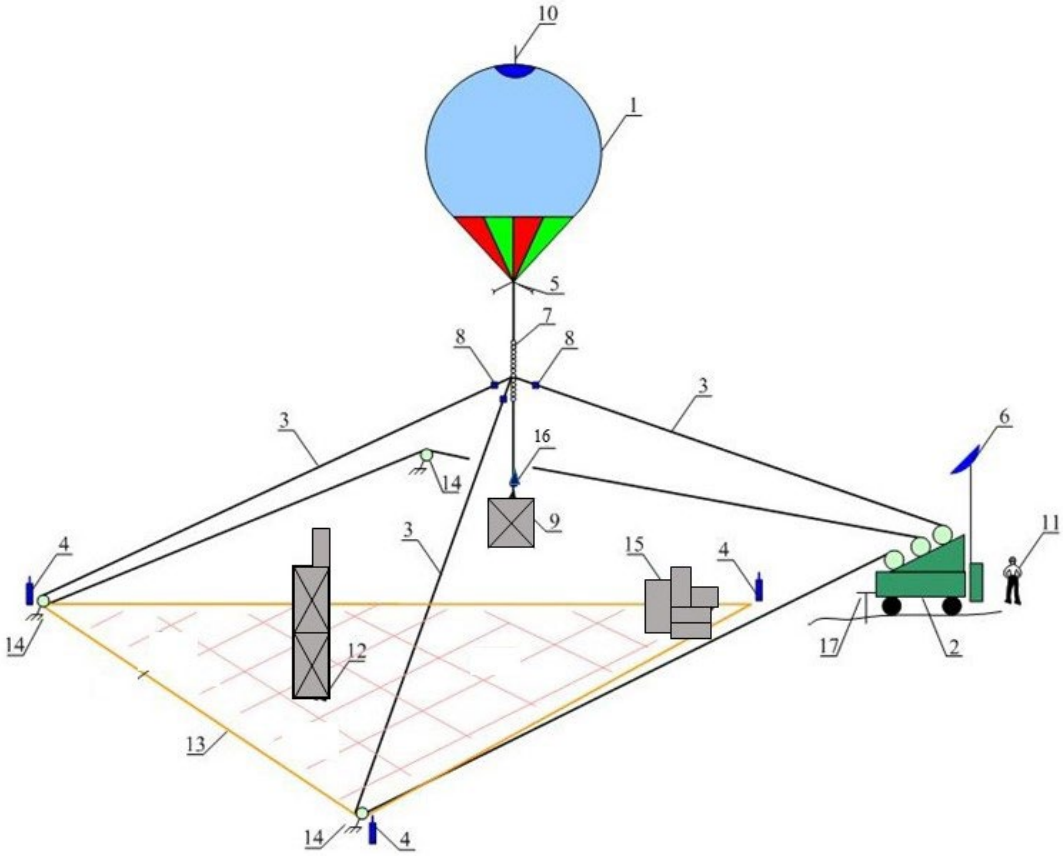


Рис. 2. – Аэростатно-канатная система для строительных и монтажных работ:

1 – аэростат; 2 – лебедка управления; 3 – тягово-возвратные канаты; 4 – радио маячки; 5 – основная антенна наземной станции управления; 6 – наземная станция управления; 7 – амортизатор грузовой подвески аэростата; 8 – беспроводные динамометры; 9 –груз; 10 – молниеотвод; 11 –оператор; 12 – объект монтажа; 13 – рабочий контур участка; 14 – направляющие контурные блоки; 15 – пункт загрузки; 16 – система видео контроля и наведения; 17 – заземление.

При этом, несмотря на часто неблагоприятные особенности воздушного потока приземного слоя, такие, как турбулентность, восходящие потоки, изменение направления и силы ветра, аэростат-кран с естественно образующейся формой будет характеризоваться высокими несущими свойствами и способен противостоять высоким ударным нагрузкам, что

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

весьма важно при выполнении грузовых и переместительных операций. Также стоить отметить, что при естественно образующейся форме не происходит местных перегрузок на материал оболочки, отсутствуют чрезмерные концентрации напряжений, а нагрузки от полезного груза распределяются, преимущественно, меридионально. Напряжение по касательной на окружности, практически, равно нулю.

Однако аэростат естественной формы имеет и определенный недостаток – он подвержен образованию «ложек» или вмятин на оболочке, которые могут образовываться вследствие снижения или вследствие сжатия газа из-за понижения внешней температуры воздуха. В этом случае ветер не ограничится наклоном аэростата-крана, но и сгонит газ в оболочке к одной стороне, что повлечет изменение формы аэростата так, что уменьшит его объем, образуя сбоку вогнутость, где действие ветра наиболее ощутимо. Соответственно коэффициент сопротивления значительно увеличится и аэростат будет терять положение равновесия [7].

Так как ветер может дуть порывами, то величина «ложки» может меняться относительно времени, и тогда аэростат при достаточно сильном и неравномерном ветре будет подвергается непрерывному раскачиванию. По причине этого деформация оболочки значительно уменьшит коэффициент полезного действия аэростата крана.

Изменение объема газа в оболочке аэростата от температурных и высотных колебаний компенсируется с помощью баллонета аэростата, который имеет системы принудительного надува и регулировки избыточного давления (рис. 3).

Баллонет аэростата не только компенсирует изменение объема газа от температурных колебаний, особенно в период низких температур, когда газ в нутрии оболочки сильно сжимается, но и поддерживает избыточное давление

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

во время сильных ветровых порывов, а также утечки несущего газа через материал оболочки.

Исходя из этого одним из основных эксплуатационных параметров аэростата-крана будет, который влияет, в том числе, и на точность наведения груза, являться условие его равновесия. Для получения уравнения равновесия рассмотрим основные факторы и характеристики аэростата, оказывающие влияние на процесс стабильной работы.

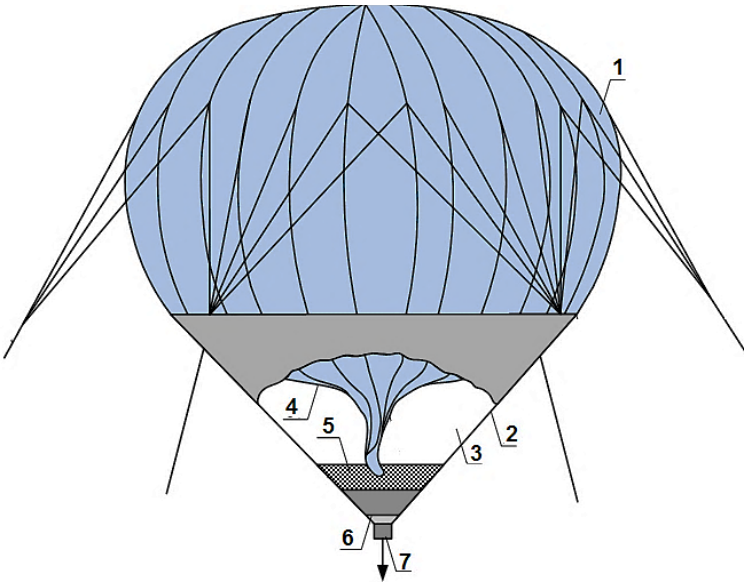


Рис. 3. – Внутренняя конструкция оболочки аэростата естественной формы:
1 – аэростат, 2 – «юбка» аэростата, 3 – баллонет, 4 – газовая часть оболочки аэростата, 5 – система принудительного надува, 6 – вентилятор, 7 – клапан.

Наиболее перспективной конструкцией оболочки аэростата-крана является каркасированная, которая состоит из усилительных каркасирующих лент и полотнищ материала, находящегося между лентами.

При этом давление $P$ будет связано с координатой $X$ соотношением $P=P_1-fX$,

где X – расстояние от полюса оболочки аэростата по оси симметрии;

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

$f_н$ – удельная подъемная сила несущего газа на заданной высоте на уровнем моря;

$P_1$ – давление газа в верхней части оболочки аэростата.

Объем оболочки аэростата вычисляется методом последовательных приближений и обеспечивается минимальным допустимым перемещением вертлюга грузовой подвески при заданной полезной грузоподъемности, что является исходным началом для дальнейших расчетов. Далее ведется уточненный расчет геометрических и весовых характеристик, динамических и статических нагрузок на элементы оболочки. Влиянием веса оболочки на её форму можно пренебречь. Тогда координата *a,* согласно схемы на рис. 4, может быть связана с геометрическими параметрами оболочки следующими соотношениями:

$$V = C_0 \cdot a^3,\ S = C_1 \cdot a^2,\ b = C_2 \cdot a,\ h = C_3 \cdot a,\ L = C_4 \cdot a \qquad (1)$$

где $V$ – объём оболочки; $S$ – площадь поверхности оболочки; $h$, $b$ – линейные размеры оболочки; $L$ – длина меридиана оболочки; $C_0$, $C_1$, $C_2$, $C_3$, $C_4$, - постоянные коэффициенты.

Для оболочки естественной формы:

$C_0 = 4{,}19;\ C_1 = 12{,}57;\ C_2 = C_3 = 1;\ C_4 = 1{,}57$

Отношение веса реальной оболочки к весу идеальной оболочки можно выразить через коэффициент весового качества $K_{об}$. Под идеальной оболочкой будем понимать гладкую оболочку без каркасирующих лент, имеющие те же геометрические размеры, как и у каркасирующей оболочки:

$$K_{об} = \frac{G_{об}}{G_{обид}} = \frac{S \cdot q_{об}}{S \cdot q_м} = \frac{q_{об}}{q_м};\ q_{об} = K_{об} \cdot q_м \qquad (2)$$

где $q_{об}$ – вес 1 м$^2$ поверхности реальной оболочки; $q_м$ – 1 м$^2$ материала идеальной оболочки.

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

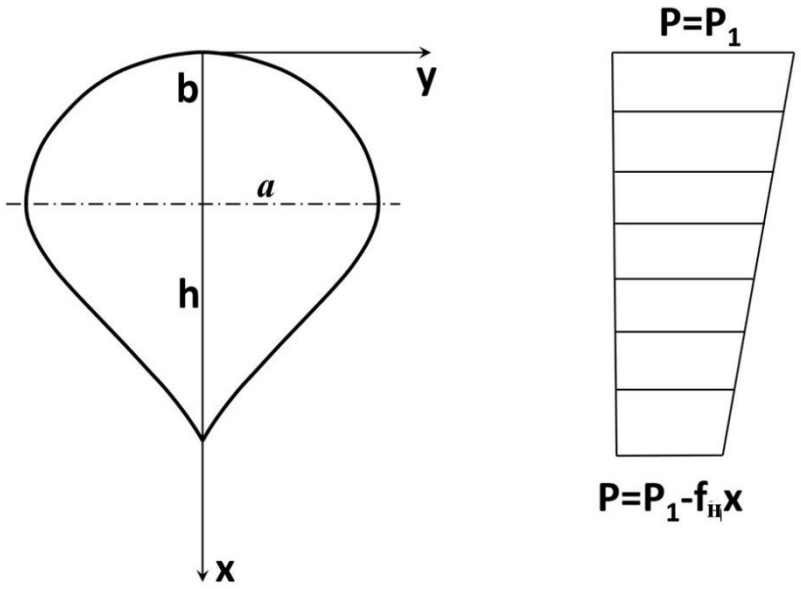


Рис. 4. – Геометрическая модель оболочки

Вес оболочки аэростата представляет собой вес материала $G_{м}$, каркасирующих лент $G_{л}$ и вспомогательных элементов $G_{всп}$:

$$G_{об} = G_{м} + G_{л} + G_{всп} \quad (3)$$

Разделим уравнение (3) на площадь поверхности оболочки $S$ и получим:

$$q_{об} = q_{м} + q_{л} + q_{всп} \quad (4)$$

Введём коэффициент ξ, равный отношению веса вспомогательных элементов к весу реальной оболочки:

$$\xi = \frac{G_{всп}}{G_{об}}, \text{ тогда } q_{всп} = \xi \cdot K_{об} \cdot q_{м} \quad (5)$$

Подставляя уравнения (2) и (5) в (4), получим:

$$q_{л} = q_{м} \cdot [(1 - \xi) \cdot K_{об} - 1] \quad (6)$$

На реальной оболочке ленты расположены по поверхности неравномерно. Вес лент приходящийся на единицу поверхности, вблизи полюсов существенно выше, чем в миделевом сечении. Полагая, что на каждый метр периметра оболочки в миделе приходится одна лента, запишем:

$$q_{л} \cdot S = q_{лд} \cdot l_{л} \cdot N_{л} \quad (7)$$

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

где $N_л$ – количество лент; $l_л$ – длина ленты; $q_{лд}$ – действительный погонный вес ленты.

Из уравнения (7) следует, что: $N_л = 2\pi a$ ,

или согласно уравнению (6) получим:

$$q_{лд} = \frac{S}{l_л \cdot N_л} \cdot q_м \cdot [(1 - \xi) \cdot K_{об} - 1] \quad (8)$$

Запас прочности каркасированой ленты равен:

$$n_л = \frac{T_{рл}}{T_л} \quad (9)$$

где $T_{рл}$ – разрывное усилие в ленте; $T_л$ – допускаемое усилие в ленте.

Разрывное усилие в ленте определяется через разрывную длину ленты $L_л$

Тогда согласно уравнению (8) получим:

$$T_{рл} = L_л \cdot \frac{S}{l_л \cdot N_л} \cdot q_м \cdot [(1 - \xi) \cdot K_{об} - 1] \quad (10)$$

Экспериментальные результаты по определению аэродинамических характеристик и распределения внешнего давления набегающего потока по поверхности оболочки осесимметричной формы показывают, что оболочки на большей части поверхности имеют отрицательное давление [8].

Предполагаем, что при действии скоростного напора оболочка испытывает по всей поверхности отрицательное давление $P_0 = 0{,}8q$,

где $q = \frac{\rho_н \cdot V_н^2}{2}$ – скоростной напор,

$\rho_н$ – плотность воздуха снаружи оболочки;

$V_н$ – скорость ветра.

Давление внутри оболочки принимаем постоянным, равным P.

Схема равновесия верхней части оболочки представлена на рис. 5.

Запишем уравнение равновесия верхней части оболочки в следующем виде:

$$2\pi \cdot a \cdot T_м + N_л \cdot T_л = (P_1 + P_0) \cdot \pi a^2 + Ф_в - G_{обв}, \quad (11)$$

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

где $T_м$ – допускаемое натяжение в материи; $T_л$ – допустимое натяжение в ленте; $Ф_в$ – подъемная сила отсеченной части оболочки; $G_{обв}$ – вес отсеченной части оболочки.

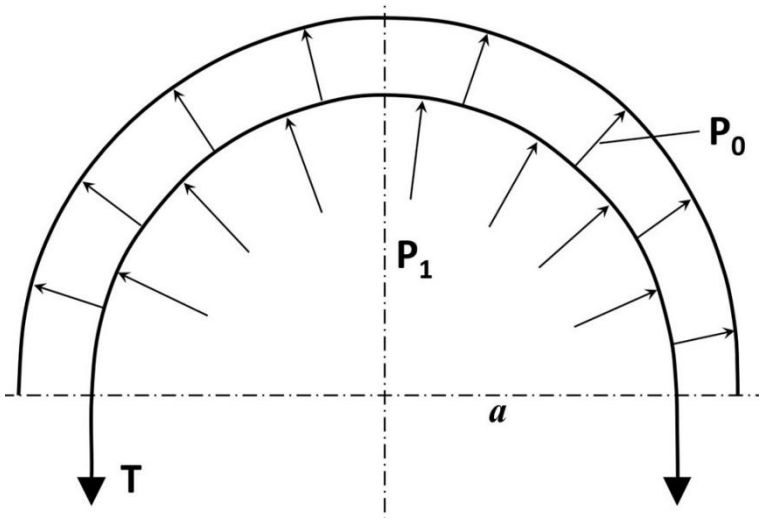


Рис. 5. – Схема равновесия верхней части оболочки аэроста-крана

Запас прочности материи оболочки:

$$n_м = \frac{T_{рм}}{T_м} \quad (12)$$

где $T_{рм}$ – разрывное усилие в материи;

Допустимое натяжение в материи выразим через разрывную длину:

$$T_м = \frac{L_м \cdot q_м}{n_м} \quad (13)$$

Для отсеченной верхней части оболочки подъемная сила равна:

$$Ф_в = \frac{V}{2} f_0 \cdot a_1 \cdot \tau \cdot \Delta = \frac{C_0}{2} \cdot a^3 \cdot f_0 \cdot a_1 \cdot \tau \cdot p_н,$$

(14)

где $f_0$ – удельная подъемная сила газа при нормальных условиях (P=760 мм рт.ст., T=15° C); $a_1$ – коэффициент, учитывающий увеличение объема оболочки за счет растяжения материи; $\tau$ – коэффициент,

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

учитывающий перегрев газа в оболочке; $p_н$ – относительная плотность воздуха на заданной высоте нахождения аэростата.

Вес отсеченной верхней части оболочки:

$$G_{обв} = \frac{S}{2} \cdot q_{об} = \frac{S}{2} \cdot к_{об} \cdot q_м = \frac{C_1}{2} к_{об} \cdot q_м \cdot a^2 \quad (15)$$

Подставив (10), (13), (14), (15) в уравнение равновесия (11), получим:

$$к_{об} = \frac{(P_1+P_0)\pi a^2+\frac{C_0}{2}\cdot a^3\cdot f_0\cdot a_1\cdot\tau\cdot\Delta+\frac{L_л\cdot S}{n_л\cdot l_л}\cdot q_м-2\pi a\frac{L_м\cdot q_м}{n_м}}{q_м\left[\frac{L_л\cdot S}{n_л\cdot l_л}(1-\xi)+4{,}75q_м\cdot a^2\right]} \quad (16)$$

Используя связь (1), представим уравнение (16) в виде:

$$к_{об} = \frac{\lambda_1\cdot a^2+\lambda_2\cdot a+\lambda_3}{\lambda_4\cdot a+\lambda_5} \quad (17)$$

$$\lambda_1 = \frac{C_0}{2} \cdot f_0 \cdot a_1 \cdot \tau \cdot p_н\,, \quad (18)$$

$$\lambda_2 = (P_1 + P_0)\pi, \quad (19)$$

$$\lambda_3 = \left(\frac{L_л\cdot C_1}{n_л C_4} - 2\pi\frac{L_м}{n_м}\right) \cdot q_м\,, \quad (20)$$

$$\lambda_4 = \frac{C_1}{2} \cdot q_м\,, \quad (21)$$

Тогда вес оболочки аэростата-крана:

$$G_{об} = S \cdot q_{об} = C_1 \cdot a^2 \cdot q_м \cdot к_{об} \cdot к_1 = C_1 \cdot a^2 \cdot к_{об} \cdot к_1 \cdot \frac{\lambda_1\cdot a^2+\lambda_2\cdot a+\lambda_3}{\lambda_4\cdot a+\lambda_5}, \quad (22)$$

Где $к_1$ – коэффициент, учитывающий увеличение веса оболочки за счет швов, крепление лент к полотнищу.

Тогда вес вспомогательных деталей равен:

$$G_{всп} = \xi \cdot G_{об} = C_1 \cdot q_м \cdot к_1 \cdot \xi \cdot \frac{\lambda_1\cdot a^2+\lambda_2\cdot a+\lambda_3}{\lambda_4\cdot a+\lambda_5} \cdot a^2 \quad (23)$$

Перейдём к определению параметров баллонета аэростата-крана.

Баллонет аэростата должен выполнять функции компенсации изменения объема газа в зависимости от температурных колебаний, в частности при низких температурах, когда происходит сжимание несущего газа, а также поддерживать избыточное давление внутри оболочки во время

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

сильных ветровых нагрузок. Так при перепаде температуры до 5° *C* изменение объема газа в оболочке может достигать 10%.

Исходя из условий эксплуатации аэростата-крана, подпитка несущим газом осуществляется в среднем один раз в 15 дней [9].

Согласно этому, объём баллонета $V_б$ представим в виде:

$$V_б = 0{,}1V_{об} + 1{,}5\gamma \cdot S10^{-3}\ в_с \tag{24}$$

где $\gamma$ – газопроницаемость материала оболочки аэростата, л/(м$^2$ · сут).

Радиус баллонета сферической формы равен:

$$R_б = \sqrt{\frac{3V_б}{4\pi}} \tag{25}$$

Поверхность баллонета $S_б$ определяется зависимостью от радиуса $R_б$ :

$$S_б = 4\pi \cdot R_б \tag{26}$$

Тогда общий вес баллонета определяется:

$$G_б = к_1 \cdot q_{мб} \cdot S_б\ , \tag{27}$$

где $к_1$ – коэффициент, учитывающий вес швов; $q_{мб}$ – вес 1 м$^2$ материала баллонета.

Используя известную зависимость определения натяжения в сферической оболочке по линейной безмоментной теории, запас прочности материала баллонета определяется соотношением:

$$n_T = \frac{T_{рмб}}{T_{мб}} = \frac{2T_{рмб}}{(P_0+\Delta P_{кл})R_б}, \tag{28}$$

где $T_{рмб}$ – разрывное усилие материала баллонета; $T_{мб}$ – допустимое натяжение в материале баллонета; $\Delta P_{кл}$ – величина избыточного давления, при котором должен сработать воздушный клапан.

Уравнение равновесия аэростата на заданной высоте имеет вид:

$$V_{об} \cdot f_0 \cdot a_1 \cdot \tau \cdot \Delta = G_а + G_{гр} + G_к + \Delta\Phi, \tag{29}$$

где $G_а$ – вес аэростата; $G_{гр}$ – вес поднимаемого груза; $G_к$ – вес тягово-возвратных канатов; $\Delta\Phi$ – запас подъёмной силы аэростата;

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

Вес аэростата:

$$G_{\text{а}} = G_{\text{об}} + G_{\text{б}} + G_{\text{всп}}, \tag{30}$$

Или используя формулы (22), (23), (24):

$$G_{\text{а}} = C_1 \cdot q_{\text{м}} \cdot \text{к}_1(1+\xi) \cdot \frac{\lambda_1 \cdot a^2 + \lambda_2 \cdot a + \lambda_3}{\lambda_4 \cdot a + \lambda_5} \cdot a^2 + \text{к}_1 \cdot q_{\text{мб}} \cdot S_{\text{б}} \tag{31}$$

Подставив в (30) значения:

$$G_{\text{к}} = \frac{1{,}8 L_{\text{стр}}}{cos\psi} \cdot q_{\text{к}}\,, \tag{32}$$

где $L_{\text{стр}}$ – наземная длина n-ой стороны рабочего треугольника трехлинейной аэростатно-канатной системы; $cos\psi$ – угол между линией наземной n-ой стороны рабочего треугольника и соответствующему тягово-возвратному канату [10];

$q_{\text{к}}$ – вес погонного метра тягово-возвратного каната.

$$\Delta\Phi = 3C_{\text{х}} \frac{p_{\text{н}} \cdot V_{\text{н}}^2}{2} \cdot V_{\text{об}}^{2/3}\,, \tag{33}$$

где $C_{\text{х}}$ – лобовое сопротивление оболочки (для сферичной и луковичной формы – 0,5); $p_{\text{н}}$ – плотность воздуха на заданной высоте; $V_{\text{н}}^2$ – скорость ветра на заданной высоте;

Получим уравнение равновесия аэростата в развернутом виде:

$$V_{\text{об}} \cdot f_0 \cdot a_1 \cdot \tau \cdot \Delta = C_1 \cdot q_{\text{м}} \cdot \text{к}_1(1+\xi) \cdot \frac{\lambda_1 \cdot a^2 + \lambda_2 \cdot a + \lambda_3}{\lambda_4 \cdot a + \lambda_5} \cdot a^2 + \text{к}_1 \cdot q_{\text{мб}} \cdot S_{\text{б}} + \frac{1{,}8 L_{\text{стр}}}{cos\psi} \cdot q_{\text{к}} + 3C_{\text{х}} \frac{p_{\text{н}} \cdot V_{\text{н}}^2}{2} \cdot V_{\text{об}}^{2/3} \tag{34}$$

*Заключение*

Стабилизация и равновесие аэростата-крана имеет значимое влияние на эксплуатационные и аэродинамические характеристики, и как следствие на изменение величин подъемной силы, размерные параметры расположения аэростата на строительной площадке, подбор тягово-возвратных канатов и др. Все это превращает расчет основных параметров аэростата-крана и

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

определение области его рационального применения при производстве строительных и монтажных работ в сложную задачу, требующую комплексного подхода и междисциплинарных знаний.

## Литература

1. Бойко Ю.С. Воздухоплавание: Привязное. Свободное. Управляемое. – М.: МГУП, 2001. – 462 с.
2. Отчет об испытаниях аэростата-крана ЭПАК-1. – М: МПНСУ трест ЦентроТехмонтаж, 1977. – 50 с.
3. Козловский В.Б., Худоленко О.В., Деревянко В.С. Аэростатические летательные аппараты для отраслей экономики. – М.: Воздушный транспорт, 2007. – 480 с.
4. Balloon Logging Systems. Phase 1 – Analytical Study // Goodyear Aerospase Corporation.1964. 180 p.
5. Casey Lambert. Dynamic and control of a multi-tethered aerostat positioning systems // Departament of Mechanical Engineering McGill University, Monreal, Canada, October 2006.184 p.
6. Абузов А.В. Технические и конструктивные особенности современной аэростатно-канатной системы для трелевки древесины // Вестник Московского государственного университета леса. Лесной вестник. - №1(93). – 2013. – С. 5-9.
7. Aglitti G.S. Dynamic Response of a High-Altitude Tethered Balloon System // Journal of aircraft. 2009. vol. 46. No.6. 9 p.
8. George R. Doyle, Jerome J. Vozachek. Investigation of stability characteristics of tethered balloon systems // Goodyear Aerospace Corporation. Contract No. F. 19628-71-C-0091. Project No. 765906, Scientific Report No.2. 30July 1971. 230 p.

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

9. Отчет о научно-исследовательской работе «Исследование возможностей использования летательных аппаратов на лесозаготовках в горных условиях». Часть 1 и 2. – Химки: ЦНИИМЭ, 1985. – 189 с.

10. Абузов А.В., Абузов Я.А. Теория расчета основных параметров канатной системы транспортно-грузового аэростата // Инженерный вестник Дона. 2024. №11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2024/9616

**References**

1. Bojko Yu.S. Vozduhoplavanie: Privyaznoe. Svobodnoe. Upravlyaemoe. [Aeronautics: Tethered. Free. Manageable.] M.: MGUP, 2001. 462 p.

2. Otchet ob ispytaniyah aerostata-krana EPAK-1. [EPAK-1 balloon crane test report.]M: MPNSU trest CentroTekhmontazh, 1977. 50 p.

3. Kozlovskij V.B., Hudolenko O.V., Derevyanko V.S. Aerostaticheskie letatel'nye apparaty dlya otraslej ekonomiki. [Aerostatic aircraft for economic sectors] M.: Vozdushnyj transport, 2007. 480 p.

4. Balloon Logging Systems. Phase 1 Analytical Study. Goodyear Aero-spase Corporation.1964. 180 p.

5. Casey Lambert. Dynamic and control of a multi-tethered aerostat position-ing systems. Departament of Mechanical Engineering McGill University, Monreal, Canada, October 2006.184 p.

6. Abuzov A.V. Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa. Lesnoj vestnik. №1(93). 2013. pp. 5-9.

7. Aglitti G.S. Journal of aircraft. 2009. vol. 46. No.6. 9 p.

8. George R. Doyle, Jerome J. Vozachek. Investigation of stability characteristics of tethered balloon systems. Goodyear Aerospace Corporation. Contract No. F. 19628-71-C-0091. Project No. 765906, Scientific Report No.2. 30July 1971. 230 p.

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

9. Otchet o nauchno-issledovatel'skoj rabote «Issledovanie vozmozhno-stej ispol'zovaniya letatel'nyh apparatov na lesozagotovkah v gornyh usloviyah». Chast' 1 i 2. [The report on the research work "Investigation of the possibilities of using aircraft for logging in mountainous conditions". Part 1 and 2.] Himki: CNIIME, 1985. 189 p.

10. Abuzov A.V., Abuzov Ya.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2024. №11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2024/9616

**Дата поступления: 8.05.2025**
**Дата публикации: 25.07.2025**

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025