

## Теория расчета основных параметров канатной системы транспортно-грузового аэростата.

А.В. Абузов<sup>1</sup>, Я.А. Абузов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет ИТМО г. Санкт-Петербург

**Аннотация:** В данной статье представлены результаты теоретических исследований в области методики определения усилий, возникающих в тягово-возвратных канатах аэростатной системы, применяемой на транспортно-грузовых и строительно-монтажных работах. Акцент сделан на точность позиционирования вертлюга при воздействии на аэростат ветрового потока. Приведены теоретические расчеты основных параметров, таких, как: скоростной напор, равнодействующей подъемной силы, пролета каната, усилие в канате, прогиб каната, перемещение вертлюга и другие. Предложена методика, позволяющая проводить относительно простой и оперативный расчет усилий канатов в процессе выполнения грузовых работ аэростатом краном на строительно-монтажной площадке.

**Ключевые слова:** аэростатная система, аэростат-кран, тягово-возвратные канаты, усилия в канатах, лобовое сопротивление, воздушные строительно-монтажные работы, вертлюг.

### Введение

Аэростат с естественно образующейся формой характеризуется высокими статическими несущими свойствами, несмотря на неблагоприятные особенности воздушного потока приземного слоя (турбулентность, восходящие потоки, изменения направления и силы ветра), способен противостоять высоким ударным нагрузкам.

При естественно образующейся форме не происходит местных перегрузок материала оболочки, отсутствуют чрезмерные концентрации напряжений. При такой форме нагрузки от полезного груза распределяются главным образом меридионально и напряжение по касательной на окружности практически равно нулю [1].

Напряжение в оболочке естественно образующейся формы определяется избыточным давлением несущего газа, динамическим давлением скоростного потока и напряжениями от полезной нагрузки.

Коэффициент лобового сопротивления аэростата  $C_x$  зависит от скорости ветра и формы его оболочки. В настоящее время нет точных

данных по  $C_x$ . Однако опыт измерений, проведенных вовремя, как отечественных, так и зарубежных испытаний привязных аэростатов показали, что значения  $C_x$  находятся в пределах 0,35-0,65. Исходя из этого, среднее значение  $C_x$  для аэростата естественной формы обычно принимают равным 0,5 [2].

Для максимального скоростного напора при ветре 30 м/с ( $45 \text{ кг/м}^2$ ) избыточное давление должно быть не менее 50 мм водного столба. В безветрие и при слабом ветре избыточное давление достаточно в пределах 15-20 мм водного столба [3].

Опыт эксплуатации аэростатов объемом от 15000 до 25000 м<sup>3</sup> в течение более 150000 часов показал, что оболочка должна иметь баллонет с принудительным наддувом воздуха, а не юбку в нижней части; верхняя часть оболочки должна быть круглой, так как на пологой верхней части в безветренную и снежную погоду скапливалось большое количество снега, который приходилось сбрасывать рабочим с лопатами, поднимающимся вверх по веревочной лестнице. Все эти обстоятельства сказываются не только на устойчивости аэростата в процессе работы, но и как следствие на точности наведения грузовой подвески на груз и периодичность изменения усилий, возникающих в тягово-возвратных канатах, участвующих в управлении и перемещении аэростатом [4, 5].

#### *Объект исследования*

Для обеспечения стабильного положения аэростатного носителя в пространстве в грузовой подвеске используется поворотный механизм – вертлюг, работа которого является определяющим в отношении обоснования возможности проведения транспортно-грузовых и общих строительно-монтажных работ с использованием аэростатов.

В условиях работы на монтажной площадке при наличии изменяющейся ветровой нагрузки оболочка аэростата, отклоняясь от

---

вертикали, передает значительную по величине горизонтальную составляющую на вертлюг. При этом изменяются величины усилий в расчалках и их фактические длины, что ведет к перемещению вертлюга в пространстве. Положение транспортно-грузового аэростата в воздухе в зависимости от ветровой нагрузки представлено на рис. 1.

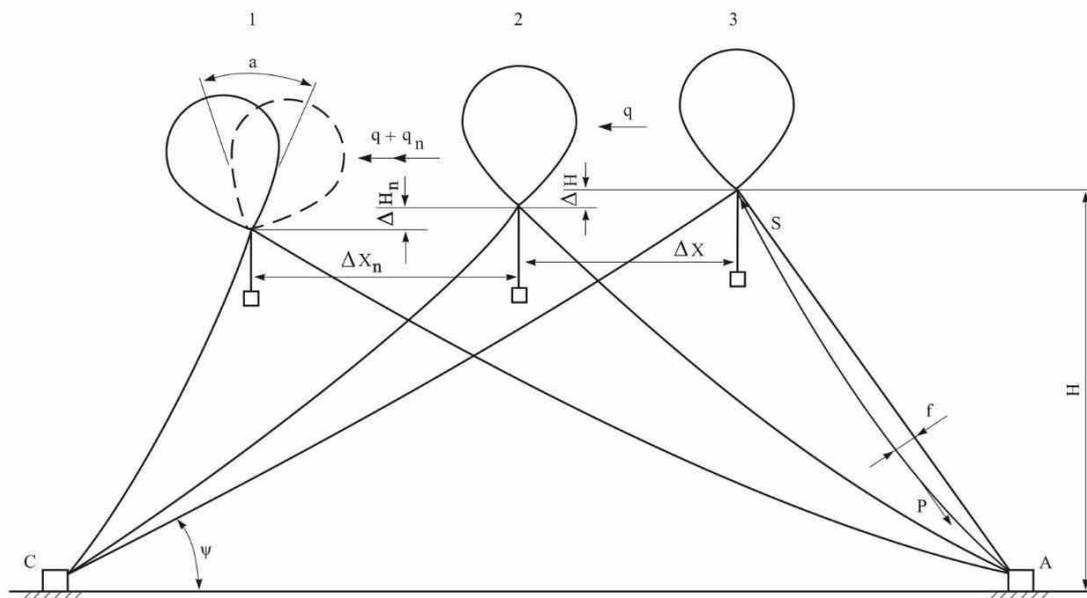


Рис. 1. – Положение транспортно-грузового аэростата в воздухе:  
1 – ветер порывистый; 2 – ветер постоянный; 3 – безветрие,

Величины перемещений вертлюга применительно к современной технологии производства воздушных монтажных работ должны быть не более 10-15 см, для обеспечения которых необходимо обосновать основные геометрические параметры системы тягово-возвратных канатов и применять для них специальные стабилизирующие устройства.

Отклонения аэростата от постоянно действующего ветрового потока компенсируются наземными лебедками и практически не влияют на цикл монтажных работ. Опасными являются резкие порывы ветра (особенно, вертикальные нисходящие) с малой продолжительностью действия. Поэтому аэростат должен иметь достаточный запас подъемной силы  $\Delta\Phi$  для

уменьшения прогибов канатов (колебаний вертлюга). Для оценки стабилизации аэростата введем коэффициент стабилизации  $K_{CT} = \Delta\Phi/X_{12}$ , где  $X_{12}$  – сила ветра 12 м/с – верхний предел допустимости производства воздушных строительно-монтажных работ.

Определение расчетным путем искомых величин перемещений вертлюга в пространстве сопряжено с большим объемом вычислительных и графических работ, при этом расчет выполняется только для одного случая расположения аэростата-крана над монтажной площадкой. Перемещение крана от первоначального положения требует повторного выполнения всего объема расчетных работ.

Изменение величин подъемной силы (температура воздуха, облачность, влажность), аэродинамических характеристик, размеров строительно-монтажной площадки, свойств применяемых канатов и других параметров рассматриваемой системы превращает расчет параметров транспортно-грузового аэростата и определение области его рационального применения при производстве строительно-монтажных работ в сложную большеобъемную задачу [6, 7].

Рассмотрим физическую и соответствующую ей математическую модель процесса. Геометрические параметры аэростатной системы, используемые для разработки математической модели представлены на рис. 2. Для определения сил, действующих на транспортно-грузовой аэростат, воспользуемся схемой, представленной на рис.3

При этом примем следующие допущения:

1. Перемещения вертлюга (оболочки аэростата) во время действия порывов ветра совершаются вдоль направления порыва.
  2. Атмосферные условия – температура, давление, облачность – во время монтажного цикла принимаются постоянными.
-



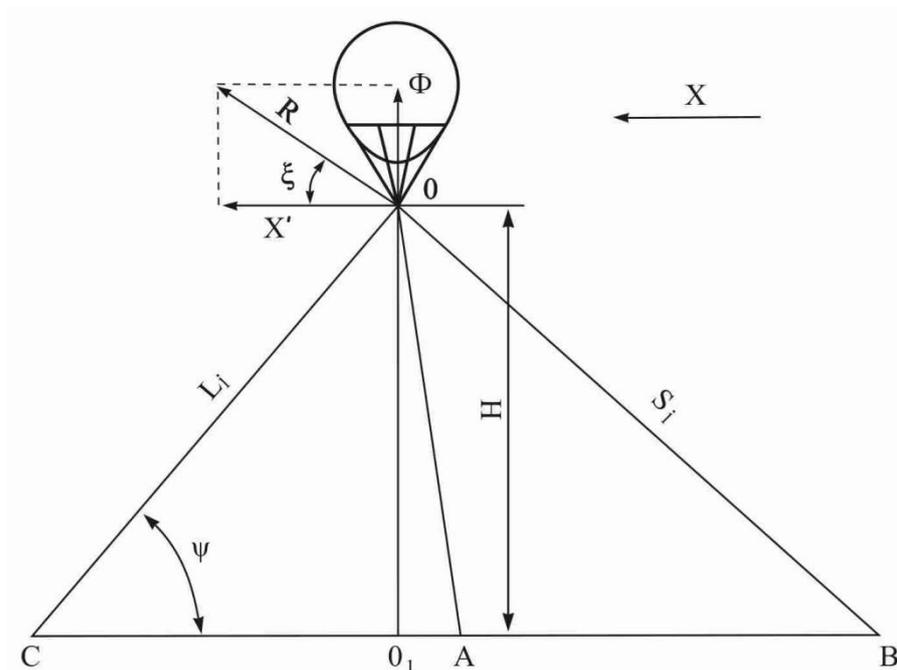


Рис. 3. – Силы, действующие на транспортно-грузовой аэростат

### Результаты исследования и их обсуждение

Физика изменения усилий в подветренном канате не описывается простыми уравнениями и изменения ее длины можно рассматривать только с учетом перемещений всех элементов системы.

Так силу лобового сопротивления оболочки аэростата на разных высотах различна и определяется по формуле:

$$X_H = C_x \frac{\rho_n V_n^2}{2} V_{об}^{2/3}, \quad (1)$$

где  $\frac{\rho_n V_n^2}{2} = q_n$  – скоростной напор на данной высоте;

$C_x$  – коэффициент лобового сопротивления (для оболочек сферической формы принимается 0,5);

$\rho_n$  – плотность воздуха на заданной высоте;

$v_n$  – скорость ветра на заданной высоте;

$V_{об}$  – объем оболочки аэростата;

Сила порыва (пульсации) определится из соотношения:

$$X_n = C_x q_n \cdot V_{об}^{2/3} \quad (2)$$

где  $q_n$  – скоростной напор порыва.

Определение геометрических и динамических характеристик аэростатной системы всегда начинается с расчета усилий, которые возникают тягово-возвратных, в частности канатах в условиях ветра [8, 9].

Покажем усилия, возникающие в наветренном канате 1:

Для этого определим высоту треугольника основания размещения наземных лебедок:

$$K = m \cdot \cos 30^\circ = 0.867m \quad (3)$$

где  $m$  – сторона треугольника.

Найдем угол  $\alpha$  между горизонтальной проекцией пролета  $l_1$  расчалки и осью  $Y$ :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{x}{\frac{2}{3}K - y}, \quad (4)$$

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{x}{\frac{2}{3}K - y}. \quad (5)$$

А также угол  $\varphi_1$  между горизонтальной проекцией пролета  $l_1$  каната и вектором скоростного напора  $q_n$ :

$$\varphi_1 = \beta - \alpha, \quad (6)$$

где  $\beta$  – угол между вектором скоростного напора и осью  $Y$ .

Тогда горизонтальная составляющая силы ветра  $X$  в канате 1:

$$X'_1 = X \cos \varphi_1 \quad (7)$$

Угол между равнодействующей  $R_1$  и  $X'_1$ :

$$\operatorname{tg} \xi_1 = \frac{\Phi}{3X'_1}, \quad (8)$$

$$\xi_1 = \operatorname{arctg} \frac{\Phi}{3X'_1}, \quad (9)$$

где  $\Phi$  – подъемная сила аэростата.

Равнодействующая подъемной силы  $\Phi$  и силы ветра  $X$ :

$$R_1 = \frac{\Phi}{3\sin\xi_1}, \quad (10)$$

Пролет каната 1 определим по формуле:

$$l_1 = \frac{\frac{2}{3}K - y}{\cos\alpha}. \quad (11)$$

Необходимо учесть угол заложения каната 1:

$$\operatorname{tg}\psi_1 = \frac{H}{I_1}, \quad (12)$$

$$\psi_1 = \operatorname{arctg} \frac{H\cos\alpha}{\frac{2}{3}K - y}, \quad (13)$$

где  $H$  – высота вертлюга (точки крепления канатов под аэростатом) над землей.

Тогда усилие в канате 1 будет равно:

$$S_1 = R_1 \cos(\psi_1 - \xi_1), \quad (14)$$

Длина каната 1:

$$L_1 = \frac{I_1}{\cos\psi_1}, \quad (15)$$

Аналогичные действия проведем для каната 2.

Где угол  $\theta$  между горизонтальной проекцией пролета  $l_2$  расчалки и осью  $X$  будет равен:

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{\frac{1}{3}K + y}{\frac{m}{2} + x}, \quad (16)$$

$$\theta = \operatorname{arctg} \frac{\frac{1}{3}K + y}{\frac{m}{2} + x}, \quad (17)$$

Тогда угол  $\varphi_2$  между горизонтальной проекцией пролета  $l_2$  и вектором скоростного напора  $q_n$ :

$$\varphi_2 = 180 - (\gamma + \alpha) - (60 - \theta) - \varphi_1 = 90 - (\alpha - \theta + \varphi_1), \quad (18)$$

Горизонтальная составляющая силы ветра  $X$ :

$$X'_2 = X \cos \varphi_2, \quad (19)$$

Угол между равнодействующей  $R_2$  и горизонтальной составляющей  $X'_2$ :

$$\operatorname{tg} \xi_2 = \frac{\Phi}{3X'_2}, \quad (20)$$

$$\xi_2 = \operatorname{arctg} \frac{\Phi}{3X'_2}, \quad (21)$$

Найдем равнодействующую  $R_2$ :

$$R_2 = \frac{\Phi}{3 \sin \xi_2}, \quad (22)$$

Пролет канат 2:

$$l_2 = \frac{\frac{m}{2} + x}{\cos \theta}, \quad (23)$$

Тогда угол заложения каната 2 равен:

$$\operatorname{tg} \psi_2 = \frac{H}{l_2}, \quad (24)$$

$$\psi_2 = \operatorname{arctg} \frac{H \cos \theta}{\frac{m}{2} + x}, \quad (25)$$

Усилие, возникающее в канате 2:

$$S_2 = R_2 \cos(\psi_2 - \xi_2), \quad (26)$$

Длина канат 2 определим по формуле:

$$L_2 = \frac{l_2}{\cos \psi_2}, \quad (27)$$

Для формирования суммарных показателей по усилиям, действующих на канатную систему, выполним расчеты для подветренного каната 3. Учитывая упругую податливость системы канатов и перемещений вертлюга, усилия в подветренном канате определяются из условия равенства моментов, действующих относительно оси АВ:

$$\Sigma M_0 = X'H + S_3K - \Phi n, \quad (28)$$

При этом угол  $\varepsilon$  между горизонтальной проекцией пролета  $l_3$  расчалки и вектором скоростного напора  $q_H$ :

$$\varepsilon = 90 - (\alpha + \gamma + \varphi_1) = 60 - (\alpha + \varphi_1), \quad (29)$$

Горизонтальная составляющая силы ветра:

$$N = X \cdot \cos \varepsilon, \quad (30)$$

Определим пролет мнимой расчалки  $n$ :

$$n = l_1 \sin(\alpha + \gamma) = \frac{\left(\frac{2}{3}K - y\right) \sin(\alpha + \gamma)}{\cos \alpha}, \quad (31)$$

Тогда пролет каната 3:

$$l_3 = \sqrt{\left(\frac{m}{2} - x\right)^2 + \left(\frac{1}{3}K + y\right)^2}. \quad (32)$$

Угол заложения каната 3:

$$\operatorname{tg} \varphi_3 = \frac{H}{l_3}, \quad (33)$$

$$\psi_3 = \operatorname{arctg} \frac{H}{\sqrt{\left(\frac{m}{2} - x\right)^2 + \left(\frac{1}{3}K + y\right)^2}}, \quad (34)$$

Найдем угол заложения плеча действия усилия  $S_3$  к горизонту:

$$\mu = 90 - \varphi_3, \quad (35)$$

Плечо действия усилия  $S_3$ :

$$a = (l_3 + n) \cos \mu, \quad (36)$$

Тогда усилие возникающие в канате 3 найдем по формуле:

$$S_3 = \frac{\Phi \left(\frac{2}{3}K - y\right) \sin(\alpha + \gamma) - X \cos \varepsilon H}{(l_3 + n) \cos \mu}, \quad (37)$$

При этом длина каната 3:

$$L_3 = \frac{l_3}{\cos \psi_3}, \quad (38)$$

По итогу величина распора в канатах определяется по формуле:

$$T_1 = \frac{2S_1 - q_k H}{2} \cos \psi_1, \quad (39)$$

где  $q_k$  – погонная масса каната.

Важной составляющей, влияющей на перемещение вертлюга, является изменение длины каната при изменении распора:

$$\Delta L_i = \frac{(T_i - T_0)L_i}{\cos^2 \psi_i EF}, \quad (40)$$

где  $EF$  – жесткость каната.

Далее определим прогиб каната  $f_i$  и пролет каната без прогиба  $L_1^0$  по формулам:

$$f_i = \frac{q_k \cdot l_1^2}{8T_i \cos \psi_1}, \quad (41)$$

$$L_1^0 = l_1 + \frac{8f_1^2}{3l_1} + \frac{l_1}{2} \operatorname{tg} \psi_1, \quad (42)$$

По итогу перемещения вертлюга  $\Delta$  определяются из соотношения:

$$\Delta = \frac{8(f_1^2 - f_0^2)}{3l_1}, \quad (43)$$

где  $f_0$  – прогиб расчалки в безветрие (если рассчитываем перемещение вертлюга при ветре) и прогиб расчалки при ветре (если рассчитываем перемещение вертлюга при порыве).

Для выполнения оперативности работ, необходимо также знать ускорение перемещения вертлюга.

Полная мгновенная кинетическая энергия аэростатной системы и приводимого ею в движение воздуха определится из соотношения [10]:

$$E = m_c \frac{v_H^2}{2} + \int \frac{\rho_H V_H^2}{2} dV_{\text{пр}}, \quad (44)$$

где  $v_H$  – скорость перемещения на данной высоте;  $V_{\text{пр}}$  – объем присоединенного воздуха;  $m_c$  – масса системы;  $m = m_c + m_{\text{пр}}$ , где  $m_{\text{пр}}$  – присоединенная масса воздуха

$$m_c = \frac{G_{гр} + G_{об} + G_p + G_r}{q}, \quad (45)$$

где  $G_{гр}$  – вес перемещаемого груза;

$G_{об}$  – вес оболочки аэростата;

$G_p$  – вес тягово-возвратных канатов аэростата;

$G_r$  – вес газа в оболочке;

$q$  – скоростной напор;

$$m_{пр} = \frac{K_{пр} V \gamma_B^H}{q}, \quad (46)$$

где  $K_{пр}$  – коэффициент присоединенной массы воздуха, для аэростата естественной формы  $K_{пр} = 0,5$ ;  $\gamma_B^H$  – плотность воздуха на заданной высоте.

Вес канатов составит  $G_p = \sum L q_k$ , где  $\sum L = \frac{1,8m}{\cos\psi}$ .

Произведение силы  $F$ , потребной для ускоренного движения системы вместе с присоединенной массой воздуха, на мгновенную скорость  $v_H$  представляет собой мощность, затрачиваемую на ускорение. Эта мощность равна скорости изменения общей кинетической энергии по времени движения.

Полагая, что  $K_{пр} = \text{const}$ , запишем:

$$F v_H = \frac{dE}{dt} m v_H \frac{dv_H}{dt}. \quad (47)$$

или  $F = m \frac{dv_H}{dt}$ , откуда ускорение  $a = dv_H/dt$  определится как отношение возмущающей силы  $F$  к массе  $m$ :  $a = \frac{F}{m}$ .

#### *Заключение*

Предложенная методика последовательных приближений обеспечивает относительно простой и оперативный расчет усилий, возникающих в канатах аэростатной системы, применяемой на транспортно-грузовых операциях в условиях локальной строительной-монтажной площадки. Используя теорию



методики было определено, что при  $K_{ст} = 3$  и углах заложения канатов от 20 до 60° обеспечивается перемещение вертлюга до 10 см при пульсациях ветра 12 м/с на высоте 100 м. При этом ускорения вертлюга для аэростата грузоподъемностью 3000 кгс находятся в пределах от 0,035 до 0,1 м/с<sup>2</sup>.

### 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. Бирбраер А.Н., Ролендер А.Ю. Экстремальные воздействия на сооружения. СПб: издательство Политехнического университета, 2009. – 595 с.
  4. Отчет о научно-исследовательской работе «Исследование возможностей использования летательных аппаратов на лесозаготовках в горных условиях». Часть 1 и 2. – Химки: ЦНИИМЭ, 1985. – 189 с.
  5. Казаков Н.В., Абузов А.В. Развитие беспилотных транспортно-технологических систем промышленного лесопользования // Инженерный вестник Дона, 2023, №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2023/8283](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2023/8283)
  6. Бойко Ю.С. Грузовые аэростаты для открытых горных разработок. – Промышленный транспорт, 1980. – №10 – с. 17 – 18.
  7. Буткин В.Д. Аэростатно-канатные транспортные системы для открытых горных работ // Горный журнал. – №6. – 1998. – с. 56-57.
  8. Brian L. Tuor, Marvin R. Pyles. Balloon logging with the pendulum-swing system: factors affecting lift // Oregon State University, September 1984. – Research Bulletin 47. – 17 p.
  9. Gregory L. Beary. Pendulum Balloon Logging System: Dynamic Model // Oregon State University, November 1983. – 40 p.
-



10. Абузов А.В., Казаков Н.В., Иванов В.И. Особенности динамических напряжений, возникающих в верхней подвеске аэростатно-канатной системы // Инженерный вестник Дона. 2014. №3. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n3y2014/2493](http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2014/2493)

### References

1. Bojko Ju.S. Vozduhoplavanje: Privjaznoe. Svobodnoe. Upravljaemoe. [Aeronautics: Tethered. Free. Manageable.] М.: MGUP, 2001. 462 p.
2. Otchet ob ispytaniyah ajerostata-krana JePAK-1. [EPAK-1 balloon crane test report.] М: MPNSU trest CentroTehmontazh, 1977. 50 p.
3. Birbraer A.N., Rolender A.Ju. Jekstremal'nye vozdeystvija na sooruzhenija. [Extreme impacts on structures.] SPb: izdatel'stvo Politehnicheskogo universiteta, 2009. 595 p.
4. Otchet o nauchno-issledovatel'skoj rabote «Issledovanie vozmozhnostej ispol'zovaniya letatel'nyh apparatov na lesozagotovkah v gornyh uslovijah». 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: CNIIMJe, 1985. 189 p.
5. Kazakov N.V., Abuzov A.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023, №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2023/8283](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2023/8283)
6. Bojko Ju.S. Promyshlennyj transport, 1980. №10. pp. 17-18.
7. Butkin V.D. Gornyj zhurnal. №6. 1998. pp. 56-57.
8. Brian L. Tuor, Marvin R. Pyles. Balloon logging with the pendulum-swing system: factors affecting lift. Oregon State University, September 1984. Research Bulletin 47. 17 p.
9. Gregory L. Beary. Pendulum Balloon Logging System: Dynamic Model. Oregon State University, November 1983. 40 p.
10. Abuzov A.V., Kazakov N.V., Ivanov V.I. Inzhenernyj vestnik Dona. 2014. №3. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n3y2014/2493](http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2014/2493)

**Дата поступления: 24.06.2024    Дата публикации: 20.11.2024**

---