

УДК 533.6.013

К ВОПРОСУ ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ МЕТЕОЗОНДА В ТРОПОСФЕРЕ

Тютюнов Д.Н., Студеникина Л.И., Зарубина Н.К., Скрипкина Е.В.

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», Курск, e-mail: tjtjunov@mail.ru

В статье проводится анализ динамики изменения размера эластичного метеозонда при движении в тропосфере. Была определена теоретическая прочность материала его оболочки и исследовано условие ее разрыва на предельной высоте подъема согласно уравнению Орована – Келли. Опираясь на формулу Менделеева – Клапейрона, получено значение давления газа-наполнителя на предельной высоте подъема. Соответственно, было найдено значение давления воздуха, окружающего шар-зонд на этой же высоте, с помощью барометрической формулы. В итоге было найдено предельно допустимое значение радиуса шара-зонда. Одновременно был изучен температурный режим, при котором не произойдет разрыв оболочки, и найдена критическая температура, вызывающая данный разрыв. Отдельно проведен анализ свойств эластомеров (каучуков, пластмасс), рассмотрены их физико-химические и механические свойства. Сделаны соответствующие уточнения по физическим характеристикам Земли: плотности воздуха, ускорению свободного падения, универсальной газовой постоянной.

Ключевые слова: тропосфера, предельные значения давления в шаре-зонде и атмосфере, предельный радиус шара-зонда, температурный режим

ABOUT DEFORMATION OF GEOMETRIC DIMENSIONS OF METEO SOUNDING BALLOON IN TROPOSPHERE

Tyutyunov D.N., Studenikina L.I., Zarubina N.K., Skripkina E.V.

Southwest State University, Kursk, e-mail: tjtjunov@mail.ru

The article is devoted to analysis of dynamics of deformation of elastic meteo sounding balloon in troposphere. Theoretical strength of the balloons material is defined. Condition of burst of balloon casing in limit lifting height according to Orowan-Kelly equation is researched. Based on ideal gas law the value of gas filler pressure in limit lifting height is received. Accordingly, the value of air pressure, surrounding sounding balloon in the same height, is found using barometric height formula. As a result the limit legitimate value of sounding balloon radius is received. Concurrently the temperature condition is studied and critical temperature is found. Separately elastomer properties (caoutchouc, plastic) are analysed.

Keywords: meteo sounding balloon, sounding balloon, limit values of sounding balloon, temperature condition

Как известно, климат планеты формируется в земной атмосфере. Особую роль в создании погоды играет тропосфера, представляющая собой ее нижний слой, поскольку в тропосфере сосредоточено более 0,8 всей массы атмосферного воздуха. Здесь наблюдается сильно развитая турбулентция и конвекция, сосредоточена основная часть водяного пара, возникают облака, циклоны и антициклоны [1, 4].

Для исследования нижних слоев атмосферы (тропосферы) применяются различные методы: космический мониторинг, наземная радиолокация, авиационная разведка погоды, применение мобильных метеозондов и дронов.

Особую актуальность приобретают исследования окружающей среды в связи с угрозой «парникового эффекта». Важно получить адекватные результаты анализа химического состава воздушных масс на различных широтах Земли в широком интервале высот.

Наибольший интерес вызывает динамика изменения концентрации углекислого газа (CO_2), соединений серы, пылевых выбросов и т.п., не менее важно изучить характер возникновения и изменения озоновых дыр. В данном случае шары-зонды при

изучении верхних слоев тропосферы имеют ряд преимуществ по сравнению с винтовыми дронами, которые обладают ограниченным ресурсом по высоте к времени пребывания на исследуемых горизонтах.

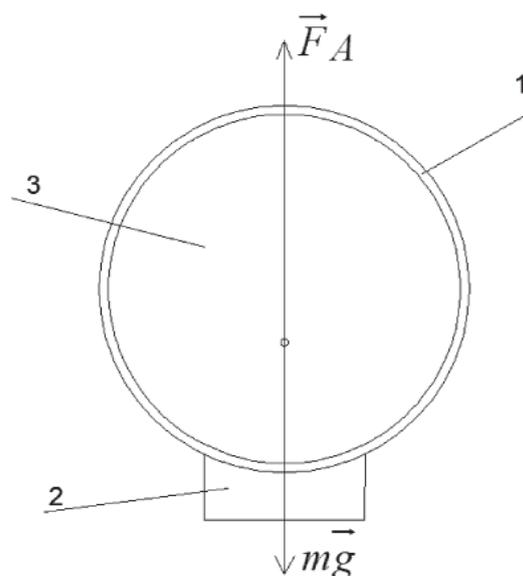


Рис. 1. Схема метеозонда:
1 – оболочка; 2 – аппаратура; 3 – газ

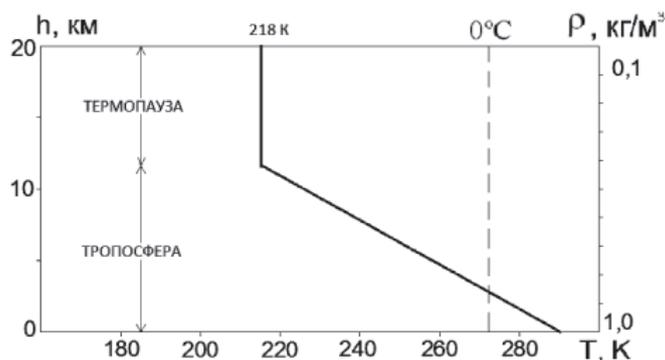


Рис. 2. Распределение температуры по вертикали в атмосфере

В последнее время проводятся эксперименты по применению шаров-зондов для ретрансляции телекоммуникационной информации. Здесь используются специальные приспособления, стабилизирующие траекторию движения шаров-зондов.

Простейший метеозонд имеет, как правило, эластичную оболочку из резины, которая наполняется гелием или водородом (рис. 1). К зонду крепится измерительная аппаратура и средство передачи данных.

В работе [5] было проведено исследование формообразования метеозонда при подъеме в верхние слои тропосферы (рис. 2).

В итоге на основе закона Архимеда была получена формула

$$h = \ln \left(\frac{4\pi r_{ш}^3 \rho_{0в}}{3m} \right)^{\frac{RT}{\mu_b g}}, \quad (1)$$

где h – наибольшая высота подъема зонда, м; T – абсолютная температура воздуха на

высоте h , К; $r_{ш}$ – радиус шара-зонда на высоте подъема зонда h , м; $\rho_{0в}$ – плотность воздуха на поверхности Земли, кг/м³; m – масса шара-зонда ($m = m_{об} + m_{г}$ – суммарная масса оболочки шара и газа-наполнителя), кг; $R = 8,31$ Дж/(моль·град) – универсальная газовая постоянная; μ_b – молекулярная масса воздуха, кг/моль; $g \approx 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения у поверхности Земли.

Важно то, что g практически не меняется и на высоте 8–18 км.

Следует отметить, что относительная упругая деформация каучуков (различных видов резины, эластомеров) E может превышать 100%. Первоначально при растяжении цепей молекул материала зонда требуется низкое напряжение. По мере растяжения цепей молекул сопротивление дальнейшему деформированию возрастает, так как увеличение деформаций вызывает разрыв связей уже растянутых молекул. Это отображено на диаграмме деформаций (рис. 3).

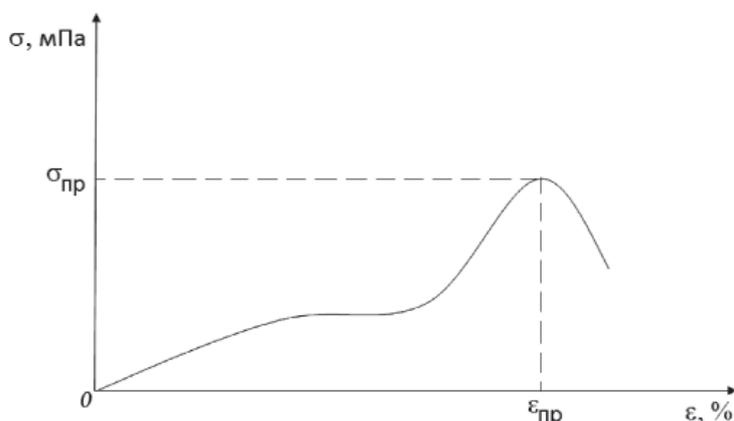


Рис. 3. Схема диаграммы деформаций ϵ эластомеров σ от напряжения

Исследуем динамику изменения размеров метеозонда в момент его динамического равновесия в верхних слоях атмосферы.

Согласно [2], упругая деформация E эластомеров (каучуков) может превышать 100%. На первом этапе деформации для распрямления цепей молекул требуется сравнительно низкое механическое напряжение σ . По мере распрямления цепей молекул сопротивление деформации возрастает, так как это нарастание вызывает разрыв связей уже выпрямленных молекул. Существует предельное значение относительных деформаций $E_{пр}$, которому соответствует предельная прочность $\sigma_{пр}$ разрушения материала зонда, которая соответствует теоретической прочности σ_T .

Определим теоретическую прочность σ_T материала зонда (резины, пластика и т.п.) на основании уравнения Орована – Келли [3]:

$$\sigma_T = \sqrt{\frac{E \cdot \mathcal{E}}{a}}, \quad (2)$$

где $E \leq 0,02$ ГПа = $2 \cdot 10^7$ Па = 20 МПа – модуль упругости резины;
 $a = 2 \cdot 10^{-8}$ см = $2 \cdot 10^{-10}$ м – межатомное расстояние в молекулярных цепях резины; \mathcal{E} – удельная поверхностная энергия резинового шара, Дж/м²

Если учесть, что поверхностная энергия $W_{пов}$ пропорциональна поверхности шара $S_{ш}$, имеем:

$$W_{пов} = \alpha \cdot S_{ш}, \quad (3)$$

где $\alpha = \text{const}$, Дж/м².

Но удельная поверхностная энергия \mathcal{E} определяется по формуле

$$\mathcal{E} = \frac{W_{пов}}{S_{ш}}. \quad (4)$$

Подставляя (3) в (4), получим

$$\mathcal{E} = \frac{\alpha \cdot S_{ш}}{S_{ш}} = \alpha. \quad (5)$$

Известно, что α зависит от материала оболочки шара.

Подставляя (4) в (2), имеем

$$\sigma_T = \sqrt{\frac{E \cdot \alpha}{a}}. \quad (6)$$

Рассмотрим условие разрыва оболочки шара-зонда на предельной высоте подъема h :

$$P_{hш} - P_{hв} \leq \sigma_T, \quad (7)$$

где $P_{hш}$ – давление газа-наполнителя на высоте h , Па; $P_{hв}$ – давление воздуха, окружающего шар-зонд, на высоте h , Па.

На основании формулы Менделеева – Клапейрона получим $P_{hш}$:

$$P_{hш} = \frac{m_r}{\mu_r} \cdot \frac{RT}{V_{ш}} = \frac{m_r RT}{\mu_r \frac{4}{3} \pi r_{ш}^3}, \quad (8)$$

где $V_{ш}$ – объем шара-зонда на высоте h , м³.

Опираясь на барометрическую формулу, определим $P_{hв}$:

$$P_{hв} = P_0 \cdot e^{-\frac{\mu_в g h}{RT}}, \quad (9)$$

где P_0 – давление воздуха, окружающего шар-зонд на поверхности Земли, Па; $\mu_в$ – молекулярная масса воздуха, кг/моль.

Подставляя (1) в (9), имеем

$$P_{hв} = P_0 \cdot e^{-\frac{\mu_в g}{RT} \ln \left(\frac{4\pi r_{ш}^3}{3m_{ш} \rho_{0в}} \right)^{\frac{RT}{\mu_в g}}} = \frac{3mP_0}{4\pi r_{ш}^3 \rho_{0в}}. \quad (10)$$

Подставляя (6), (8), (10) в (7), получим

$$\frac{3}{4\pi r_{ш}^3} \cdot \left(\frac{m_r}{\mu_r} RT - \frac{mP_0}{\rho_{0в}} \right) \geq \sqrt{\frac{E\alpha}{a}}. \quad (11)$$

Из условия (11) следует предельное значение радиуса шара-зонда на высоте h при температуре T (рис. 4):

$$r_{ш} \leq \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi \cdot \sqrt{\frac{E\alpha}{a}} \left(\frac{m_r}{\mu_r} RT - \frac{mP_0}{\rho_{0в}} \right)}}. \quad (12)$$

Из (12) следует, что $r_{ш} > 0$. Тогда получим температурный режим, при котором не произойдет разрыв оболочки шара-зонда:

$$\frac{m_r}{\mu_r} RT - \frac{mP_0}{\rho_{0в}} > 0, \quad (13)$$

тогда имеем

$$T_{кр} > \frac{\mu_r m P_0}{\rho_{0в} m_r R}. \quad (14)$$

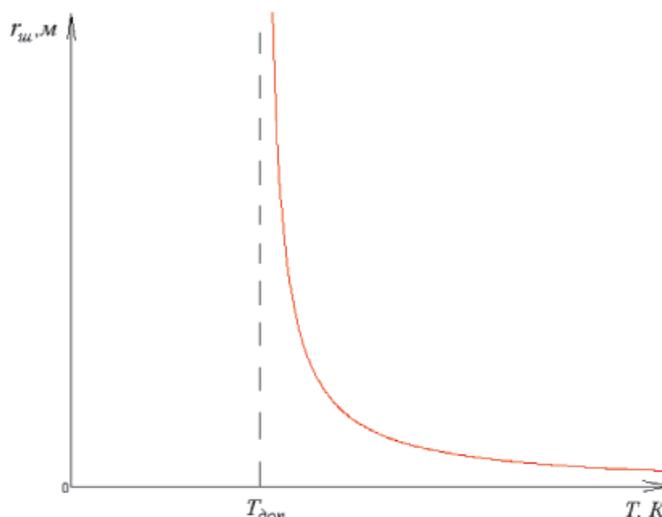


Рис. 4. Зависимость радиуса метеозонда r_m от температуры T тропосферы

Таким образом, в статье:

1. Получена формула (12) предельного значения радиуса резинового шара-зонда на максимальной высоте подъема h при данной температуре тропосферы T .

2. Получена формула (10) давления $P_{hв}$ воздуха, окружающего шар-зонд, на максимальной высоте подъема h .

3. Установлена допустимая предельная температура $T_{кр}$ тропосферы (14) на данной высоте h , выше которой происходит разрыв оболочки шара-зонда.

Список литературы

1. Большой энциклопедический словарь / под ред. А.М. Прохорова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Большая Российская энциклопедия, 2000. – 1456 с.
2. Горчаков Г.И., Баженов Ю.М. Строительные материалы: учеб. для вузов / Г.И. Горчаков, Ю.М. Баженов. – М.: Стройиздат, 1986. – 688 с.
3. Келли А. Высокопрочные материалы. – М.: Мир, 1976. – 261 с.

4. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф, А.К. Лебедев. – 8-е изд., перераб. и испр. – М.: ООО Изд-во «Оникс», 2006. – 1056 с.

5. Тютюнов Д.Н. Расчет предельной высоты подъема метеозонда / Д.Н. Тютюнов, Л.И. Студеникина, Н.К. Зарубина, А.Ф. Пихлап // Наука и Мир. – Волгоград: Изд-во «Научное обозрение», 2015. – Т. 2. № 1(17). – С. 82–84.

References

1. Bolshoi entsiklopedicheskii slovar (A.M. Prokhorov) 2nd edition. Moscow: Bolshaya Rossiiskaya entsiklopediya. 2000. 1456 p.
2. Gorchakov G.I., Bazhenkov Yu.M. Stroitelnye materialy: uchebnik dlya vuzov. Moskwa, Stroizdat, 1986. 688 p.
3. Kelli A. Vysokoprochnye materialy. Moscow, Mir, 1976. 261 p.
4. Yavorskii B.M., Detlaf A.A., Lebedev A.K. Spravochnik po fizike dlya inzhenerov i studentov vuzov. Moscow, Izdatelstvo Oniks, 2006. 1056 p.
5. Tyutyunov D.N., Studenikina L.I., Zarubina N.K., Pikhlap A.F. Raschet predelnoi vysoty podema meteozonda. Nauka i Mir. Volgograd: Izd-vo «Nauchnoe obozrenie», 2015. T. 2. no. 1(17). pp. 82–84.