

Ю.П. Герцен, И.А. Бабушкин, Г.Ф. Путин,
А.Ф. Глухов, В.К. Покровский, А.В. Зюзгин

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕЛА С НЕЙТРАЛЬНОЙ ПЛАВУЧЕСТЬЮ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МИКРОГРАВИТАЦИИ

Цель работы заключалась в оценке влияния ускорения системы на поведение поплавка картезианского водолаза исходя из уравнения равновесия. При этом отслеживалась зависимость уровня поплавка от действующего в системе ускорения. Это позволяет оценить возможность использования данного космического аппарата для проведения процессов получения высокочистых полупроводников и биопрепаратов.

Ключевые слова: акселерометр, микроускорения, микрогравитация, картезианский водолаз.

Традиционные типы акселерометров [1–3] не рассчитаны на низкие и ультранизкие (менее 0,01 Гц) частоты и вследствие этого недостаток не могут быть применены для регистрации постоянных составляющих или же медленно меняющихся малых ускорений.

В последнее время все активнее применяются конвективные акселерометры и сейсмографы [3,4], причем в ряде случаев такие приборы оформляются в виде корпусов микросхем (например, фирмой MEMSIS). Первые приборы имели чувствительность порядка 1 мг. Обзор методов измерения микроускорений [5] путем изучения и замеров связанных с ними процессов теплообмена (конвекция, кристаллизация, пылевая плазма, поведение жидкости вблизи критической точки представлен в обзоре В.И. Полежаева и В.В. Сазонова [6], Разработаны также сейсмоприемники, использующие конвекцию [7] для измерения ускорений на орбите МКС был создан конвективный датчик ДАКОН-2 [8].

Целью данной работы была разработка конструкции датчика ускорений, позволяющего непосредственно измерять величину и направление ускорения в условиях реального космического полета. Для этого можно применить тело с нейтральной плавучестью, так называемый картезианский водолаз (КВ), которое используется в школьных опытах по гидростатике. Внешнее и гидростатическое давление сжимает газовый пузырь внутри КВ, вследствие чего изменяется условие равнове-

сия сил тяжести и Архимеда, и КВ способен останавливаться на определенной глубине.

На рис. 1 схематично показано тело с полостью внутри, заполненной газом. При изменении давления на поверхности жидкости последняя через поры сжимает газ внутри полости (или дает возможность ему расширяться).

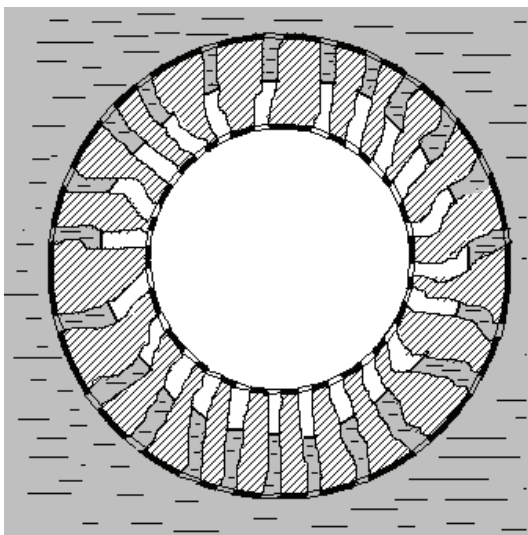


Рис. 1. Тело с нейтральной плавучестью

Для начала рассмотрим стационарное состояние КВ в слое жидкости с постоянной, не зависящей от давления плотностью $\rho_{\text{ж}}$. Представим КВ в виде сферического тела из материала с плотностью $\rho_{\text{т}}$, объем тела обозначим через $V_{\text{т}}$. Полость внутри тела КВ соединяется с поверхностью тела пористыми каналами. При погружении КВ в жидкость внутри сохраняется полость, заполненная газом. Объем газа (будем считать его приближенно равным объему полости $V_{\text{г}}$) зависит от суммарного внешнего давления. При определенном соотношении параметров наступает равновесие между силой тяжести, действующей на тело, и силой Архимеда, стремящейся вытолкнуть тело вверх. Этот баланс сил может быть записан следующим образом:

$$\rho_{\text{т}}V_{\text{т}}g + \rho_{\text{г}}V_{\text{г}}g - \rho_{\text{ж}}V_{\text{т}}g - \rho_{\text{ж}}V_{\text{г}}g = 0. \quad (1)$$

Первые два слагаемых представляют силу тяжести тела и вес газового пузыря. Объем газового пузыря может складываться из объема

пор, частично заполненных жидкостью, и объема внутренней сферы. Следует также ожидать, что часть внутренней сферы может заполниться жидкостью.

При повышении внешнего давления P_0 газ сжимается, его объем уменьшается, сила Архимеда также уменьшается, но медленнее, чем вызванный погружением тела прирост гидростатического давления. Суммарное давление газа

$$P_{\text{сум}} = P_0 + \rho_{\text{ж}} g \cdot z. \quad (2)$$

Здесь z – глубина погружения КВ, размеры тела КВ считаем пренебрежимо малыми по сравнению с глубиной погружения.

Газ в полости можно считать идеальным, тогда для него справедливо условие постоянства массы газа

$$\frac{P_{\text{сум}} \mu}{RT} V_{\text{г}} = \frac{P_0 \mu V_{\text{г}0}}{RT}. \quad (3)$$

Здесь R – универсальная газовая постоянная, T – абсолютная температура среды, $V_{\text{г}}$ – текущее значение суммарного объема газа (в полости и капиллярах), $V_{\text{г}0}$ – объем газа в полости при давлении P_0 , μ – молярная масса газа.

Объем газовой полости вычисляем из (3) и (2):

$$V_{\text{г}}(z) = \frac{P_0 V_{\text{г}0}}{P_0 + \rho_{\text{ж}} g \cdot z}. \quad (4)$$

Уравнение равновесия после некоторых преобразований можно записать в виде

$$(\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{ж}}) V_{\text{т}} + \frac{(\rho_{\text{г}} - \rho_{\text{ж}}) P_0 V_0}{P_0 + \rho_{\text{ж}} g \cdot z} = 0. \quad (5)$$

После несложных преобразований получаем связь между положением «поплавка» z и ускорением свободного падения в данной среде:

$$g = \frac{P_0}{\rho_{\text{ж}} z} \frac{1-D}{D}, \quad (6)$$

где $D = \left(\frac{\rho_{\text{т}}}{\rho_{\text{ж}}} - 1 \right) \frac{V_{\text{т}}}{V_0} + \frac{P_0 \mu}{\rho_{\text{ж}} RT}$.

Таким образом, описанное выше устройство позволяет при достижении гидростатического равновесия однозначно связать глубину погружения в жидкость и ускорение, испытываемое системой.

Однако при малых значениях ускорения, наблюдаемых в условиях космической невесомости, даже малые загрязнения в порах КВ могут существенно повлиять на залипание жидкости в капиллярах. Кроме того, для повышения точности и воспроизводимости результатов необходимо постоянство объема газа в системе, но в приведенных выше условиях возможна частичная утечка газа в виде пузырьков, растворение газа в жидкости.

Для сохранения массы газа внутри полости и в то же время для изменения объема в зависимости от глубины погружения лучше всего использовать герметичную емкость, например пластиковый сиффон, как показано на рис. 2.

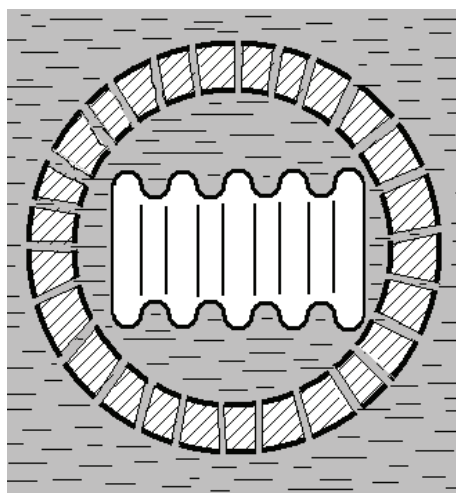


Рис. 2. Герметичная емкость (сиффон)

Если сиффон изготовлен из достаточно мягкого материала (например, полиэтилена), то давление внутри него мало отличается от давления снаружи устройства КВ, и выражение для давления повторяет (2):

$$P = P_0 + \rho_{\text{ж}} g \cdot z.$$

Уравнение равновесия с учетом изменения объема сиффона запишется следующим образом:

$$\rho_{\text{т}} V_{\text{т}} g + m_{\text{с}} g + \rho_{\text{г}} V_{\text{г}} g - \rho_{\text{ж}} V_{\text{т}} g - \rho_{\text{ж}} V_{\text{с}} g - \rho_{\text{ж}} V_{\text{г}} g = 0. \quad (7)$$

Здесь V_T – объем тела, $V_c = V'_c$ – собственный объем сиффона, V_r – объем газа внутри сиффона, m_c – масса сиффона; $\rho_r \cdot V_r = m_r = \text{const}$ – масса газа в сиффоне,

Уравнение (7) можно записать, опуская g , в виде

$$(\rho_r - \rho_{ж})V_T + (m_c - \rho_{ж}V'_c) + (\rho_r - \rho_{ж})V_r = 0. \quad (8)$$

Учитывая (2), а также соотношение $\rho_r = \frac{P\mu}{RT}$, а кроме того, также считая процесс внутри сиффона изотермическим, т.е. $P_r V_r = P_0 V_{r0}$, где индексы справа относятся к условиям на поверхности жидкости ($z = 0$), получаем связь давления в сиффоне P_c с глубиной погружения z :

$$P_c = \frac{\rho_r RT}{\mu} = \frac{m_r RT}{V_r \mu} = \frac{m_r RT (P_0 + \rho_{ж} g \cdot z)}{\mu \cdot P_0 V_0}. \quad (9)$$

Тогда плотность газа запишется как $\rho_r = \frac{m_r (P_0 + \rho_{ж} g \cdot z)}{P_0 V_0}$.

Подставляя полученные результаты в уравнение (10), после алгебраических преобразований получаем связь ускорения g с параметрами элементов КВ.

Для достаточно мягкого сиффона связь ускорения свободного падения с глубиной погружения и другими параметрами

$$g = \frac{1}{\rho_{ж} z} \left[\frac{P_0 V_0}{\left(\frac{\rho_r}{\rho_{ж}} - 1 \right) V_T + \left(\frac{m_c}{\rho_{ж}} - V'_c \right) + \frac{m_r}{\rho_{ж}}} - P_0 \right]. \quad (10)$$

Получается математическая зависимость между глубиной погружения, внешним давлением, параметрами тела и ускорением свободного падения. Следует, однако, учесть, что при измерении малых и сверхмалых ускорений расстояния, на которое смещается тело за конечное время (порядка 10 секунд), измеряются долями миллиметра. Для достижения равновесия, то есть неподвижного положения тела, придется варьировать внешнее давление P_0 . Но чтобы добиться неподвижности КВ, потребуется время, которое практически невозможно оценить заранее (речь пойдет, вероятно, о часах). Поэтому следует разработать приемы, которые позволили бы получать результаты за конечное время.

Рассмотрим динамику поведения тела, погруженного в жидкость. Примем, что сила трения для тела сферической формы при малых скоростях движения аналогична силе трения в задаче Стокса, т.е. сила трения пропорциональна скорости движения и коэффициенту вязкости жидкости [9].

Обозначив через $\partial V/\partial t$ ускорение объекта, получаем уравнение движения КВ.

$$(\rho_T V_T + m_c + \rho_r V_r - \rho_{ж} V_T - \rho_{ж} V_r - \rho_{ж} V_c') g - \kappa \eta v = (\rho_T V_T + m_c + \rho_{ж} V_{ж}^{доп}) \frac{\partial v}{\partial t}. \quad (11)$$

Здесь $V_c^{доп}$ – объем жидкости, находящийся внутри прибора между сильфоном и корпусом, η – коэффициент динамической жидкости в вязкости жидкости, κ – коэффициент пропорциональности, v – скорость движения тела относительно неподвижной жидкости. Сферические тела достаточно быстро достигают установившегося значения скорости:

$$v_{уст} = \frac{g}{\kappa \eta} [(\rho_T - \rho_{ж}) V_T + (m_c - \rho_{ж} V_c') + (\rho_r - \rho_{ж}) V_r]. \quad (12)$$



Рис. 3. Тело картезианского водолаза

На рис. 3 представлена фотография тела картезианского водолаза, изготовленного по рис. 2. Сфера из двух сит с полиэтиленовым сильфоном внутри погружалась в заполненный дистиллированной водой

мерный цилиндр, верхняя часть которого герметизировалась, к герметизирующему устройству подводилось давление, величина которого замерялось манометром.

Для заданного перепада давления экспериментально определялась средняя скорость погружения путем замера времени прохождения КВ между двумя метками на цилиндре, нанесенными на расстоянии 30 см ($\pm 0,5$ мм). Опыты с картезианским водолазом производились для избыточных давлений в диапазоне 2,6 ... 18,5 КПа (20 ... 140 мм рт. ст.).

При проведении эксперимента было обнаружено, что скорость погружения (как и всплытия) меняется в зависимости от глубины, на которой в данный момент находится КВ. Вблизи поверхности жидкости скорость погружения заметно меньше, чем на глубине.

Это следует из анализа формулы (11), в правой части которой есть множитель V_r – объем газа внутри сильфона. С увеличением глубины погружения его объем уменьшается, вклад этого множителя в баланс сил также уменьшается и скорость погружения увеличивается. При всплытии КВ наблюдается обратная картина.

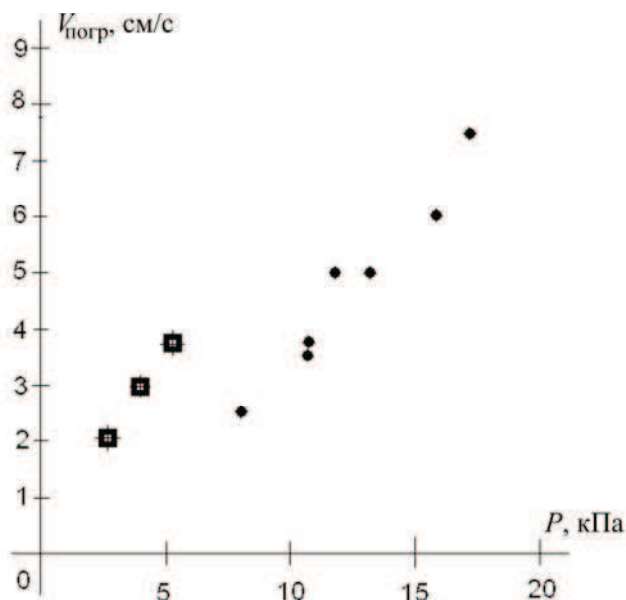


Рис. 4. Зависимость средней скорости погружения КВ от внешнего давления P : масса КВ – \blacklozenge 13,28 г; \blacksquare 13,35 г

Влияние массы КВ по мере приближения к равновесию демонстрируется на рис. 4. При уменьшении массы КВ погружение начинается при меньшем перепаде давления.

Рассмотренный в статье метод измерения ускорений (в том числе и микроускорений) может найти применение в космических аппаратах в процессах получения высокочистых полупроводников и биопрепаратов.

Библиографический список

1. Справочник метролога. – URL: <http://metrologu.ru/info/izmerenia/vibroizmerenia/type-akselerometr.html>
2. Пьезоприбор. – URL: http://www.piezo.sfedu.ru/catalog/3_1.php
3. Фрайден Дж. Современные датчики: справ. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
4. Левашов Ю. Акселерометры компании MEMSIS, Inc. // Компоненты и технологии. – 2005, № 6. – С. 44–47.
5. Седельников А.В. Проблема микроускорений: 30 лет поиска решения // Современные наукоемкие технологии. – 2005. – № 4.
6. Полежаев В.И., Сазонов В.В. Механика невесомости и гравитационно-чувствительные системы // Науч.-исслед. семинар: аннотации докладов / ИПМех РАН. – Препринт № 898, 2009. – С. 80.
7. Сейсмоприемник на основе ячейки Хеле-Шоу / И.А. Бабушкин, А.Ф. Глухов, В.А. Дёмин, Д.А. Маловичко, Р.А. Дягилев // Прикладная физика. – 2008. – №3. – С. 134–140.
8. Измерение инерционных микроускорений с помощью конвективных датчиков / И.А. Бабушкин, А.Ф. Глухов, В.А. Демин [и др.] // Космическое материаловедение–2007: материалы рос. симпозиума / Ин-т кристаллографии имени А.В. Шубникова РАН. – Калуга, 2007. – С. 72–77.
9. Слезкин Н.А. Динамика вязкой несжимаемой жидкости. – М., 1955. – 520 с.

Получено 02.07.2011

**Yu. P. Gertzen, I.A. Babushkin, G.F. Putin, A.F. Gluhov,
V.K. Pokrovskiy, A.V. Zuzgin**

The Perm national research polytechnic university

APPLICATION OF THE BODY WITH NEUTRAL BUOYANCY FOR MEASUREMENT OF MICROGRAVITATION

Abstract. The purpose of work consisted in an estimation of influence of acceleration of system on behaviour of the float karthezian diver, proceeding from the equation of balance.

Thus dependence of a level of a float on acceleration working in system is traced. It allows to estimate an opportunity of use of the given space vehicle for carrying out of processes of reception of semiconductors and biological products of high cleanliness

Keywords: accelerometer, microaccelerations, microgravitation, the karthezian diver.