Доклады Академии Наук СССР
1938. Том XXI, № 5

ФИЗИКА

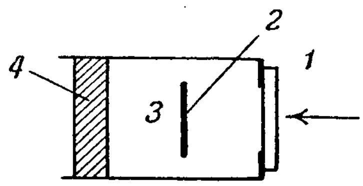
К. ВУЛЬФСОН

О ПОРОГЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ГАЗОВОГО РАДИОМЕТРА

(Представлено академиком С. И. Вавиловым 9 X 1938)

В № 7. 202 (1936) Rev. of Scient. Instrum. была опубликована работа Хэйеса, описавшего своеобразную конструкцию газового радиометра.

Автор приходит в этой работе к совершенно необоснованному выводу, что его радиометр во много раз чувствительнее обычных термоэлементов. Свой вывод он делает из сопоставления напряжения, получающегося после усиления показаний этого радиометра, с напряжением, непосредственно развиваемым термоэлементом. Основной же вопрос о пороге чувствительности своего радиометра Хэйес оставляет открытым.



Попытку решения этой проблемы впервые сделал М. Л. Вейнгеров[1]. К сожалению в своем расчете этот автор допустил ошибку и пришел поэтому к неверному выводу, что порог чувствительности газового радиометра равен $W_{min} \approx 10^{-19}$ W, что на много порядков ниже, чем у современных термоэлементов, для которых $W_{min} \approx 10^{-8}$ W [2]. В связи с тем, что в своей новой работе М. Л. Вейнгеров вновь указывает на значительно бо́льшую чувствительность газового радиометра, представляется целесообразным изложить здесь теорию газового радиометра.

Рассмотрим упрощенную схему устройства газового радиометра, изображенную на фигуре.

Из такой же схемы радиометра исходил М. Л. Вейнгеров в своей первой работе.

Радиация поступает через отверстие, закрытое прозрачным окном *1*. Поглощаясь газом *3* и тонкой зачерненной пластинкой *2*, она вызывает нагревание, благодаря которому газ расширяется и перемещает поршень *4*, производя работу. Для вычисления работы перемещения поршня М. Л. Вейнгеров сначала предполагает, что на поршень действуют кроме давления газа еще и упругие силы, которыми в дальнейшем он пренебрегает. Для вычисления работы перемещения поршня он пользуется выражением:

$$A = p\Delta v = R\Delta T. \qquad (1)$$

Однако это выражение не учитывает наличия давления газа на поршень с внешней стороны. Движение поршня происходит под действием разности между внешним и внутренним давлением, т. е.

$p_0 - p$. По мере перемещения поршня эта величина меняется и поэтому для вычисления работы надо вычислить интеграл ([3]):

$$A = \int_{v_0}^{v} (p_0 - p)\, dv = S \int_{x_0}^{x} (p_0 - p)\, dx, \qquad (1')$$

где p_0 — давление газа до нагревания (равное внешнему давлению); S — площадь поршня; x — перемещение поршня.

Примененное М. Л. Вейнгеровым выражение (1) приводит, как будет показано ниже, к результату, отличающемуся от правильного на порядок величины $\frac{\Delta p}{p} \approx 10^{-10}$.

Чем меньшее количество лучистой энергии падает на радиометр, тем на меньшую величину перемещается поршень. Измерения будут возможны только тогда, если перемещение, вызванное падающей энергией, в определенное число раз превосходит флюктуационные смещения поршня, обусловленные тепловым движением молекул. Таким образом чтобы найти порог чувствительности, надо приравнять смещение поршня от нагревания газа лучистой энергией к среднему квадратичному смещению под действием флюктуаций.

Среднее квадратичное смещение поршня, как известно, может быть найдено из условия, что средняя работа флюктуаций

$$\overline{A} = \frac{kT}{2} \qquad (2)$$

(k—константа Больтцмана).

Выражения (1′) и (2) дают возможность вычислить средний квадрат смещения поршня. Разлагая подинтегральное выражение в ряд и ограничиваясь первым членом, находим:

$$A = S^2 \frac{\partial p}{\partial v} \int_{x_0}^{x} (x_0 - x)\, dx = -S^2 \frac{\partial p}{\partial v} \frac{(x_0 - x)^2}{2}, \qquad (3)$$

откуда

$$\overline{(x_0 - x)^2} = -\frac{kT}{S^2 \frac{\partial p}{\partial v}}. \qquad (4)$$

Для определения $\frac{\partial p}{\partial v}$ воспользуемся уравнением состояния* $pv = RT$, откуда

$$\frac{\partial p}{\partial v} = -\frac{p_0}{v_0}. \qquad (5)$$

Подставляя значение $\frac{\partial p}{\partial v}$ в выражение (4), находим:

$$\overline{(x_0 - x)^2} = \frac{kTx_0}{Sp_0}. \qquad (6)$$

Вычислим теперь величину перемещения поршня под действием радиации, нагревающей газ на ΔT. Из уравнения состояния находим:

$$\frac{\Delta v}{v_0} = \frac{\Delta x}{x_0} = \frac{\Delta T}{T}. \qquad (7)$$

Для определения порога чувствительности радиометра сравниваем Δx с $\sqrt{\overline{(x_0 - x)^2}}$, откуда:

$$\Delta T_{\text{порог}} = \sqrt{\frac{k}{R}}\, T_0, \qquad (8)$$

* Предполагаем, что радиометр наполнен идеальным газом.

где R — газовая постоянная для количества газа, заключенного в радиометре.

Количество лучистой энергии, необходимое для нагревания радиометра на $\Delta T_{\text{порог}}$, определяется равенством:

$$\Delta T_{\text{порог}} = \frac{W_{\text{порог}}}{F}, \tag{9}$$

где $F = 4\sigma T_0^3 s + f$; σ — постоянная лучеиспускания; s — поверхность, поглощающая радиацию; f — коэффициент, определяющий потери тепла через теплопроводность и конвекцию газа.

Если принять самый идеальный случай, когда $f = 0$, т. е. все потери сводятся к обратному излучению, то можно легко подсчитать порог чувствительности газового радиометра.

Полагая, что сосуд объемом $V_0 = 5$ мм² * наполнен воздухом при давлении 760 мм рт. столба, находим при $s = 0.1$ см²:

$$W_{\text{порог}} \approx 5.0 \cdot 10^{-11} \text{ W}.$$

Минимальное количество энергии, измеряемое с точностью до 1%, будет равно

$$W_{\min} = 5.0 \cdot 10^{-9} \text{ W}.$$

Последняя величина совпадает по порядку с чувствительностью термоэлемента, подсчитанной Картрайтом ([2]).

Учитывая отброшенные выше потери тепла на теплопроводность и конвекцию газа, превосходящие в обычных условиях в 5—10 раз потери на обратное излучение, мы нашли бы, что чувствительность газового радиометра не только не превосходит чувствительность вакуумного термоэлемента (одинаковой инерции и воспринимающей поверхности) в два раза, но на практике будет даже значительно ниже.

Покажем в заключение, что рассмотренная нами идеальная схема газового радиометра является оптимальной с точки зрения возможности измерения малых изменений температуры и следовательно малых световых потоков. Допустим, что на поршень кроме внешнего постоянного давления p_0, осуществляемого либо грузом, наложенным на поршень, либо давлением газа, находящегося вне радиометра, действуют еще упругие или квазиупругие силы (неизбежные при практическом осуществлении такого радиометра). В этом случае формула (1′) примет вид:

$$A = \int_{v_0}^{v} [p_0 - p + \alpha(x_0 - x)]\, dv = -S^2 \frac{\partial p}{\partial v} \frac{(x_0 - x)^2}{2} + \frac{(x_0 - x)^2}{2} \alpha S \tag{1''}$$

где α — константа упругой или квазиупругой силы (в случае радиометра, снабженного U-образной барометрической трубкой, $\alpha = 2\rho g$; ρ — плотность жидкости, заполняющей трубку, и g — ускорение силы тяжести). Приравнивая $A = \frac{kT}{2}$, находим:

$$\overline{(x_0 - x)^2} = \frac{kTx_0}{Sp_0 + 2\rho g S x_0}. \tag{6'}$$

---

* В нашем численном примере мы уменьшили объем радиометра по сравнению с расчетом М. Л. Вейнгерова, так как радиометр указанного им размера обладал бы инерцией, в сотни раз большей, чем инерция обычных термоэлементов.

При вычислении перемещения поршня, вызванного нагреванием падающей радиацией, нужно учесть, что внешнее давление зависит от объема:

$$p = p_0 + \frac{2(v_0 - v)\,\rho g}{S}.$$

Пользуясь уравнением состояния $pv = RT$, находим:

$$\Delta x = \frac{\Delta v}{S} = \frac{R\Delta T}{p_0 S + 2x_0\rho g S}.$$

Сравнивая Δx с $\sqrt{\overline{(x_0 - x)^2}}$, получаем:

$$\Delta T_{\text{пор}}{}^{\text{ог}} = \sqrt{\frac{kTx_0 S\,(p_0 + 2\rho g x_0)}{R^2}} > \sqrt{\frac{k}{R}T}.$$

Из написанного неравенства видно, что чувствительность к температуре, а следовательно и к радиации падает с появлением упругих или квазиупругих сил, действующих на поршень. Таким образом рассмотренная вначале схема газового радиометра является наивыгоднейшей.

Изложенные расчеты показывают, что газовый радиометр вне зависимости от конструкции не обладает чувствительностью, в миллиард раз большей, чем термоэлементы, как это утверждают Хэйес и Вейнгеров.

Поступило
10 X 1938.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

[1] М. Л. Вейнгеров, ДАН, III (XII), № 3 (98) (1936). [2] C. H. Cartwright, ZS. f. Physik, 92, 153 (1934). [3] Smoluchowsky, Ann. d. Phys., 25, 205—226 (1908).