

ПОПЕРЕЧНЫЙ ПЕРЕНОС ТЕПЛА В МОЛЕКУЛЯРНО-ТЕПЛОВОМ ПОТОКЕ,  
СОЗДАННОМ В ГАЗЕ С НЕСФЕРИЧЕСКИМИ МОЛЕКУЛАМИ  
ПРИ НАЛИЧИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Л. Л. Горелик, В. Г. Николаевский, В. В. Синицын

Как известно, коэффициенты переноса газов изменяют свою величину в магнитном поле (см. [1-7]). Этот эффект не изменяет своего знака при изменении направления магнитного поля на обратное ("четный" эффект). Развивая теоретический метод исследования явлений переноса в магнитном поле, разработанный Каганом и Максимовым [7], Кнап и Бенакер пришли к выводу о том, что, если создать в газе градиент температуры ( $T$ ) в направлении, перпендикулярном к магнитному полю ( $H$ ), то в направлении, перпендикулярном  $\vec{H}$  и  $\text{grad } T$ , возникнет тепловой поток [8]. Эффект вытекает из тензорного характера коэффициента теплопроводности газа ( $\lambda$ ) в магнитном поле. Возникающая вследствие этого поперечная разность температур меняет свой знак при изменении направления магнитного поля на обратное ("нечетный" эффект). Аналогичный эффект был предсказан также и для вязкости. Последний был недавно экспериментально обнаружен Корвингом и др. в  $O_2$ ,  $N_2$  и  $HD$  [9] <sup>1</sup>). Теоретические предсказания нечетного эффек-

456

та сделаны также в публикуемой работе Кагана и Максимова [10]. В соответствии с [8, 10] справедлива формула

$$\varepsilon_{\text{нез}} = \frac{\Delta \lambda_{\text{нез}}}{\lambda} = -\alpha \left( \frac{\xi}{1+\xi^2} + 2 \frac{2\xi}{1+4\xi^2} \right),$$

где  $\Delta \lambda_{\text{нез}}$  - изменение теплопроводности в нечетном эффекте,  $\xi = k \mu_{\text{нез}} H / p$ ,  $\mu_{\text{нез}}$  - эффективный магнитный момент молекулы, ответственный за нечетный эффект,  $p$  - давление газа,  $\alpha$  и  $k$  - коэффициенты, зависящие от молекулярно-кинетических свойств газа и природы магнитного момента. Согласно [10] для парамагнитных газов формула (I) справедлива лишь приближенно. Ниже приведены результаты проведенных экспериментов с целью обнаружения упомянутого нечетного эффекта для теплопроводности.

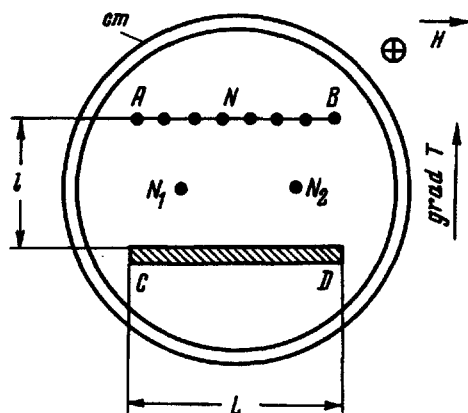


Рис. I

Поперечное сечение измерительной камеры схематически изображено на рис. I. Она представляет собой помещенный в соленоид цилиндрический латунный стакан (ст), в котором смонтированы подогреваемые током до 180-200<sup>0</sup>С проволоки N для создания градиента температур ("градиентные" проволоки), латунная пластина CD для теплоотвода (она имеет тепловой контакт со стаканом) и две, подогреваемые током до 90-100<sup>0</sup>С, платиновые нити N<sub>1</sub> и N<sub>2</sub> Ø 50 мк для регистрации поперечного переноса тепла ("измерительные" нити). Градиентные проволоки

натянуты вдоль цилиндра по сечению АВ; они выполнены из платиновой проволоки  $\varnothing$  50 мк. Измерительные нити расположены на расстояниях  $\ell/2$  от АВ и  $L/4$  от оси стакана. (В осуществленной нами конструкции  $L = \ell = 20$  мм). Они являются двумя плечами моста Уитстона, питаемого переменным током частотой 1000 гц, и имеют общую вершину. В диагональ моста включен избирательный усилитель. Если в направлении  $N_1 N_2$  возникает тепловой поток, то появляющаяся в этом случае между нитями  $N_1$  и  $N_2$  разность температур приводит к разбалансу моста. О величине  $\xi_{\text{нет}}$  удобно судить по изменению разбаланса моста, возникающему при изменении направления поля на обратное. Датчик поме-

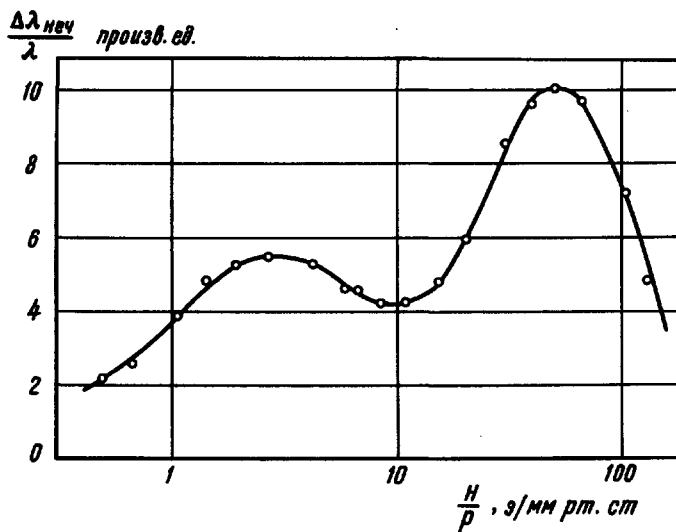


Рис. 2

чался в магнитный экран. Эксперименты проводились при комнатной температуре, давлениях 1 - 15 мм рт.ст. и полях до 650 эрстед. Для предотвращения побочного эффекта, вызванного прогибом градиентных нитей, последние натягивались с помощью пружинок, питание нитей осуществлялось переменным током частотой 3 кгц. Отсутствие побочного эффекта, в частности, подтверждалось тем, что в  $Az$  эффект оказывался практически равным нулю. С целью полного исключения названного побочного эффекта в последнее время осуществлен датчик, в котором гра-

диентные нити выполнены из бифилярно свитых медных эмалированных про-  
волоков  $\varnothing$  50 мк.

Предварительные эксперименты, проведенные при различных давле-  
ниях кислорода (1 - 15 мм рт.ст.), показали, что  $\epsilon_{\text{неч}}$ , в соот-  
ветствии с теоретическими данными, является функцией  $H/p$ . На

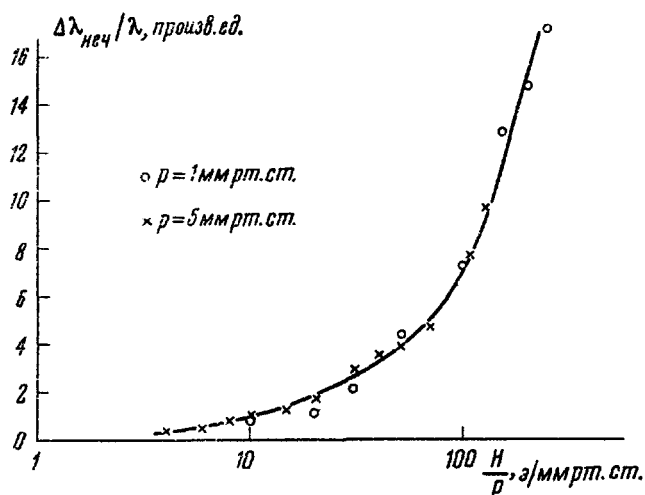


Рис.3

рис.2 представлена кривая относительного хода  $\epsilon_{\text{неч}}$  в зависимости  
от  $H/p$  для кислорода, полученная при давлении 5 мм рт.ст. При  
больших значениях  $H/p$   $\epsilon_{\text{неч}} \rightarrow 0$ , что согласуется с форму-  
лой (I). Кривая  $\epsilon_{\text{неч}}(H/p)$  имеет два максимума. Первый из них  
соответствует значению  $H/p \sim 3$  э/мм рт.ст., второй -  
50 э/мм рт.ст. Наличие первого максимума согласуется с имеющим-  
ся в работе [10] теоретическим предсказанием нечетного эффекта, ко-  
торый обусловлен неупругими столкновениями молекул кислорода, сопро-  
вождающимися изменением проекции  $\sigma$  электронного спина на враща-  
тельный момент (т.е. переходами от  $\sigma = \pm 1$  к  $\sigma = 0$  и обратно).

Наличие второго максимума согласуется с имеющимся в работе [8] тео-  
ретическим предсказанием нечетного эффекта, обусловленного упругими  
столкновениями молекул кислорода с составляющей электронного спина  
 $\sigma = 0$ . На согласование полученных экспериментальных результатов с  
теоретическими данными указывает, в частности, тот факт, что отно-

шение значений  $H/\rho$  для второго и первого максимумов ( $\sim 15$ ) приблизительно равно отношению эффективных магнитных моментов молекулы кислорода в состояниях  $\sigma = \pm 1$  и  $\sigma = 0$  [8]. По предварительным оценкам максимальное значение величины  $\epsilon_{\text{нез}}$  порядка  $10^{-4}$ .

Нечетный эффект был обнаружен также в азоте. На рис.3 приведена кривая  $\epsilon_{\text{нез}}(H/\rho)$ , полученная в  $N_2$  при давлениях 1 и 5 мм рт.ст. и полях до 650 эрстед. Относительные оценки показывают, что при значениях  $H/\rho \sim 130$  э/мм рт.ст.  $\epsilon_{\text{нез}}$  для  $N_2$  приблизительно равно максимальному значению  $\epsilon_{\text{нез}}$  для  $O_2$ . Знак эффекта для этих газов оказался одинаковым. В дальнейшем предполагается проведение более тщательных исследований в  $O_2$ ,  $N_2$  и других газах.

Авторы выражают благодарность И.К.Кикоину, Ю.М.Кагану, Л.А.Максимову, Ю.А.Михайловой и В.Д.Борману за полезное обсуждение, В.И.Николаеву и Н.Я.Анисимову за помощь в изготовлении датчиков.

Поступило в редакцию  
31 августа 1966 г.

#### Литература

- [1] H.Senftleben, J.Pietzner. *Ann. Physik*, 16, 907, 1933; 27, 108, 117, 1936; 30, 541, 1937.
- [2] H.Senftleben, H.Gladisch. *Ann. Physik*, 30, 713, 1937; 33, 471, 1938.
- [3] J.J.Beenakker, G.Scoles, H.F.P.Кнаар, R.M.Jonkman. *Phys. Lett.*, 2, 5, 1962.
- [4] Л.Л.Горелик, В.В.Синицын. *ЖЭТФ*, 46, 401, 1964.
- [5] Л.Л.Горелик, Ю.Н.Редкобородый, В.В.Синицын. *ЖЭТФ*, 48, 761, 1965.
- [6] J.J.M.Beenakker, H.Hulsman, H.F.P.Кнаар, J.Korving, G.Scoles. *Advances in Thermophysical Properties of Extreme Temperatures*, ASME, N-Y, 1965, p.261.
- [7] Ю.Каган, Л.Максимов. *ЖЭТФ*, 41, 842, 1961.
- [8] H.F.P.Кнаар, J.J.M.Beenakker, *Heat conductivity and viscosity of a gas of non-spherical molecules in a magnetic field. Suppl.*

No.124 to the Communications Kamerlingh Onnes Laboratorium,  
Leiden, Netherlands.

[9] J.J.Corring, H.Nulaman, H.F.P. Knaap, J.J.M.Veenakker. Phys.  
Lett., 21, 5, 1966.

[10] Д.Каган, Л.Максимов, ЖЭТФ, № 12, 1966 (в печати).

---

1) В работе [9] указывается, что выполнены также предварительные измерения нечетного эффекта для теплопроводности, результаты которых будут опубликованы.