

# Math-Net.Ru

All Russian mathematical portal

V. I. Alfyorov, E. A. Bozhkova, L. M. Dmitriev,  
Energy-balance in a contracted glow-discharge in a  
longitudinal gas-flow,  
*TVT*, 1982, Volume 20, Issue 3, 437–441

<https://www.mathnet.ru/eng/tvt6330>

Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that you  
have read and agreed to these terms of use

<https://www.mathnet.ru/eng/agreement>

Download details:

IP: 18.97.9.172

April 18, 2025, 10:48:51



УДК 537.50

## ИССЛЕДОВАНИЕ БАЛАНСА ЭНЕРГИИ В КОНТРАГИРОВАННОМ ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ, ПРОДОЛЬНО ОБДУВАЕМОМ ПОТОКОМ ГАЗА

*Алферов В. И., Бсжкова Е. А., Дмитриев Л. М.*

Приводятся данные о калориметрических измерениях энергии в струе газа, пропущенной через тлеющий разряд большой плотности тока при энерговыкладах до 4000 кДж/кг.

Высокоэнергетические источники неравновесного газа, возбужденного тлеющим разрядом, представляют интерес для многих задач технической физики. Одним из ограничений применения самостоятельного тлеющего разряда в таких источниках является контракция разряда при повышении плотности тока. В данной работе исследуется в условиях самостоятельно тлеющего разряда вклад энергии во внутренние степени свободы молекул газа, продольно обдуваемого потоком азота и воздуха при повышенных значениях плотности тока ( $1-5 \text{ А/см}^2$ ) в столбе разряда.

Схема экспериментального устройства приведена на рис. 1. Электрический разряд организуется в потоке газа (азота, воздуха), протекающего через трубку из кварцевого стекла. Выходная часть трубки (длиной  $\approx 10 \text{ мм}$ ) выполнена сужающейся с наименьшим диаметром на выходе 1,5 мм. Диаметр цилиндрической части трубки 5,5; толщина стенки в сужающейся части 0,2 мм. Электроды выполнены из меди, причем масса катода выбрана такой, чтобы за время включения разряда (5–10 с) нагрев катода за счет приэлектродных потерь не превышал  $2-3^\circ \text{ С}$ . Питание разряда осуществлялось от источника с стабилизированным напряжением (уровень пульсаций не более 2%).

Газовая струя, нагретая в разряде, поступает в газовый калориметр, выполненный в двух вариантах (рис. 1). В первом варианте (рис. 1, а) калориметр представляет собой цилиндрическую камеру диаметром 30 и длиной 180 мм, в конце которой установлено мерное сопло с диаметром критического сечения 10 мм. Перепад давлений в мерном сопле, а также в разрядной трубке поддерживается достаточным для того, чтобы реализовать звуковое истечение в критических сечениях сопла и разрядной трубки. Для сведения к минимуму потерь тепла к стенкам калориметра коаксиально со струей газоразрядной плазмы в камеру подается охлаждающий газ (азот, воздух, углекислота), расход которого в 10–40 раз превышает расход газа через разрядную трубку. Температура стенок камеры из-за большой теплоемкости стенок остается во время эксперимента практически постоянной.

При отсутствии процессов релаксации энергии внутренних степеней свободы молекул (за исключением вращательных) вблизи критического сечения и при равномерном распределении температуры и концентраций по сечению изменение давления в камере связано с выделяющейся в камере энергией  $\Delta H$  соотношением

$$\Delta H = C(P_2^2/P_1^2 - 1), \quad (1)$$

где  $P_1$ ,  $P_2$  — давления в камере до и после включения разряда, а коэффициент  $C$  может быть определен из газодинамических соотношений [1], связывающих параметры газа в критическом сечении с параметрами в камере.

Так как при смешении горячего газа из разрядной трубки с охлаждающим газом поле температур в камере перед входом в сопло остается

неравномерным, величина  $C$  для заданных расходов горячего и охлаждающего газов определялась экспериментально. Для этого вместо нагретого в разряде газа в камеру подавалась струя газа, прошедшая через омический нагреватель, причем параметры струи (сечение, расход, импульс) выбраны такими же, как и у газоразрядной струи. По известной энтальпии нагретой струи проводилась градуировка калориметра по соотношению (1).

Во втором варианте (рис. 1, б) калориметр выполнен таким образом, чтобы в нем выделялась вся энергия газа, поступающего из разрядной трубки. Калориметр — трубка из нержавеющей стали, окруженная коаксиальной герметичной газовой полостью. Длина трубки 500, внутренний диаметр 8, толщина стенки 1, величина зазора между стенками полости 3 мм, полость заполнена воздухом при атмосферном давлении. На внешней стенке полости из-за большой теплоемкости стенок температура поверхности во время эксперимента сохраняется постоянной. На выходе из трубки калориметра установлено мерное сопло с диаметром критического сечения 5 мм. Для уменьшения потерь тепла на входе в калориметр, а также исключения перегрева трубки калориметра (и возникновения вследствие этого конвекции во внешней полости калориметра) коаксиально струе горячего газа подается также охлаждающий газ. Тепло, выделяющееся на внутренней поверхности трубки калориметра, определяется по темпу роста давления в газовой полости непосредственно перед выключением разряда [2], а тепло, уносимое вместе с газом, определяется по измерению давлений перед мерным соплом по соотношению (1). Градуировка калориметра проводилась с помощью источника тепла (нагреваемая электрическим током тонкая нихромовая спираль, помещенная внутри трубки калориметра) известной мощности. Доля энергии, затраченная на нагрев поступательных и вращательных степеней свободы газа в разряде, определялась по измерению давления в разрядной трубке также по (1).

Для определения мощности, передаваемой истекающему из разрядной трубки газу в приэлектродных областях, анод подвигался через выходное сечение разрядной трубки непосредственно к катоду. При этом зазор между электродами составлял 1 мм, и напряжение горения разряда определялось в основном приэлектродными падениями.

Характерные условия, в которых проводились эксперименты, следующие: давление в разрядной трубке 4–20 кПа; расход газа через разрядную трубку 0,017–0,05 г/с; время пребывания газа в разрядной зоне  $5 \cdot 10^{-4}$ – $2 \cdot 10^{-3}$  с; время прохождения газового объема через калориметры соответственно для вариантов а и б  $7 \cdot 10^{-3}$  и  $10^{-2}$  с; длина разрядного столба 20–50 мм; напряжение и ток разряда соответственно 0,6–2 кВ и 0,02–0,1 А; давление в калориметрах 1,3–6,6 кПа. Регистрируемые параметры: ток и напряжение разряда, давления в калориметрах и в разрядной трубке. Для уменьшения погрешности измерений разность давлений  $P_2 - P_1$ , а также приращение давлений в полости калориметра б измерялись с помощью дифференциальных датчиков относительно поддерживаемых постоянными и равными первоначальному (до включения разряда) давлений; в качестве исследуемых газов использованы азот и воздух. Визуально канал разряда отшнурован от стенок разрядной трубки и имеет диаметр  $\approx 1,5$  мм, вольт-амперные характеристики имеют типичный для контрагированных разрядов падающий вид: при изменении тока от 0,03 до 0,1 А напряжение в разрядном промежутке меняется от 1500 до 1200 В (при расстоянии между электродами 50 мм, расходе газа  $G = 0,018$  г/с).

Условия работы калориметра а выбраны такими, что при подмешивании в качестве охлаждающего газа воздуха энергия колебаний молекул, возбужденных в разряде, не успевает релаксировать при столкновениях за время пролета газовым объемом камеры калориметра. И, наоборот, полностью дезактивируется при подмешивании углекислоты, что подтвердилось в экспериментах: результаты измерений выделяющейся в камере энергии  $\Delta H$  при давлениях в камере 1,3–4 кПа не зависели от величины

давлений. Рекомбинация атомов и передача энергии электронных состояний в тепло за время пролета не успевают пройти и, таким образом, калориметр регистрирует энергию поступательных, вращательных и колебательных степеней свободы молекул, прошедших через разряд.

В калориметре *б* при условиях

$$\frac{\tau_n V_T}{d} \alpha \gg 1, \quad \tau_n \gg \tau_d \quad (2)$$

( $V_T$  — тепловая скорость молекул при температуре стенки ( $T \approx 300$  К);  $d$  — диаметр трубки,  $\alpha$  — коэффициент аккомодации энергии возбужденных состояний атомов, молекул при столкновениях с поверхностью;

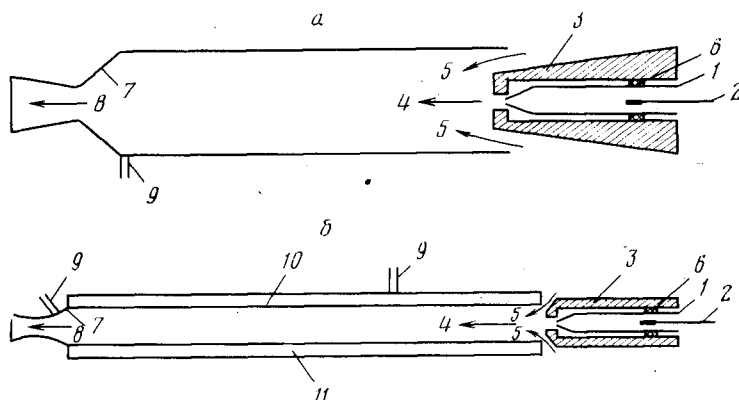


Рис. 1. Схема экспериментального устройства (варианты калориметров *а* и *б*): 1 — кварцевая трубка; 2 — анод; 3 — катод; 4 — струя газоразрядной плазмы; 5 — охлаждающий газ; 6 — уплотнение; 7 — мерное сопло; 8 — откачка газа; 9 — трассы измерения давлений; 10 — трубка из нержавеющей стали; 11 — воздушная полость

$\tau_n, \tau_d$  — соответственно времена пролета и диффузии частиц к стенкам) выделяется вся энергия газоразрядной струи, поступающей в калориметр. Наименьшим коэффициентом аккомодации обладает дезактивация на стенке энергии колебательно возбужденных состояний молекул  $N_2$  [3–5], поэтому давление и скорость газа в трубке калориметра *б* выбраны такими, чтобы условия (2) выполнялись для колебаний молекул  $N_2$ . Если давление перед мерным соплом выбрано меньшим, чем 1,3 кПа, то оно остается неизменным при включении разряда, а показания калориметра одинаковыми как при использовании в качестве охлаждающего газа воздуха, так и углекислоты, т. е. в этом случае вся энергия  $W$ , поступающая в калориметр вместе с газоразрядной плазмой, выделяется в калориметре. Кроме того, в опытах, в которых разрядная трубка вдвигалась непосредственно в полость калориметра *б*, и катодом являлась внутренняя трубка калориметра, установлено, что в калориметре выделяется практически вся (с точностью до погрешностей измерений  $\delta W/W \approx 5\%$ ) подводимая к разряду энергия, т. е. потери энергии за счет теплоотвода вдоль кварцевой трубки невелики.

Для определения доли энергии электрического разряда, выносимой газом из столба разряда, необходимо выделить ту часть энергии, которая передается газу в приэлектродных зонах. Результаты экспериментов, проведенных при минимальном зазоре  $\approx 1$  мм между электродами, приведены на рис. 2. В этом случае измерения полной энергии  $H_e$ , выделяющейся в калориметрах *а* и *б*, независимо от давлений и токов, приводят к практически одинаковым результатам: энергия, накапливаемая в газе, составляет 8–11% от подводимой в приэлектродных зонах электрической энергии, причем большая часть энергии передается газу в виде тепла. Падения напряжения  $U_e$  в приэлектродных областях при изменении тока  $I$  от 0,03 до 0,1 А меняются незначительно: для азота и воздуха в пределах 350–360 В, для углекислого газа 410–430 В.

На рис. 3 приведены зависимости величин энергии, выделяющейся в калориметрах, от энергии  $(U-U_0)I$ , подводимой к газу в столбе разряда. Величина  $\Delta H$ , равная разности результатов измерений калориметром *a* при охлаждении струи углекислым газом и воздухом, может быть

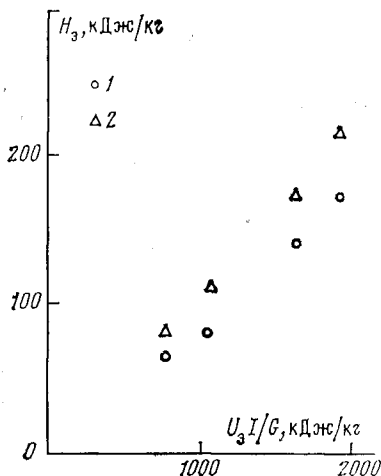


Рис. 2. Энергия  $H_3$ , передаваемая потоку азота в приэлектродных зонах, в зависимости от подводимой мощности ( $G=0,018$  г/с, охлаждающий газ — воздух): 1 — результаты измерений калориметром *a*; 2 — результаты измерений калориметром *б*

$E/N$  меняется незначительно. При значениях  $E/N \geq 6 \cdot 10^{-16}$  энергия, передаваемая электронами непосредственно во вращательные и поступательные степени свободы, мала [6]. Тот факт, что в струе газа значительная

идентифицирована как энергия, заключенная в колебательных степенях свободы молекул. Суммарная энергия, передаваемая в колебательные, поступательные и вращательные степени свободы молекул, составляет для азота 0,5–0,6 от подводимой к столбу разряда электрической энергии. Это соответствует теоретическим [6] значениям  $E/N = 6 \cdot 10^{-16} - 8 \cdot 10^{-16}$  В·см<sup>2</sup> в столбе разряда (в предположении, что  $E/N$  вдоль столба разряда не меняется). Параметр  $E/N$  связан с концентрацией электронов  $n_e$  соотношением

$$k_r (E/N) N = \beta n_e - \frac{1}{n_e} \text{div} (D_a \text{grad} n_e + n_e u), \quad (3)$$

где  $k_r$ ,  $\beta$ ,  $D_a$  — соответственно коэффициенты ионизации, рекомбинации и амбиполярной диффузии электронов;  $u$  — скорость потока. Величина  $k_r$  резко зависит от параметра  $E/N$  [6, 7], а так как правая часть (3) для заданного тока зависит главным образом от диаметра столба, слабо изменяющегося по его длине, то можно предположить, что вдоль столба разряда

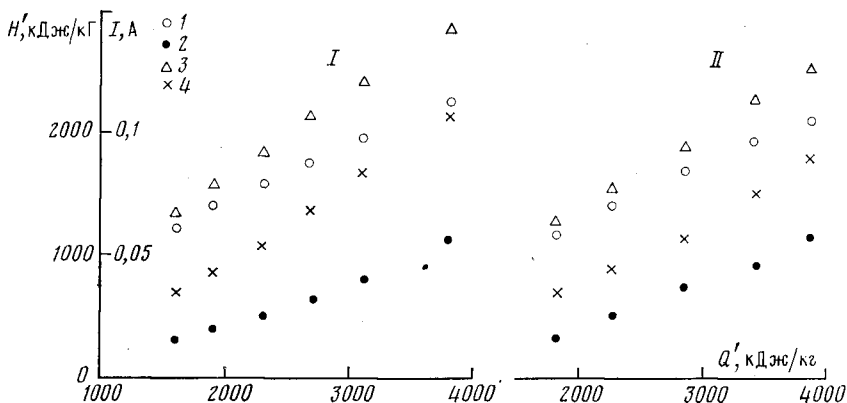


Рис. 3. Энергия, выделяющаяся в калориметрах, и ток разряда в зависимости от энергии, подводимой к газу ( $G=0,018$  г/см,  $H'=H-H_0$ ,  $Q'=(U-U_0)I/G$ ): I — разряд в азоте; II — в воздухе; 1, 2 — измерение калориметром *a*; 3 — *б*; 1, 3 — охлаждающий газ — углекислота; 2 — воздух; 4 — ток разряда

часть энергии (сравнимая с  $\Delta H$ ) содержится в виде тепла, может быть объяснен релаксацией энергии с верхних колебательных уровней  $V$ , для которых скорость  $V-T$ -релаксации сравнивается со скоростями  $V-V$ -обмена [8]. С увеличением вклада энергии величина  $\Delta H$  достигает насыщения (рис. 3), однако максимальные значения  $\Delta H$ , полученные в опытах

с различными межэлектродными расстояниями и давлениями в разрядной трубке, не превышали 1200 кДж/кг.

Наличие предельных значений  $\Delta H$  свидетельствует, по-видимому, о том, что при движении газа в столбе разряда после достижения определенных значений энергии колебаний ( $\epsilon_v \approx 0,3-0,4$  эВ/молекулу) скорость ее дезактивации резко возрастает, и рост  $\epsilon_v$  в столбе прекращается. В окружающем же газе увеличение энергии колебаний продолжается за счет ее диффузии из столба разряда.

Разность энергий, измеренных калориметрами *a* и *b*, свидетельствует о наличии в газоразрядной струе диссоциированных или метастабильных электронно-возбужденных частиц, однако максимальная степень диссоциации в азоте, оцененная по результатам измерения разности энергий, не превышает 1,5–2%. Значительная часть энергии в разряде (15–20%), как следует из рис. 3, уносится неравновесным излучением (тепловые потери к стенкам, как указывалось выше, незначительны).

Таким образом, из результатов проведенных исследований можно сделать вывод, что тлеющий разряд с большой плотностью тока, продольно обдуваемый потоком газа, может служить средством получения высокоэнергетических неравновесных потоков газа.

Москва

Поступила в редакцию  
24.VII.1981

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Абрамович Г. Н.* Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1969.
2. *Бушмин А. С., Дмитриев Л. М.* Калориметрический метод исследования взаимодействия продуктов газоразрядной плазмы с поверхностями.— ТВТ, 1977, т. 15, № 1, с. 24.
3. *Лосев С. А.* Газодинамические лазеры. М.: Наука, 1977, с. 123.
4. *Жестков Б. Е., Книпель А. Я.* Взаимодействие диссоциированного потока азота с металлическими поверхностями.— Уч. зап. ЦАГИ, 1979, т. 10, № 6, с. 37.
5. *Каминский М. Н.* Атомные и ионные столкновения на поверхности металла. М.: Мир, 1967.
6. *Александров Н. Л., Кончаков А. М., Сон Э. Е.* Функция распределения электронов и кинетические коэффициенты азотной плазмы. I. Невозбужденные молекулы.— Физика плазмы, 1978, т. 4, № 1, с. 169.
7. *Полак Л. С., Сергеев П. А., Словецкий Д. И.* Механизм ионизации азота в тлеющем разряде.— ТВТ, 1977, т. 15, № 1, с. 15.
8. *Мамедов Ш. С.* Методы колебательной кинетики и их приложения к молекулярным лазерам и лазерной химии.— В кн.: Молекулярная кинетика, молекулярные лазеры и лазерохимия; Тр. ФИАН, 1979, т. 107, с. 3.