

УДК 621.521

# Газодинамические аспекты работы криовакуумного насоса в вязкостном режиме течения газа

Д-р техн. наук **В. И. ИВАНОВ**

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет ИТМО

Институт холода и биотехнологий

191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

**When a cryovacuum pump is working in a viscous mode a directional movement of gas towards a cryopanel is observed. An offered calculation procedure allows to determine a velocity of pumped gas flow in front of the cryopanel depending on its capture coefficient and then to calculate a velocity of pumping.**

**Keywords:** cryovacuum pump, a molecule of gas, liquid nitrogen, pumping speed.

**Ключевые слова:** криовакуумный насос, молекула газа, жидкий азот, скорость откачки.

Криогенные вакуумные насосы заливного и проточного типа, обладающие уникальными достоинствами, находят широкое применение для создания высокого и сверхвысокого вакуума. Отсутствие движущихся частей в этих насосах делает их весьма простыми по устройству и надежными в работе. Они позволяют создавать «чистый вакуум», не загрязняя откачиваемый объект рабочим веществом (маслом, ртутью, титаном и т. п.). Кроме того, крионасосы при работе не создают электрических и магнитных полей и не производят шума и вибрации. Криопанели насосов можно встраивать непосредственно в откачиваемый объект, обеспечивая высокие скорости откачки. Все это позволяет криовакуумным насосам быстро завоевывать все новые сферы применения и не только в высоковакуумных системах, но и в установках, где требуется средний и даже низкий вакуум, например, в аэродинамических трубах разреженного газа, в системах откачки химических лазеров и т. д.

Расчет откачных характеристик высоковакуумных крионасосов, работающих в молекулярном режиме течения газа, рассмотрен в литературе достаточно широко, тогда как вязкостный режим освещен недостаточно.

При откачке газа криовакуумным насосом в вязкостном режиме максимально возможная скорость откачки зависит не только от теплового движения молекул, но и от газодинамического разгона его в направлении криопанели. При коэффициенте захвата молекул газа криопанелью  $\alpha = 1$ , ее можно рассматривать как выходное отверстие звукового сопла. Тогда непосредственно перед криопанелью поток газа достигает местной скорости звука [1]

$$a_1 = \sqrt{\frac{2k}{k+1} RT_0}, \quad (1)$$

где  $k$  — показатель адиабаты;

$R$  — газовая постоянная;

$T_0$  — температура торможения.

Плотность газа перед криопанелью соответственно будет равна

$$\rho_1 = \rho_0 \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{1-k}}, \quad (2)$$

где  $\rho_0$  — плотность неподвижного газа вдали от криопанели.

В реальной ситуации, когда не все молекулы газа, попадающие на криопанель, захватываются ею, коэффициент захвата  $\alpha < 1$ . В результате этого плотность газа перед криопанелью увеличивается до значения  $\rho_x$ . Можно предположить, что коэффициент захвата  $\alpha$ , численные значения которого приведены в [2], связан с реальной плотностью газа перед криопанелью соотношением

$$\alpha = \frac{\rho_0 - \rho_x}{\rho_0 - \rho_1}. \quad (3)$$

Из этого уравнения и уравнения (2) следует

$$\frac{\rho_x}{\rho_0} = 1 - \alpha \left[ 1 - \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{1-k}} \right]. \quad (4)$$

Исходя из соотношения для идеальной адиабаты

$$\frac{p_x}{p_0} = \left( \frac{\rho_x}{\rho_0} \right)^k,$$

можно также записать зависимость от  $\alpha$  отношения статического давления в потоке непосредственно перед криопанелью  $p_x$  к давлению полностью заторможенного газа  $p_0$ , т. е. к давлению в камере вдали от криопанели

$$\frac{p_x}{p_0} = \left\{ 1 - \alpha \left[ 1 - \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{1-k}} \right] \right\}^k. \quad (5)$$

Поскольку при  $\alpha < 1$  скорость потока, набегающего на криопанель, всегда будет меньше местной скорости звука, то в расчетах удобно пользоваться коэффициентом скорости  $\beta$ , который можно выразить через найденное выше отношение давлений [1]

$$\beta = \sqrt{\frac{k+1}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{p_x}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad (6)$$

или с учетом выражения (5)

$$\beta = \sqrt{\frac{k+1}{k-1} \left\{ 1 - \left[ 1 - \alpha \left[ 1 - \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{1-k}} \right] \right]^{k-1} \right\}}. \quad (7)$$

Определив коэффициент скорости для заданного значения коэффициента захвата  $\alpha$ , можно найти скорость потока, набегающего на криопанель

$$w_1 = \beta a_1 = \beta \sqrt{\frac{2k}{k+1} RT_0}. \quad (8)$$

Соответственно, зная скорость потока  $w_1$  нетрудно найти массовую скорость откачки  $G$  при площади поверхности криопанели  $F$

$$G = \frac{p_0 F}{\sqrt{T_0}} \beta \left( 1 - \frac{k-1}{k+1} \beta^2 \right)^{\frac{1}{k-1}} \cdot \sqrt{\frac{2k}{R(k+1)}} \quad (9)$$

и объемную скорость откачки объекта

$$S = F \beta \sqrt{\frac{2k}{k+1} RT_0} \cdot \left( 1 - \frac{k-1}{k+1} \beta^2 \right)^{\frac{1}{k-1}}. \quad (10)$$

Коэффициент захвата молекул паров воды на криопанели, охлаждаемой жидким азотом, равен единице [3], поэтому можно предположить, что в вязкостном режиме поток пара перед криопанелью достигнет критической скорости звука. При температуре паров воды 293 К она равна 392 м/с и соответственно удельная скорость откачки, отнесенная к параметрам газа, имеющим место непосредственно перед криопанелью, должна быть  $392 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ . Отнеся скорость откачки к параметрам состояния газа на удалении от кри-

опанели, получим  $247 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ , что практически совпадает с результатом расчетов по уравнению (10)  $S = 245,5 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ . Эксперименты по откачке паров воды в вязкостном режиме дали аналогичный результат  $245 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ , что подтверждает справедливость изложенного выше подхода [4]. Также становится очевидным, что при переходе от молекулярного режима к вязкостному скорость откачки возрастает, поскольку в первом случае она определяется только скоростью теплового движения молекул газа, а во втором еще и скоростью сформировавшегося потока газа в направлении к криопанели.

Таким образом, используя изложенную выше методику, можно для вязкостного режима течения газа определить изменение скорости откачки камеры, в которой размещена криопанель, в зависимости от коэффициента захвата молекул газа криопанелью.

### Список литературы

1. *Абрамович Г. Н.* Прикладная газовая динамика. — М.: Наука, 1969.
2. Справочник по физико-техническим основам криогеники/Под ред. М. П. Малкова. — М.: Энергоатомиздат, 1985.
3. *Brown R. F., Wang E. S. V.* Capture coefficients of gases at 77 K // *Adv. in cryogenic engineering*. 1965. Vol. 10.
4. *Bland M. E.* The cryopumping of water vapour in the continuum pressure region // *Cryogenics*. 1975. Vol. 15. N 11.