

УДК 621.51

## Работа высоковакуумного криосорбционного насоса в условиях охлаждения

**В.О. Бевза**

*Студент кафедры «Вакуумная и компрессорная техника»*

*МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия*

*Научный руководитель: Исаев А.В., к.т.н., доцент кафедры «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия*

МГТУ им. Н.Э. Баумана

[vladb90@mail.ru](mailto:vladb90@mail.ru)

Нестационарный режим работы адсорбционного насоса начинается в момент подачи криогенной жидкости и заканчивается после стабилизации температуры адсорбента [1,2,3]. Работа некоторых криосорбционных устройств, как например криогенных трубопроводов, часто осуществляется в нестационарном режиме [3]. Кроме того от интенсивности протекания нестационарных процессов зависит время выхода адсорбционного насоса на режим. Низкая теплопроводность адсорбентов, особенно в условиях низких давлений и температур, приводит к тому, что продолжительность нестационарного режима затягивается на многие часы [8]. Поэтому исследование этих режимов является важной задачей, решение которой позволит найти интенсификации нестационарных процессов.

Решим задачу охлаждения адсорбента в плоских криоадсорбционных кассетах. Учитывая, что толщина слоя адсорбента на порядок ниже двух других измерений кассеты, слой адсорбента можно рассматривать как неограниченную плоскую стенку. При подаче криогенной жидкости температуры криогенной панели и экрана стабилизируются в течении нескольких минут. Поэтому задача сводится к охлаждению неограниченной плоской стенки, на границе которой поддерживаются заданные температуры –  $T_c$  и  $T_s$ , а начальная температура постоянна  $T_0 = \text{const}$ , т.е. согласно рис.1

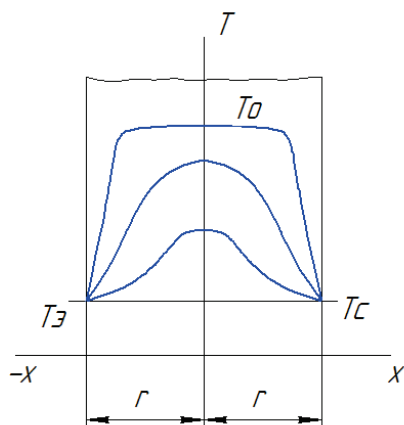


Рис. 1. График распределения температур

$T_{(0;t)}=T_c$ ;  $T_{(h; t)}=T_3$ - граничные условия

$T_{(0;z)}=T_0$ -начально условие

Решение этой задачи при  $\lambda = \text{const}$ ,  $T_{\text{п}}=T_3$  имеет вид[9]:

$$T(x, \tau) = \frac{T(x, \tau) - T_c}{T_0 - T_c} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\mu n} (-1)^{n+1} \cos \mu n \frac{x}{R} \exp(-\mu n^2 F_0) \quad (1)$$

где  $\mu n = (2n-1)\pi/2$

Будем считать, что в силу небольших количеств поглощенного газа, адсорбция подчиняется уравнению Генри[4,5]

$$V_{\text{уд}} = B \cdot p \cdot e^{Q_{\text{ад}}/RT} \quad (2)$$

где  $V_{\text{уд}}$ - удельная ёмкость адсорбента,  $\text{м}^3 \text{Па} \backslash \text{кг}$ ;

$B$ - постоянная адсорбции,  $\text{кг} \backslash \text{м}^3$ ;

$P$ - давление над поверхностью адсорбента,  $\text{Па}$ ;

$Q_{\text{ад}}$ - теплота адсорбции,  $\text{Дж} \backslash \text{моль}$ ;

$R$ - универсальная газовая постоянная,  $\text{Дж} \cdot \text{моль} \backslash \text{К}$ ;

$T$ - температура адсорбента,  $\text{К}$ .

В каждый момент времени в слое адсорбента будет поле распределения температур, определяемое уравнением (1). Для определения массы газа, содержащейся в адсорбенте в данный момент времени, нужно проинтегрировать уравнение (2) по всему объёму адсорбента[6,7]:

$$G = \rho \cdot l \cdot b \cdot B \cdot p \int_{-r}^{+r} e^{Q_{\text{ад}}/RT(x, \tau)} dx; \quad (3)$$

Масса газа, поглощенного из камеры, будет равна разности этой величины и массы газа, содержащегося в адсорбенте в начальный момент времени, т.е. :

$$V_k(p_0 - p) = \rho \cdot l \cdot b \cdot B \cdot p \int_{-r}^{+r} e^{Q_{ad}/RT(x,\tau)} dx - \rho \cdot l \cdot b \cdot 2r \cdot B \cdot p_0 \cdot e^{Q_{ad}/RT_0} \quad (4)$$

где  $\rho$ - плотность засыпки адсорбента, кг/м<sup>3</sup>;

$l$  и  $b$ - длина и ширина криоадсорбционной панели.

Из уравнения (4) выразим  $p$ :

$$p(\tau) = \frac{V_k p_0 + \rho \cdot l \cdot b \cdot 2r \cdot B \cdot p_0 \cdot e^{Q_{ad}/RT_0}}{V_k + \rho \cdot l \cdot b \cdot B \cdot p \int_{-r}^{+r} e^{Q_{ad}/RT(x,\tau)} dx} \quad (5)$$

Можно упростить задачу, если использовать среднюю температуру слоя адсорбента в каждый момент времени[7]:

$$\text{При малых } F_0 < 0.1 \quad \langle \theta \rangle = 1 - 2\sqrt{\frac{F_0}{\pi}} \quad [10]. \quad (6)$$

$$\text{При больших } F_0 > 0.1 \quad \langle \theta \rangle = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2}{4} F_0\right) \cdot [10] \quad (6)$$

$$\text{где } \langle \theta \rangle = \frac{\langle T_\tau \rangle - T_c}{T_0 - T_c} \quad (7).$$

Поэтому для малых  $F_0$  будем иметь:

$$\frac{\langle T \rangle - T_c}{T_0 - T_c} = 1 - 2\sqrt{\frac{F_0}{\pi}}$$

Отсюда выразим  $\langle T \rangle$ :

$$\langle T \rangle = (T_0 - T_c) \left(1 - 2\sqrt{\frac{F_0}{\pi}}\right) + T_c = (T_0 - T_c) \left(1 - 2\sqrt{\frac{a\tau}{r^2 \pi}}\right) + T_c \quad (8)$$

Для больших  $F_0$  получим:

$$\langle T_\tau \rangle = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2}{4} F_0\right) (T_0 - T_c) + T_c \quad (9)$$

Подставляя в (5) вместо  $T(x,\tau)$  выражение для  $\langle T_\tau \rangle$  из (8) и (9) получим:

Для малых  $F_0 < 0.1$

$$p(\tau) = \frac{V_k p_0 + \rho \cdot l \cdot b \cdot 2r \cdot B \cdot p_0 \cdot e^{Q_{ad}/RT_0}}{V_k + \rho \cdot l \cdot b \cdot 2r \cdot B \cdot p_0 \cdot e^{\frac{Q_{ad}}{R((T_0 - T_c)(1 - 2\sqrt{\frac{a\tau}{r^2 \pi}}) + T_c)}}} \quad (10)$$

Большие  $F_0 > 1$

$$p(\tau) = \frac{V_k p_0 + \rho \cdot l \cdot b \cdot 2r \cdot B \cdot p_0 \cdot e^{Q_{ad}/RT_0}}{V_k + \rho \cdot l \cdot b \cdot 2r \cdot B_1 \cdot p_0 \cdot e^{\frac{Q_{ad}}{R} \left( \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 a \tau}{4 r^2}\right) (T_0 - T_c) + T_c \right)}} \quad (11)$$

В нашей работе рассмотрим процесс откачки различных газов воздушной смеси криоадсорбционным насосом. Приведена схема насоса (рис.2). [11]

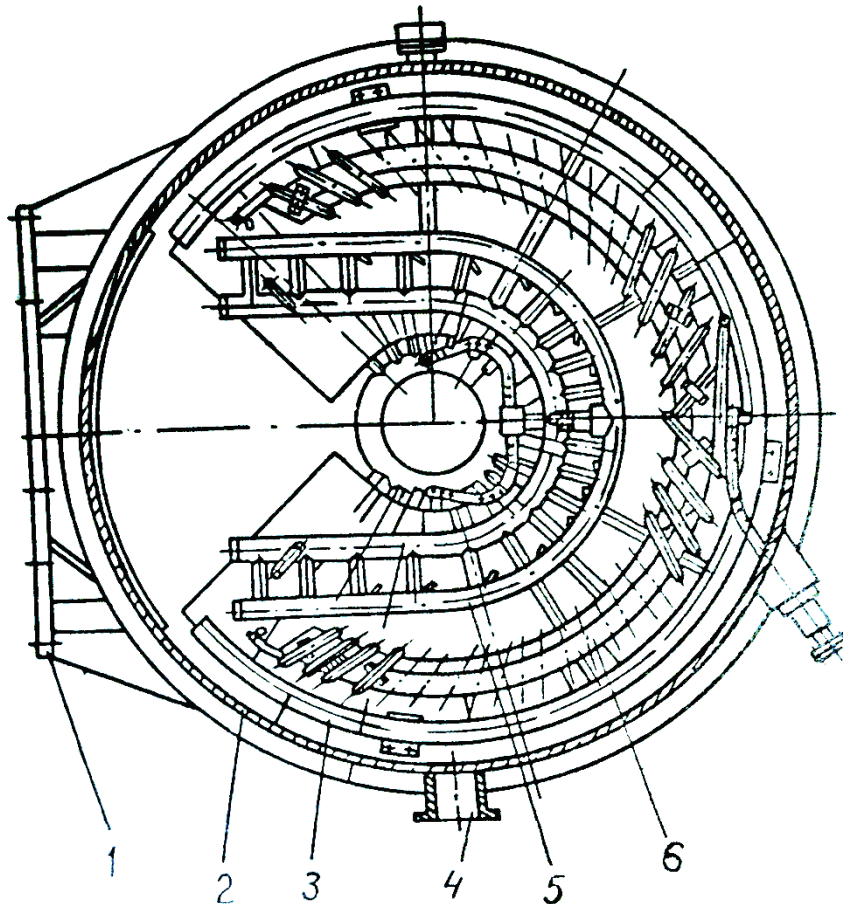


Рис. 2. Поперечный разрез насоса:

1 – входной патрубок; 2 – корпус; 3 – внешний азотный экран; 4 - патрубок подключения внешней системы вакууммирования; 5 – внутренний азотный экран; 6 – гелиевый контур

Нас не интересует процесс откачки при малых промежутках времени, поэтому мы будем рассматривать результаты только при  $t > 0,75$  часа. Объем насоса  $V_k = 0.95 \text{ м}^3$ , плотность адсорбента  $\rho = 600 \text{ кг/м}^3$ , коэффициент теплопроводности  $a = 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2/\text{час}$ ,  $r = 0.15 \text{ м}$ , температура до подачи криожидкости  $T_0 = 293 \text{ К}$ . В качестве криоагента используется жидкий гелий. Поэтому принимаем температуру в конце процесса охлаждения  $T_c = 20 \text{ К}$ .

В первом эксперименте рассмотрим процесс откачки азота при заданном давлении  $P_0=78$  Па.

Теплота адсорбции для азота  $Q_{ад}=12500$  Дж\моль, постоянная Генри  $B= 5 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>\кг. Результаты расчётов представлены на рис. 3.

Во втором эксперименте рабочий газ- кислород при заданном давлении  $P_0=21$  Па. Теплота адсорбции для кислорода  $Q_{ад}=9630$  Дж\моль, постоянная Генри  $B= 2.3 \cdot 10^{-2}$  м<sup>3</sup>\кг. Результаты расчётов представлены на рис. 4.

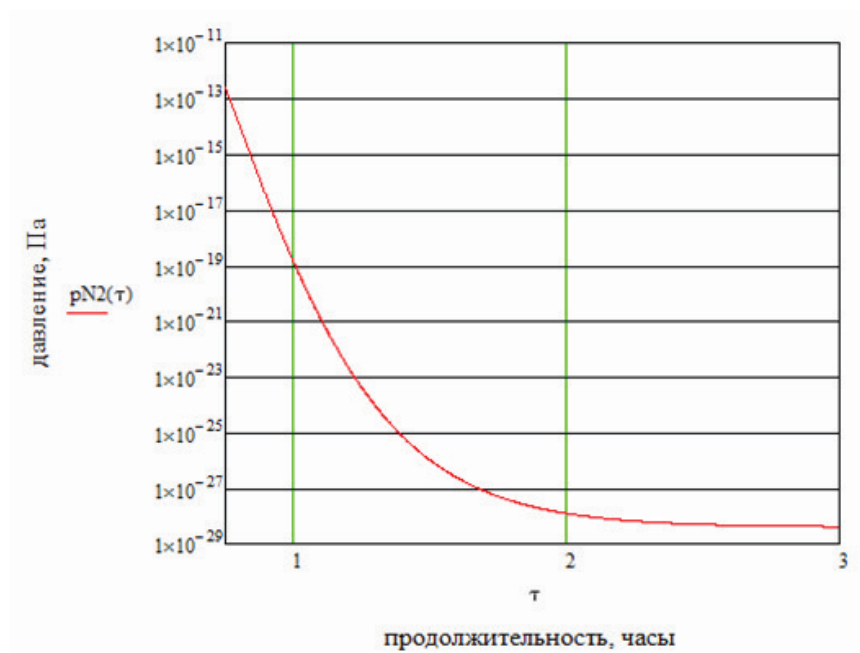


Рис. 3. График изменения давления по времени

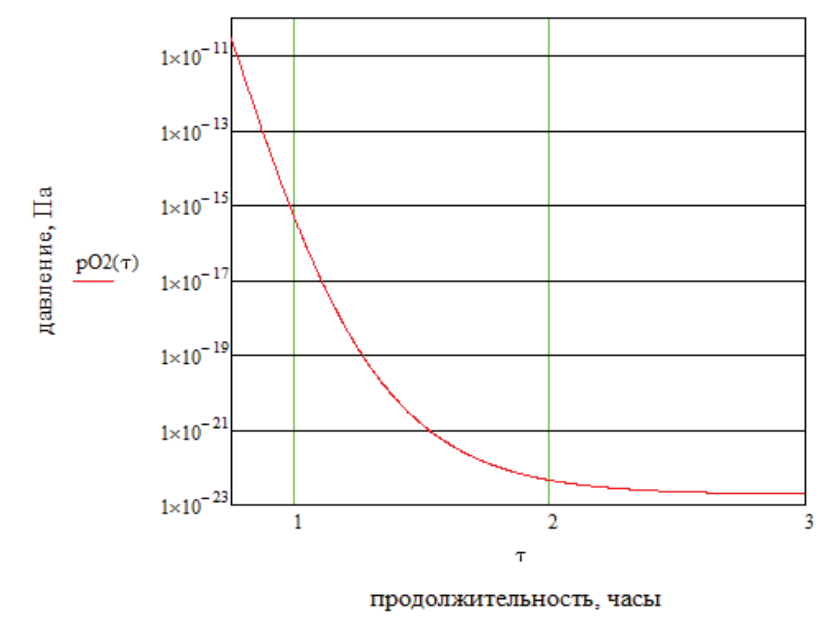


Рис. 4. График изменения давления по времени

Третий эксперимент проведём с аргеном при заданном давлении  $P_0=1$  Па.

Теплота адсорбции для аргона  $Q_{ад}=9630$  Дж\моль, постоянная Генри  $V=1.4 \cdot 10^{-2}$  м<sup>3</sup>\кг. Результаты расчётов представлены на рис. 5.

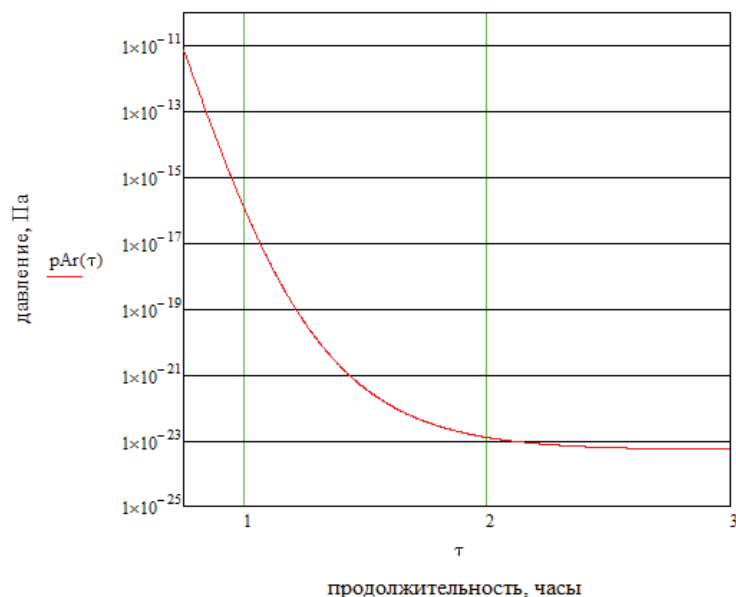


Рис. 5. График изменения давления по времени

Четвертый эксперимент проведём с водородом при заданном давлении  $P_{1H_2}=1$  Па и  $P_{2H_2}=10$  Па и  $P_{3H_2}=100$  Па.

Теплота адсорбции для водорода  $Q_{ад}=5000$  Дж\моль, постоянная Генри  $V=2.5 \cdot 10^{-1}$  м<sup>3</sup>\кг. Результаты расчётов представлены на рис. 6.

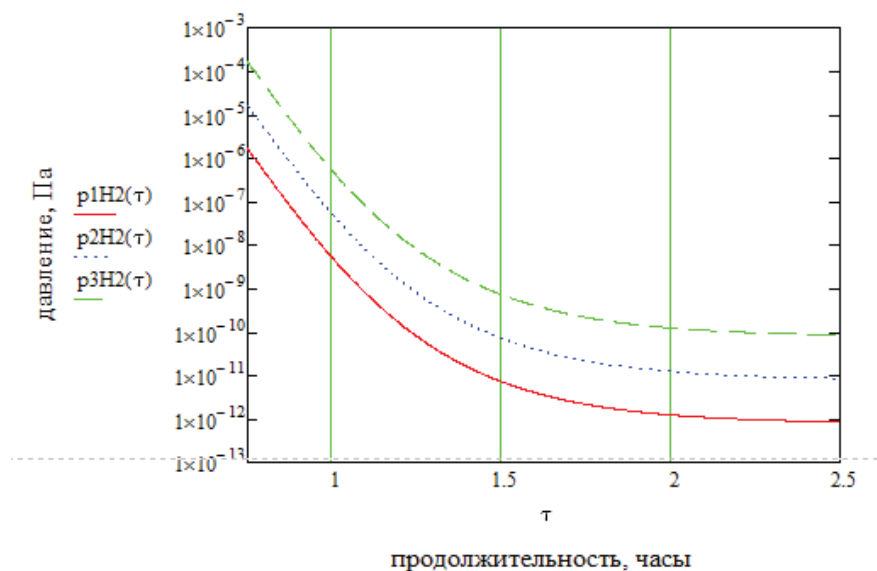


Рис. 6. График изменения давления по времени

Для проведения экспериментов были выбраны именно эти газы, так как они являются основными составляющими атмосферы. водорода.

### Список литературы

1. Валеев Р.Г., Бельтюков А.Н., Ветошкин В.М., Сурнин Д.В., Бакиева О.Р., Хохряков С.В. Модернизация камеры подготовки образцов установки Riber Las-2000 для сверхвысоковакуумного термического напыления тонких полупроводниковых пленок. Вакуумная техника и технология, том 20, №4 2010.
2. Исаев А.В., Куприянов В.И., Ермохин В.М., Кузнецов В.И., Юшин Н.П., Адсорбционные вакуумные насосы, М. ЦИНТИхимнефтемаш, 1980.
3. Беляков В.П., Криогенная техника и технология. – М.: Энергоиздат, 1982. – 272с.
4. Вакуумная техника. Справочник / К. Е. Демихов, Ю. В. Панфилов, Н. К. Никулин и др./ под. Общей редакцией К. Е. Демихова, Ю. В. Панфилова. 3-е издание переработанное и дополненное. М.: Машиностроение, 2009. 590с.
5. Исаев А.В., Куприянов В.И. Исследование взаимосвязи адсорбционных характеристик вакуумных цеолитов с температурой. Вопросы атомной науки и техники. Харьков: ХФТИ АН УССР, 1977, Вып. 2 (8). (Серия: Общая и ядерная физика).
6. Исаев А.В., Кряковкин В.П. К вопросу о расчете адсорбционных ловушек. 14 НТК Вакуумная наука и техника М.:МИЭМ 2007.

7. Исаев А.В., Куприянов В.И., Лунчев в.П. ,Чопов С.М. Малогабаритный криосорбционный насос. Вопросы атомной науки и техники. Харьков: ХФТИ АН УССР, 1979, Вып. I (7).
8. Исаев А.В., Куприянов В.И., Теплопроводность засыпки вакуумного цеолита. Вопросы атомной науки и техники. Харьков: ХФТИ АН УССР, 1979, Вып. 1 (7).
9. Теория тепломассообмена, под ред. А.И. Леонтьева, издание 2-е, Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997.
10. Лыков А.В. «Теория теплопроводности» изд. «Высшая школа» 1967г.
11. Сборник научных трудов под редакцией В.И. Сухова «Исследование процессов и конструкций в криогенных установках и системах» 1987 г., статья «Криоадсорбционный высоковакуумный насос» 127с.