

УДК 621.528.3

Специфика работы криoadсорбционного вакуумного насоса в импульсном режиме

Д-р техн. наук В. И. ИВАНОВ

vl_iv.9391@mail.ru

Университет ИТМО

191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

Процесс откачки криoadсорбционным насосом потока разреженного газа при давлениях выше 10^2 Па имеет определенную специфику. Лимитирующим фактором процесса является не скорость диффузии молекул откачиваемого газа в порах адсорбента, а разогрев последнего в результате выделения теплоты сорбции. Низкая теплопроводность слоя из гранул адсорбента снижает интенсивность отвода теплоты к криопанели. Изменение распределения температуры в слое адсорбента предложено находить методом конечных разностей путем временной итерации. Слой рассматривался как неограниченная пластина, термостатируемая с одной стороны криопанелью и имеющая внутренние распределенные источники теплоты. Показано, что определив темп роста градиента температуры в слое сорбента, можно предсказать скорость падения производительности криoadсорбционного вакуумного насоса. При этом учитывалось влияние изменяющихся во времени локальных температур на скорость откачки элементарных слоев и, соответственно, на мощность тепловыделений в них.

Ключевые слова: криовакуумный насос, адсорбция, скорость откачки, поле температур, теплота сорбции.

Cryoadsorption vacuum pump in pulse mode: operation peculiarities

D. Sc. V. I. IVANOV

vl_iv.9391@mail.ru

ITMO University

191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9

The article deals with the peculiarities of low-pressure gas at pressures above 10^2 Pa pumping process with cryoadsorption vacuum pump. Limiting factor of the process is not the rate of molecular diffusion in the adsorbent pores of the gas being pumped, but its warming due to sorption heat release. Low thermal conductivity of the adsorbent granules layer reduces the intensity of heat removal to cryopanel. Changing the temperature distribution in the adsorbent bed is offered to calculate by the finite difference method on the basis of time iteration. Layer is considered as unbounded plate being thermostated by cryopanel at one side hand and having internal distributed heat sources. It is shown that having determined temperature gradient in sorbent layer one can predict the rate of cryoadsorption vacuum pump performance drop. The effect of time-varying local temperatures on the elementary layers pumping speed and, in effect, on the heat release rate in them is taken into account.

Keywords: cryoadsorption vacuum pump, adsorption, pumping speed, temperature field, sorption heat.

Для работы ряда газодинамических устройств, например, химического кислородно-йодного лазера [1, 2] требуется вакуумная система способная за несколько секунд откачивать из камеры резонатора десятки молей буферного газа (азота) при давлении не превышающих

10^3 Па. Причем в таком устройстве рабочие периоды, когда происходит напуск газа, чередуются с перерывами, когда напуск газа перекрыт.

Учитывая большие расходы откачиваемого газа, из всех современных средств вакуумирования наиболее приемлемыми по массо-габаритным и энергетическим показателям могут оказаться криогенные и, в частности, криoadсорбционные насосы [3].

Криoadсорбционный вакуумный насос представляет собой криопанель с размещенным на ней слоем гранул адсорбента, которая помещена в камеру. Поток откачиваемого газа поступает в камеру циклично: напуски чередуются с перерывами. Напускаемый газ поглощается адсорбентом со скоростью S .

При поглощении газа выделяется теплота сорбции. Из-за низкой теплопроводности пористого слоя сорбента лишь незначительная часть выделяющейся теплоты успевает отводиться к криопанели, а основная ее часть идет на разогрев гранул сорбента [4, 5].

С повышением температуры адсорбента падает скорость откачки, следовательно, растет давление в камере [6–8]. Это следует из уравнения, полученного из материального баланса системы

$$p_k = p_n + (p_n - p_n) \exp\left(\frac{S}{V_k} \tau\right), \quad (1)$$

где p_n — давление перед началом напуска газа в камеру; p_k — давление в камере через время τ , в течение которого в камеру подавался постоянный по величине поток газа I ; S — скорость откачки криoadсорбционного насоса; V_k —

объем молекул; $p_n = \frac{I}{S}$ — предельное давление в камере.

Во время перерыва напуска газа в камеру ($I = 0$, $p_n = 0$) падение давления в ней определяется уравнением

$$p'_k = p'_n \exp\left(-\frac{S}{V_k} \tau_0\right), \quad (2)$$

где p'_k — давление в камере по завершению перерыва напуска газа; p'_n — давление в камере в начале перерыва, равное давлению, достигаемому в конце предшествующего напуска газа $p'_n = p_k$; τ_0 — продолжительность перерыва напуска газа в камеру.

Откачка при повторном включении напуска газа происходит уже на разогретом сорбенте и поэтому давление в камере растет быстрее, чем при предыдущем напуске.

Напуски газа могут повторяться до тех пор, пока давление в камере не достигнет максимально допустимого значения $p_{\max}$, при котором лазер уже не может функционировать.

В уравнениях (1), (2), величина S — интегральное значение скорости откачки для всего слоя адсорбента. Скорости откачки отдельных слоев S_i зависят от локальных значений температуры этих слоев. Дело в том, что в результате выделения теплоты сорбции, в слое адсорбента возникает градиент температуры, который нарастает с каждым новым напуском газа. Разная температура отдельных элементарных слоев сорбента является причиной разной локальной скорости откачки. По мере удаления от криопанели локальная скорость откачки падает, но одновременно уменьшается и локальное тепловыделение. Экспериментально было определено [6], что для цеолита NaX в интервале температур от 78 до 110 К

$$S_i = S_{0i} [1 - 0,028(T_i - T_{0i})], \quad (3)$$

где S_{0i} и T_{0i} — соответственно исходное значение скорости откачки азота и температура i -го слоя; T_i — текущая температура i -го слоя.

Таким образом, специфика криоадсорбционного насоса, работающего в таком режиме, состоит в том, что определяющим фактором является не диффузионный процесс перемещения молекул откачиваемого газа в порах сорбента [9, 10], а тепловые процессы.

Изменение распределения температуры в слое адсорбента можно найти методом конечных разностей путем временной итерации [9–11]. Для этого весь слой адсорбента разбивается на ряд элементарных слоев толщиной δ и задается начальное распределение температур в них. Принимается, что температура криопанели, на которой расположен слой сорбента, не изменяется $T_0 = \text{const}$ и на внешней границе слоя тепловой поток отсутствует.

В результате выделения теплоты сорбции температуры в узловых точках элементарных слоев адсорбента через интервал времени Δt приобретут новые значения, определяемые уравнением

$$T'_i = \text{Fo} \left(T_{i-1} + T_i \left(\frac{1}{\text{Fo}} - 2 \right) + T_{i+1} \right) + \frac{\text{Fo} \cdot w_i \delta^2}{\lambda}, \quad (4)$$

где $i = 1 \dots n$ — номер элементарного слоя; Fo — критерий Фурье; w_i — удельная мощность тепловыделения в i -ом слое; λ — теплопроводность слоя сорбента.

Повышение температуры отдельных элементарных слоев за время Δt приводит к снижению их скорости откачки, в соответствие с уравнением (3).

Новое значение скорости откачки всего насоса составит

$$S_N = \sum_{i=1}^n S_i. \quad (5)$$

Падение скорости откачки слоев сорбента влечет снижение удельной мощности тепловыделения w_i по элементарным слоям

$$w_i = \frac{G q_c}{V_c} \cdot \frac{S_i}{S_N}, \quad (6)$$

где G — массовый расход откачиваемого газа; q_c — теплота сорбции откачиваемого газа; V_c — объем сорбента на криопанели.

Таким образом, уравнение (4) дает возможность предопределить изменение температуры в любой узловой точке в пределах малого конечного интервала времени. Это, в свою очередь, позволяет найти изменение скорости откачки как отдельных элементарных слоев по уравнению (3), так и всего слоя адсорбента по уравнению (5). При этом учитывается изменение мощности тепловыделения по отдельным элементарным слоям (6). Однако, поскольку система дробится как во времени, так и в пространстве, то необходимо подобрать величины δ и Δt , которые не могут быть взяты независимо друг от друга в силу ограничений, накладываемых на критерий Фурье.

Из уравнения (4) видно, что выражение $\left(\frac{1}{\text{Fo}} - 2 \right)$ должно быть больше или равно нулю, т. е.

$$\text{Fo} \leq \frac{1}{2}, \quad (7)$$

и при выбранной величине δ выбор интервала времени Δt ограничивался условием

$$\Delta t \leq \frac{\delta^2}{2a'}, \quad (8)$$

где a — коэффициент температуропроводности материала слоя адсорбента.

Для повышения точности расчета температурного поля и обеспечения сходимости и устойчивости численного решения следует принять $\text{Fo} = \frac{1}{4}$. Тогда уравнение (4) примет вид:

$$T'_i = \frac{1}{4} (T_{i-1} + 2T_i + T_{i+1}) + \frac{w_i \delta^2}{4\lambda}, \quad (9)$$

$i = 1 \dots (n - 1)$,

а интервал времени:

$$\Delta t = \frac{\delta^2 \text{Fo}}{a} = \frac{0,25 \delta^2}{a}. \quad (10)$$

Так как на внешней поверхности слоя адсорбента (узловая точка n) нет теплового потока, то градиент температуры в ней равен нулю и, следовательно, значение температуры в точке n определяется уравнением

$$T'_n = \frac{1}{2} (T_{n-1} - T_n) + \frac{w_n \delta^2}{4\lambda}, \quad i = n. \quad (11)$$

Число шагов по времени задается в зависимости от продолжительности всего периода напуска газа в ка-

меру или расчет завершается досрочно, если давление в камере достигает максимально допустимого значения. В том случае, если период напуска газа завершился, но давление в камере $p_k < p_{\max}$, то начинается период охлаждения адсорбента, в течение которого газ в камеру не поступает. В течение этого периода за каждый шаг по времени температура отдельных слоев приобретает новые значения:

$$T_i'' = \frac{1}{4}(T_{i-1} + 2T_i + T_{i+1}), \quad i = 1 \dots (n-1); \quad (12)$$

$$T_n'' = \frac{1}{2}(T_{n-1} + T_n). \quad (13)$$

Снижение температуры отдельных элементарных слоев адсорбента повышает их скорость откачки и приводит к падению давления в камере согласно уравнению

$$p_k' = p_n' \exp\left(-\frac{S_N}{V} \Delta\tau_0\right), \quad (14)$$

где $\Delta\tau_0$ — шаг по времени в процессе охлаждения адсорбента.

После завершения всего периода охлаждения τ_0 циклы напуска газа с последующими перерывами повторяются до тех пор, пока давление в камере, при очередном напуске, не достигнет наперед заданного максимально допустимого значения $p_{\max}$.

Из изложенного следует, что увеличения числа последовательных включений лазера с криоадсорбционной системой откачки буферного газа можно достичь, применяя ряд методов:

- за счет повышения теплоемкости (следовательно, массы) адсорбента;
- путем уменьшения толщины слоя адсорбента, при сохранении массы, за счет размещения его на развитой (оребреной) поверхности;
- путем увеличения теплопроводности слоя адсорбента, добавляя в него высокотеплопроводные металлические включения (дробь, стружку и т. п.);
- комбинируя приведенные выше методы.

Список литературы

1. Патент РФ RU 2390892. Химический кислородно-йодный лазер с буферным газом. МПК H01S3122. 21.05.2008.
2. Патент РФ RU 2226622. Вакуумная криоадсорбционная система для химического кислородно-йодного лазера. 10.04.2004.
3. Tanaka H., Sumitoto H. Cryopump. Патент США 8261559, 11.09.2012.
4. Зобков П. Н., Шрамова А. Л., Иванов В. И. Определение эффективной теплопроводности цеолита NaX. // Известия СПбГУНиПТ. 2009. № 1. с. 56–57.

5. Burri F., Fertl M., Henneck B. Copper coated carbon fiber reinforced plastics for high and ultra high vacuum applications. // Vacuum, 2014, vol. 101, No 5, p. 67–81.
6. Зобков П. Н. Зависимость кинетики адсорбции от температуры. // Холодильная техника. 2008. с. 32–33.
7. Tzabar N., Grossman G. Analysis of an activated-carbon sorption compressor operating with gas mixtures. // Cryogenics, 2012. vol. 52, No 10, p. 491–499.
8. Исаев А. В., Очков А. А., Кряковкин В. П. К расчету суммарной поглотительной способности криоадсорбционных вакуумных насосов. // Альтернативная энергетика и экология. 2013. № 2. с. 28–34.
9. Шнейдер П. Инженерные проблемы теплопроводности. — М.: Изд-во иностранной литературы, 1960. 478 с.
10. Sharipov F., Graur I. A. Rarefied gas flow through a zigzag channel. // Vacuum. 2012. vol. 86. No11. p. 1778–1782.
11. Safaat Gharamaleki Y., Shams M. Numerical investigation of conductance of porous media in high vacuum systems. // Vacuum. 2011. vol. 86. No 3. p. 311–317.

References

1. Patent RU 2390892 Russian Federation. The chemical oxygen-iodine laser with buffer gas. MPK H01S3122. 21.05.2008. (in Russian)
2. Patent RU 2226622 Russian Federation. Vacuum cryoadsorption system for the chemical oxygen-iodine laser. 10.04.2004. (in Russian)
3. Tanaka H., Sumitoto H. Cryopump. Patent of the USA. 8261559, 11.09.2012.
4. Zobkov P. N., Shramova A. L., Ivanov V. I. Determination of effective heat conduction of NaX zeolite. *Izvestiya SPbGUNIPT*. 2009. No 1. p. 56–57. (in Russian)
5. Burri F., Fertl M., Henneck B. Copper coated carbon fiber reinforced plastics for high and ultra high vacuum applications. *Vacuum*, 2014, vol. 101, No 5, p. 67–81.
6. Zobkov P. N. Dependence of kinetics of adsorption on temperature. *Kholodil'naya tekhnika*. 2008. p. 32–33. (in Russian)
7. Tzabar N., Grossman G. Analysis of an activated-carbon sorption compressor operating with gas mixtures. *Cryogenics*, 2012. vol. 52, No 10, p. 491–499.
8. Isaev A. V., Ochkov A. A., Kryakovkin V. P. To calculation of summary absorbing ability of the cryoadsorption vacuum pumps. *Alternativnaya energetika i ekologiya*. 2013. No 2. p. 28–34. (in Russian)
9. Shneider P. Engineering problems of heat conduction. Moscow. 1960. 478 p. (in Russian)
10. Sharipov F., Graur I. A. Rarefied gas flow through a zigzag channel. *Vacuum*. 2012. vol. 86. No11. p. 1778–1782.
11. Safaat Gharamaleki Y., Shams M. Numerical investigation of conductance of porous media in high vacuum systems. *Vacuum*. 2011. vol. 86. No 3. p. 311–317.