

СУММАРНАЯ ПОГЛОТИТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ СФЕРИЧЕСКИХ КРИОАДСОРБЦИОННЫХ НАСОСОВ

А.А. Очков¹, А.В. Исаев¹, Р.О. Андреев¹, В.П. Кряковкин², Г.Т. Цакадзе¹

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
105005 Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5

Тел.: (916) 028-3753; e-mail: aochkov@bmstu.ru, zhenkong46@yandex.ru

²ЗАО «Научно-производственное предприятие Криосервис» («НПП Криосервис»)

143903 Балашиха Московской обл., ул. Пушкинская, д. 7, стр. 1

Тел.: (916) 905-5684; e-mail: kvp@cryoservice.ru

Заключение совета рецензентов: 19.11.15 Заключение совета экспертов: 22.11.15 Принято к публикации: 25.11.15

Целью работы является исследование влияния типа адсорбента и температуры адсорбции на поглотительную способность насоса. Использовались два метода: приближенный расчет по средней температуре и точный расчет путем интегрирования уравнения адсорбции по всему объему адсорбента. При этом исследования проводились при давлениях, соответствующих различным степеням вакуума. Соответственно, были получены аналитические зависимости относительной расчетной ошибки от температуры на периферии адсорбента для следующих условий: адсорбция различных газов для насосов на охлажденном и переохлажденном жидком азоте, для адсорбента с различными значениями постоянной пористой структуры при различных давлениях всасывания.

Ключевые слова: криосорбционный насос, вакуум, адсорбция, жидкий азот, давление, температура, относительная расчетная ошибка, пористая структура, поглотительная способность.

THE TOTAL ABSORPTION CAPACITY OF SPHERICAL CRYOSORPTION PUMPS

A.A. Ochkov¹, A.V. Isaev¹, R.O. Andreev¹, V.P. Kryakovkin², G.T. Tsakadze¹

¹N.E. Bauman Moscow State Technical University (MSTU)

5, 2-nd Baumanskaya str., Moscow, 105005, Russia

Tel.: (916) 028-3753; e-mail: aochkov@bmstu.ru, zhenkong46@yandex.ru

²Research and manufacturing corporation «Cryoservice» (Cryoservice corp.)

7/1 Pushkinskaya str., Balashikha, Moscow reg., 143903, Russia

Tel.: (916) 905-5684; e-mail: kvp@cryoservice.ru

Referred: 19.11.15 Expertise: 22.11.15 Accepted: 25.11.15

The aim of the study is to research influence of the type of adsorbent and the adsorption temperature to the adsorption capacity of the pump. Two methods were used: an approximate calculation of the average temperature and the accurate calculation by integration equation adsorption over the entire volume of the adsorbent. Research carried out at pressure corresponding to different degrees of vacuum. Accordingly were obtained analytical relative computational error – temperature in the periphery of the adsorbent dependence to the following conditions: adsorption of different gases for cooling liquid nitrogen pumps and overcooled liquid nitrogen pumps for the adsorbent with different values of the constant of the pore structure at different intake pressure.

Keywords: cryosorption pump, vacuum, adsorption, liquid nitrogen, pressure, temperature, relative computational error, pore structure, adsorption capacity.



Роман Олегович
Андреев
Roman O. Andreev

Сведения об авторе: магистр по направлению «технологические машины и оборудование», студент МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Образование: МГТУ им. Н.Э.Баумана (2017).

Область научных интересов: криогенно-вакуумная техника, пневмотранспорт, вакуумная тепловая изоляция.

Information about the author: master of technological machinery and equipment.

Education: N.E. Bauman MSTU (2017).

Research area: cryovacuum technical equipment, pneumatic transport, vacuum thermal insulation.



Георгий Тамазиевич
Цакадзе
Georgy T. Tsakadze

Сведения об авторе: магистр по направлению технологические машины и оборудование, студент МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Образование: МГТУ им. Н.Э. Баумана (2017 г.).

Область научных интересов: криогенно-вакуумная техника, пневмотранспорт, вакуумная тепловая изоляция.

Information about author: master of technological machinery and equipment.

Education: Bauman Moscow State Technical University (2017).

Research area: cryovacuum-technical equipment, pneumatic transport, vacuum thermal insulation.



Андрей Андреевич
Очков
Andrei A. Ochkov

Сведения об авторе: ассистент МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Образование: МГТУ им. Н.Э. Баумана (2013).

Область научных интересов: высоковакуумные механические насосы, высоковакуумные криоадсорбционные насосы, процессы оптимизации высоковакуумных механических насосов.

Публикации: более 10 научных работ и изобретений.

Information about author: the assistant of the N.E. Bauman Moscow State Technical University.

Education: N.E. Bauman Moscow State Technical University (2013).

Research area: high-vacuum mechanicals pumps, high-vacuum cryoadsorbptive pumps, optimization processes for high-vacuum mechanical pumps.

Publications: more than 10 scientific works and inventions.



Александр Вадимович
Исаев
Aleksandr V. Isaev

Сведения об авторе: канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Образование: МВТУ им. Н.Э. Баумана (1971).

Область научных интересов: криогенно-вакуумная техника, исследования процессов переноса при низкотемпературной адсорбции, разработка промышленных средств криоадсорбционной откачки и криоадсорбционных устройств теплоизоляционных полостей криогенного оборудования.

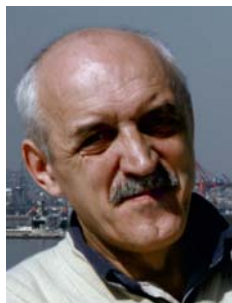
Публикации: более 100 научных работ и изобретений.

Information about author: Cand. Tech. Sci., the senior lecturer of the N.E. Bauman Moscow State Technical University.

Education: N.E. Bauman MSTU (1971).

Research area: cryovacuum technical equipment, research of processes of carry at adsorption, development of industrial means of cryoadsorption pumping and cryoadsorption devices of thermoinsulation cavities of the cryogenic equipment.

Publications: more than 100 scientific works and inventions.



Вячеслав Петрович
Кряковкин
Vyacheslav P.
Kryakovkin

Сведения об авторе: канд. техн. наук, зам. ген. директора ЗАО «НПП Криосервис».

Образование: Московский институт химического машиностроения (1973).

Область научных интересов: криогенно-вакуумная техника, исследования процессов переноса при низкотемпературной адсорбции, разработка промышленных средств криоадсорбционной откачки и криоадсорбционных устройств теплоизоляционных полостей криогенного оборудования.

Публикации: более 70 научных работ и изобретений.

Information about author: Cand. Tech. Sci., the assistant of the general director of Cryoservice corp.

Education: Moscow Institute of Chemical-Mechanical Engineering (1973).

Research area: cryovacuum-technical equipment, research of processes of carry at adsorption, development of industrial means of cryoadsorption pumping and cryoadsorption devices of thermoinsulation cavities of the cryogenic equipment.

Publications: more than 70 scientific works and inventions.

Введение

Сферические насосы имеют минимальные теплопритоки, поэтому хладагент, залитый во внутренний сферический сосуд, испаряется медленно и можно длительно эксплуатировать насос без дозаправки, то есть без обслуживающего персонала. Поэтому такими насосами могут оснащаться вакуумные установки для дегазации теплоизоляционной полости (ТИП) криогенного оборудования, а также установки повышенной чувствительности течеискания.

Насос представляет собой сферический сосуд для хладагента, на поверхности которого крепится адсорбент. Адсорбент защищается от теплопритоков сферическим экраном. Вся кассета и экраны располагаются по центру сферического корпуса. Для этой цели служит тонкостенная трубка из нержавеющей стали, на которой внутренний сосуд с экраном закреплены в центре корпуса. Эта же трубка служит для залива хладагента во внутренний сосуд [1, 2].

Таким образом, адсорбент представляет собой сферический слой, на границах которого поддерживаются постоянные температуры – на внутренней поверхности температура кипения хладагента в сосуде – T_1 , на внешней поверхности температура экрана – T_2 . Если принять, что в диапазоне температур T_1 – T_2 коэффициент теплопроводности засыпки адсорбента является величиной постоянной – λ , то поле распределения температуры по радиусу адсорбционного слоя будет иметь вид [3]:

$$T(r) = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{1/r_1 - 1/r_2} (1/r_1 - 1/r). \quad (1)$$

Теперь определим среднюю температуру в слое адсорбента:

$$\langle T \rangle = \frac{1}{(4\pi/3)(r_2^3 - r_1^3)} \int_{r_1}^{r_2} 4\pi r^2 T(r) dr = \frac{3}{r_2^3 - r_1^3} \times \left[\left(T_1 + \frac{T_2 - T_1}{(1/r_1 - 1/r_2)r_1} \right) \frac{r_2^3 - r_1^3}{3} - \frac{T_2 - T_1}{1/r_1 - 1/r_2} \frac{r_2^2 - r_1^2}{2} \right]. \quad (2)$$

Расчет суммарной поглотительной способности в области высокого вакуума

В области высокого вакуума адсорбция подчиняется уравнению типа Генри:

$$v_{уд} = BP e^{Q_{ад}/R(T)}, \quad (3)$$

где $v_{уд}$ – удельная емкость адсорбента, $\text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{кг}$; B – постоянная адсорбции, $\text{кг} / \text{м}^3$; P – рабочее давление, Па ; $Q_{ад}$ – теплота адсорбции, $\text{Дж} / \text{моль}$; R – универсальная газовая постоянная, $\text{Дж} / \text{моль} \cdot \text{К}$; $\langle T \rangle$ – температура адсорбента, К .

Применяют 2 метода: приближенный расчет по средней температуре и точный расчет путем интегрирования уравнения адсорбции по всему объему адсорбента.

Приближенный расчет по средней температуре

$$V_{\Sigma \text{ср}} = (4\pi/3)(r_2^3 - r_1^3) \rho B P e^{Q_{ад}/R\langle T \rangle}, \quad (4)$$

где ρ – плотность засыпки адсорбента.

Здесь вместо $\langle T \rangle$ подставляется ее значение из формулы (2).

Точный интегральный расчет

$$V_{\Sigma \text{инт}} = \int_{r_1}^{r_2} 4\pi r^2 B P \rho e^{Q_{ад}/R(T)} dr = 4\pi B P \rho \int_{r_1}^{r_2} r^2 e^{Q_{ад}/R(T)} dr, \quad (5)$$

где $T(r)$ – поле температуры в слое адсорбента (1).

Для сравнения результатов по этим методам определим величину относительной ошибки:

$$\sigma = 1 - V_{\Sigma \text{ср}} / V_{\Sigma \text{инт}}. \quad (6)$$

Подставим в (6) выражения входящих функций:

$$\sigma = 1 - \frac{(4/3)(r_2^3 - r_1^3) e^{Q_{ад}/R\langle T \rangle}}{4 \int_{r_1}^{r_2} r^2 e^{Q_{ад}/R(T)} dr}, \quad (7)$$

где $\langle T \rangle$ – средняя температура (2), а $T(r)$ по (1).

Таким образом, как это следует из (7), величина относительной ошибки расчетов зависит от следующих параметров: r_1 , r_2 , T_1 , T_2 , $Q_{ад}$. Исследуем фактор влияния этих параметров на величину относительной ошибки σ . Прежде всего рассмотрим насосы для среднего вакуума, где для охлаждения слоя адсорбента применяют жидкий азот [4, 5]. Таким образом, $T_1 = 77,8 \text{ К}$. В качестве откачиваемого газа рассмотрим азот, теплота адсорбции которого на активированном угле СКТ-4 и вакуумном цеолите СаЕН-4В составляет $Q_{ад} = 12500 \text{ Дж/моль}$. Толщина слоя адсорбента $0,025 \text{ м}$ для $r_1 = 0,06 \text{ м}$ и $r_2 = 0,085 \text{ м}$. Такие геометрические соотношения часто применяются при создании сферических криосорбционных насосов. Таким образом, остается один параметр T_2 , который и будем варьировать. Действительно, T_2 является переменной величиной, которая может меняться в достаточно широких пределах в зависимости от величины теплового потока, падающего на экран. Часть этого теплового потока проникает к поверхности адсорбента, приводя к росту T_2 . Учитывая очень низкую величину коэффициента теплопроводности засыпки адсорбента ($\sim 1 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$) [6], даже незначительный поток тепла может привести к большому перегреву. Эксперименты показывают, что T_2 может превышать T_1 на несколько десятков градусов. Подставляя значения фиксированных параметров в (7),

получим зависимость $\sigma = f(T_2)$ – рис. 1. На графике дополнительно представлены кривые еще и для других газов: для адсорбции кислорода – $Q_{ад} = 9900$ Дж/моль; для адсорбции аргона – $Q_{ад} = 9630$ Дж/моль; для адсорбции метана – $Q_{ад} = 16300$ Дж/моль; для адсорбции водорода – $Q_{ад} = 5000$ Дж/моль и для адсорбции гелия – $Q_{ад} = 585$ Дж/моль. Из графика следует, что с ростом температуры периферии адсорбционного слоя относительная ошибка монотонно возрастает, асимптотически приближаясь к единице. Однако темп подъема кривых различен и пропорционален теплоте адсорбции. Поэтому наибольшая ошибка в определении суммарной поглотительной способности по средней температуре наблюдается для метана, а минимальная – для гелия. Так, например, для CH_4 уже при $T_2 = 92$ К приближенное значение меньше точного в два раза, а при $T_2 = 110$ К интегральное значение превышает приближенное на один порядок величины. Для гелия величина относительной ошибки во всем приведенном диапазоне температур не превышает 0,3, что является вполне допустимым. Тогда как для адсорбции основных газов, составляющих воздуха, N_2 , O_2 , Ar и H_2 расчет по средней температуре ведет к большей ошибке и суммарная поглотительная способность в несколько раз занижается по сравнению со своим действительным значением.

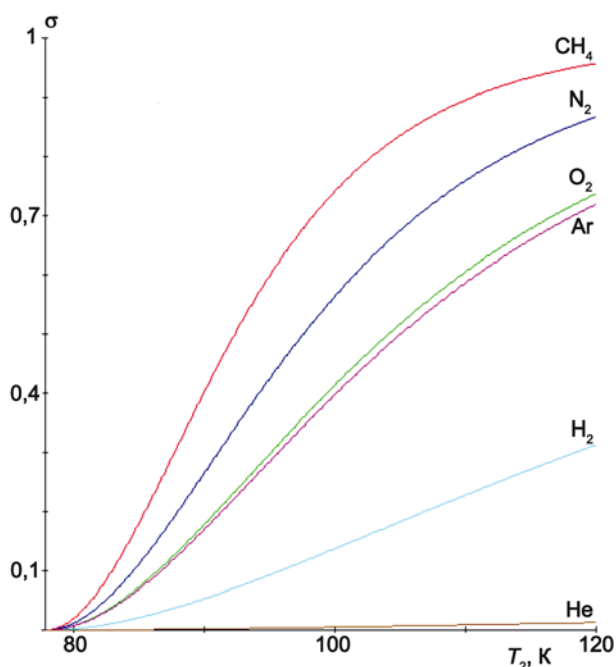


Рис. 1. Зависимость относительной расчетной ошибки от температуры на периферии адсорбента при адсорбции различных газов для насосов, охлаждаемых жидким азотом
Fig. 1. Dependence of the relative error estimated from the temperature at the periphery of the adsorbent in the adsorption of various gases for pumps, chilled with liquid nitrogen

Для обеспечения более глубокого вакуума необходимо охладить адсорбент до более низких температур. Для этих целей можно использовать, напри-

мер, жидкие неон или водород, однако, учитывая высокую стоимость этих хладагентов, эксплуатация таких насосов будет стоить значительно дороже. Поэтому можно предложить иное решение, основанное на использовании переохлажденного жидкого азота. Путем вакуумирования пространства над жидкостью можно понизить температуру жидкого азота с 77,8 К до 63 К, после чего жидкость начинает переходить в кристаллическую фазу [7, 8]. Величина относительной ошибки для насосов, работающих на переохлажденном жидком азоте ($T_1 = 63$ К), иллюстрируется графиком (рис. 2).

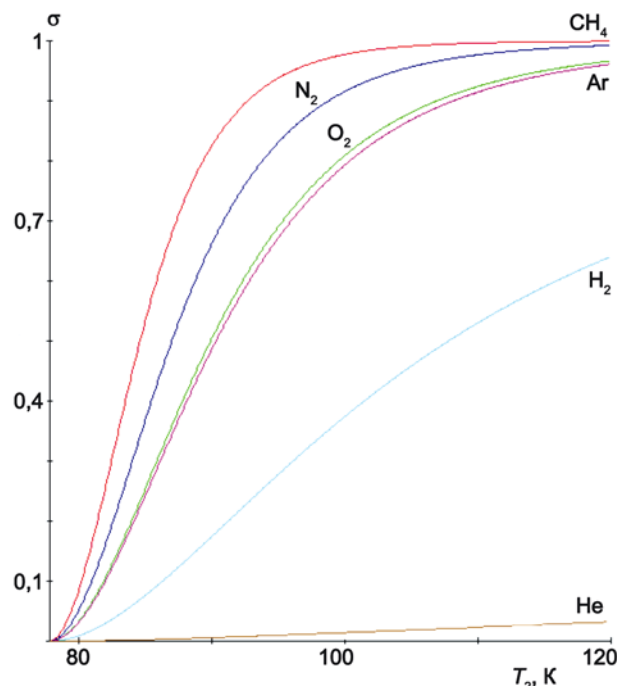


Рис. 2. Зависимость относительной расчетной ошибки от температуры на периферии адсорбента при адсорбции различных газов для насосов на переохлажденном жидком азоте
Fig. 2. Dependence of the relative error estimated from the temperature at the periphery of the adsorbent in the adsorption of various gases on the pump supercooled liquid nitrogen

Характер кривых сохраняется таким же, как и на графике рис. 2. Однако с ростом температуры на периферии адсорбционного слоя относительная ошибка возрастает быстрее, и при $T_2 = 120$ К для всех приведенных газов, кроме водорода и гелия, интегральное значение превосходит приближенное на порядок.

Расчет суммарной поглотительной способности в области низкого вакуума

В области низкого вакуума адсорбция подчиняется закономерности Дубинина-Радушкевича [2]:

$$v = \frac{w_0}{v^*} \exp \left[-A \frac{T^2}{\beta^2} \left(\lg \frac{P_s}{P} \right)^2 \right], \quad (8)$$

где w – удельный объем адсорбционного пространства, м³/кг; v^* – константа, определяемая типом адсорбента, Па⁻¹; A – константа пористой структуры, К⁻²; P_s – давление насыщенных паров адсорбата при температуре T , Па; P – рабочее давление над адсорбентом, Па; β – коэффициент аффинности.

Приближенный расчет по средней температуре

При расчете суммарной поглотительной способности по средней температуре адсорбента (2) получим:

$$V_{\Sigma \text{ср}} = \rho (4\pi/3) (r_2^3 - r_1^3) \frac{w_0}{v^*} \exp \left[-A \frac{\langle T \rangle^2}{\beta^2} \left(\lg \frac{P_s}{P} \right)^2 \right]. \quad (9)$$

Точный интегральный расчет

Для точного расчета будем проводить интегрирование по всему объему слоя адсорбента:

$$V_{\Sigma \text{инт}} = 4\pi \frac{w_0}{v^*} \rho \int_{r_1}^{r_2} r^2 \exp \left[-A \frac{T(r)^2}{\beta^2} \left(\lg \frac{P_s}{P} \right)^2 \right] dr. \quad (10)$$

В (10) $T(r)$ подставляется из (1), а P_s является функцией температуры адсорбента. В работе [9] для различных газов предлагаются следующие зависимости:

$$\begin{aligned} \lg P_s &= 7,17 - 326/T - \text{азот}; \\ \lg P_s &= 7,26 - 380/T - \text{аргон}; \\ \lg P_s &= 4,8 - 45/T + 0,02T - \text{водород}; \\ \lg P_s &= 7,16 - 377,2/T - \text{кислород}; \\ \lg P_s &= 7,15 - 465/T - \text{метан}. \end{aligned} \quad (11)$$

Подставляя значение P_s для азота из (11) и $T(r)$ в (10), получаем:

$$V_{\Sigma \text{инт}} = 4\pi \frac{w_0}{v^*} \rho \int_{r_1}^{r_2} r^2 \exp \left[-A \frac{\left\{ T_1 + \frac{T_2 - T_1}{1/r_1 - 1/r_2} \right\}^2 (1/r_1 - 1/r)^2}{\beta^2} \left(7,17 - \frac{326}{T_1 + \frac{T_2 - T_1}{1/r_1 - 1/r_2} (1/r_1 - 1/r)} - \lg P \right)^2 \right] dr. \quad (12)$$

Теперь можно записать выражение для относительной ошибки расчета при вычислении суммарной поглотительной способности по азоту:

$$\begin{aligned} \sigma = 1 - & \frac{\frac{r_2^3 - r_1^3}{3} \exp \left[-A \frac{3}{r_2^3 - r_1^3} \left\{ T_1 + \frac{T_2 - T_1}{(1/r_1 - 1/r_2)r_1} \right\} \frac{r_2^3 - r_1^3}{3} - \frac{T_2 - T_1}{(1/r_1 - 1/r_2)r_1} \frac{r_2^2 - r_1^2}{2} \right]}{\int_{r_1}^{r_2} r^2 \exp \left[-A \left\{ T_1 + \frac{T_2 - T_1}{1/r_1 - 1/r_2} \right\}^2 (1/r_1 - 1/r)^2 \left(7,17 - \frac{326}{T_1 + \frac{T_2 - T_1}{1/r_1 - 1/r_2} (1/r_1 - 1/r)} - \lg P \right)^2 \right] dr} \times \\ & \times \frac{\left(7,17 - \frac{326}{\frac{3}{r_2^3 - r_1^3} \left\{ T_1 + \frac{T_2 - T_1}{(1/r_1 - 1/r_2)r_1} \right\} \frac{r_2^3 - r_1^3}{3} - \frac{T_2 - T_1}{(1/r_1 - 1/r_2)r_1} \frac{r_2^2 - r_1^2}{2}} - \lg P \right)^2}{\int_{r_1}^{r_2} r^2 \exp \left[-A \left\{ T_1 + \frac{T_2 - T_1}{1/r_1 - 1/r_2} \right\}^2 (1/r_1 - 1/r)^2 \left(7,17 - \frac{326}{T_1 + \frac{T_2 - T_1}{1/r_1 - 1/r_2} (1/r_1 - 1/r)} - \lg P \right)^2 \right] dr}. \end{aligned} \quad (13)$$



Таким образом, как это следует из (13), величина относительной ошибки расчетов зависит от следующих параметров: r_1 , r_2 , T_1 , T_2 , A , P . Исследуем фактор влияния этих параметров на величину относительной ошибки σ . Прежде всего рассмотрим насосы для среднего вакуума, где для охлаждения слоя адсорбента применяют жидкий азот [1, 6]. Таким образом, $T_1 = 77,8$ К. В качестве откачиваемого газа рассмотрим азот. Примем $P = 1000$ гПа. Толщина слоя адсорбента 0,025 м для $r_1 = 0,06$ м и $r_2 = 0,085$ м. Коэффициент пористой структуры A зависит от материала адсорбента. Рассмотрим 3 случая: $A = 1 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-2}$; $A = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-2}$; $A = 5 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-2}$. Таким образом, остается один параметр T_2 , который и будем варьировать. Подставляя значения фиксированных параметров в (13), получим зависимость $\sigma = f(T_2)$ – рис. 3-5. На графиках дополнительно представлены еще кривые для различных давлений всасывания: $P = 500$; 100; 50; 10; 1 гПа.

Из графиков следует, что с ростом температуры периферии адсорбционного слоя относительная ошибка монотонно возрастает, асимптотически приближаясь к единице. Однако темп подъема кривых различен и обратно пропорционален давлению всасывания. Поэтому наибольшая ошибка в определении суммарной поглотительной способности по средней температуре наблюдается при $P = 1$ гПа, а минимальная – для $P = 1000$ гПа. Такой результат предсказуем, так как формула Дубинина-Радушкевича дает результат для адсорбции в области низкого вакуума. Кроме этого, стоит отметить, что с увеличением значения постоянной пористой структуры A растет величина относительной ошибки.

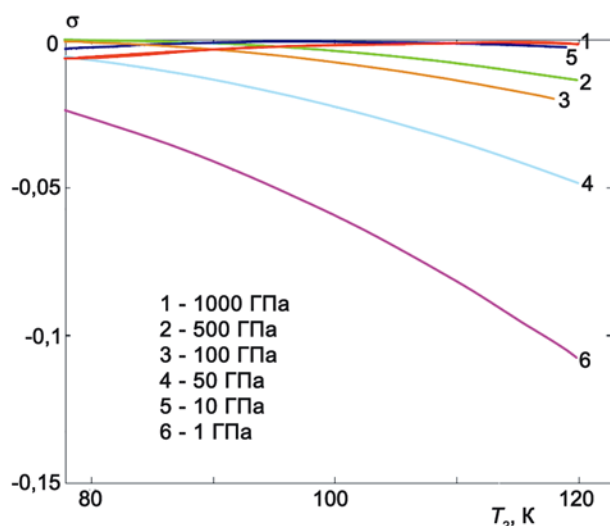


Рис. 3. Зависимость относительной расчетной ошибки от температуры на периферии адсорбента с $A = 1 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-2}$ при различных давлениях всасывания, охлаждаемых жидким азотом

Fig. 3. Dependence of the relative error estimated from the temperature at the periphery of the adsorbent with $A = 1 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-2}$ at different suction pressures, cooled by liquid nitrogen

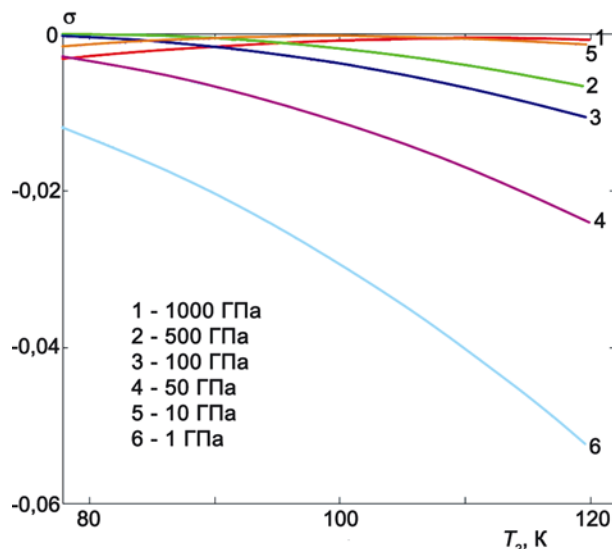


Рис. 4. Зависимость относительной расчетной ошибки от температуры на периферии адсорбента с $A = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-2}$ при различных давлениях всасывания, охлаждаемых жидким азотом

Fig. 4. Dependence of the relative error estimated from the temperature at the periphery of the adsorbent with $A = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-2}$ at different suction pressures, cooled by liquid nitrogen

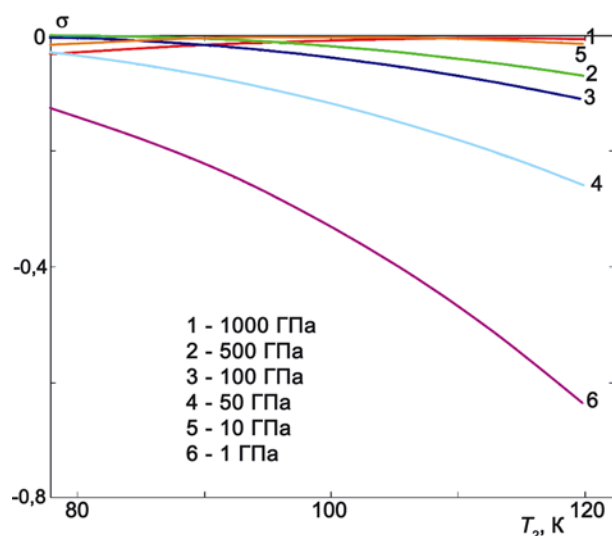


Рис. 5. Зависимость относительной расчетной ошибки от температуры на периферии адсорбента с $A = 5 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-2}$ при различных давлениях всасывания, охлаждаемых жидким азотом

Fig. 5. Dependence of the relative error estimated from the temperature at the periphery of the adsorbent with $A = 5 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-2}$ at different suction pressures, cooled by liquid nitrogen

Выводы

1. Расчет по средней температуре приводит к большому занижению суммарной поглотительной способности насоса.

2. Величина ошибки прямо пропорциональна перепаду температуры в слое адсорбента и обратно

пропорциональна температуре криогенной жидкости, используемой для охлаждения.

3. Теплота адсорбции оказывает сильное влияние на ошибку и для газов с высокой $Q_{ад}$, таких как CH_4 и N_2 , даже незначительные перепады температуры ведут к занижению истинного значения в несколько раз.

Список литературы

1. Исаев А.В., Куприянов В.И., Лунчев В.П., Чопов С.М. Малогабаритный криосорбционный насос // ВАНТ. Сер. Общая и ядерная физика. 1979. Вып. 1 (7). С. 32-35.
2. Демихов К.Е., Панфилов Ю.В., Никулин Н.К., Автономова И.В. Вакуумная техника. Справочник / под. общ. ред. К.Е. Демихова, Ю.В. Панфилова. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2009.
3. Исаев С.И., Кожин И.А., Кофанов В.И., Леонтьев А.И., Миронов Б.М., Никитин В.М., Петражицкий Г.Б., Самойлов М.С., Хвостов В.И., Шишов Е.В. Теория тепломассообмена / под ред. А.И. Леонтьева. М.: Высшая школа, 1979.
4. Валеев Р.Г., Бельтюков А.Н., Ветошкин В.М., Сурнин Д.В., Бакиева О.Р., Хоряков С.В. Модернизация камеры подготовки образцов установки RiberLAS – 2000 для сверхвысоковакуумного напыления тонких полупроводниковых пленок // Вакуумная техника и технология. 2010. Т. 20, № 4. С. 235-240.
5. Исаев А.В., Ермохин В.М., Куприянов В.И., Кряковкин В.П., Чопов С.М. Серия криосорбционных вакуумных насосов широкого назначения. Тез. 5-й Всесоюзной конф. «Физика и техника высокого и сверхвысокого вакуума». Л.: НТОПриборпром. 1985. С. 41-42.
6. Исаев А.В., Куприянов В.И. Теплопроводность засыпки вакуумного цеолита // ВАНТ. Сер. Общая и ядерная физика. 1979. Вып. 1 (7). С. 36-38.
7. Батраков Б.П., Гласов Б.В., Лавышев И.В. Автоматическое устройство для поддержания температуры и уровня жидкого азота // ВАНТ. Сер. Ядерно-физические исследования (теория и эксперимент). 1989. Вып. 3. С. 60-63.
8. Исаев А.В., Кряковкин В.П. О бездренажном хранении криогенных жидкостей // Альтернативная энергетика и экология – ISJAE. 2008. № 8. С. 27-30.
9. Мамов М.П., Данилов И.Б., Зельдович А.Г., Фрадков А.Б. Справочник по физико-техническим основам криогеники / под ред. Малкова М.П., 3-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1985.
10. Исаев А.В., Куприянов В.И., Ермохин В.М., Кузнецов В.И., Юшин Н.П. Адсорбционные вакуумные насосы / под общ. ред. А.В. Исаева, В.И. Куприянова. М.: ЦИНТИХимнефтемаш, 1980.
11. Беляков В.П. Криогенная техника и технология. М.: Энергоиздат, 1982.

4. В области низкого вакуума величина ошибки обратно пропорциональна давлению всасывания и прямо пропорциональна значению постоянной пористой структуры.

5. Расчет по средней температуре в области низкого вакуума приводит к завышению суммарной поглощательной способности насоса.

References

1. Isaev A.V., Kupriyanov V.I., Lunchev V.P., Chopov S.M. Malogabaritnyj kriosorbciionnyj nasos // VANT. Ser. Obšaâ i âdernaâ fizika. 1979. Vyp. 1 (7). S. 32-35.
2. Demihov K.E., Panfilov Ū.V., Nikulin N.K., Avtonomova I.V. Vakuumaâ tehnika. Spravočnik / pod. obš. red. K.E. Demihova, Ū.V. Panfilova. 3-e izd., pererab. i dop. M.: Mašinstroenie, 2009.
3. Isaev S.I., Kožinov I.A., Kofanov V.I., Leont'ev A.I., Mironov B.M., Nikitin V.M., Petražickij G.B., Samojlov M.S., Hvostov V.I., Šišov E.V. Teoriâ teplomassoobmena / pod red. A.I. Leont'eva. M.: Vysšaa škola, 1979.
4. Valeev R.G., Bel'tûkov A.N., Vetoškin V.M., Surnin D.V., Bakieva O.R., Horâkov S.V. Modernizaciâ kamery podgotovki obrazcov ustanovki RiberLAS – 2000 dlâ sverhvysokovakuumnogo napyleniâ tonkih poluprovodnikovyh plenok // Vakuumaâ tehnika i tehnologiâ. 2010. T. 20, № 4. S. 235-240.
5. Isaev A.V., Ermohin V.M., Kupriyanov V.I., Krâkovkin V.P., Chopov S.M. Seriâ kriosorbciionnyh vakuumnyh nasosov širokogo naznačeniâ. Tез. 5-j Vsesoŭznoj konferencii «Fizika i tehnika vysokogo i sverhvysokogo vakuumâ». L.: NTOPriborprom. 1985. S. 41-42.
6. Isaev A.V., Kupriyanov V.I. Teploprovodnost' zasypki vakuumnogo ceolita // VANT. Ser. Obšaâ i âdernaâ fizika. 1979. Vyp. 1 (7). S. 36-38.
7. Batrakov B.P., Glasov B.V., Lavyšev I.V. Avtomatičeskoe ustrojstvo dlâ podderžaniâ temperatury i urovnâ židkogo azota // VANT. Ser. Âderno-fizičeskie issledovaniâ (teoriâ i èksperiment). 1989. Vyp. 3. S. 60-63.
8. Isaev A.V., Krâkovkin V.P. O bezdrenažnom hranenii kriogennyh židkostej // Al'ternativnaâ ènergetika i èkologiâ – ISJAE. 2008. № 8. S. 27-30.
9. Mamov M.P., Danilov I.B., Zel'dovič A.G., Fradkov A.B. Spravočnik po fiziko-tehničeskim osnovam kriogeniki / pod red. Malkova M.P., 3-e izd. M.: Ènergoatomizdat, 1985.
10. Isaev A.V., Kupriyanov V.I., Ermohin V.M., Kuznecov V.I., Ūšin N.P. Adsorbciionnye vakuumnye nasosy / pod obš. red. A.V. Isaeva, V.I. Kuprianova. M.: CINTIhimneftemaš, 1980.
11. Belâkov V.P. Kriogennaâ tehnika i tehnologiâ. M.: Ènergoizdat, 1982.

12. Исаев А.В., Куприянов В.И. Исследование взаимосвязи адсорбционных характеристик вакуумных цеолитов с температурой // ВАНТ. Сер. Физика и техника высокого вакуума. 1977. Вып. 2 (8). С. 57-59.

13. Исаев А.В., Кряковкин В.П. К вопросу о расчете адсорбционных ловушек. 14-я научно-техн. конференция «Вакуумная наука и техника»: материалы. М.: МИЭМ, 2007. С. 81-83.

14. Каганер М.Г. Тепломассообмен в низкотемпературных теплоизоляционных конструкциях. М.: Энергия, 1979.

15. Исаев А.В. Криосорбционные насосы и устройства с пористыми экранами: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Балашиха, 1984.

12. Isaev A.V., Kupriânov V.I. Issledovanie vzaimosvâzi adsorbciionnyh harakteristik vakuumnyh ceolitov s temperaturoj // VANT. Ser. Fizika i tehnika vysokogo vakuuma. 1977. Vyp. 2 (8). S. 57-59.

13. Isaev A.V., Krâkovkin V.P. K voprosu o rasçete adsorbciionnyh lovušek. 14-â Nauçno-tehniçeskaâ konferenciâ «Vakuumnaâ nauka i tehnika»: materialy. M.: MIÈM, 2007. S. 81-83.

14. Kaganer M.G. Teplomassoobmen v nizkotemperaturnyh teploizolâcionnyh konstrukciâh. M.: Ènergiâ, 1979.

15. Isaev A.V. Kriosorbciionnye nasosy i ustrojstva s poristymi èkranami: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk. Balašiha, 1984.

Транслитерация по ISO 9:1995

