

## Ресурс работы высоковакуумных цилиндрических криоадсорбционных насосов

# 04, апрель 2013

DOI: 10.7463/0413.0569077

Очков А. А., Исаев А. В., Прудников С. Н.

УДК 621.51

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

[aochkov@rambler.ru](mailto:aochkov@rambler.ru)

[nkn@bmstu.ru](mailto:nkn@bmstu.ru)

Криоадсорбционные насосы, имеющие быстроты действия порядка  $0,1 \dots 0,3 \text{ м}^3/\text{с}$ , выполняются цилиндрическими [1]. Если говорить о выносных насосах, то такие насосы состоят из цилиндрического корпуса, в центре которого на тонкостенной трубке из нержавеющей стали крепится криосорбционная кассета цилиндрической формы [2]. Большое распространение получили цилиндрические встроенные насосы, которые поддерживают охранный вакуум в теплоизоляционных полостях криогенных трубопроводов [3]. Ресурс работы таких насосов определяет время, в течение которого обеспечивается постоянное рабочее значение быстроты действия. По мере насыщения быстрота действия насоса падает. Время поддержания быстроты действия в заданных пределах зависит от суммарной поглотительной способности насоса. Чем выше суммарная поглотительная способность, тем выше ресурс работы насоса и стабильная его характеристика. Суммарная поглотительная способность зависит от массы адсорбента, давления над его поверхностью и температуры. Давление определяется рабочими условиями и является величиной постоянной, а температура распределена в слое адсорбента по определенному закону. Зная поле распределения температуры по слою адсорбента, можно с помощью термических уравнений адсорбции вычислить суммарную поглотительную способность насоса.

В работах [7], [14] предложен метод расчета суммарной поглотительной способности для криоадсорбционных кассет трех базовых геометрий: плоской, цилиндрической и сферической. Расчет базируется на вариационных методах определения искомого функционала для описания температурного состояния в слое вакуумного адсорбента. Полученные выражения для коэффициентов функционала однако являются весьма громоздкими. Это затрудняет расчет по данному методу и анализ

величины относительной ошибки. Кроме того принятое допущение об отсутствии скачков температуры на границах адсорбент- криогенная поверхность и адсорбент –экран далеко не всегда выполняется. И наконец не понятно какова будет величина ошибки в случае использования в конструкции других типов теплозащитных экранов кроме пористых ,например, из перфорированного алюминиевого листа.

В работе [6] предлагается метод расчета на основе использования усредненных характеристик адсорбционного слоя. Однако оценка величины ошибки выполнена только для цеолита типа NaA и только для случая адсорбции водяных паров ,что не позволяет говорить о погрешностях предложенного метода для других адсорбатов и других адсорбентах.

Таким образом, целью данной работы является необходимость восполнить существующие пробелы в вопросах ,связанных с методами расчета суммарной поглотительной способности адсорбционных вакуумных насосов и анализа точности предлагаемых методов для широкого диапазона температур и спектра откачиваемых насосами газов ,а также использование оценочного математического аппарата для анализа тепловых процессов, протекающих в слоях вакуумных адсорбентов.

В области высокого вакуума при температурах выше 63 К адсорбция на промышленных адсорбентах хорошо описывается уравнением типа Генри [4,5]:

$$v = B \frac{Q_{ад}}{P e^{RT}}, \quad (1)$$

где

$v$  – удельная емкость адсорбента, м<sup>3</sup>\*Па/кг

$B$  – постоянная адсорбции, кг/м<sup>3</sup>

$P$  – рабочее давление, Па

$Q_{ад}$  – теплота адсорбции, Дж/моль

$R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/моль\*К

$T$  – температура адсорбента, К

Поскольку температура в слое не постоянна, для определения суммарной поглотительной способности используют два метода: 1- расчет по средней температуре [6]; 2 – интегральный расчет [7].

В первом случае определяют среднюю температуру адсорбента, затем среднюю удельную емкость  $\langle v \rangle$  по уравнению (1) и далее суммарную поглотительную способность. По второму методу производят интегрирование удельной емкости по всему объему адсорбента. Возникает вопрос, какую ошибку допускают при усредненном расчете. Данная работа посвящена изучению этого вопроса.

Криосорбционная кассета представляет собой цилиндрический сосуд, на боковой поверхности которого закреплен адсорбент. Адсорбент защищен от теплового потока экраном.

В стационарном режиме на границах адсорбционного слоя поддерживаются постоянные температуры:  $T_1$  – на внутренней поверхности и  $T_2$  – на наружной поверхности, обращенной к экрану. Радиус экрана обозначим  $r_2$ , а радиус цилиндрического сосуда обозначим  $r_1$  – рис.1. Если принять коэффициент теплопроводности слоя адсорбента величиной постоянной [8], то поле распределения температуры в цилиндрическом слое адсорбента будет иметь вид [9]:

$$T(r) = T_1 + (T_2 - T_1) \frac{\ln\left(\frac{r}{r_1}\right)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (2)$$

Определим среднюю температуру слоя адсорбента.

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

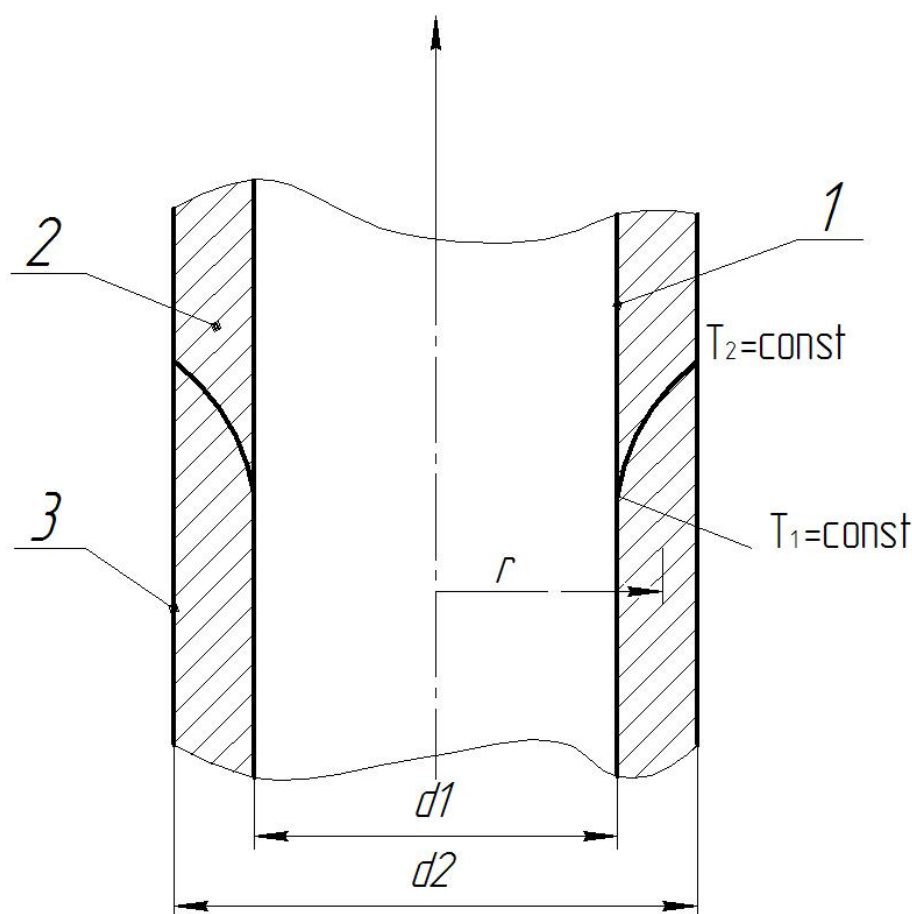


Рис. 1. Распределение температуры в неограниченном цилиндрическом слое адсорбента.

1 – цилиндрический сосуд для хладагента; 2 – адсорбент; 3 – теплозащитный экран.

### Расчет суммарной поглотительной способности.

Как указывалось выше, для расчета применяют два метода: приближенный расчет по средней температуре и точный расчет путем интегрирования по всему объему адсорбента.

#### Расчет по средней температуре.

$$V_{\Sigma\text{cp}} = \pi(r_2^2 - r_1^2)h\rho Vp e^{\frac{Q_{\text{ад}}}{R\langle T \rangle}}, \quad (4)$$

где  $h$  – высота слоя адсорбента, равная длине образующей цилиндрического сосуда для хладагента.

#### Интегральный расчет.

$$V_{\Sigma\text{ин}} = 2\pi h\rho Vp \int_{r_1}^{r_2} r e^{\frac{Q_{\text{ад}}}{RT(r)}} dr, \quad (5)$$

где  $\rho$  – плотность засыпки адсорбента

$T(r)$  – поле температуры в слое адсорбента – формула (2).

Для сравнения результатов определим относительную ошибку приближенного метода.

$$\sigma = \frac{V_{\Sigma\text{ин}} - V_{\Sigma\text{cp}}}{V_{\Sigma\text{ин}}} = \left( 1 - \frac{V_{\Sigma\text{cp}}}{V_{\Sigma\text{ин}}} \right) \quad (6)$$

Подставляя в (6) значения из формул (4) и (5), получим:

$$\sigma = \left( 1 - \frac{\frac{Q_{\text{ад}}}{R(T_1 + \frac{(T_2 - T_1)r_2^2}{(r_2^2 - r_1^2)} + \frac{(T_2 - T_1)}{2 \ln(\frac{r_2}{r_1})})}}{(r_2^2 - r_1^2)\rho e}}{\frac{Q_{\text{ад}}}{2 \int_{r_1}^{r_2} r e^{\frac{Q_{\text{ад}}}{R(T_1 + (T_2 - T_1) \frac{\ln(\frac{r}{r_1})}{\ln(\frac{r_2}{r_1})})} dr}}} \right) \quad (7)$$

Таким образом, как это следует из формулы (7), величина относительной ошибки расчетов зависит от следующих параметров:  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $Q_{\text{ад}}$ . Исследуем фактор влияния этих параметров на величину относительной ошибки  $\sigma$ . Прежде всего рассмотрим насосы для среднего вакуума, где для охлаждения слоя адсорбента применяют жидкий азот [1, 10]. Таким образом,  $T_1 = 77,8$  К. В качестве откачиваемого газа рассмотрим азот, теплота адсорбции которого на активированном угле СКТ-4 и вакуумном цеолите Са ЕН-4В

составляет  $Q_{ad}=12500$  Дж/моль. Толщину слоя адсорбента  $0,03$  м для  $r1=0,1$  м и  $r2=0,13$  м. Такие геометрические соотношения часто применяются при создании цилиндрических 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 ( $\sim 1 \cdot 10^{-3}$  Вт/м\*К)[8], 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 формулу (7), получим зависимость  $\sigma=f(T_2)$  – рис. 2. На графике дополнительно представлены еще кривые для других газов: для адсорбции кислорода -  $Q_{ad}=9900$  Дж/моль; для адсорбции аргона -  $Q_{ad}=9630$  Дж/моль; для адсорбции метана -  $Q_{ad}=16300$  Дж/моль; для адсорбции водорода -  $Q_{ad}=5000$  Дж/моль и для адсорбции гелия -  $Q_{ad}=585$  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.

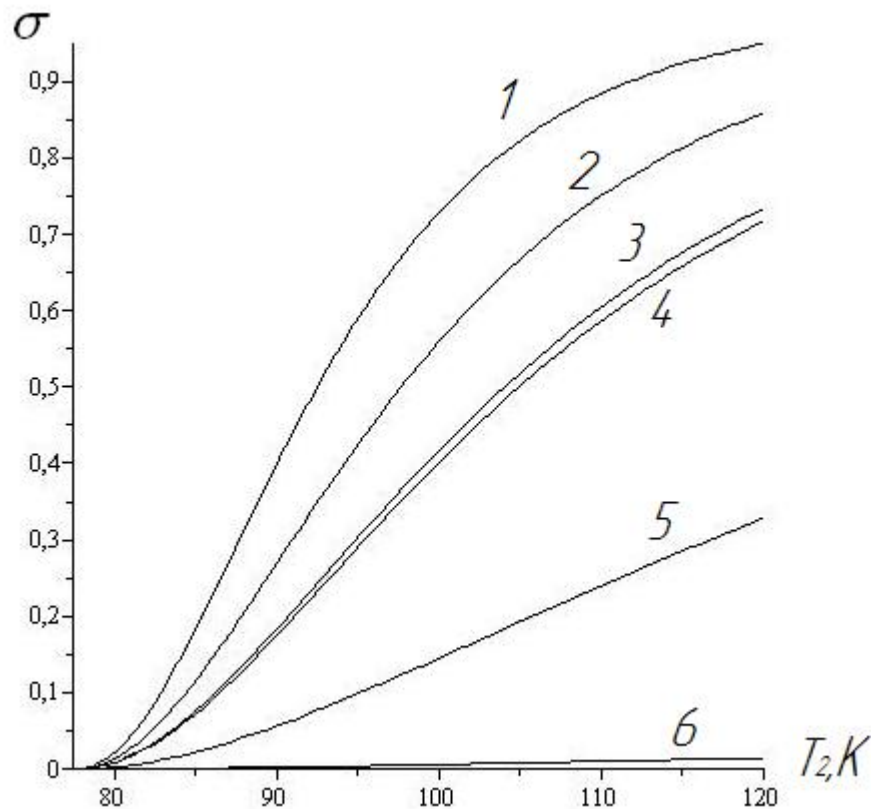


Рисунок 2. Зависимость относительной расчетной ошибки от температуры на периферии адсорбента при адсорбции различных газов для насосов, охлаждаемых жидким азотом.

1 – CH<sub>4</sub>; 2 – N<sub>2</sub>; 3 – O<sub>2</sub>; 4 – Ar; 5 – H<sub>2</sub>; 6 – He.

Для обеспечения более глубокого вакуума необходимо охладить адсорбент до более низких температур. Для этих целей можно использовать, например, 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 [11, 12]. Величина относительной ошибки для насосов, работающих на переохлажденном жидком азоте ( $T_1=63$  К) иллюстрируется графиком (Рис. 3).

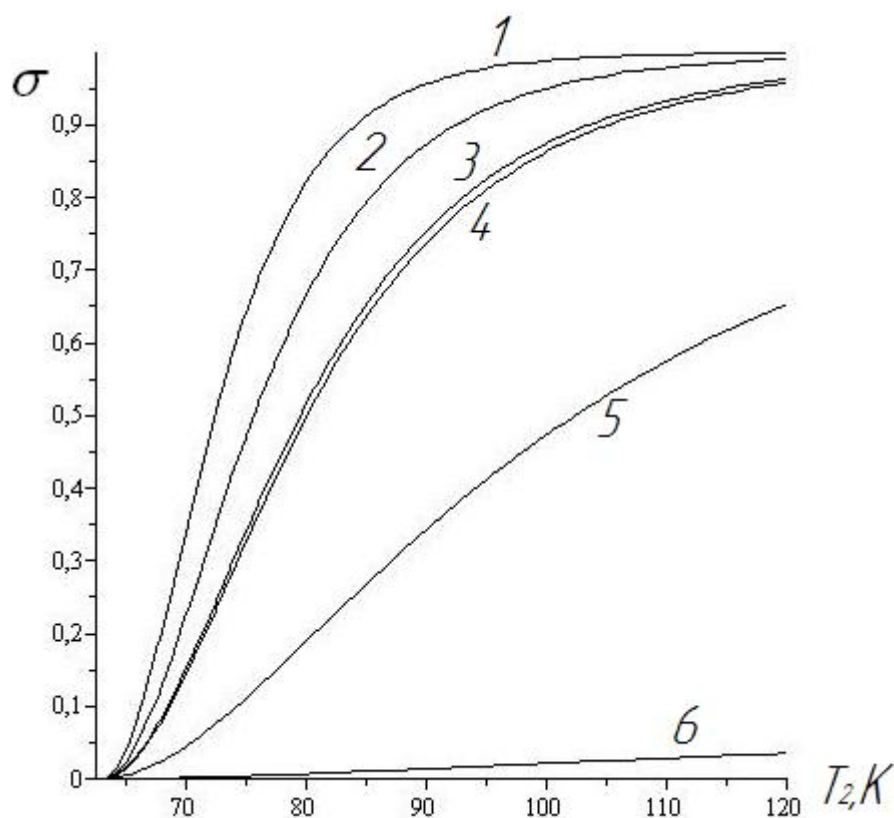


Рисунок 3. Зависимость относительной расчетной ошибки от температуры на периферии адсорбента при адсорбции различных газов для насосов на переохлажденном жидком азоте. 1 –  $\text{CH}_4$ ; 2 –  $\text{N}_2$ ; 3 –  $\text{O}_2$ ; 4 –  $\text{Ar}$ ; 5 –  $\text{H}_2$ ; 6 –  $\text{He}$ .

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.

Изучалась зависимость ошибки от радиуса криогенного сосуда для постоянной толщины адсорбционного слоя 0,03 м. Было установлено, что с уменьшением радиуса сосуда ошибка имеет тенденцию к уменьшению. Однако ошибка падает незначительно, как это следует из графика (Рис. 4), где при  $rl=0,03$  м  $\sigma$  меньше, чем при  $rl=0,5$  м для насосов на переохлажденном жидком азоте на 0,02. Причем с ростом  $T_2 \Delta\sigma$  увеличивается, что более наглядно иллюстрируется графиком (Рис. 5). Для более качественной оценки поведения кривых (Рис. 4, 5) на графиках показан узкий диапазон изменения температуры  $T_2$  в связи с относительно малым изменением ошибки.

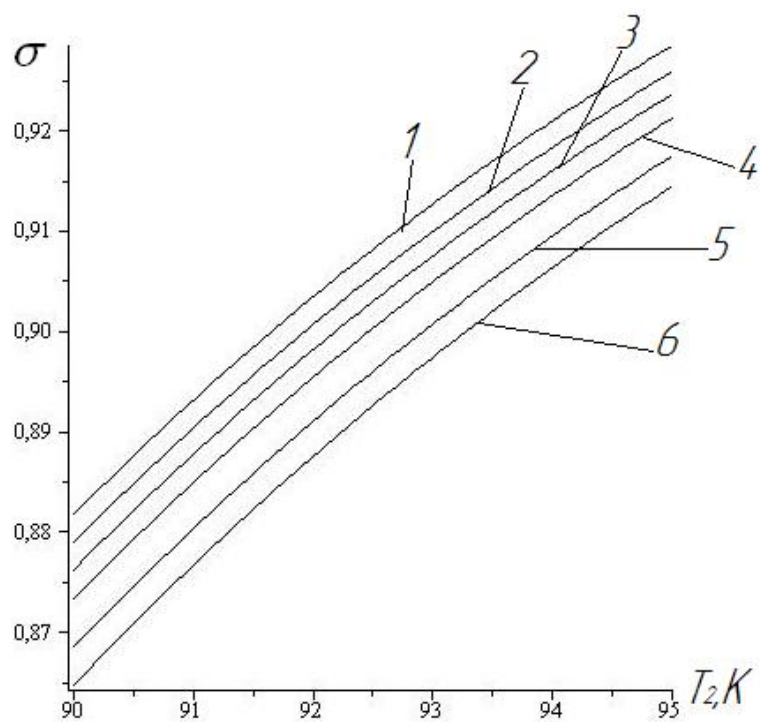


Рисунок 4. Зависимость относительной расчетной ошибки от температуры на периферии адсорбционного слоя для насоса на переохлажденном жидком азоте при адсорбции азота и различных радиусов криогенного сосуда  $r_1$ .

1 – 0,03 м; 2 – 0,05 м; 3 – 0,07 м; 4 – 0,1 м; 5 – 0,2 м; 6 – 0,5 м

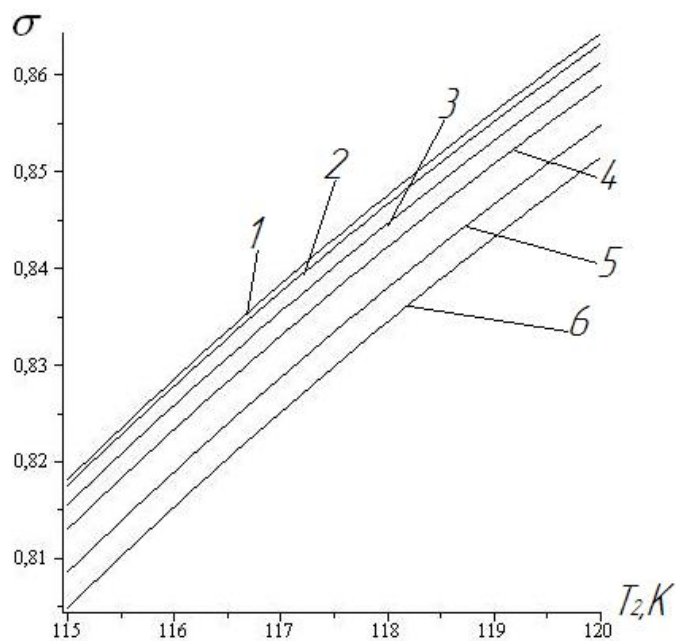


Рисунок 5. Зависимость относительной расчетной ошибки от температуры на периферии адсорбционного слоя для насоса, охлаждаемого жидким азотом, при адсорбции азота и различных радиусов криогенного сосуда  $r_1$ .

1 – 0,03 м; 2 – 0,05 м; 3 – 0,07 м; 4 – 0,1 м; 5 – 0,2 м; 6 – 0,5 м



По предложенной выше методике была проведена оценка величины относительной ошибки для случая прямой линейной зависимости коэффициента теплопроводности засыпки адсорбента от его температуры. Такое предположение ведет к более крутому характеру кривых поля распределения температуры в слое адсорбента, особенно для участков прилегающих к криогенной поверхности. Это должно повлечь за собой рост ошибки. Однако, как показал анализ, этого не происходит. Таким образом, предположение о зависимости коэффициента эффективной теплопроводности от температуры, которого придерживаются авторы многих работ, обзор которых дан в монографии [13], является ошибочным. Этот вывод позволяет по иному взглянуть на процесс переноса тепла при низких давлениях и температурах в сыпучих средах, какими по сути дела являются вакуумные адсорбенты.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие 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.
4. Предположение о зависимости коэффициента эффективной теплопроводности от температуры является ошибочным. Этот вывод позволяет по иному взглянуть на процесс переноса тепла при низких давлениях и температурах в сыпучих средах, какими по сути дела являются вакуумные адсорбенты.

### Список литературы.

1. Валеев Р.Г., Бельтюков А.Н., Ветошкин В.М., Сурнин Д.В., Бакиева О.Р., Хоряков С.В. Модернизация камеры подготовки образцов установки Riberg LAS – 2000 для сверхвысоковакуумного напыления тонких полупроводниковых пленок // Вакуумная техника и технология. 2010. Т. 20, № 4. С. 235-240.
2. Адсорбционные вакуумные насосы / А.В. Исаев, В.И. Куприянов, В.М. Ермохин, В.И. Кузнецов, Н.П. Юшин; под общ. ред. А.В. Исаева, В.И. Куприянова. М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1980. 36 с.
3. Беляков В.П. Криогенная техника и технология. М.: Энергоиздат, 1982. 272 с.
4. 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. 590 с.

5. Исаев А.В., Куприянов В.И. Исследование взаимосвязи адсорбционных характеристик вакуумных цеолитов с температурой // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика и техника высокого вакуума. 1977. Вып. 2 (8). С. 57-59.
6. Исаев А.В., Кряковкин В.П. К вопросу о расчете адсорбционных ловушек // 14-я Научно-техническая конференция «Вакуумная наука и техника»: материалы. М.: МИЭМ, 2007. С. 81-83.
7. Исаев А.В., Куприянов В.И., Лунчев В.П., Чопов С.М. Малогабаритный криосорбционный насос // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Общая и ядерная физика. 1979. Вып. 1 (7). С. 32-35.
8. Исаев А.В., Куприянов В.И. Теплопроводность засыпки вакуумного цеолита // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Общая и ядерная физика. 1979. Вып. 1 (7). С. 36-38.
9. Теория тепломассообмена / С.И. Исаев, И.А. Кожинов, В.И. Кофанов, А.И. Леонтьев, Б.М. Миронов, В.М. Никитин, Г.Б. Петражицкий, М.С. Самойлов, В.И. Хвостов, Е.В. Шишов; под ред. А.И. Леонтьева. М.: Высшая школа, 1979. 495 с.
10. 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 конференции «Физика и техника высокого и сверхвысокого вакуума». Л.: НТОПриборпром. 1985. С. 41-42.
11. Батраков Б.П., Гласов Б.В., Лавышев И.В. Автоматическое устройство для поддержания температуры и уровня жидкого азота // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-физические исследования (теория и эксперимент). 1989. Вып. 3. С. 60-63.
12. Исаев А.В., Кряковкин В.П. О бездренажном хранении криогенных жидкостей // Альтернативная энергетика и экология. 2008. № 8. С. 27-30.
13. Каганер М.Г. Тепломассообмен в низкотемпературных теплоизоляционных конструкциях. М.: Энергия, 1979. 256 с.
14. Исаев А.В. Криосорбционные насосы и устройства с пористыми экранами : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Балашиха, 1984. 188 с.

**Working resource of cylindrical cryoadsorption high-vacuum pumps**

# 04, April 2013

DOI: [10.7463/0413.0569077](https://doi.org/10.7463/0413.0569077)

Ochkov A.A., Isaev A.V., Prudnikov S.N.

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation

[aohkov@rambler.ru](mailto:aohkov@rambler.ru)[nkn@bmstu.ru](mailto:nkn@bmstu.ru)

In this article the authors consider methods of determination of total absorbing ability of high-vacuum cylindrical cryoadsorption pumps: average temperature calculation and integrated calculation. These two methods were compared with each other. The authors also considered an algorithm of calculation of a relative error of the method of determination of total absorbing ability by using an average temperature. Influence of various parameters, such as temperature on the periphery of the adsorptive layer, the radius of a cryogenic vessel, etc., on the mistake value was revealed. Results of calculation were presented in graphic and analytical interpretations. On the basis of the conducted researches several conclusions were drawn.

**Publications with keywords:** [adsorption](#), [Criogetter high vacuum pump](#), [cryopanel](#), [relative mistake](#), [total adsorbing ability](#), [the adsorption layer](#)

**Publications with words:** [adsorption](#), [Criogetter high vacuum pump](#), [cryopanel](#), [relative mistake](#), [total adsorbing ability](#), [the adsorption layer](#)

## References

1. Valeev R.G., Beltyukov A.N., Vetoshkin V.M., Surnin D.V., Bakiyev O.R., Horyakov S.V. Modernizatsiia kamery podgotovki obraztsov ustanovki Riber LAS – 2000 dlia sverkhvysokovakuumnogo napyleniia tonkikh poluprovodnikovyykh plenok [Modernization of the camera of preparation of models of the Riber LAS installation – 2000 for an ultrahigh-vacuum dusting of thin semiconductor films]. *Vakuumnaia tekhnika i tekhnologiya*, 2010, vol. 20, no. 4, pp. 235-240.
2. Isaev A.V., Kupriyanov V.I., Ermokhin V.M., Kuznetsov V.I., Yushin N.P. *Adsorbtsionnye vakuumnye nasosy* [The adsorption vacuum pumps]. Moscow, Tsintikhimneftemash Publ., 1980. 36 p.
3. Belyakov V.P. *Kriogennaia tekhnika i tekhnologiya* [Cryogenic equipment and technology]. Moscow, Energoizdat, 1982. 272 p.

4. Demikhov K.E., Panfilov Iu.V., Nikulin N.K., Avtonomova I.V. *Vakuumnaia tekhnika. Spravochnik* [Vacuum equipment. Directory]. Moscow, Mashinostroenie, 2009. 590 p.
5. Isaev A.V., Kupriyanov V.I. Issledovanie vzaimosviazi adsorbtsionnykh kharakteristik vakuumnykh tseolitov s temperaturoi [Research of interrelation of the adsorption characteristics of vacuum zeolites with a temperature]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Ser. Fizika i tekhnika vysokogo vakuuma* [Questions of nuclear science and equipment. Ser. Physics and equipment of high vacuum], 1977, no. 2 (8), pp. 57-59.
6. Isaev A.V., Kriakovkin V.P. K voprosu o raschete adsorbtsionnykh lovushek [To a question of calculation of the adsorption traps]. *14-ia Nauchno-tekhnicheskaiia konferentsiia «Vakuumnaia nauka i tekhnika»: materialy* [14-th Scientific-technical conference "Vacuum Science and Equipment": proc.]. Moscow, MIEM Publ., 2007, pp. 81-83.
7. Isaev A.V., Kupriyanov V.I., Lunchev V.P., Chopov S.M. Malogabaritnyi kriosorbtsionnyi nasos [Small-sized cryosorption pump]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Ser. Obshchaia i iadernaia fizika* [Questions of nuclear science and equipment. Ser. General and nuclear physics], 1979, no. 1 (7), pp. 32-35.
8. Isaev A.V., Kupriyanov V.I. Teploprovodnost' zasypki vakuumnogo tseolita [Heat conductivity of filling of vacuum zeolite]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Ser. Obshchaia i iadernaia fizika* [Questions of nuclear science and equipment. Ser. General and nuclear physics], 1979, no. 1 (7), pp. 36-38.
9. Isaev S.I., Kozhinov I.A., Kofanov V.I., et al. *Teoriia teplomassoobmena* [Heatmass exchange theory]. Moscow, Vysshaia shkola, 1979. 495 p.
10. Isaev A.V., Ermokhin V.M., Kupriyanov V.I., Kriakovkin V.P., Chopov S.M. Seriiia kriosorbtsionnykh vakuumnykh nasosov shirokogo naznacheniia [Series of multipurpose cryosorption vacuum pumps]. *Tez. 5-i Vsesoiuznoi konferentsii «Fizika i tekhnika vysokogo i sverkhvysokogo vakuuma»* [Abstracts of the 5th All-Union conference "Physics and Equipment High and Superhigh-vacuum"]. Leningrad, NTOPriborprom Publ., 1985, pp. 41-42.
11. Batrakov B.P., Glasov B.V., Lavyshev I.V. Avtomaticheskoe ustroistvo dlia podderzhaniia temperatury i urovnia zhidkogo azota [The automatic device for maintenance of temperature and level of liquid nitrogen]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Ser. Iaderno-fizicheskie issledovaniia (teoriia i eksperiment)* [Questions of nuclear science and equipment. Ser. Nuclear and physical researches (theory and experiment)], 1989, no. 3, pp. 60-63.
12. Isaev A.V., Kriakovkin V.P. O bezdrenazhnom khraneniia kriogennykh zhidkosti [Non-drain storage of cryogenic liquids]. *Al'ternativnaia energetika i ekologiia* [Alternative power engineering and ecology], 2008, no. 8, pp. 27-30.
13. Kaganer M.G. *Teplomassoobmen v nizkotemperaturnykh teploizoliatsionnykh konstruktsiakh* [Heat-and-mass transfer in low-temperature heat-insulating designs]. Moscow, Energiia, 1979. 256 p.
14. Isaev A.V. *Kriosorbtsionnye nasosy i ustroistva s poristymi ekranami. Avtoreferat kand. diss.* [Cryosorption pumps and devices with porous screens. Abstract of cand. diss.]. Balashikha, 1984. 188 p.