

14 1352799
Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское

ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н. Э. Баумана

На правах рукописи

РОЗАНОВ Леонид Николаевич

**ТЕОРИЯ, РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ
АДСОРБЦИОННЫХ ВАКУУМНЫХ НАСОСОВ
НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ**

Специальность 05.04.06 — вакуумная техника

**Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
доктора технических наук**

Москва

1978

НЕ НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Работа выполнена в Ленинградском ордена Ленина политехническом институте имени М. И. Калинина.

Официальные оппоненты — доктор технических наук *Лубенец В. Д.*, доктор химических наук *Мартинсон Е. Н.*, доктор технических наук *Юферов В. Б.*

Защита диссертации состоится «*17*» *мая* 1978 г. на заседании специализированного совета по энергетическим установкам Московского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшего технического училища им. Н. Э. Баумана по адресу: г. Москва, 107005, 2-я Бауманская ул., д. 5.

х, заверенные печатью,
ресу.

х, заверенные печатью,
ресу.

х, заверенные печатью,
ресу.

Ученый секретарь
специализированного совета,
сор, д. т. н. *Поляев В. М.*

M 352799



Актуальность проблемы. Развитие экономики нашей страны в десятой пятилетке в области ядерной энергетики, космических исследований, химической промышленности и электронной техники ставит перед вакуумным машиностроением новые задачи в создании современных откачных средств, обладающих большими скоростями откачки, заданным составом и предельными давлениями остаточных газов. Одним из перспективных направлений "безмасляной" откачки, удовлетворяющей этим требованиям, является адсорбционная откачка, уже получившая признание как эффективное средство получения высокого и низкого вакуума.

Недостатками существующих адсорбционных откачных средств являются снижение скорости откачки и повышение предельного давления в процессе работы вакуумной установки. Для обеспечения работоспособности вакуумной системы в таких условиях требуется сильно завышать количество адсорбента, используемого в насосах и ловушках, или дублировать откачные средства для обеспечения возможности их регенерации в процессе работы вакуумной установки.

Устранение указанных недостатков способствовало бы значительно расширению применения адсорбционной откачки в промышленности и научных исследованиях. Это оказывается возможным лишь при переходе к непрерывному методу адсорбционно-диффузионной откачки, теоретическому исследованию и практической реализации которого посвящена данная работа.

Цель работы - исследование непрерывного нестационарного метода адсорбционно-диффузионной откачки, создание теории адсорбционных откачных устройств непрерывного действия, разработка вопросов расчета и конструирования откачных устройств с движущимся адсорбентом. В процессе работы решались следующие основные задачи:

1. Определение производительности и предельного давления адсорбционных откачных устройств непрерывного действия в различных режимах работы.
2. Исследование характеристик адсорбентов, разработка новых композиционных материалов на основе металлических порошков и промышленных адсорбентов.



3. Разработка и исследование механизмов транспортирования адсорбционных материалов в вакууме, вопросов прочности конструктивных элементов насоса - фланцевых соединений, оболочек под воздействием температурных напряжений, атмосферного давления и технологических нагрузок.

Методика проведения исследований. Теоретическое определение производительности, скорости откачки и предельного давления адсорбционных откачных устройств непрерывного действия осуществлялось исследованием решений дифференциальных уравнений диффузии в частных производных второго порядка параболического типа, соответствующих последовательным циклам транспортирования адсорбента между камерами адсорбции и десорбции, и математическим моделированием работы насоса методом статистических испытаний /Монте-Карло/.

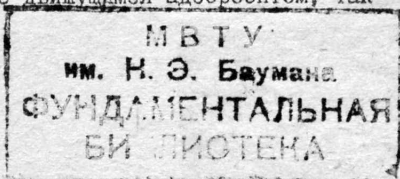
Исследование адсорбционных характеристик - адсорбируемости и коэффициента диффузии проводилось по объемной методике и из кинетических кривых при постоянном натяжении; коэффициенты теплопроводности и температуропроводности исследовались методами стационарного и нестационарного теплового потока; скорость откачки насоса определялась методами постоянного объема или постоянного давления.

Научная новизна проблем, рассмотренных в диссертации, состоит в теоретическом исследовании производительности непрерывной адсорбционной откачки в двух режимах работы насосов, возникающих при различных скоростях транспортирования адсорбента: 1/ режим с постоянной температурой адсорбента, соответствующий малым скоростям транспортирования; 2/ режим с переменной температурой адсорбента, соответствующий большим скоростям транспортирования.

Новыми являются также исследования коэффициентов захвата адсорбционных камер, выполненные методом статистических испытаний /Монте-Карло/.

Разработаны новые композиционные материалы на основе адсорбционных и металлических порошков. Предложены и исследованы новые конструкции вибрационных механизмов для транспортирования адсорбента.

Новыми являются все результаты, полученные в разработке конструкций насосов и ловушек с движущимся адсорбентом, так



как адсорбционные устройства этого типа разрабатываются впервые.

Практическая ценность данной работы состоит в разработке методик расчёта основных параметров адсорбционных насосов и ловушек с движущимся адсорбентом. Результаты этой работы могут быть эффективно использованы для безмасляной откачки испытательных камер больших объёмов с длительным временем работы, так как могут обеспечить большие скорости откачки и неограниченный ресурс работы таких систем. Применение непрерывной адсорбционной откачки возможно и в типовом вакуумном оборудовании при существенном улучшении теплофизических и механических характеристик существующих адсорбционных материалов.

Апробация работы. Материалы работы обсуждались на четырёх ленинградских и двух казанских всесоюзных конференциях по вакуумной технике; опытные конструкции адсорбционных насосов и ловушек внедрены в установках для испытания приборов и узлов трения в вакууме, в термическом оборудовании для обработки изделий электронной техники.

Цубликации. Основное содержание работы опубликовано в одной монографии, пяти статьях, одиннадцати изобретениях и использовано в конспекте лекций "Вакуумная техника" для специальности 0567 "Полупроводниковое и электровакуумное машиностроение".

Объём работы. Диссертация содержит 292 страницы машинописного текста, исключая рисунки, таблицы, графики и список литературы; 139 рисунков; 25 таблиц; список литературы -- 278 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Глава I. Адсорбционные методы периодической откачки вакуумных систем.

Адсорбционные откачные устройства с неподвижным адсорбентом -- насосы и ловушки уже получили достаточно широкое применение в промышленности и научных исследованиях. В этом большая заслуга советских учёных: Лазарева Б.Г., Фёдоровой М.Ф., Мартинсона Е.Н., Мданова С.П., Волчкевича А.И., Куприянова В.И., Макарова А.М., Когана В.С.,

Донде А.Л., Бреславец К.Г., Путиловского Ф.Д., Бойцова В.М., и др.

Из иностранных исследователей, оказавших наибольшее влияние на развитие адсорбционных откачных устройств с неподвижным адсорбентом следует отметить: Кармихаеля и Ланге, Турнера и Файнлэба, Дженсена, Киндала и Ванга.

В первой главе рассматриваются основные вопросы теории, расчёта и конструирования адсорбционных насосов с неподвижным адсорбентом на основе работ, выполненных автором.

При проектировании новых насосов, задаваясь температурой внешней поверхности адсорбента и производительностью насоса, из уравнения теплового баланса можно определить минимально допустимое соотношение поверхности и толщины слоя адсорбента.

Ряд других конструктивных размеров и параметров насоса: допустимая площадь и температура нагретых деталей насоса, максимальная температура откачиваемого газа, минимальное расстояние между адсорбентом и корпусом насоса определяются из условия равенства суммы всех вредных теплопритоков тепловому потоку, выделяющемуся при откачке.

Предельное давление адсорбционных насосов определяется из решения уравнения адсорбционной откачки, записанного на основании постоянства количества вещества в газовой и адсорбционных фазах до начала и после окончания процесса откачки

$$p_0 v + a_{T_1}(p_0) + \int_0^t q dt' = p_1 v + a_{T_2}(p_1), \quad / I /$$

где p_0 и p_1 - начальное и конечное давления в процессе откачки, v - объёмная нагрузка насоса, q - удельное газовыделение и натекание, отнесённое к единице объёма адсорбента, $a_T(p)$ - количество газа, поглощённое адсорбентом при давлении p и абсолютной температуре T , t - время откачки. Уравнение /I/ справедливо, если объём откачиваемой камеры значительно превышает объём самого насоса. Решение уравнения /I/ может быть найдено как в графической, так и аналитической форме.

Для улучшения предельного давления насоса при больших объёмных нагрузках $U > 1$ л/см³ можно применить многократную откачку объёма одним и тем же насосом. В работе показано, что предельное давление насоса при многократной откачке не зависит от его объёмной нагрузки.

Для борьбы с ограничением предельного давления насоса,

связанным с наличием предсорбированных газов, рекомендуется применять многоступенчатую откачку. Эффективность применения многоступенчатой откачки при постоянном количестве используемого адсорбента определяется условием $\frac{K_1 t_0}{\Gamma} \gg 1$. Так при $\frac{K_1 t_0}{\Gamma} = 10^3$ равномерное распределение адсорбента по трём ступеням откачки приводит к снижению предельного давления в 10^8 раз.

Предельное давление парциальной откачки для адсорбционных ловушек по парам масла также определяется из уравнения /1/. В этом случае слагаемое $\int q dt$ является основным источником откачиваемого пара, а $q(p)$ выражается уравнением полимолекулярной теории адсорбции БЭТ. По заданному сроку службы ловушки, обратному потоку паров масла и количеству используемого адсорбента определяется предельное давление в предположении об адсорбции на гладкой поверхности.

Быстрота откачки адсорбционного насоса, если известна адсорбируемость Γ и коэффициент стационарной диффузии D_e , при условии равнодоступности всех адсорбирующих поверхностей может быть определена из уравнения нестационарной диффузии.

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{D_e}{1+\Gamma} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{K_1}{r} \cdot \frac{\partial p}{\partial r} \right), \quad /2/$$

где K_1 — постоянная формы зерна, равная для неограниченной пластины, неограниченного цилиндра и шара соответственно 0, 1, 2.

Начальные и граничные условия уравнения /2/ при симметричной форме адсорбента, постоянной начальной концентрации и постоянстве потока через внешнюю поверхность адсорбента имеют вид:

$$p(r, 0) = p_0; \quad \frac{\partial p(0, t)}{\partial r} = 0; \quad -D_e \frac{\partial p(R, t)}{\partial r} = K_2 R Q_v = Q_{vf} \quad /3/$$

где Q_{vf} — газовый поток на единицу внешней поверхности адсорбента, Q_v — газовый поток на единицу насыпного объема, R — характерный размер, K_2 — постоянная, при заполнении насыпного объема адсорбентом в форме неограниченной пластины, неограниченного цилиндра и шара при кубической наименее плотной упаковке соответственно равна 1, $2/\pi$, $2/\pi$.

Решение уравнения /2/ при граничных условиях /3/ для $r = R$ при $f_0 \geq 0,42$ /для неограниченной пластины/, $f_0 \geq 0,27$ для неограниченного цилиндра/ и $f_0 \geq 0,19$ /для шара/ можно представить в виде: $Q_v R^2$

$$\frac{[p(R, t) - p_0] D_e}{K_3 f_0 + K_4} = \frac{1}{\dots} \quad /4/ \quad 7$$

где $F_0 = \frac{De \cdot t}{(1+\tau)R^2}$; $K_3 = 1, 4/\pi, 6/\pi$; $K_4 = 1/3, 1/2, 2/5$ для неограниченной пластины, неограниченного цилиндра и шара соответственно.

Для малых F_0 получим:

$$\frac{Q_v R^2}{[p(a,t) - p_0] De} = \frac{1}{2 K_3 \sqrt{F_0 / \pi}}, \quad /5/$$

где для неограниченной пластины $K_3 = K_2 = 1$;

для неограниченного цилиндра $K_3 = K_2 (1 + 0,44\sqrt{F_0} + 0,168F_0 + \dots)$;

для шара $K_3 = K_2 (1 + 0,89\sqrt{F_0} + F_0 + \dots)$.

Ошибка при расчёте K_3 для неограниченной пластины при $F_0 < 0,42$, для неограниченного цилиндра при $F_0 < 0,27$, для шара при $F_0 < 0,19$ не превышает нескольких процентов.

Определяя быстроту откачки насоса как $S_v/p(a,t)$, представим уравнения /4/, /5/ в виде

$$\frac{1}{\Theta} = \frac{1}{R_0} + \frac{1}{K_4}, \quad /6/$$

где Θ - безразмерная удельная быстрота откачки насоса,

$$\Theta = \frac{S_v \cdot R^2}{De}, \quad /7/$$

R_0 - безразмерный критерий, зависящий от начальных и граничных условий,

K_4 - правая часть уравнений /4/, /5/ в зависимости от величины критерия F_0 ,

Анализ уравнения /6/ позволяет сделать ряд выводов о целесообразной форме адсорбента. При малых F_0 быстрота откачки пропорциональна внешней поверхности адсорбента и исследованные формы адсорбента располагаются в порядке убывания скорости откачки: шар, неограниченный цилиндр, неограниченная пластина. При больших F_0 быстрота откачки пропорциональна степени заполнения насыпного объема и порядок расположения форм адсорбента меняется: неограниченная пластина, неограниченный цилиндр и шар. При $F_0 > 0,2$ для шара и $F_0 > 0,64$ для неограниченного цилиндра неограниченная пластина обеспечивает большую быстроту откачки.

Величина критерия R_0 оказывает влияние на выбор формы адсорбента в насосе. При $R_0 < 10$ преимущества шара и цилиндра перед пластиной с точки зрения получения больших скоростей откачки при малых F_0 не могут быть использованы.

В тех случаях, когда объем откачиваемой камеры доста-

точно велик или суммарный поток газовыделения и натекания достаточно мал, при этом количеством газа $V_k \cdot \Delta p$, определяющим повышение давления в камере, нельзя пренебречь по сравнению с количеством газа $\int q(t) dt$, уравнение нестационарной диффузии для адсорбентов в форме неограниченной пластины имеет вид:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_{\text{эф}} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}, \quad /8/$$

а начальные и граничные условия

$$c(x, 0) = c_0; \quad \frac{\partial c(0, t)}{\partial x} = 0; \quad c(R, t) = n(t); \quad /9/$$

$$n(0) = n_0; \quad \frac{\partial n(t)}{\partial x} + A \frac{\partial c}{\partial x}(R, t) + B q(t) = 0.$$

Решение /8/, /9/ для постоянного значения q и $n_0 = c_0$ имеет следующий вид:

$$\frac{n(t) - n_0}{q R^2 / (D_{\text{эф}} V_k)} = \frac{\tau}{1 + \tau} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 E [1 - \exp(-a_n^2 \tau)]}{a_n^2 (a_n^2 + E^2 + E)}, \quad /10/$$

$$\text{где } \tau = \frac{D_{\text{эф}} \cdot t}{R^2}, \quad A = \frac{D_{\text{эф}} (1 + \Gamma) F_a}{V_k}, \quad B = -\frac{1}{V_k},$$

$E = \frac{F_a \cdot R}{V_k} (1 + \Gamma)$, V_k - объем камеры, F_a - площадь внешней поверхности адсорбента, a_n - корни уравнения $a + E \operatorname{tg} a = 0$.

Глава 2. Теория адсорбционных насосов с движущимся адсорбентом при постоянной температуре адсорбента /режим работы при малых скоростях транспортирования/.

Из исследователей, занимавшихся вопросами непрерывной адсорбционной откачки, следует отметить известного польского ученого Я.Грошковского и американца Р.А.Флинна. Ими были получены авторские свидетельства на несколько конструктивных схем таких насосов, а Я.Грошковским была также предложена методика расчёта насосов с гладкими адсорбирующими поверхностями.

В самом общем виде определение производительности и скорости откачки адсорбционного насоса с гранулированным адсорбентом связано с решением тройной нестационарной диффузионной задачи с переменными коэффициентами и связными граничными условиями:

- 1/ диффузия газа от входа в насос до поверхности адсорбента,
- 2/ диффузия газа между гранул адсорбента,

3/ диффузия газа в гранулы адсорбента.

Для насосов непрерывного действия эта задача дополнительно усложняется наличием переменных начальных условий, изменяющихся при последовательных циклах транспортирования адсорбента.

Основная часть этой задачи — диффузия газа в гранулы адсорбента определяет максимальную производительность процесса откачки, остальные две при неудачном конструировании могут привести лишь к её уменьшению.

Диффузия газа от входа в насос до поверхности адсорбента не будет влиять на характеристики насоса, если общая проводимость последовательно соединённых элементов от входного сечения до наиболее удалённого участка адсорбента будет на $1+2$ порядка больше требуемой быстроты откачки насоса. Однако это условие приводит к увеличению габаритов насоса, так как взято с большим запасом, тем более, что сами проводимости элементов сложной формы не могут быть точно определены. Эта задача будет подробно рассмотрена в 4 главе в независимой постановке для гладких адсорбирующих поверхностей с целью выбора оптимальных размеров адсорбционно-десорбционных камер.

Диффузия газа между гранул адсорбента может быть исключена из рассмотрения, если удельная проводимость слоя будет на $1+2$ порядка больше его удельной быстроты откачки. Удельная проводимость слоя теоретически и экспериментально определяется в главе 6, а быстроты откачки в главах 2 и 3. Таким образом проверка этого условия не вызывает затруднения. Обычно слои в $3+4$ гранулы $\phi 2$ мм удовлетворяют этим требованиям. Толщина слоя для надёжного вибротранспортирования в закрытых каналах должна быть в $5+8$ раз больше максимального размера гранул. При двухсторонней откачке слоем эти требования совместимы. Дальнейшее увеличение толщины слоя ухудшает его теплофизические характеристики, что для насосов с движущимся адсорбентом приводит к быстрому снижению быстроты откачки.

В данной работе мы ограничимся рассмотрением только тонких слоёв адсорбента, удовлетворяющим одновременно всем указанным требованиям.

В главах 2 и 3 рассматривается диффузия газов в гранулы адсорбента в условиях работы адсорбционных откачных устройств.

ств непрерывного действия. Глава 2 посвящена исследованию режима работы при постоянной температуре адсорбента в камерах адсорбции и десорбции, соответствующему малым скоростям транспортирования адсорбента; а в главе 3 рассмотрен режим работы при переменной температуре адсорбента, соответствующий большим скоростям транспортирования.

Рассмотрим работу адсорбционного насоса при постоянной температуре адсорбента в камерах адсорбции и десорбции.

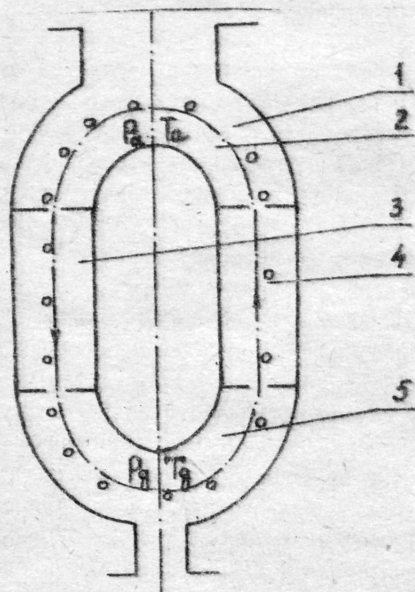


Рис. I.

На рис. I показана принципиальная схема адсорбционного насоса с движущимся адсорбентом. Адсорбент I проходит последовательно камеру адсорбции 2, шлюзовую камеру 3, камеру десорбции 5, вторую шлюзовую камеру 4. На этом заканчивается первый цикл транспортирования. Адсорбент вновь возвращается в камеру адсорбции. Затем начинается второй цикл и т.д.

Принимаем постоянство давлений газа и температур адсорбента в камерах адсорбции и десорбции /граничные условия первого рода/. Считаем,

что выполняется закон Генри для адсорбции, при этом количество газа в единице объема адсорбента $S = C/I + I$, где C - концентрация в газовой фазе. Все гранулы адсорбента находятся в одинаковых условиях. Это позволяет исключить из рассмотрения первую и вторую диффузионные задачи. Коэффициент нестационарной диффузии $D_{эф}$, учитывающий течение адсорбата как в газовой фазе, так и в адсорбированном состоянии, при постоянной температуре адсорбента и независимости процесса диффузии от количества адсорбированного газа, можно принять постоянным

и рассчитывать по формуле

$$D_{эф} = \frac{\varepsilon (D_n \Gamma + D_r)}{K_2^2 (1 + \Gamma)}, \quad /II/$$

где ε - пористость, K_2 - коэффициент извилистости,

D_n - коэффициент поверхностной диффузии,

D_r - коэффициент молекулярной диффузии,

$\Gamma(T)$ - адсорбируемость при температуре T .

Рассмотрим постановку задачи для расчёта распределения концентрации поглощённого газа в адсорбенте в процессе транспортирования.

1. Камера адсорбции / t_a /. Начальное распределение концентрации по радиусу адсорбента принимаем постоянным и равным S_0 . В результате пребывания адсорбента в камере адсорбции в течение времени t_a будет поглощено некоторое количество газа и установится новое распределение концентрации $S(r, t_a)$, для нахождения которого с учётом сделанных ранее предположений следует решить уравнение

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\varepsilon [D_r(T_a) + D_n(T_a) \Gamma(T_a)]}{K_2^2 [1 + \Gamma(T_a)]} \left(\frac{\partial^2 S}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial S}{\partial r} \right) \quad /12/$$

при граничных и начальных условиях:

$$S(r, 0) = S_0; \quad \frac{\partial S(0, t)}{\partial r} = 0; \quad S(R, t) = S_m \quad /13/$$

2. Шлюз первый / $t_{ш1}$ /. При переходе адсорбента через шлюзовую камеру в течение времени $t_{ш1}$ происходит нагрев адсорбента, в общем количестве поглощённого газа остаётся неизменным. Распределение концентрации на входе и выходе из шлюза могут отличаться. Рассмотрим два крайних случая изменения распределения концентрации: 1/ распределение не изменяется, 2/ распределение усредняется:

$$1) S(z, t_a + t_{ш1}) = S(z, t_a); \quad 2) S(z, t_a + t_{ш1}) = \int_V S(z, t_a) dv / V$$

3. Камера десорбции / t_d /. В камере десорбции происходит обезгаживание адсорбента. Для нахождения распределения концентрации в адсорбенте после пребывания в камере десорбции в течение времени t_d необходимо решить уравнение

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\varepsilon [D_r(T_d) + D_n(T_d) \Gamma(T_d)]}{K_2^2 [1 + \Gamma(T_d)]} \left(\frac{\partial^2 S}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial S}{\partial r} \right) \quad /14/$$

при граничных и начальных условиях:

$$S(r, 0) = S(r, t_a + t_{ш1}); \quad \frac{\partial S(0, t)}{\partial r} = 0; \quad S(R, t) = S_p. \quad /15/$$

4. Шлюзовая камера вторая /t_{м2}/. Во второй шлюзовой камере так же, как и в первой, рассмотрим два варианта расчёта. Распределение концентрации будет повторно усредняться или сохраняться неизменным:

$$1) S(z, t_a + t_{m1} + t_g + t_{m2}) = S(z, t_a + t_{m1} + t_g);$$

$$2) S(z, t_a + t_{m1} + t_g + t_{m2}) = \int_V S(z, t_a + t_{m1} + t_g) dv/V$$

С концентрацией $S(z, t_a + t_{m1} + t_g + t_{m2})$ адсорбент входит в камеру адсорбции и на этом заканчивается первый цикл транспортирования адсорбента. Исследование распределений концентрации на нескольких циклах транспортирования позволяет записать рекуррентные формулы для распределения концентрации на i -цикле через $i-1$ -цикл для случаев сохранения и усреднения концентраций в шлюзовых камерах. Интегрируя полученные распределения по объёму адсорбента, определим средние концентрации, которые можно использовать для расчёта производительности насоса в камерах адсорбции и десорбции на i -цикле транспортирования:

I. Сохраняется распределение концентраций на входе и выходе из шлюзовых камер:

производительность в камере адсорбции

$$Q_{ai} = U_{\lambda} \cdot F \left[\int_V S_i(t_a) dv/V - \int_V S_{i-1}(t_a + t_{m1} + t_g) dv/V \right]; \quad /16/$$

производительность в камере десорбции

$$Q_{gi} = U_{\lambda} \cdot F \left[\int_V S_i(t_a) dv/V - \int_V S_i(t_a + t_{m1} + t_g) dv/V \right]; \quad /17/$$

где U_{λ} - линейная скорость транспортирования,

F - площадь поперечного сечения слоя.

2. Усредняется распределение концентраций на входе и выходе из шлюзовых камер:

производительность в камере адсорбции

$$Q_{ai} = U_{\lambda} \cdot F [S_i(t_a + t_{m1}) - S_{i-1}(t_a + t_{m1} + t_g + t_{m2})]; \quad /18/$$

производительность в камере десорбции

$$Q_{gi} = U_{\lambda} \cdot F [S_i(t_a + t_{m1}) - S_i(t_a + t_{m1} + t_g + t_{m2})] \quad /19/$$

Неустановившийся режим работы насоса характеризуется разными производительностями в камерах адсорбции и десорбции. Если адсорбент перед началом работы был тщательно обезгажен, то производительность насоса в камере адсорбции в течение неустановившегося режима работы больше, чем производительность в камере десорбции. При необезгаженном адсорбенте наблюдается

обратная картина. Этот случай показан на рис. 2.

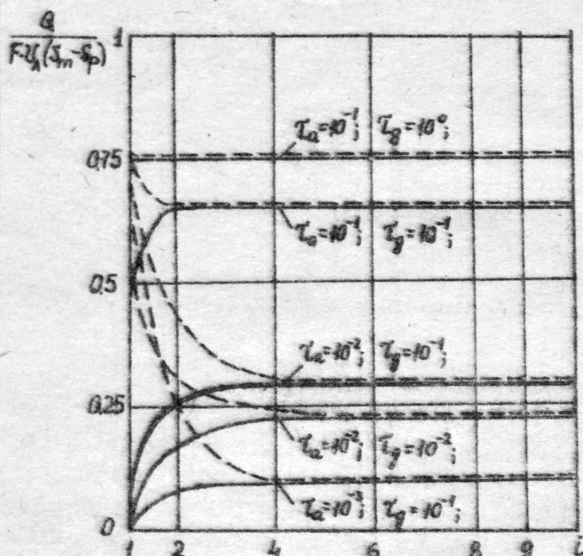


Рис. 2. Производительность адсорбционно-го насоса: сплошные линии - в камере адсорбции, пунктир - в камере десорбции при различных безразмерных временах адсорбции τ_a и десорбции τ_d в зависимости от числа циклов транспортирования при выравнивании распределения концентраций в шлюзовых камерах.

Число циклов транспортирования до выхода на установившийся режим работы при постоянной температуре адсорбента можно рассчитать по формуле

$$l \approx \frac{0,35}{\tau_a + \tau_d} \quad /20/$$

Производительности и скорости откачки в камерах адсорбции и десорбции после выхода насоса на установившийся режим работы становятся одинаковыми:

1/ в случае сохранения распределения концентраций в шлюзовых камерах скорость откачки в установившемся режиме

$$S_{\text{н.с.}} = V_n \cdot F \left[(q_a + 1) - \frac{q_0(q_a + 1)}{p_a} \right] \cdot \frac{6}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^2} \frac{[1 - \exp(-k^2 \pi^2 \tau_a)] [1 - \exp(-k^2 \pi^2 \tau_d)]}{1 - \exp[-k^2 \pi^2 (\tau_a + \tau_d)]} \quad /21/$$

2/ в случае выравнивания распределения концентраций в шлюзовых камерах скорость откачки в установившемся режиме

$$S_{\text{н.с.}} = V_n \cdot F \left[(q_a + 1) - \frac{q_0(q_a + 1)}{p_a} \right] \frac{[1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^2} \exp(-k^2 \pi^2 \tau_a)] [1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^2} \exp(-k^2 \pi^2 \tau_d)]}{1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^2} \exp(-k^2 \pi^2 \tau_a) - \frac{6}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^2} \exp(-k^2 \pi^2 \tau_d)} \quad /22/$$

Производительности и скорости откачки, рассчитанные по двум указанным способам изменения распределения концентраций в шлюзовых камерах как в установившемся, так и в неустойчивом режиме работы дают наибольшее расхождение результатов

при $\tau_a = \tau_g$, а максимальная ошибка в расчётах при этом не более 15%. Так как в обычных условиях работы насоса $\tau_g > \tau_a$, то расчёт можно вести по любому из указанных способов, но для расчёта с запасом можно рекомендовать способ усреднения распределения концентрации как дающий меньшее значение при расчёте производительности. Расчёт по усреднённым распределениям концентраций в шаровых камерах, как нам удалось показать, может быть реализован графоаналитически. На рис.3 построены зависимости средних концентраций в шаровом адсорбенте при граничных условиях I рода в процессе адсорбции $\bar{s}_a$ и десорбции $\bar{s}_g$ в зависимости от безразмерного времени τ .

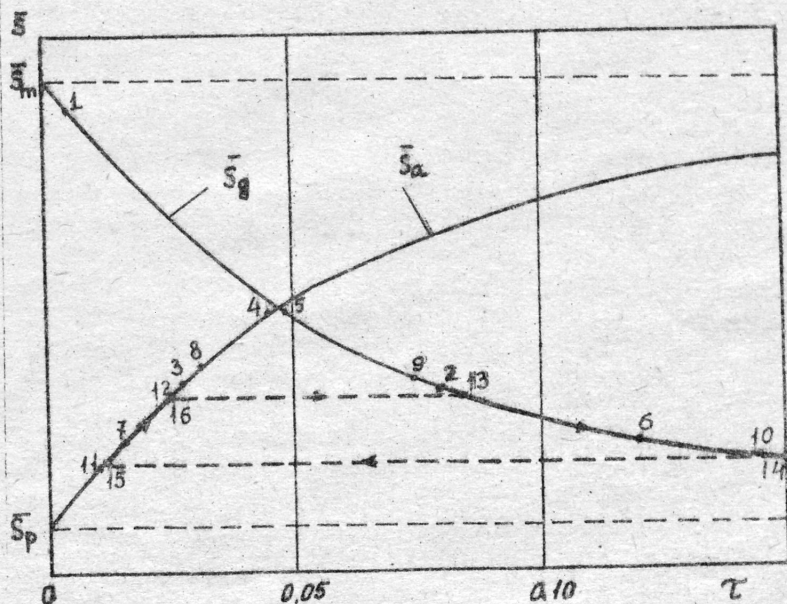


Рис.3. Графоаналитический расчёт производительности адсорбционных насосов непрерывного действия, $\tau_a = 1,5 \cdot 10^{-2}$, $\tau_g = 7,5 \cdot 10^{-2}$, форма адсорбента - шар.

Расчёт проводится в следующей последовательности. Выбирается начальная точка на кривой адсорбции или десорбции в зависимости от начальных условий работы насоса. Если целью расчёта является определение производительности в установив-

шемся режиме, то в качестве начальной может быть взята любая точка на любой из двух кривых. Выберем в качестве начальной /./ 1. Передвигаясь вправо по кривой десорбции на величину τ_d находим точку 2. После чего по горизонтали переходим на кривую адсорбции и находим точку 3. Передвигаемся вправо по кривой адсорбции на величину τ_a и находим точку 4. Затем по горизонтали переходим на кривую десорбции - точка 5. Процесс повторяется до тех пор, пока не будет наблюдаться совпадение соответствующих точек в последовательных циклах транспортирования, что характеризует выход насоса на установившейся режим работы. На рис. 3 установившейся режим работы наступает через 4 цикла транспортирования и показан утолщенными линиями. Разность уровней средних концентраций $\bar{S}_1$ и $\bar{S}_2$ определяет установившееся значение скорости откачки.

$$S_{ni \rightarrow \infty} = \frac{v_a \cdot F}{P_a} (\bar{S}_1 - \bar{S}_2), \quad /23/$$

как показано в работе, совпадающее с аналогичным значением по формуле /22/.

Рассмотренный метод графоаналитического расчёта годится только для распределения концентраций, задаваемых в виде функций, обладающих свойством $f(x+y) = f(x) \cdot f(y)$. Этим свойством обладают, например, показательные функции. В этом случае точки, соответствующие последующим циклам транспортирования ложатся на одну и ту же кривую. Этому требованию удовлетворяет способ расчёта с усреднением концентраций, в котором средние концентрации записываются в виде сумм экспонент. Для способа расчёта при сохранении распределения концентрации в шлюзовых камерах нами не было найдено наглядной графической интерпретации, так как распределение концентраций задаётся в нём в виде произведения тригонометрических и экспоненциальных функций.

Глава 3. Теория адсорбционных откачных устройств непрерывного действия при переменной температуре адсорбента /большие скорости транспортирования/.

Повышение скорости транспортирования адсорбента в насосе всегда приведёт к тому, что за время пребывания в шлюзе, соединяющем камеру десорбции с камерой адсорбции, температура адсорбента не достигнет установившегося значения и охлаждение адсорбента будет продолжаться в камере адсорбции.

Критерием разделения скоростей транспортирования на большие и малые может служить равенство:

$$V_{\lambda}^{opt} = \frac{a_{ox} \cdot l_1}{(d_c/2)^2 \cdot Fo} \quad /24/$$

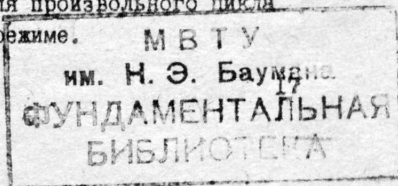
где a_{ox} - коэффициент температуропроводности слоя, l_1 - длина первого шлюза, d_c - диаметр слоя адсорбента, Fo - критерий Фурье; $Fo = 0,5 + 1,0$ в зависимости от температуры десорбции и формы адсорбента.

Повышение скорости транспортирования по теории, изложенной в главе 2, всегда сопровождается увеличением быстроты откачки насоса, а повышение температуры адсорбента снижает быстроту откачки за счёт ухудшения адсорбируемости быстрой, чем она увеличивается за счёт повышения скорости транспортирования и роста коэффициента диффузии. Таким образом условие /24/ определяет оптимальную скорость транспортирования адсорбента.

Режим работы насоса при больших скоростях транспортирования представляет практический интерес для уменьшения инерционности насоса, например, при откачке шлюзовых камер, для уменьшения "памяти" насоса по откачиваемым газам в масс-спектрометрии и т.д.

Принимаем, что цилиндрический слой адсорбента охлаждается или нагревается при граничных условиях I рода. Это позволяет использовать приведенный в предыдущей главе графоаналитический метод для расчёта распределения температуры по длине слоя в камерах адсорбции и десорбции, а также упростить исследования теплообмена в адсорбционном слое, ограничиваясь экспериментальным определением лишь одного кажущегося коэффициента температуропроводности слоя.

Построив кривые средних температур при нагревании и охлаждении слоя так, как это показано на рис.3 для средних концентраций при массообмене, можно по той же методике, предварительно определив Fo_0 при охлаждении и Fo_n при нагревании по длинам соответствующих участков и линейной скорости транспортирования, рассчитать начальные и конечные температуры адсорбента на входах и выходах из камер адсорбции и десорбции или в любой другой точке этих камер для произвольного цикла транспортирования и в установившемся режиме.



Количество циклов транспортирования для выхода на установившийся режим в этом случае с погрешностью 5% определяется по формуле

$$\delta \tau = \frac{0,4}{F_{00} + F_{0n}} \quad /25/$$

Определение производительности насоса в режиме переменной температуры адсорбента требует новой постановки задачи нестационарной диффузии с переменными коэффициентами. Будем считать, что температура адсорбента не зависит от координаты и определяется только временем нахождения адсорбента в камере адсорбции. Массообменные и теплообменные процессы при аналитических исследованиях будем считать независимыми. Это означает, что при расчёте массообменных процессов распределение температуры в слое адсорбента по длине камеры адсорбции считаем установившемся. Так же, как и в главе 2, будем считать, что в шлюзовых камерах газ не поглощается и не выделяется. При условии возможного изменения распределения концентрации в шлюзовых камерах рассмотрим два граничных варианта расчёта: 1/ распределение концентрации сохраняется, 2/ распределение концентрации усредняется.

Принципиальная схема насоса, работающего в режиме переменной температуры адсорбента, показана на рис.4. Адсорбент, выходящий из камеры десорбции, имеет температуру $T_{дн}$, а адсорбент, входящий в камеру адсорбции, — $T_{а}$. В камере адсорбции адсорбент охлаждается до температуры $T_{ан}$. Весь путь адсорбента в камере адсорбции разделён на "n" равных изотермических участков. На каждом участке назначаются новые граничные условия из-за изменения равновесной концентрации газа на внешней поверхности адсорбента и новые начальные условия из-за увеличения количества газа, поглощённого адсорбентом на предыдущем участке.

При переходе границ между изотермическими участками камер адсорбции температура адсорбента изменяется скачкообразно, а распределение концентрации остаётся неизменным.

Запишем постановку задачи для расчёта распределения концентрации на первом цикле транспортирования по всем участкам камеры адсорбции, первого шлюза, участкам камеры десорбции и второго шлюза.

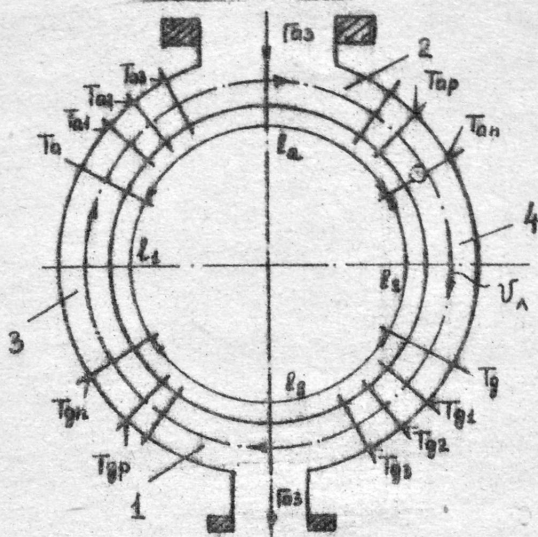


Рис. 4. Расчетная схема адсорбционного насоса непрерывного действия в режиме переменной температуры адсорбента: 1 - камера десорбции, 2 - камера адсорбции, 3, 4 - шлюзы.

Камера адсорбции:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\varepsilon [D_r(T_a) + D_n(T_a) \Gamma(T_a)]}{K_2^2 [1 + \Gamma(T_a)]} \left(\frac{\partial^2 S}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial S}{\partial r} \right) \quad /26/$$

1 уч. $S_{a1}(r, t_{a1}) = S(T_{a1})$; $\frac{\partial S(r, t)}{\partial t} = 0$; $S_{a1}(r, 0) = S_0$;

2 уч. $S_{a2}(r, t_{a2}) = S(T_{a2})$; $\frac{\partial S(r, t)}{\partial t} = 0$; $S_{a2}(r, 0) = S(r, t_{a1})$

 n уч. $S_{an}(r, t_{an}) = S(T_{an})$; ----- ; $S_{an}(r, 0) = S(r, t_{a, n-1})$

Шлюз передви:

1/ $S(r, t_{an} + t_{ш1}) = S_{an}(r, t_{an})$;

2/ $S(r, t_{an} + t_{ш1}) = \int_V S_{an}(r, t_{an}) dv/v$

Камера десорбции:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\varepsilon [D_r(T_d) + D_n(T_d) \Gamma(T_d)]}{K_2^2 [1 + \Gamma(T_d)]} \left(\frac{\partial^2 S}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial S}{\partial r} \right) \quad /27/$$

$$1 \text{ уч. } S_{q1}(R, t_{q1}) = S(T_{q1}); \quad \frac{\partial S(0, t)}{\partial z} = 0; \quad S_{q1}(z, 0) = S(z, t_{an} + t_{w1});$$

$$2 \text{ уч. } S_{q2}(R, t_{q2}) = S(T_{q2}); \quad \text{---} \text{---} \text{---}; \quad S_{q2}(z, 0) = S(z, t_{q1});$$

$$3 \text{ уч. } S_{q3}(R, t_{q3}) = S(T_{q3}); \quad \text{---} \text{---} \text{---}; \quad S_{q3}(z, 0) = S(z, t_{q2});$$

$$n \text{ уч. } S_{qn}(R, t_{qn}) = S(T_{qn}); \quad \text{---} \text{---} \text{---}; \quad S_{qn}(z, 0) = S(z, t_{q, n-1}).$$

Шлюз второй:

$$1/ S(z, t_{an} + t_{w1} + t_{qn}) = S_{qn}(z, t_{qn}),$$

$$2/ S(z, t_{an} + t_{w1} + t_{qn}) = \int S_{qn}(z, t_{qn}) dV/V.$$

На каждом участке камер адсорбции и десорбции в первом цикле постоянным сохраняется лишь условие симметрии $\frac{\partial S(0, t)}{\partial z} = 0$. Новые значения приобретают: коэффициент диффузии, концентрации на границе $S_p(R, t_p)$ и начальные условия. В дальнейших циклах транспортирования коэффициент диффузии и концентрация на внешней поверхности адсорбента изменяются циклически, а начальные условия каждый раз приобретают новые значения.

Производительность насоса на j -цикле транспортирования в неустановившемся режиме может определяться по уравнениям /16/, /17/ для случая сохранения распределения концентрации в шлюзовых камерах и по уравнениям /18/, /19/ при усреднении концентрации в шлюзовых камерах с учётом распределений концентраций, получаемых при решении задачи /26/, /27/.

В установившемся режиме производительность насоса в случае сохранения распределения концентраций в шлюзовых камерах:

$$Q_{j \rightarrow \infty} = U_{\lambda} \cdot F \left\{ S_{an} - S_{qn} + \frac{G}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^2} \left[E_{j \rightarrow \infty}^a \left(\exp(-k^2 \pi^2 \tau_{an}) - 1 \right) + \right. \right. \quad /28/ \\ \left. \left. \Sigma(a) + S_{qn} - S_{a1} \right] \right\},$$

$$\text{где } E_{j \rightarrow \infty}^a = \frac{[S_{qn} - S_{a1} + \Sigma(a)] + [S_{an} - S_{q1} + \Sigma(a)] \exp(-k^2 \pi^2 \tau_{qn})}{1 - \exp[-k^2 \pi^2 (\tau_{qn} + \tau_{an})]};$$

при выравнивании распределений концентраций в шлюзовых камерах

$$Q_j = U_{\lambda} \cdot F \left\{ \frac{[S_{qn} - S_{a1} + \Sigma(a) + \frac{G}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^2} \exp(-k^2 \pi^2 \tau_{qn}) (S_{an} - S_{q1} + \Sigma(a))]}{1 - \frac{G}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^2} \exp(-k^2 \pi^2 \tau_{an})} \cdot \right. \quad /29/ \\ \left. \frac{[\frac{G}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^2} \exp(-k^2 \pi^2 \tau_{an}) - 1]}{\frac{G}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^2} \exp(-k^2 \pi^2 \tau_{qn})} + \Sigma(a) + S_{qn} - S_{a1} \right\}$$

При $p = I$ температура адсорбента в камерах адсорбции и десорбции становится постоянной, $\Sigma(a) = 0$, $\Sigma(q) = 0$, $S_{an} = S_{a1}$, $S_{gn} = S_{g1}$, тогда /28/ становится равносильным /21/, а /29/ - /22/.

Как показывает анализ полученных решений, количество циклов транспортирования, необходимых для установления равновесия в массообменных процессах, может быть рассчитано по формуле

$$j_m = \frac{0,35}{\tau_{an} + \tau_{gn}}, \quad /30/$$

где $\tau_{an} = \frac{v_a}{R^2 \cdot U_n \cdot n} \sum_{p=1}^n D_{ap}$; $\tau_{gn} = \frac{v_g}{R^2 \cdot U_n \cdot n} \sum_{p=1}^n D_{gp}$. p - номер участка в камере адсорбции или десорбции.

Общее количество циклов транспортирования, необходимое для установления как теплового, так и массообменного равновесия определяется суммой

$$j_n = j_m + j_t = \frac{0,35(F_{o1} + F_{on}) + 0,4(\tau_{an} + \tau_{gn})}{(\tau_{an} + \tau_{gn})(F_{o1} + F_{on})} \quad /31/$$

При проектировании адсорбционных насосов с движущимся адсорбентом необходимо стремиться к тому, чтобы $j_n \leq 1$.

Для одновременного учёта массообменных и теплообменных процессов была составлена программа для ЭВМ "ОДРА 1204", позволявшая корректировать температуру адсорбента в процессе расчёта производительности насоса. Наибольшая ошибка наблюдается при равенстве числа циклов, необходимых для установления теплового и массообменного равновесия. В остальных случаях описанная методика расчёта даёт удовлетворительные результаты.

Рассмотрим основную характеристику адсорбционного насоса с движущимся адсорбентом, представляющую собой зависимость его скорости откачки от линейной скорости транспортирования адсорбента. При больших безразмерных временах массообмена или малых скоростях транспортирования /кривая 1, рис.5/ скорость откачки пропорциональна скорости транспортирования. Возрастание скорости транспортирования при ограниченных размерах камеры адсорбции приведёт к тому, что времени пребывания адсорбента в камере адсорбции окажется недостаточным для установления адсорбционного равновесия. В этом случае скорость откачки пропорциональна корню квадратному из скорости транспортирования /кривая 2/. Дальнейшее возрастание скорости транспортирования за счёт повышения температуры адсорбента

/кривая 3/ приводит к быстрому уменьшению быстроты откачки, при этом образуется характерный максимум быстроты откачки, определяющий оптимальную скорость транспортирования.

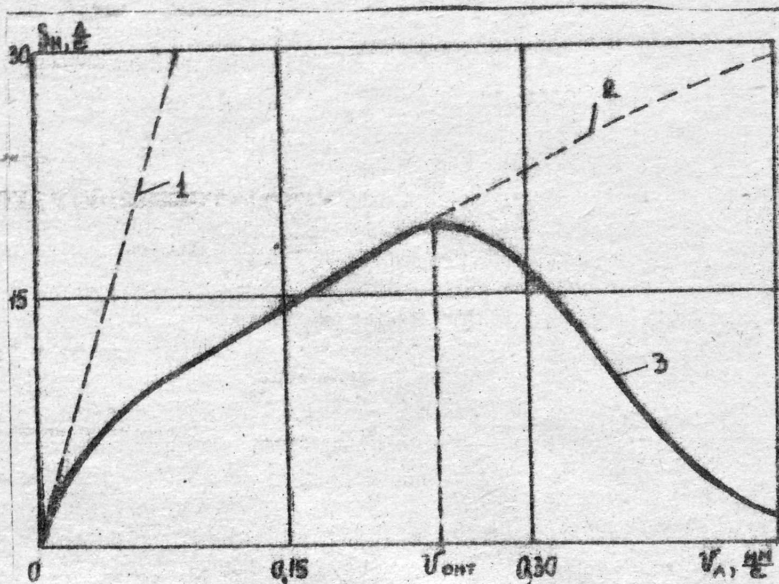


Рис.6. Быстрота откачки насоса в зависимости от линейной скорости транспортирования адсорбента: 1 - линейная зависимость, 2 - незаполнение адсорбента, 3 - повышение температуры адсорбента.

Максимальная быстрота откачки насоса для линейной скорости транспортирования 1 мм/с , площади поперечного сечения слоя 1 см^2 и $\Gamma = 10^4 \text{ л/см}^3$ составит 10^3 л/с .

Быстрота откачки насоса увеличивается по мере понижения давления, что связано с увеличением теплоты адсорбции при уменьшении количества поглощённого газа, и является характерной особенностью всех адсорбционных насосов.

Предельное давление адсорбционных насосов с движущимся адсорбентом определяется суммой нескольких компонент: 1/ равновесного давления над охлаждённым адсорбентом, 2/ давления обратного потока через шлюзовые каналы, 3/ давления газост-

деления и натекания деталей насоса.

Первая составляющая предельного давления - равновесное давление над охлажденным адсорбентом определяется на основании существующих теорий адсорбции как переход от равновесного состояния T_g, p_g путём охлаждения к новому равновесному состоянию T_a, p_a при неизменном количестве поглощенного газа. Отношение p_g/p_a представляет собой максимальный коэффициент компрессии насоса и в простейшем случае рассчитывается по формуле

$$\frac{p_g}{p_a} = \sqrt{\frac{T_g}{T_a}} \exp \left[\frac{Q}{R} \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_g} \right) \right] \quad /32/$$

Расчёт, выполненный по /32/ при теплоте адсорбции 3000 $\frac{\text{ккал}}{\text{кмоль}}$ и трёхкратном отношении температур в камере адсорбции и десорбции, даёт значение максимального коэффициента компрессии одной ступени откачки $\sim 10^6$.

Определим распределение давления и обратный поток через канал с движущимся адсорбентом, когда направление обратного потока газа совпадает с направлением движения адсорбента или противоположно. Будем считать, что адсорбционное равновесие в элементарном объёме канала устанавливается мгновенно и выполняется закон Генри для адсорбции. Изменение давления во времени в элементарном объёме этого канала, имеющего площадь поперечного сечения F , определяется следующим дифференциальным уравнением:

$$\frac{\partial p(x,t)}{\partial t} = D_r \frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial x^2} - \frac{U \cdot F}{F} \cdot \frac{\partial p(x,t)}{\partial x} \quad /33/$$

с начальными и граничными условиями

$$t=0 : p(x,0) = p_0;$$

$$x=0 : p(0,t) = p_g;$$

$$x=l : p(l,t) = p_a. \quad /34/$$

Стационарное распределение давления по длине канала найдём, решая /33/, /34/

$$p_x = p_g - (p_g - p_a) \frac{1 - \exp\left(\frac{U \cdot F \cdot x}{D_r \cdot F}\right)}{1 - \exp\left(\frac{U \cdot F \cdot l}{D_r \cdot F}\right)} \quad /35/$$

где положительный знак объемной скорости транспортирования слоя U означает движение газа, адсорбента в попутном, а отрицательный - в противоположных направлениях.

Стационарный поток адсорбата через шлюз при движении газа и адсорбента в одинаковых направлениях

$$Q_+ = v \cdot \Gamma \cdot p_g + \frac{v \cdot \Gamma (p_g - p_a)}{\exp\left(\frac{v \cdot \Gamma \cdot d}{D \cdot p_g}\right) - 1} \quad /36/$$

при противоположных направлениях потоков

$$Q_- = -v \cdot \Gamma \cdot p_g + \frac{v \cdot \Gamma (p_g - p_a)}{1 - \exp\left(-\frac{v \cdot \Gamma \cdot d}{D \cdot p_g}\right)} \quad /37/$$

отношение дополнительного обратного потока и газоотделения деталей насоса к скорости откачки насоса определяет вторую и третью составляющую предельного давления.

Глава 4. Расчёт и конструирование камер адсорбции и десорбции методом статистических испытаний /Монте-Карло/.

Для конструктивной схемы камер адсорбции /см. рис.6/, инвариантной относительно подобного изменения размеров, определены интегральный и дифференциальный коэффициенты захвата и степени покрытия активных поверхностей /заштрихованы на схеме/ в зависимости от соотношения размеров и скорости транспортирования адсорбента. Исследования проводились при молекулярном режиме течения газа. Входной поток считался равномерно распределённым по площади входного отверстия с косинусным угловым распределением. Вероятности захвата молекул на свободных поверхностях принимались пропорциональными доле свободной поверхности. Имитация движущегося слоя обеспечивалась последовательной перестановкой активных поверхностей в соответствии со стрелками на рис.6. Причём перестановка элемента от внутреннего торца к входному отверстию сопровождалась очисткой поверхности от адсорбированных молекул, имитировавшей десорбцию. Число испытаний в зависимости от сложности схемы изменялось от 150000 до 5000, что занимало для каждого эксперимента около 6. часов машинного времени на ЭВМ "ОДРА 1204".

В результате исследования конструктивных схем, полученных из основной путём изменения одного из её параметров, удалось построить зависимости дифференциального коэффициента захвата насоса от числа адсорбционных элементов K_1 , относительной ширины адсорбционного элемента $d_2/2d$ и внутреннего диаметра $2d_1/2d$. Коэффициент захвата насоса при малых степенях

заполнения насоса Θ уменьшается с ростом числа адсорбционных элементов, а при больших Θ , наоборот, увеличивается. При средних значениях $\Theta \approx 0,45$ коэффициент захвата слабо зависит от числа адсорбционных элементов.

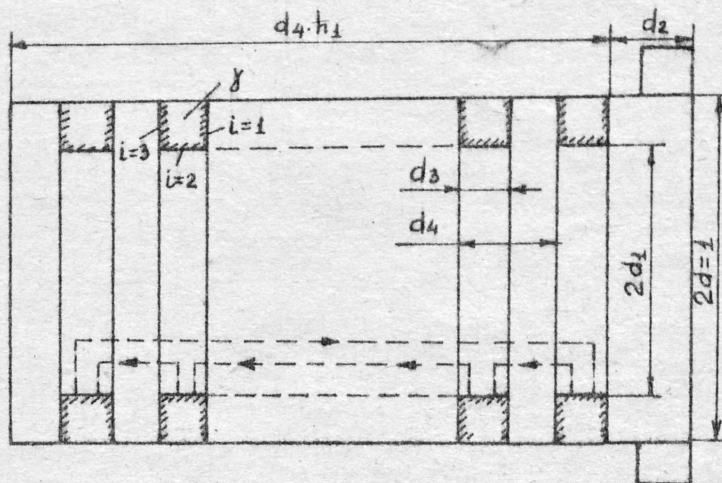


Рис.6. Расчётная схема рабочей полости адсорбционного насоса.

Если в качестве критерия для выбора соотношения внутреннего диаметра и длины адсорбционной полости выбрать постоянство коэффициента захвата насоса при переменной степени заполнения Θ , изменяющейся в пределах от 0,2 до 0,8, то при соотношении 1:2 колебания коэффициента захвата не превышают 20%, что можно считать приемлемым для практического применения.

Изменения коэффициента захвата насоса в зависимости от внутреннего диаметра $2d_1/2d$ носит почти линейный характер в интервале исследованных Θ от 0,1 до 0,9. Зависимость коэффициента захвата насоса от относительной ширины адсорбционных элементов имеет характерный максимум при $d_3/2d = 0,04 \pm 0,05$ для различных Θ , соответствующий отношению диаметра и длины рабочей полости 1:2, что является дополнительным подтверждением целесообразности выбора указанного соотношения.

Выбор размеров адсорбционной камеры определяется обратным методом по графическим зависимостям с учётом выбранной ранее оптимальной скорости транспортирования адсорбента.

Даны рекомендации по конструированию камер десорбции.

Глава 5. Разработка и исследование композиционных адсорбционных материалов с улучшенными теплофизическими и механическими характеристиками.

Рассмотрен комплекс технологических работ, выполненных по разработке новых адсорбционных материалов, получаемых прессованием, формованием и прокаткой. В качестве наполнителя, связующей, пластифицирующей и частично адсорбирующей компоненты использовались металлические порошки Ti , Ni , Si , Al различного гранулометрического состава. Основной сорбирующей компонентой являлись кристаллические цеолиты и размельчённый активный уголь СКТ-2. В отдельных случаях в качестве связующего в смесь вводили концентрированный золь кремниевой кислоты и пересажённую гидроокись алюминия. Парообразующей компонентой являлась техническая мочеви́на. На способ получения композиционных адсорбционных материалов получены два авторских свидетельства.

Методами стационарного теплового потока определялась теплопроводность специальных образцов, изготовленных из разработанных материалов. Исследовалось влияние типа порошка, состава смеси, усилия прессования на теплопроводность. Композиционные материалы, рекомендуемые для применения в адсорбционных насосах, с содержанием никеля от 60 до 70 объёмных процентов и кристаллического адсорбента NaX , CaA , CaE , СКТ от 30 до 40 объёмных процентов обладают теплопроводностью $3,6 \pm 0,6$ Вт/м.К, что примерно в 40 раз превышает теплопроводность исходных промышленных адсорбентов.

Адсорбционные характеристики композиционных материалов исследовались объёмной методикой при времени установления адсорбционного равновесия 30 мин и 2 часа. Изучалось влияние типа металлического порошка на адсорбцию воздуха при 77 К. Лучшие результаты были получены на титановых порошках. Исследовалось влияние температуры спекания, температуры и выдержки

при обезгаживании, а также объёмного содержания адсорбента на количество поглощённого газа.

Определены адсорбируемости и коэффициенты диффузии в диапазоне давлений $10^{-6} + 10^{-2}$ торр для новых композиционных материалов. Наилучшие результаты были получены на цеолите и активном угле СКТ-2.

Механические характеристики композиционных материалов оценивались по сопротивлению на раздавливание. Они оказались в несколько раз прочнее, чем промышленные адсорбенты. Образцы, полученные прессованием с 30% объёмным содержанием цеолита NaX, имели прочность на раздавливание $\sim 100 \text{ Н/мм}^2$.

Оценка виброизноса промышленных адсорбентов, сделанная в работе, позволяет оценивать срок их службы в насосе с вибротранспортированием $\sim 10^4$ часов.

Глава 6. Расчёт и конструирование вспомогательных элементов адсорбционных откачных устройств непрерывного действия.

Наиболее эффективный теплообменник – круглая трубка, омываемая со всех сторон хладагентом, была исследована в данной работе. Трубка внутренним диаметром 10 мм засыпалась адсорбентами различной грануляции, термопара измеряла температуру в центре трубки. Из кривых охлаждения и нагревания слоя при граничных условиях I рода определялся кажущийся коэффициент температуропроводности. С уменьшением размера гранул адсорбента значение коэффициента температуропроводности уменьшалось, что говорит о преимущественной передаче тепла лучеиспусканием. Это позволило считать, что теплофизические характеристики движущегося и неподвижного слоя одинаковы.

В связи с конструктивной сложностью шлюзовых устройств закрытого и полукрытого типа в данной работе применялись лишь шлюзовые устройства открытого типа, перепад давления между камерами адсорбции и десорбции в которых создаётся за счёт вакуумного сопротивления слоя адсорбента. В работе рассмотрены две конструкции таких шлюзов: ребристый шлюз и трубчатый шлюз. Теоретически и экспериментально определена проницаемость слоёв адсорбента различной грануляции при различных

ражимах течения газа.

Для транспортирования адсорбционных материалов в насосе преимущество в работе отдаётся вибрационным механизмам, достоинствами которых являются отсутствие пар трения в вакууме и незначительное разрушение адсорбента. Тем не менее в одной из конструкций адсорбционных ловушек был использован гладкий цилиндрический транспортёр с вводом вращения в вакуум.

В работе экспериментально получена формула для расчёта скорости транспортирования адсорбционных материалов на плоских и спиральных вибротранспортёрах в зависимости от углов установки пружин и подъёма спирали, амплитуды и частоты колебаний.

Исследованы экспериментально производительности других вибрационных механизмов, перспективных для применения в насосах. К ним относятся: напорный, спускной, ситовой и клапанный механизмы. На вибропривод адсорбционного насоса получено авторское свидетельство №477078. Исследованы динамические условия устойчивости транспортирования адсорбента для одномассового бункера с пятью степенями свободы.

В связи с использованием в насосе нестандартных разборных соединений, работающих в условиях переменных температурных воздействий, разработаны двух и трёхэлементная расчётные модели вакуумных фланцевых соединений. На одну из конструкций с упругими элементами получено авторское свидетельство.

Исследованы напряжения и деформаций в элементах соединения контактирующих и неконтактирующих фланцев в условиях начальной затяжки болтов и при воздействии атмосферного давления. Экспериментально исследованы податливости и ползучести прокладок различной формы при двух рабочих температурах: 20° и 450°C .

Изучены температурные поля и напряжения в элементах соединений и температурные напряжения, возникающие за счёт разности температур между обечайкой и фланцем.

Глава 7. Проектирование адсорбционных насосов и ловушек с движущимся адсорбентом.

Методика проектировочного расчёта насоса основана на режиме малых скоростей транспортирования. Приведён численный

пример расчёта. Методика проверочного расчёта учитывает одновременное протекание массо и теплообменных процессов.

Рассмотрены особенности конструкций разработанных насосов и ловушек с движущимся адсорбентом, обсуждаются технические направления в конструировании отдельных узлов и их общей компоновке: верхнее и нижнее расположение нагревателя, центральное и периферийное расположение камеры десорбции, одно, двух и трёхмассовый вибрационный привод, использование различных механизмов транспортирования, открытое и закрытое /в вакууме/ расположение вибробункера и т.д.

На разработанных конструкциях осуществлялась экспериментальная проверка методики расчёта /см. рис.7 и 8/, показавшая удовлетворительное совпадение результатов расчёта и эксперимента.

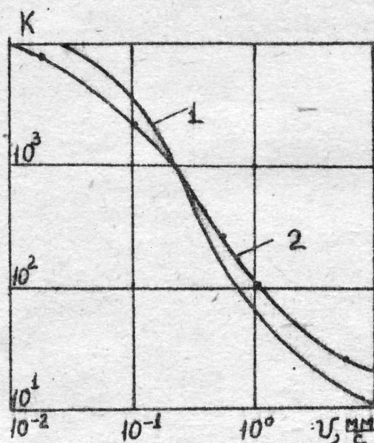


Рис.7. Коэффициент компрессии насоса при различных скоростях транспортирования адсорбента: 1 - расчётная кривая, 2 - экспериментальная.

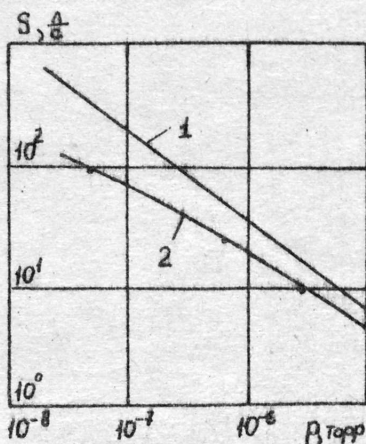


Рис.8. Быстрота откачки насоса ВАНДА - 4:
1 - расчётная кривая,
2 - экспериментальная.

На конструкции адсорбционных насосов и ловушек получено 6 авторских свидетельств. Вакуумные насосы и ловушки с движущимся адсорбентом внедрены для испытания узлов трения в вакууме и для откачки термического оборудования в электронной технике.

Народно-хозяйственный эффект от внедрения новых методов откачки, без учёта улучшения качества обработки, только на капитальных затратах и эксплуатационных расходах составляет не менее 500 тысяч рублей в год.

Основные выводы.

Положено начало новому направлению исследований в вакуумной технике—теории, расчёту и проектированию адсорбционных откачных устройств непрерывного действия. На основании анализа существующих систем периодического действия /глава 1/ сделан вывод о целесообразности перехода к системам непрерывного действия. Разработана теория работы адсорбционных откачных устройств непрерывного действия в режимах малых, средних /глава 2/ и больших скоростей транспортирования /глава 3/. Исследованы вопросы расчёта и проектирования основных узлов: камер адсорбции и десорбции /глава 4/; разработаны новые адсорбенты /глава 5/; исследованы перспективные вибрационные механизмы для транспортирования адсорбента, теплообменники, шлюзы, фланцевые соединения /глава 6/. Созданы конструкции насосов и ловушек на новом способе откачки /глава 7/:

1. Аналитически исследованы производительности насоса с движущимся адсорбентом в режиме малых и средних скоростей транспортирования в установившемся и неустойчивом режиме работы для двух крайних случаев возможного изменения распределения концентрации при переходе адсорбентом шлюзовых камер: при сохранении неизменного распределения или его усреднения. Показано, что наибольшее различие в результатах расчёта производительности возникает при $\tau_a = \tau_g$ и достигает 15%. Для приближённых расчётов с запасом рекомендуется метод, использующий усреднение концентраций, как дающий меньшее значение производительности. Определено простое условие выхода насоса на установившийся режим работы $i(\tau_a + \tau_g) \geq 0,35$, где i — число циклов транспортирования, τ_a и τ_g — безразмерные времена адсорбции и десорбции.

2. Аналитически исследованы производительности насоса, работающего в режиме больших скоростей транспортирования в установившемся и в неустойчивом режиме работы для последовательных циклов транспортирования адсорбента. Определено приоб-

лиженное условие выхода насоса на установившейся режим работы как сумма циклов транспортирования, необходимых для установления массообменного и теплообменного равновесия.

3. Разработана методика и программа для расчета производительности насоса при переменной температуре адсорбента, учитывающая одновременное протекание тепло и массообменных процессов.

4. Предложен графоаналитический способ расчёта производительности и распределения температуры в камере адсорбции, пригодный для решений, представляющих средние температуры или средние концентрации в виде суммы функций, обладающих свойством

$$f(x_1 + x_2) = f(x_1) \cdot f(x_2)$$

5. Получены расчетные выражения для определения быстроты откачки насоса при различных условиях его работы. Максимальная быстрота откачки насоса для линейной скорости транспортирования адсорбента 1 мм/с, площади поперечного сечения слоя 1 см² и коэффициента Генри 10⁴ л/см³ составляет 10³ л/с.

6. Быстрота откачки насоса при малых скоростях транспортирования прямо пропорциональна v_A , при средних скоростях - пропорциональна $\sqrt{v_A}$, а при больших скоростях - экспоненциально убывает с ростом скорости транспортирования.

7. Предельное давление насоса с движущимся адсорбентом определяется: равновесным давлением адсорбата, охлажденного от температуры камеры десорбции до температуры камеры адсорбции; давлением адсорбата, поступающего обратным потоком через открытые шлюзовые системы; динамическим давлением, определяемым газовыделением и быстротой откачки насоса. Максимальный коэффициент компрессии одной ступени откачки насоса, охлаждаемого до температуры жидкого азота, достигает 10⁶ для теплоты адсорбции 3000 ккал/кмоль и трёхкратном отношении температур в камерах адсорбции и десорбции.

8. Установлены зависимости коэффициентов захвата насоса от относительных размеров рабочей камеры и скорости транспортирования. Рекомендуется соотношение диаметра и длины рабочей полости 1:2 из условия постоянства коэффициента захвата насоса в широком диапазоне относительных заполнений.

9. Металлизированные адсорбенты, разработанные в данной работе, обладают теплопроводностью 3,6 + 6,0 Вт/м·К, что примерно в 40 раз выше, чем теплопроводность исходных промышленных адсорбентов, а их механическая прочность по сопротивлению на

раздавливание колеблется в пределах от 75 до 110 Н/мм², что в 5+8 раз выше, чем для промышленных адсорбентов. Наилучшие результаты могут быть достигнуты прессованием, хуже - прокаткой и формованием. Срок службы адсорбента в насосе оценивается $\sim 10^4$ часов.

10. Для перемещения адсорбента в насосе удобны механизмы вибротранспортирования, обладающие следующими преимуществами: отсутствие пар трения; меньшее, чем в других способах транспортирования, разрушение адсорбента.

11. Исследована трехэлементная модель прогреваемых вакуумных соединений, определены экспериментально податливости металлических прокладок при 20° и 450°С, необходимые для практического применения модели расчёта нестандартных фланцевых соединений. Определены условия их надёжной работы при циклических изменениях температуры.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Розанов Л.Н. "Вакуумная техника", Изд.ЛПИ, 1971г., II п.л.
2. Розанов Л.Н. Молекулярная проводимость элементов вакуумных систем с произвольным числом входов, "Журнал технической физики", т.63, №4, 873-876, 1973г.
3. Розанов Л.Н., Шенёв В.В. Проводимость щитковых вакуумных ловушек при молекулярном режиме течения газа, "Журнал технической физики", т.63, №6, 1284-1289, 1973г.
4. Розанов Л.Н., Кузиниц Л.А. Новый адсорбционный вакуумный насос с движущимся регенерируемым адсорбентом, "Вопросы атомной науки и техники", сер."Физика и техника высокого вакуума", вып. I, стр.33-39, 1973г.
5. Розанов Л.Н., Лебедев В.М. Высоковакуумный виброадсорбционный насос, "Электронная техника", сер.4, вып. I, 76-84, 1974г.
6. Розанов Л.Н., Кузиниц Л.А. Теория адсорбционных вакуумных насосов непрерывного действия, "Бюллетень польской академии наук", сер.техн.наук, т.23, №7, 55-63, 1975г.
7. Розанов Л.Н. Вакуумные машины и установки, Изд. "машиностроение", 21 п.л., 1975г, 336 стр.

М-23027. Подписано к печати 1/1 1978 г. Заказ 8
Объем 1,75 печ.листа. Тираж 100. Бесплатно.
Отпечатано на ротационной машине Ленинградского политехнического института имени М.И.Калинина.
195251. Ленинград, Политехническая ул., 29.