



004614384

ЗОБКОВ ПАВЕЛ НИКОЛАЕВИЧ

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРОЦЕССА КРИСОСОРБЦИОННОЙ ОТКАЧКИ
ИМПУЛЬСНЫХ ПОТОКОВ РАЗРЕЖЕННОГО ГАЗА**

Специальность : 05.04.03 - «Машины и аппараты , процессы холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения».

25 НОЯ 2010

АВТОРЕФЕРАТ
диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2010

Работа выполнена в ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий".

Научный руководитель: доктор технических наук
Иванов Владислав Иванович

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Эглит Александр Янович
доктор технических наук
Полупан Андрей Владимирович


Ведущее предприятие: Научно-производственное предприятие
«Лазерные системы», Санкт-Петербург

Защита состоится 24» ноября 2010 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.234.01 в Санкт-Петербургском государственном университете низкотемпературных и пищевых технологий по адресу: 191002, г. Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, д.9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГУНиПТ.

Автореферат разослан 21» октября 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.234.01,
доктор технических наук, профессор

 В.А.Рыков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современное машиностроение и приборостроение требуют широкого внедрения новых инновационных технологий обработки материалов, в частности лазерной. Особенно актуальными в этом плане считаются химические кислородно-йодные лазеры, которые находят применение в таких областях, как дистанционное разрушение конструкций в опасных условиях (например утилизация ядерных реакторов), обработка (резка, сверление и т.д.) и термоупрочнение материалов. Высокая эффективность, а также хорошие массогабаритные характеристики создают предпосылки для применения лазеров этого типа в системах военного назначения как для локации, так и для поражения объектов на расстоянии в сотни километров.

Необходимым элементом кислородно-йодного лазера является система откачки газа при давлении 1-1300 Па. Поскольку величина потока газа может составлять до 30 моль/с, то практически отсутствует разумная альтернатива криосорбционному методу откачки как по энергетическим, так и по массогабаритным показателям, особенно если речь идет о мобильных лазерных системах. Во время включения лазера криосорбционный насос должен за короткий временной промежуток откачивать интенсивный поток газа, сорбент при этом разогревается, вследствие выделения теплоты сорбции, скорость откачки падает. После этого, до следующего включения, происходит перерыв напуска газа, и слой сорбента в какой-то мере охлаждается за счет отвода теплоты криопанелью. Таким образом осуществляется чередование периодов напуска и перерывов напуска до тех пор, пока, вследствие снижения скорости откачки криосорбционного насоса, давление в системе не превысит допустимое значение, и работа химического лазера станет невозможной. Эффективность работы системы откачки определяется числом возможных включений. Чем больше включений, тем выше эффективность её работы.

Широкие перспективы использования кислородно-йодных лазерных систем делают весьма актуальной разработку адекватной методики расчета одного из её основных элементов - криосорбционного вакуумного насоса. Наличие такой методики позволит осуществлять анализ процессов в насосе и определять меры повышения эффективности его работы (например, за счет повышения эффективной теплопроводности сорбента или создания новых профилей криопанелей). Важность указанной задачи состоит еще и в том, что аналогичные насосы находят все большее применение в системах откачки газодинамических установок (системы молекулярных пучков, аэродинамические трубы малой плотности и др.), работающих в импульсном режиме при среднем и низком вакууме, что еще раз подчеркивает актуальность темы данной работы.

Цель работы. Разработка методики расчета процесса криосорбционной откачки импульсных потоков разреженного газа в условиях нестационарного температурного поля слоя сорбента. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Аналитическое моделирование процессов протекающих в насосе и откачиваемой камере при импульсном напуске газа.
2. Определение характера взаимовлияния изменений отдельных параметров друг на друга и на процесс откачки в целом.
3. Расчёт температурных полей в слое адсорбента с учётом изменяющегося во времени и пространстве внутреннего источника теплоты (теплоты сорбции) для одномерной и двумерной задач.

4. Разработка физической и математической моделей для расчёта эффективного коэффициента теплопроводности слоя сорбента при криогенных температурах в условиях вакуума и экспериментальная их проверка.
5. Экспериментальное определение температурной зависимости скорости откачки сорбента.
6. Разработка алгоритма расчёта процесса криосорбционной откачки для плоской и оребренной криопанелей.
7. Экспериментальное исследование процесса криосорбционной откачки.
8. Разработка рекомендаций по повышению эффективности криосорбционной откачки интенсивных импульсных потоков разреженного газа.

Научная новизна. Разработана методика расчёта процесса криосорбционной откачки интенсивных импульсных потоков разреженного газа, которая позволяет учитывать нестационарность температурного поля в слое сорбента и, как следствие этого, зависимость скорости откачки и соответственно тепловыделений от локальных значений температур на отдельных участках слоя сорбента. Получены данные по эффективному коэффициенту теплопроводности слоя сорбента при криогенных температурах и условиях вакуума. Определена зависимость скорости откачки слоя сорбента от температуры. Получены экспериментальные сведения по основным зависимостям, характеризующим процесс криосорбционной откачки, а именно по изменению температурного поля слоя сорбента, скорости откачки сорбента и изменению давления в камере с криосорбционным насосом при импульсном напуске газа. Проведено исследование влияния на эффективность процесса криосорбционной откачки профиля охлаждающей сорбент криопанели и добавки в слой сорбента включений с высоким коэффициентом теплопроводности.

Практические результаты. Разработанная методика расчета процесса криосорбционной откачки импульсных потоков разреженного газа позволяет:

- в зависимости от индивидуальных исходных параметров (расход напускаемого газа, время напуска газа и т.д.) проектировать эффективные системы откачки для различных газодинамических установок (химические кислородно-йодные лазеры, системы молекулярных пучков, аэродинамические трубы малой плотности и др.) работающих в импульсном режиме;
- учитывать влияние теплофизических свойств сорбента на работу криосорбционного вакуумного насоса;
- увеличить эффективность работы криосорбционного вакуумного насоса за счёт оптимального подбора профиля охлаждающей сорбент криопанели;
- увеличить эффективность работы криосорбционного вакуумного насоса за счёт определения оптимальной доли включений с высоким коэффициентом теплопроводности в слой сорбента;
- повысить оперативность проектных и конструкторских работ, связанных с разработкой систем откачки, работающих в импульсном режиме.

Внедрение результатов работы

- ООО НПК «ГОИ им. Вавилова» использует методику расчета процесса криосорбционной откачки импульсных потоков газа при исследовании оптических параметров разреженной газовой среды;
- результаты работы использованы в учебном процессе по направлениям подготовки 140400 «Техническая физика» и 140500 «Энергомашиностроение» в изучении

специального курса «Вакуумная техника» на кафедре криогенной техники СПбГУНиПТ.

Апробация работы и результаты. Результаты диссертационной работы опубликованы в 5 печатных трудах, в том числе 2 работы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, и доложены на III-ей Международной научно-технической конференции «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке», Санкт-Петербург, 2007 г.; на 34-ой НПК профессорско-преподавательского состава докторантов, аспирантов и сотрудников университета, Санкт-Петербург, 2008г.; на 35-ой НПК профессорско-преподавательского состава докторантов, аспирантов и сотрудников университета, Санкт-Петербург, 2009г.; на IV-ой Международной научно-технической конференции «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке», Санкт-Петербург, 2009 г.; на 36-ой НПК профессорско-преподавательского состава докторантов, аспирантов и сотрудников университета, Санкт-Петербург, 2010г.

Объём работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы (95 наименования) и 3-х приложений. Она изложена на 121 страницах машинописного текста, содержит 59 рисунков и 19 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В России созданием различных типов криосорбционных вакуумных насосов и исследованиями связанными с изучением сорбционных свойства при криогенных температурах занимались такие видные ученые как Лазарев Б.Г., Федорова М.Ф., Коган В.С., Волчкевич А.И., Куприянов В.И., Розанов Л.Н. и др. Среди зарубежных ученых следует отметить Брунауэра С., Хэфера Р., Уинздора Е., Штерна С. и др.

В результате анализа методик расчёта процесса криосорбционной откачки, обзора конструктивного исполнения различных криосорбционных систем откачки для газодинамических установок автор делает следующие выводы:

- в изученных работах не была найдена методика расчёта процесса криосорбционной откачки при импульсном напуске откачиваемого газа в условиях нестационарного температурного поля сорбента;
- все известные криосорбционные насосы предназначены для откачки при малых расходах газа, при этом только некоторые конструкции теоретически способны работать в импульсном режиме при больших массовых расходах откачиваемого газа;
- в известных теоретических исследованиях процесса криосорбционной откачки принималось, что температура адсорбента равна температуре криоагента и поддерживается постоянной или допускается небольшая температурная стратификация;
- в литературе приводятся различные конструктивные решения криосорбционных насосов для достижения среднего и низкого вакуума без их теоретического обоснования.

На основе сделанных выводов автор обозначает цель научного исследования: создание методики, при помощи которой можно будет адекватно оценить работу криосорбционных вакуумных насосов в условиях интенсивных расходов откачиваемого газа и при изменении температурного поля в слое сорбента.

Важным фактором влияющим на работу любого криосорбционного вакуумного насоса являются адсорбционные (удельная емкость, размер входных окон и др.) и теплофизические (плотность, теплоемкость, теплопроводность и температуропроводность) характеристики сорбента. В связи с этим были сопоставлены данные характеристики различных сорбентов и обоснован выбор наиболее подходящего

типа сорбента (цеолит NaX) для откачки интенсивных потоков азота в диапазоне давлений от 1-1300 Па.

Для определения скорости изменения давления в камере с криосорбционной панелью (см. рис.1) составляется уравнение материального баланса:

$$Vdp = (Sp - I)d\tau \quad (1)$$

Интегрирование уравнения (1) позволяет получить два уравнения для определения конечного давления за какой-то промежуток времени:

$$p_k = p_{\text{н}} + (p_{\text{н}} - p_{\text{п}}) \exp\left(-\frac{S}{V}\tau\right) \quad (2)$$

для случая, когда происходит напуск газа и

$$p_k = p_{\text{н}} \cdot \exp\left(-\frac{S}{V}\tau\right) \quad (3)$$

для случая отсутствия напуска газа.

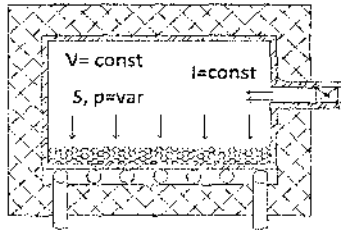


Рис. 1. Вакуумируемая камера с криосорбционной панелью.

V-объем камеры;

S-скорость откачки; p-давление;

I- расход напускаемого газа .

На основе данных уравнений был определен характер изменения давления в откачиваемой системе с циклическим напуском газа (см. рис.2).

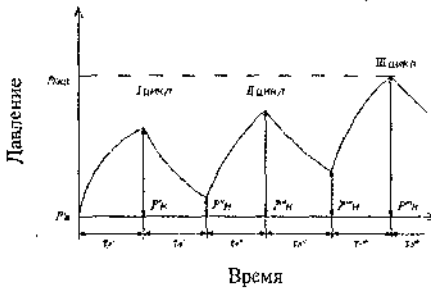


Рис. 2. Характер изменения давления от времени в откачиваемой системе с циклическим напуском газа.

Для расчета изменения давления в камере необходимо знать интегральную скорость откачки всего слоя сорбента, которую, в свою очередь, можно определить только зная скорости откачки каждого элементарного слоя. Скорость откачки элементарного слоя зависит от его локальной температуры. Следовательно, при расчете изменения давления в камере следует параллельно находить температурное поле в слое сорбента и периодически корректировать значения скоростей откачки каждым элементарным слоем и тепловыделений в нём в соответствии с его локальной температурой в данный момент времени.

Температурное поле внутри слоя адсорбента может быть одномерным в случае охлаждения плоской криопанелью и двумерным в случае охлаждения сорбента на

обретенной криопанели. Изменение температурного поля внутри слоя сорбента описывается дифференциальными уравнениями теплопроводности:

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{w}{c\rho} \quad (4)$$

для одномерного температурного поля и

$$\frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial y^2} \right) + \frac{w}{c\rho} \quad (5)$$

для двумерного температурного поля.

Поскольку решить данные дифференциальные уравнения аналитически не представляется возможным, для определения температурного поля использован метод конечных разностей и слой сорбента разбит пространственно-временной сеткой. Составляя уравнение теплового баланса для каждой узловой точки, можно записать следующие уравнения для определения температуры на следующем временном шаге:

$$T_i^* = F_0 \left(T_{i-1} + \left(\frac{1}{F_0} - 2 \right) \cdot T_i + T_{i+1} \right) + \frac{F_0 \cdot W_i \cdot \delta^2}{\lambda_c} \quad (6)$$

для одномерного температурного поля и

$$T_{x,y}^* = F_0 \left[T_{x-1,y} + T_{x+1,y} + T_{x,y+1} + T_{x,y-1} + T_{xy} \left(\frac{1}{F_0} - 4 \right) \right] + F_0 \frac{w_{xy} \delta^2}{\lambda_c} \quad (7)$$

для двумерного температурного поля.

Для выполнения условия сходимости критерий Фурье должен принимать значения не более 1/2 при одномерном температурном поле и не более 1/4 при двумерном температурном поле. Для решения данных уравнений, кроме этого, необходимо иметь надежные сведения по эффективному коэффициенту теплопроводности слоя сорбента NaX для области криогенных температур в условиях вакуума. Справочных данных по данной величине для заданных условий найти не удалось.

Вопросом определения эффективного коэффициента теплопроводности дисперсных веществ занимались Оделевский В.И., Чудновский А.И., Дульнев Г.Н., Платунов Е.С., Муратова Б.Л., Сигалова З.В., Заричняк Ю.П., Богомолов В.З., Ляликов А.С., Каганер М.Г., Вулей П., Саутвик П. и другие авторы. На основе проведенного обзора были сделаны следующие выводы:

-примеров экспериментальных установок для определения эффективной теплопроводности дисперсных веществ для узкого диапазона температур 78-110 К найти не удалось;

-расчетные методики по определению эффективного коэффициента теплопроводности дисперсных веществ базируются в основном на методе обобщенной проводимости. Существует множество математических моделей, но каждая из них имеет преимущества и недостатки, поэтому прежде чем воспользоваться этим методом необходим тщательный анализ.

В результате эффективный коэффициент теплопроводности был рассчитан для нескольких математических моделей на базе метода обобщенной проводимости. По результатам расчета были построены зависимости эффективного коэффициента теплопроводности от пористости (см. рис. 4). Поскольку результаты различных моделей существенно различались, то было проведено экспериментальное исследование, на основании которого получено аппроксимирующее уравнение:

$$\lambda/\lambda_1 = -5.63 \ln(m_2) + 0.159 \quad (8)$$

Сравнение экспериментальных и расчетных данных выявило то, что ни одна модель не совпадает достаточно хорошо с экспериментом (см. рис. 4). Поскольку наличие адекватной модели позволяет быстро и удобно производить расчет эффективного коэффициента теплопроводности, автором была создана физическая и математическая модель для определения эффективного коэффициента теплопроводности при криогенных температурах и условиях вакуума. На рис.3 представлена структура и элементарная ячейка модели.

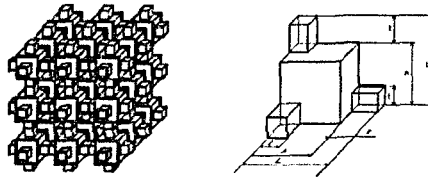


Рис. 3. Структура с взаимопроникающими компонентами и “шейками” (слева) и элементарная ячейка системы (справа) .

Эффективный коэффициент теплопроводности элементарной ячейки определяется из уравнения (9):

$$\lambda = \frac{L \times L}{L \times R} = \frac{1}{1 \times R} = \frac{1}{R} \quad , (9)$$

где R-тепловое сопротивление элементарной ячейки;

L- относительный размер элементарной ячейки (см. рис. 3), L=1.

Данные, рассчитанные по модели автора, также представлены на рис.4 и дают наиболее близкое совпадение с экспериментальными значениями, особенно в диапазоне пористости 0.45-0.53.

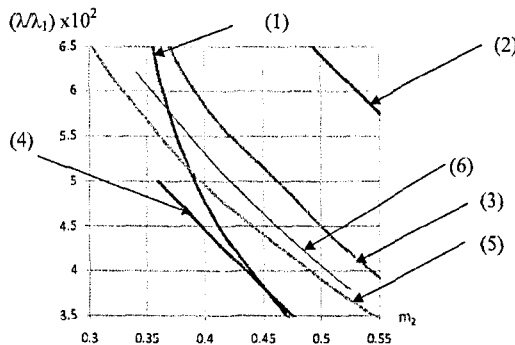


Рис.4. Графики зависимости отношения эффективной теплопроводности слоя к теплопроводности каркаса от пористости системы $\lambda/\lambda_1 = f(m_2)$.

1- модель В.З. Богомолова; 2- модель А.С. Ляликова ; 3- модель Г.Н. Дульнева и З.В. Сигаловой ; 4- модель М.Г. Каганера; 5- результаты автора; 6- результаты опыта.

Погрешность расчетных данных определяется прежде всего тем, что для математической модели принимаются различные допущения (прямолинейность линий эка, структура модели несколько отличается от реального строения дисперсной системы и т.д.).

Для определения зависимости скорости откачки слоя сорбента от температуры был проведен эксперимент. В качестве сорбента в опытах был использован цеолит NaX. риопанель термостатировалась при любой температуре в диапазоне от 78 до 110 К утем изменения расхода паров криоагента через нее. По экспериментальным данным были построены графики зависимости скорости откачки от времени при различных температурах (см. рис.5, а). Анализ полученных данных позволил определить зависимость скорости откачки от температуры адсорбента (см. рис.5, б). В интервале температур от 78 К до 110 К она оказалась линейной и может быть выражена уравнением:

$$S = S_0 [1 - B(T - T_0)] \quad (10)$$

указанном выше интервале температур коэффициент B для цеолита NaX оказался равным 0.028.

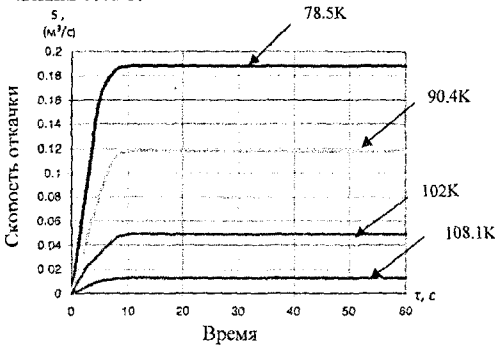


рис. 5,а. Графики зависимости скорости откачки от времени при различных температурах

$$S = f(\tau).$$

Для оценки сопротивления щелевых каналов между гранулами сорбента при протекании газа проводилось исследование, в результате которого было установлено, что при протекании газа реализуется ламинарный режим течения и сопротивление равно ~ 10 Па, что составляет ~10 % и ниже от рабочего давления (100-1300 Па).

На основе проведенных научных исследований был составлен подробный шаговый алгоритма расчета процесса криосорбционной откачки интенсивных потоков разреженного газа в импульсном режиме.

Алгоритм расчета процесса криосорбционной откачки.

Слой адсорбента разбивается на N элементарных слоев или элементов. Толщина элементарного слоя $\delta = l/N$, где l – толщина слоя сорбента.

Объем элементарного слоя $V = V_c/N$, где V_c – объем сорбента.

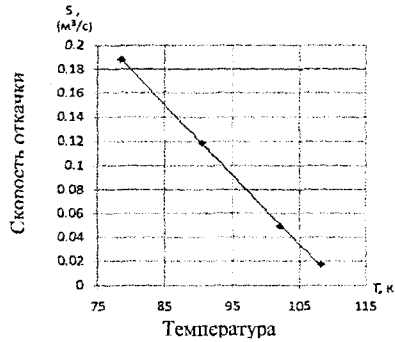


Рис. 5,б. График зависимости скорости откачки от температуры

$$S = f(T).$$

2. Определение коэффициента температуропроводности слоя адсорбента:

$$a = \frac{\lambda_c}{C_c \rho_c},$$

где λ_c – эффективный коэффициент теплопроводности сорбента;

ρ_c – насыльная плотность сорбента;

C_c – удельная теплоемкость сорбента.

3. Расчет шага по времени: $\Delta t = \frac{\delta^2 \cdot Fo}{a}$, где Fo – критерий Фурье.

4. Начальная температура во всех узловых точках элементарных слоев или элементов адсорбента одинаковая:

$$T_i = T_0 = 78K, \quad i = 0 \dots 12. \text{ При одномерном температурном поле.}$$

$$T_{n,m} = T_0 = 78K, \quad n = 0 \dots 8, \quad m = 0 \dots 8. \text{ При двумерном температурном поле.}$$

5. Начальная скорость откачки элементарных слоев и элементов также одинаковая:

$$S_i = \frac{S_0}{N}, \quad i = 1 \dots 12, \text{ при одномерном температурном поле.}$$

$$S_{n,m} = \frac{S_0}{N}, \quad n = 1 \dots 8, \quad m = 1 \dots 8, \text{ при двумерном температурном поле,}$$

где S_0 – начальная скорость откачки насоса.

6. Предельное разрежение в камере на первом временном шаге:

$$p_{II} = \frac{I}{S_0},$$

где I – расход напускаемого газа в камеру.

7. По истечении первого шага по времени в камере устанавливается давление:

$$p_K = p_{II} + (p_H - p_{II}) \cdot \exp\left(-\frac{S_0}{V_K} \cdot \Delta t\right),$$

где p_H – начальное давление в камере;

V_K – объем камеры.

8. За время Δt в камере накапливается определенное количество газа:

$$G_X = \frac{V_K (p_K - p_{II}) \rho_G}{101000},$$

где ρ_G – плотность напускаемого газа в камеру.

9. За время Δt адсорбируется разность между напускаемым газом и накопленным газом в камере:

$$G_A = G - G_X,$$

где G – количество напускаемого газа в камеру за Δt .

10. За этот же промежуток времени Δt выделяется теплота адсорбции:

$$Q = G_A \cdot q_c,$$

где q_c – теплота адсорбции азота на цеолите NaX.

11. Выделяющаяся теплота сорбции распределяется по элементарным слоям не равномерно, а пропорционально скорости откачки каждого элементарного слоя или элемента:

$$Q_i = Q \cdot \frac{S_i}{S_N}, \quad i = 1 \dots 12. \text{ при одномерном температурном поле.}$$

$$Q_{n,m} = Q \cdot \frac{S_{n,m}}{S_0}, \quad n = 1 \dots 8, \quad m = 1 \dots 8. \text{ - при двумерном температурном поле.}$$

12. Удельная мощность тепловыделения по элементарным слоям и элементам такж будет неравномерной:

$$W_i = \frac{Q_i}{\Delta t \cdot V}, \quad i = 1 \dots 12. \text{ - при одномерном температурном поле.}$$

$$W_{n,m} = \frac{Q_{n,m}}{\Delta t \cdot V}, \quad n = 1 \dots 8, \quad m = 1 \dots 8. \text{ - при двумерном температурном поле.}$$

13. В результате выделения теплоты сорбции температуры в узловых точках элементарных слоев и элементов адсорбента через промежуток времени Δt приобретут новые значения. Для одномерного температурного поля:

$$T_i = Fo \left(T_{i-1} + \left(\frac{1}{Fo} - 2 \right) \cdot T_i + T_{i+1} \right) + \frac{Fo \cdot W_i \cdot \delta^2}{\lambda_c}, \quad i = 1 \dots 11.$$

$$T_{12} = Fo \left(2T_{11} + \left(\frac{1}{Fo} - 2 \right) \cdot T_{12} \right) + \frac{Fo \cdot W_{12} \cdot \delta^2}{\lambda_c}, \quad i = 12.$$

Для двумерного температурного поля:

$$T_{n,m} = Fo \left(T_{n-1,m} + T_{n+1,m} + T_{n,m-1} + T_{n,m+1} + \left(\frac{1}{Fo} - 4 \right) \cdot T_{n,m} \right) + \frac{Fo \cdot W_{n,m} \cdot \delta^2}{\lambda_c},$$

$$n = 1 \dots 8, \quad m = 1 \dots 7.$$

$$T_{n,8} = Fo \left(T_{n-1,8} + T_{n+1,8} + 2T_{n,7} + \left(\frac{1}{Fo} - 4 \right) \cdot T_{n,8} \right) + \frac{Fo \cdot W_{n,m} \cdot \delta^2}{\lambda_c} \quad - n = 1 \dots 8, \quad m = 8.$$

14. Изменение температуры отдельных элементарных слоев и элементов приводит к изменению их скорости откачки. Новые их значения определяются уравнениями:

$$S_i = S_i [1 - B(T_i - T_0)], \quad i = 1 \dots 12, \text{ при одномерном температурном поле.}$$

$$S_{n,m} = S_{n,m} [1 - B(T_{n,m} - T_0)], \quad n = 1 \dots 8, \quad m = 1 \dots 8, \text{ при двумерном температурном поле.}$$

15. Новое значение скорости откачки всего насоса будет:

$$S_N = \sum_{i=1}^{12} S_i,$$

при одномерном температурном поле.

$$S_N = \sum_{n=1}^8 \sum_{m=1}^8 S_{n,m},$$

при двумерном температурном поле.

16. Далее расчет повторяется (п.6-15). При этом находится новое значение предельного разрежения, а за начальное давление p_H каждый раз принимается конечное давление предыдущего шага p_K . При достижении давления p_{\max} расчет прекращается.

17. В том случае, если период напуска газа в камеру завершился, но давление в камере $p_K < p_{\max}$, то начинается период охлаждения сорбента, в течение которого газ в камеру не поступает.

18. В течение периода охлаждения, за каждый шаг по времени температура отдельных слоев приобретает новые значения:

$$T_i = Fo \left(T_{i-1} + \left(\frac{1}{Fo} - 2 \right) \cdot T_i + T_{i+1} \right), \quad i = 1 \dots 11;$$

$$T_{12} = Fo \left(2T_{11} + \left(\frac{1}{Fo} - 2 \right) \cdot T_{12} \right), \quad i = 12,$$

для одномерного температурного поля.

$$T_{n,m} = Fo \left(T_{n-1,m} + T_{n+1,m} + T_{n,m-1} + T_{n,m+1} + \left(\frac{1}{Fo} - 4 \right) \cdot T_{n,m} \right), \quad n = 1 \dots 8,$$

$$m = 1 \dots 7;$$

$$T_{n,8} = Fo \left(T_{n-1,8} + T_{n+1,8} + 2T_{n,7} + \left(\frac{1}{Fo} - 4 \right) \cdot T_{n,8} \right) - n = 1 \dots 8, \quad m = 8,$$

для двумерного температурного поля.

19. После завершения периода охлаждения, начинается следующий период напуска газа в камеру, но уже при значениях температур по элементарным слоям, установившихся в конце периода охлаждения.

По описанному выше алгоритму был осуществлен расчет процесса криосорбционной откачки импульсных потоков разреженного газа. Расчет по данному алгоритму выполнялся посредством персонального компьютера по программе написанной на языке Фортран. Оценка эффективности процесса криосорбционной откачки производилась по изменению скорости откачки слоя сорбента, по скорости роста давления в камере и изменению температурного поля внутри слоя сорбента. Графики изменения указанных выше величин представлены на рисунках 9 – 11. На основе полученных «пилообразных» графиков был сделан следующий вывод, что при охлаждении сорбента на ребренной криопанели можно получить почти в 2 раза большее число рабочих циклов газодинамических систем по-сравнению с охлаждением сорбента на плоской криопанели. Это объясняется тем, что при охлаждении сорбента ребренной криопанелью удается более эффективно отводить выделяемую теплоту сорбции и скорость откачки падает заметно медленнее (см. рис.9) по-сравнению с сорбентом охлаждаемым на плоской криопанели и давление в камере достигает максимального допустимого значения только на 7 цикле (см. рис. 10).

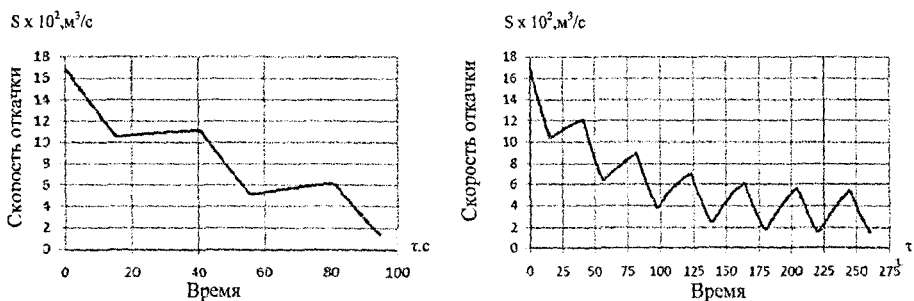


Рис.9. Графики зависимости скорости откачки от времени $S=f(\tau)$ при охлаждении цеолита NaX плоской (график слева) и ребренной (график справа) криопанелями.

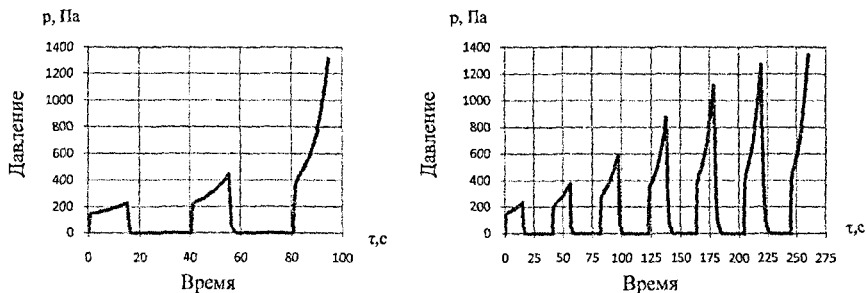


Рис.10. Графики зависимости давления в вакуумируемой камере от времени $p=f(\tau)$ при охлаждении цеолита NaX плоской (график слева) и ребренной (график справа) криопанелями.

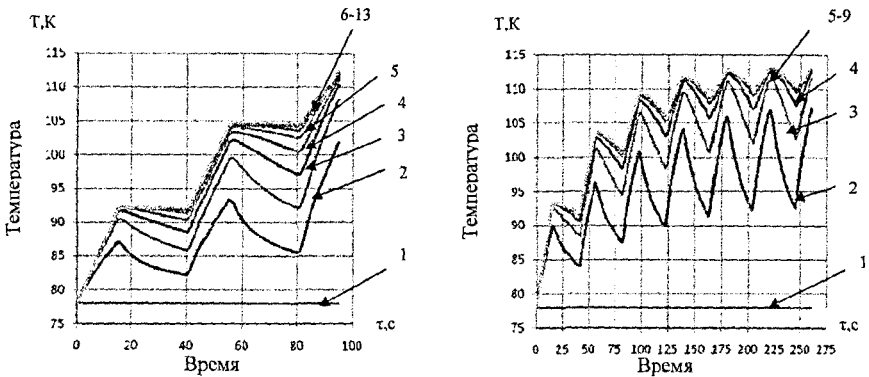


Рис.11. Графики зависимости изменения температуры по слоям и элементам от времени $T=f(t)$ при охлаждении цеолита NaX плоской (график слева) и оребренной (график справа) криопанелями. 1- криопанель, 2-13 – слои сорбента в порядке их удаления от криопанели.

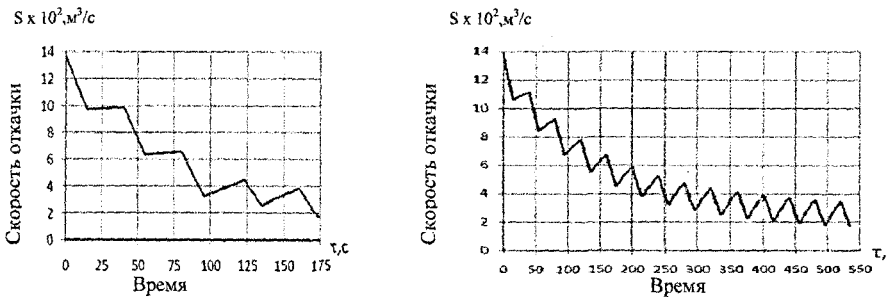


Рис.12. Графики зависимости скорости откачки от времени $S=f(t)$ при охлаждении шихты (гранулы меди и гранулы цеолита) плоской (график слева) и оребренной (график справа) криопанелями.

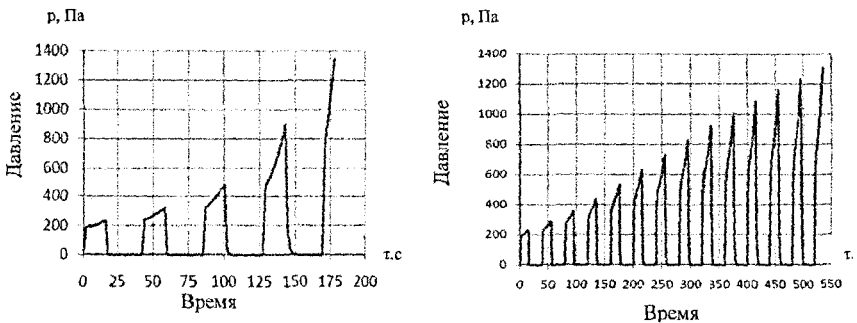


Рис.13. Графики зависимости давления в вакуумируемой камере от времени $p=f(t)$ при охлаждении шихты (гранулы меди и гранулы цеолита) плоской (график слева) и оребренной (график справа) криопанелями.

Как видно из графиков представленных на рисунках 12-13 при использовании шихты состоящей из гранул меди и цеолита число рабочих циклов увеличивается в 2 раза несмотря на то, что начальная скорость откачки меньше чем в случае использования чистого цеолита. Это объясняется прежде всего повышением эффективности охлаждения гранул сорбента вследствие более высокой теплопроводности шихты.

Для проверки полученных расчетных данных при циклическом напуске откачиваемого газа на кафедре криогенной техники была создана экспериментальная установка. Схема установки представлена на рис. 14. Расход газа (азота) в период напуска определялся диаметром калибровочной шайбы и оставался постоянным. Изменение давления в камере фиксировалось автоматически с шагом по времени равном 1 секунде. Время напуска газа составляло $t_p=15$ с., время перерыва $t_0=25$ с.

На основе проведенного эксперимента были построены зависимости температуры слое сорбента, скорости откачки и давления в вакуумируемой камере от времени сопоставлены с полученными ранее аналогичными расчетными кривыми. Как видно из графиков (рис.15-17), число рабочих циклов откачиваемой системы, полученные расчетным и экспериментальным методами, совпадает.

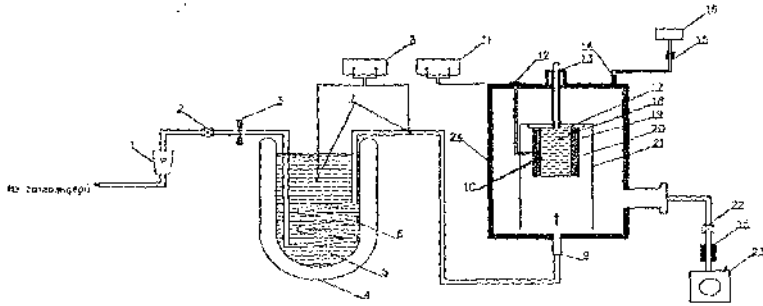


Рис.14. Схема экспериментальной установки для определения основных характеристик процесса криосорбционной откачки при импульсном напуске откачиваемого газа.

- 1-ротаметр И250, 2- отсекающий клапан, 3- калибровочная шайба, 4- сосуд с жидким азотом, 5- жидкий азот, 6 – медный змеевик, 7- термометр, 8- ампервольтметр Ф 30, 9- патрубок для напуска откачиваемого газа, 10- термометр, 11- ампервольтметр Ф 30, 12- гермоввод, 13 – патрубок с горловиной для заполнения жидким азотом, 14 –патрубок для подсоединения вакуумметра, 15-гибкая вставка, 16- деформационный вакуумметр ВД-2, 17- емкость с азотом, 18- жидкий азот, 19 - цеолит NaX, 20- металлическая сетка, 21- экран, 22- запорный вентиль, 23- механический вакуумный насос ВИ 461 М, 24- вакуумируемая камера.

Это подтверждает адекватность разработанной методики расчета процесса криосорбционной откачки импульсных потоков разреженного газа. Погрешность расчетных данных определяется прежде всего тем, что принимались ряд допущений (теплофизические свойства сорбента не зависели от температуры; источник тепловыделений рассматривался как точечный; температура охлаждающей криопанели и теплота сорбции принимались постоянными и т.д.).

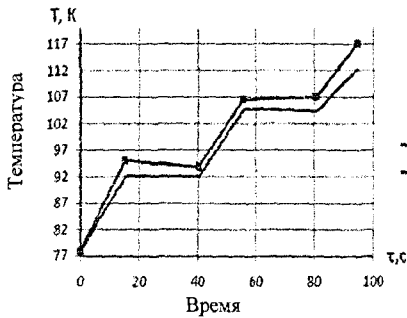


Рис.15. Графики зависимости температуры в центре слоя сорбента $T=f(\tau)$ при охлаждении плоской криопанелью. 1-расчетная кривая; 2-опытная кривая.

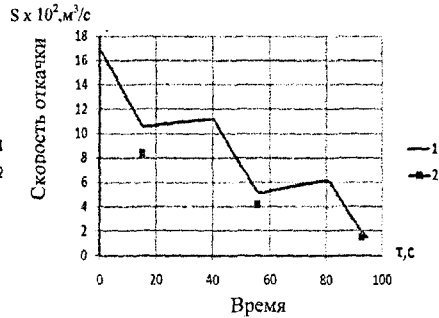


Рис.16.Графики зависимости скорости откачки $S=f(\tau)$ при охлаждении сорбента плоской криопанелью. 1-расчетная кривая; 2-опытные точки.

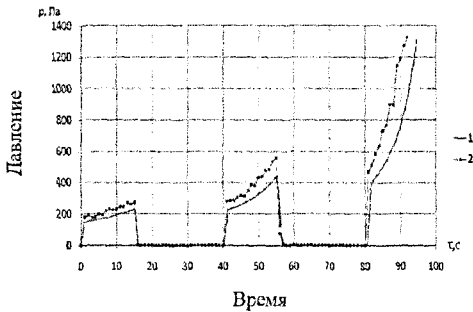


Рис.17. Графики зависимости давления в вакуумируемой камере от времени $p=f(\tau)$ при охлаждении цеолита NaX плоской криопанелью. 1- расчетная кривая, 2-экспериментальная кривая.

Основные результаты и выводы по работе.

1. Разработана методика расчета процесса криосорбционной откачки импульсных потоков разреженного газа в условиях нестационарного одномерного и двумерного температурных полей в слое адсорбента.
2. Адекватность методики расчета процесса криосорбционной откачки импульсных потоков разреженного газа в условиях нестационарного одномерного температурного поля слоя адсорбента подтверждена на реальном физическом эксперименте.
3. Разработан алгоритм расчёта процесса криосорбционной откачки импульсных потоков разреженного газа и написана программа для реализации его на языке «Fortran».
4. Разработана математическая модель для определения эффективного коэффициента теплопроводности слоя сорбента при криогенных температурах в условиях вакуума. Адекватность модели подтверждена на реальном физическом эксперименте.
5. Определена зависимость эффективного коэффициента теплопроводности от пористости системы для диапазона температур 78 -110 К в условиях вакуума. В

состоянии свободной засыпки для сферических гранул одинакового диаметра сорбента NaX $\lambda_{\text{эф}} = 0.071 \text{ Вт/ (м} \times \text{К)}$.

6. Экспериментально определен температурный коэффициент изменения скорости откачки слоя сорбента NaX $B = 0.028 \text{ 1/К}$ в интервале температур 78-110 К.

7. Исследован вопрос влияния на эффективность процесса криосорбционной откачки в импульсном режиме профиля криопанели. На основе произведенных расчетов установлено, что при использовании ребрения можно увеличить число рабочих циклов газодинамической системы в два раза по сравнению с плоской криопанелью.

8. Исследован вопрос влияния на эффективность процесса криосорбционной откачки в импульсном режиме применение шихты (гранулы меди- гранулы цеолита).

Основные публикации

1. Зобков П.Н., Конюшкова А.Б. К вопросу измерения малых потоков газа. Сборник «Проблемы пищевой инженерии», СПбГУНиПТ. – СПб, 2006 г., депонированный сборник ВИНТИ № 833 – В2006 от 23.06.06, с. 106-107.

2. Зобков П.Н., Конюшкова А.Б. Влияние сорбированной воды на характеристики криоадсорбционного вакуумного насоса. Сб. материалов III МНТК «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке», СПбГУНиПТ-СПб, 2007 г., с. 220-222.

3. Зобков П.Н., Конюшкова А.Б. Зависимость кинетики адсорбции от температуры. Журнал «Вестник МАХ», выпуск №4, издательский дом «Холодильная техника»-М, 2008 г., с. 32-33.

4. Зобков П.Н., Иванов В.И. Определение эффективной теплопроводности цеолита NaX . Известия СПбГУНиПТ, №1, СПб, 2009 г., с. 46-49.

5. Зобков П.Н., Шрамова А.Л. Влияние способов отвода теплоты от сорбента на эффективность процесса криосорбционной откачки. Журнал «Вестник МАХ», выпуск №3, издательский дом «Холодильная техника»-М, 2009 г., с.41-43.