

М/93495
Министерство высшего и среднего специального образования СССР

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

КУПРИЯНОВ ВЛАДИМИР ИВАНОВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИОСОРБЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ
ДЛЯ СОЗДАНИЯ И ПОДДЕРЖАНИЯ ВАКУУМА
В ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ ПОЛОСТЯХ
КРИОГЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

(05.04.06—Вакуумная техника)

Диссертация написана на русском языке

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в МВТУ им. Н. Э. Баумана.

Научный руководитель —

д. т. н. Фролов Е. С.

Официальные оппоненты:

д. т. н. Архаров А. М.,

к. т. н. Николаев В. М.

Ведущее предприятие — НИИХИММАШ.

Автореферат разослан « » 1973 г.

Защита диссертации состоится « » 1973 г.

на заседании Совета

Мос

Трудового Красного

Зна

и Н. Э. Баума-

на

ул., дом. 5.

сле

ую, просьба вы-

ли

библиотеке Учи-

M 193495

Дальнейшее развитие физики, химии и многих отраслей промышленности, предусмотренное решениями XXIV съезда КПСС тесно связано с развитием вакуумной и криогенной техники. В настоящее время трудно указать какую-либо область науки и техники, в которой не применялись бы низкие температуры или оборудование для получения вакуума.

Следует отметить особую связь и взаимное влияние вакуумной и криогенной техники. Это объясняется тем, что многие способы получения и длительного поддержания вакуума связаны с необходимостью применения низких температур, а эффективность хранения и транспортировки криогенных продуктов зависит от вакуума, создаваемого в теплоизоляционных полостях хранилищ, трубопроводов и другого криогенного оборудования.

Выбор способа откачки зависит от многих факторов, определяющих техническое назначение установки или технологического процесса. Применение адсорбционных средств откачки в изделиях криогенной техники является предпочтительным. Это объясняется тем, что уже в самой основе любого криогенного изделия заложены те необходимые предпосылки, которые определяют работу адсорбционного насоса, т.е. низкие температуры, при которых процесс физической адсорбции идет интенсивней, в результате чего создается возможность получать и длительное время поддерживать необходимое рабочее давление.

Адсорбционные вакуумные насосы находят в настоящее время большое применение для получения вакуума в широком диапазоне давлений от 760 мм рт.ст. до $1 \cdot 10^{-11}$ мм рт.ст. По сравнению с другими типами насосов, адсорбционные вакуумные насосы обладают рядом достоинств, к которым прежде всего следует отнести отсутствие загрязнения откачиваемых объектов парами рабочей жидкости, значительное увеличение производительности с ростом давления, длительную эксплуатацию без участия обслуживающего персонала, использование его в качестве конденсационного насоса при откачке газовых смесей с резко отличающимися по конденсационным свойствам компонентам.

Криосорбционное устройство является важным элементом криогенных изделий (хранилищ, трубопроводов, арматуры и т.д.), отвечающим за вакуум в теплоизоляционных полостях, а следовательно, за потери криогенного продукта и надежность работы криогенной системы в целом.

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ

ПОЛУ
И. И. Е. УМЕНА
БЕЗДОТЕКА

НТБ МГУ им. Н.Э. Баумана



1193495

Куприянов В.И. Исследования

В практике эксплуатации криогенных систем рассматривается два основных случая их работы.

Первый случай, когда емкости и криогенные трубопроводы работают в циклическом режиме "охлаждение-отогрев" с короткими промежутками между циклами (от нескольких часов до нескольких суток).

Второй случай, когда емкости, трубопроводы и другое криогенное оборудование находится под заливом криогенной жидкости длительное время (от нескольких месяцев до нескольких лет).

В первом случае определяющим моментом будет кинетика охлаждения и кинетика откочки криосорбционного устройства, т.е. эффективность его работы в переходном режиме. Чем меньше время достижения рабочего вакуума в теплоизоляционной полости изделия, тем меньше потери продукта на испарение.

Кроме того, в случае подачи криогенного продукта по трубопроводам, при повышенном испарении будет течь паро-жидкостная смесь. Это приведет к возрастанию гидравлического сопротивления потоку и задержке подачи жидкости к месту потребления.

Во втором случае определяющим фактором работы криосорбционного устройства является получение и поддержание рабочего вакуума при заданном натекании в теплоизоляционную полость на протяжении всего срока эксплуатации.

Анализ экспериментальных и теоретических работ показывает, что снижение температуры и интенсификация процессов теплообмена в слое адсорбента является основным фактором, влияющим на эффективность работы криосорбционного устройства. Применяемые в настоящее время способы улучшения теплообмена и снижения температуры за счет тепловых мостов в виде охлаждающих змеевиков, ребер, стержней и охлаждаемых заливных или жалюзийных экранов, либо сложны по технологии исполнения, либо вообще не приемлемы из-за невозможности их размещения по конструктивным особенностям и ограниченности тепло-изоляционного пространства ряда криогенного оборудования, например, арматуры, трубопроводов и др.

Кроме того, до настоящего времени не изучены переходные процессы, которые являются одними из основных режимов работы криогенного оборудования, а следовательно, и криосорбционного устройства.

По той же причине отсутствует методика расчета криосорбционного устройства в переходном режиме, не исследовано влияние толщины слоя, степени экранировки на кинетические и емкостные характеристики адсорбционных насосов; не изучены теплофизические характеристики адсорбентов, которые могли бы лечь в основу теплового расчета криосорбционного устройства в переходном и установившемся режимах.

На основании анализа теоретических и экспериментальных работ, а также изучения существующих конструкций адсорбционных насосов, выдвинуто предположение о возможности значительного упрощения их конструкций, повышения надежности и эффективности работы за счет введения в слой гранулированного адсорбента теплового шунта в виде металлических порошков с высокой теплопроводностью; чернения охлаждающей поверхности; замены охлаждаемых экранов на неохлаждаемые из специальных теплоизолирующих материалов, широко применяемых в криогенной технике.

Основные задачи работы состоят в следующем :

1. Исследование влияния металлической компоненты на теплопроводящие характеристики слоя. Выбор оптимального размера металлической компоненты и нахождение теплофизических характеристик, определяющих теплоперенос в слоях адсорбента и смеси "адсорбентметалл".
2. Исследование изменения кинетики охлаждения адсорбционного слоя за счет введения в пространство между гранулами металлических порошков с высокой теплопроводностью таких, как медь и алюминий.
3. Исследование влияния металлических порошков на кинетику откачки криосорбционного устройства.
4. Исследование влияния на емкость адсорбента в криосорбционном устройстве металлического порошка и различных способов тепловой защиты.
5. Исследование эффективности применения в криосорбционных устройствах неохлаждаемых экранов из теплоизолирующей пленки типа ПТЭФ.

6. Исследование влияния степени черноты охлаждающей поверхности на кинетику охлаждения слоя адсорбента и кинетику откачки криоадсорбционного устройства.

7. Исследование влияния толщины слоя адсорбента на кинетические и емкостные характеристики криоадсорбционного устройства.

8. Разработка рекомендаций по расчету криосорбционных устройств в переходном и установившемся режимах по результатам экспериментального исследования.

Для выполнения задач исследования был разработан и изготовлен экспериментальный стенд. Стенд состоял из модели адсорбционного насоса для снятия кинетических и емкостных характеристик и криостата для определения приведенных коэффициентов теплопроводности и теплоотдачи адсорбента.

Система вакуумирования стенда включала в себя высоковакуумный пароструйный агрегат ВА-01-1 и механический насос ВН-2МГ.

В контрольно-измерительную систему стенда входили :

- вакуумметр ВИТ-2А с манометрическими преобразователями ПМТ-2 и ПМИ-2 для измерения давлений в диапазоне $0,1 \div 1 \cdot 10^{-7}$ мм рт ст ;

- вакуумметр ВСБ-1 с манометром теплоэлектрическим МТ-6 для измерения давлений в диапазоне $30 - 0,1$ мм рт ст ;

- газовый счетчик ГСБ-400 для замера испаряемости жидкого азота ;

- самопишущий потенциометр КСП-4 для измерения температуры ;

- натекатель для регулировки давления в системе.

Экспериментальный адсорбент выбирался из условия его максимальной емкости в рабочем диапазоне давлений, взрывобезопасности при воздействии на него любой криогенной жидкости, длительной эксплуатации без замены и широко освоенный промышленностью. Таким адсорбентом был выбран цеолит кальциевой формы СаА-4В, изготовленный по технологии Горьковского опытного завода, Салаватским химическим комбинатом. Все эксперименты проводились на кипящем жидком азоте.

В качестве металлической компоненты применялись медный и алюминиевый порошки. Медный — как металл с наиболее высокой теплопроводностью. Алюминиевый — как металл хорошо проводящий тепло и обладающий малым удельным весом.

Форма гранул порошка была выбрана сферической из условия обеспечения наименьшего сопротивления передаче тепла излучением.

Размер гранул металлического порошка выбирался из условия обеспечения высокой теплопроводности. С этой целью исследовалась зависимость коэффициента теплопроводности медного и алюминиевого порошков от диаметра гранул.

Эксперименты показали, что теплопроводность порошков при $P \leq 1 \cdot 10^{-2}$ мм рт ст не является функцией давления. Зависимость теплопроводности от размера гранул имеет вид кривой с максимумом при диаметре гранул ~ 250 мк как для медного, так и для алюминиевого порошков. Поэтому для эксперимента использовались гранулы диаметром ~ 250 мк.

Чернение охлаждающей поверхности производилось методом плазменного напыления, в результате чего степень черноты достигала значения 0,95–0,96.

Экспериментальное исследование зависимости кажущегося коэффициента теплопроводности от температуры и давления показало, что $\lambda_{\text{каж}}$ прямопропорционален температуре, причем с повышением температуры скорость изменения $\lambda_{\text{каж}}$ увеличивается и тем значительнее, чем ниже давление; что $\lambda_{\text{каж}}$ увеличивается с ростом давления и тем значительнее, чем ниже температура; что при давлении ниже $1 \cdot 10^{-4}$ мм рт ст и температуре ниже 100°K коэффициент теплопроводности не зависит ни от температуры ни от давления.

Полученные результаты позволили сделать вывод о совокупном вкладе в тепловой поток каждой из составляющих теплопередачи: теплопроводность газа, излучение, теплопроводность по твердому телу и конвекция. При давлениях выше $1 \cdot 10^{-2}$ мм рт ст определяющим является теплоперенос по газу, при давлениях ниже $1 \cdot 10^{-2}$ мм рт ст и температурах выше 100°K определяющим является передача тепла излучением, а при давлениях ниже $1 \cdot 10^{-3}$ мм рт ст и температурах ниже 100°K теплоперенос обусловлен контактной теплопроводностью.

Эксперименты показали также, что коэффициент теплопроводности смесей цеолита с медным и алюминиевым порошками при давлениях ниже $1 \cdot 10^{-2}$ мм рт ст и температурах $80^\circ\text{K} < T < 300^\circ\text{K}$ является величиной постоянной. Для медной засыпки его значение равно $3,8 \cdot 10^{-5}$, а для алюминиевой $3,0 \cdot 10^{-5}$ кал/см сек град.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о доминирующей роли в процессах теплопереноса в механических смесях (при давлениях ниже $1 \cdot 10^{-2}$ мм рт ст) кондукции по металлу.

Зависимость приведенного коэффициента теплоотдачи от температуры и давления аналогична зависимости кажущегося коэффициента теплопроводности от этих параметров.

Чернение поверхности охлаждения приводит к увеличению приведенного коэффициента теплоотдачи. С ростом давления влияние чернения на коэффициент теплоотдачи уменьшается и при давлениях $P > 1 \cdot 10^{-2}$ мм рт ст сводится к нулю.

Экспериментально установлено, что использование механических смесей позволяет, во-первых, увеличить в 6-7 раз кажущийся коэффициент теплопроводности в области низких давлений ($P < 1 \cdot 10^{-4}$ мм рт ст) и низких температур ($T < 150^\circ\text{K}$) и, во-вторых, увеличить приведенный коэффициент теплоотдачи при низких давлениях ($P < 1 \cdot 10^{-4}$ мм рт ст) и температурах ($T < 150^\circ\text{K}$) в 5-6 раз.

Однако с ростом давления как приведенный коэффициент теплоотдачи, так и кажущийся коэффициент теплопроводности механической смеси приближается к h и λ как цеолита. Аналогичная тенденция наблюдается и при повышении температуры и увеличении степени черноты охлаждающей поверхности.

Таким образом, приведенный коэффициент теплоотдачи цеолита существенно зависит от давления, температуры и степени черноты, тогда как приведенный коэффициент теплоотдачи механических смесей определяется в основном теплопроводностью металлического наполнителя. Поэтому наибольшего эффекта от применения механических смесей можно достичь при $P < 1 \cdot 10^{-4}$ мм рт ст и $T < 150^\circ\text{K}$, т.е. когда отсутствует конвекция, теплопроводность газа чрезвычайно мала, а теплоперенос излучением малоинтенсивен из-за низкой температуры.

В работе показано также, что в переходном режиме откачки обусловлена тонким участком слоя адсорбента. Определена коор-

дината этого участка в зависимости от толщины слоя, экранировки и наполнителя. Показано, что с уменьшением тепловой нагрузки на поверхность адсорбента рабочий участок смещается к периферии адсорбционного слоя.

Анализ кривых охлаждения и откачки показал, что в переходный период как для механических смесей, так и для цеолитов, скорость откачки определяется возрастанием адсорбционной емкости в ходе охлаждения при постоянной массе цеолита, участвующего в адсорбции. Определены численные значения коэффициентов, показывающих какой процент цеолита участвует в адсорбции в переходный период.

Полученные результаты позволяют определить зависимость давления в объеме криосорбционного устройства от времени охлаждения в процессе выхода на расчетный режим. Порядок расчета следующий: кривая охлаждения рабочего участка аппроксимируется многочленом.

Для определения функции $P = f(\tau)$ многочлен подставляется в формулу для адсорбируемости, дифференцирование которой с учетом проводимости позволяет определить эффективную скорость откачки изоляционного пространства криоадсорбционного устройства, как функцию времени - $S_{\text{эф}} = F(\tau)$.

Давление в изоляционной полости определяется по формуле:

$$P = P_0 e^{-\frac{\int_0^{\tau} F(\tau) d\tau}{V}} \quad (I)$$

где: P_0 - начальное давление, мм рт ст ;

V - объем изоляционного пространства, л.

Исследование влияния чернения охлаждающей поверхности на скорость откачки показало, что скорость откачки цеолита в случае чернения при отсутствии экранировки увеличивается в 6-7 раз. Однако при увеличении толщины слоя и степени защиты поверхности адсорбента от теплового излучения влияние чернения на скорость откачки снижается и в случае применения охлаждаемого экрана как на черненном, так и на нечерненном сосуде получены одинаковые удельные скорости откачки. Это позволяет сделать вывод о доминирующей роли охлаждаемого экрана в процессе охлаждения адсорбента.

Исследование зависимости соотношения предельных остаточных давлений, полученных на механических смесях и цеолите от толщины слоя без экрана и экранно-вакуумной изоляции из пленки ПТЭФ показало, что при минимальной толщине слоя - в одну гранулу (5 мм) предельное давление, полученное на механических смесях, без экрана на 3 порядка, а для экранов из ПТЭФ на 2 порядка ниже, чем предельное давление полученное для тех же условий на цеолите. При увеличении слоя адсорбента предельные остаточные давления, полученные на механических смесях, приближаются к значениям предельных давлений на цеолите и при слое 30 мм при отсутствии экрана предельный вакуум ниже на 2 порядка, а для экранов из ПТЭФ на порядок.

Чернение поверхности охлаждения в случае отсутствия экранов приводит к понижению предельного остаточного давления на 0,5 порядка. При увеличении степени экранирования влияния чернения снижается и при использовании экранов из теплоизолирующей пленки ПТЭФ сводится к нулю.

Все изотермы, адсорбции, снятые на цеолите СаА-4В и механических смесях, в диапазоне давлений $1 \cdot 10^{-2}$ - $1 \cdot 10^{-6}$ мм рт ст. были линейными функциями давления.

Исследования адсорбционной емкости металлической компоненты, используемой для образования механических смесей (алюминиевый и медный порошки) показали, что емкость как алюминиевого, так и медного порошков на $1,5 - 2$ порядка ниже емкости цеолита. Таким образом адсорбционная емкость механической смеси определяется только емкостью цеолита.

По результатам эксперимента установлена зависимость адсорбируемости γ от температуры адсорбента в диапазоне давлений $1 \cdot 10^{-2}$ - $1 \cdot 10^{-6}$ мм рт ст, которая аппроксимируется зависимостью вида :

$$\gamma = 1,5 \cdot 10^6 \cdot e^{-2,9 \cdot 10^{-2} T} \quad (2)$$

Для криосорбционных устройств одним из факторов, определяющих совершенство конструкции, является эффективность использования его полезного объема. Для оценки фактора эффективности предложено воспользоваться безразмерным комплексом вида :

$$\Xi_n = \frac{\alpha T}{P V} \quad (3)$$

где:

- Q - натекание, л.мк/сек ;
- t - ресурс работы, сек ;
- P - рабочее давление, мк. рт ст ;
- V - объем, занимаемый адсорбентом, л.

С учетом линейности изотерм выражение для комплекса преобразуется к виду :

$$\Xi_m = a_r \gamma \quad (4)$$

где:

- γ - насыпной вес адсорбента, г/л
- a_r - усредненный по объему адсорбента параметр, зависящий от распределения температуры в слое адсорбента, л/г.

Комплекс " Ξ " зависит от конструктивных параметров криосорбционных устройств: толщины слоя адсорбента и степени защиты поверхности адсорбента от излучения теплых стенок корпуса.

В работе приведена графическая зависимость комплекса от толщины слоя при охлажденном и неохлажденном экране для цеолита и механических смесей цеолита с медным и алюминиевым порошками, позволяющая, задаваясь конструктивной схемой криосорбционного устройства, типом адсорбента и толщиной его слоя, определять отвечающее данному конструктивному решению численное значение комплекса " Ξ ". Зная " Ξ ", можно определить потребное количество адсорбента :

$$G = \frac{Q \tau \gamma}{P} \cdot \frac{1}{\Xi_m} \quad (5)$$

Проведена оптимизация параметров криосорбционных устройств по экономическому критерию. Получены зависимости для определения оптимальной массы адсорбента для установок циклического действия и для установок со стационарным режимом работы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ РАБОТЫ

1. Предложен способ интенсификации теплообмена в слоях гранулированного цеолита, основанный на заполнении пространства между гранулами адсорбента, порошками металлов с высоким коэффициентом теплопроводности. Исследовано влияние медных и алюминиевых наполнителей на температурные, емкостные и откачные характеристики криосорбционных устройств, хладагентом для которых служит жидкий азот.

2. Предложен способ интенсификации теплообмена на границе адсорбента с охлаждающей поверхностью, основанный на чернении охлаждающей поверхности. На примере зачерненной методом плазменного напыления поверхности исследовано влияние предложенного способа на температурные, емкостные и откачные характеристики криосорбционных устройств.

3. Предложено с целью защиты адсорбента от теплового излучения применять неохлаждаемые экраны из теплоизолирующих пленок типа ПТЭФ, широко применяемых в криогенном машиностроении.

Исследовано влияние предложенного способа тепловой защиты на характеристики криосорбционных устройств.

4. Экспериментально определены кажущиеся коэффициенты теплопроводности и коэффициенты теплоотдачи во всем диапазоне изменения рабочих параметров криоадсорбционных устройств, ($P < 1 \cdot 10^{-2}$ мм рт ст, $80^\circ\text{K} < T < 300^\circ\text{K}$), в результате анализа которых установлено:

а/ в исследованном диапазоне температур и давлений кажущийся коэффициент теплопроводности и приведенный коэффициент теплоотдачи смесей цеолита с медным и алюминиевым порошками не зависят от температуры и давления и превышают значения $\lambda_{\text{цел}}$ и $h_{\text{цел}}$ цеолита в области давлений $P < 1 \cdot 10^{-4}$ мм рт ст и $T < 150^\circ\text{K}$ в 6-7 и 3-4 раза соответственно (для меди и алюминия);

б/ кажущийся коэффициент теплопроводности и приведенный коэффициент теплоотдачи гранулированных цеолитов возрастает пропорционально температуре и давлению, принимая при $P > 1 \cdot 10^{-2}$ мм рт ст и $T \leq 150^\circ\text{K}$ значения больше $\lambda_{\text{каж}}$ и h смесей цеолита с медным и алюминиевым порошками ;

в/ чернение поверхности охлаждения позволяет увеличить коэффициент теплоотдачи при давлении $P < 1 \cdot 10^{-4}$ мм рт ст в 3-4 раза.

С ростом давления эффективность чернения снижается и при $P > 1 \cdot 10^{-2}$ мм рт ст сводится к нулю.

5. Установлено, что в процессе стабилизации температуры откачка определяется поверхностью расположенных в рабочем участке слоя адсорбента гранул.

На основе полученных результатов предложен метод для определения зависимости давления в объеме криосорбционного устройства от времени охлаждения.

6. Экспериментально исследовано влияние металлической компоненты и степени черноты поверхности охлаждения на скорость откачки и предельный вакуум, в результате чего установлено:

а/ при минимальной толщине слоя (в одну гранулу) на механических смесях с экранами из пленки ПТЭФ скорость откачки в 7-8 раз выше, а на смесях с охлажденным экраном в 2-3 раза выше, чем на цеолите для тех же условий. С ростом слоя адсорбента значения скоростей откачки сближаются и при $\delta = 40-45$ мм скорости откачки цеолита и смесей становятся равными. Чернение поверхности охлаждения при толщине слоя цеолита в одну гранулу приводит к увеличению скорости откачки: в случае отсутствия экрана в 6-7 раз, а в случае экрана из пленки ПТЭФ в 1,5-2 раза. При увеличении слоя цеолита зависимость скорости откачки от степени черноты уменьшается ;

б/ при толщине слоя в одну гранулу без экрана предельный вакуум на смесях на 3 порядка выше, а для экранов из ПТЭФ на 2 порядка выше, чем на цеолите. С увеличением толщины слоя предельный вакуум на смесях приближается к предельному вакууму на цеолите.

Чернение поверхности охлаждения приводит к увеличению предельного вакуума на цеолите для неохлажденного экрана и слое в одну гранулу на 0,5 порядка. При увеличении слоя цеолита до 30-35мм разница по предельному вакууму для черненной и нечерненной поверхностей сокращается до нуля.

Для экранно-вакуумной изоляции и охлажденного экрана увеличение предельного вакуума не происходит.

7. В результате экспериментального исследования удельной емкости цеолита предложена эмпирическая зависимость удельной емкости от температуры и давления, справедливая при давлениях $1 \cdot 10^{-2}$ - $1 \cdot 10^{-6}$ мм рт ст и температурах 80-300°K.

8. Предложено для оценки эффективности криосорбционных устройств и расчета потребного количества адсорбента безразмерное соотношение, анализ которого показывает, что оптимальной толщиной слоя является для смесей слой толщиной в одну гранулу (5мм), а для цеолитов слой ~ 40мм.

9. Получены выражения для определения оптимальной массы и толщины слоя адсорбента.

10. Результаты исследования использованы при разработке криосорбционных устройств для хранилищ объемом 60, 100, 200 м³, для серии криогенных трубопроводов различной протяженности и цикличности работы, при создании ряда автономных форвакуумных насосов и высоковакуумных адсорбционных насосов.

11. Результаты исследований дают основание предполагать, что метод использования металлических наполнителей может быть распространен и на случаи применения других криогенных жидкостей, например, водорода и гелия.

12. Предложенные методы повышения эффективности позволяют сократить габариты криосорбционных устройств и адсорбционных насосов в 1,5 - 2 раза.

Основные разделы диссертации опубликованы:

1. Фролов Е.С., Куприянов В.И., Левицкая Н.А. "Увеличение теплопроводности слоя адсорбента в высоковакуумных адсорбционных насосах".

Тезисы докладов IV Всесоюзной научно-технической конференции по вакуумной технике, 1970 г., г.Казань.

2. Куприянов В.И., Исаев А.В., Чубаров Е.В., Лунчев В.П. "Исследование некоторых теплофизических характеристик адсорбентов".

Тезисы докладов III Всесоюзной научно-технической конференции по физике и технике высокого вакуума, 1971 г., г.Ленинград.

3. Куприянов В.И., Макаров А.М., Исаев А.В., Филин Н.В., Чопов С.М. "Теория адсорбционного вакуумного насоса".

Тезисы докладов III Всесоюзной научно-технической конференции по физике и технике высокого вакуума, 1971 г., г.Ленинград.

4. Куприянов В.И., Исаев А.В., Чопов С.М., Коган В.С. "Влияние степени черноты охлаждающей поверхности на кинетику сорбции". Вопросы Атомной Науки и Техники, ФТИ АН УССР серия "Низкотемпературная адсорбция и криогенный вакуум", 1972 г.

5. Исаев А.В., Коган В.С., Куприянов В.И. "Исследование влияния теплового излучения на характеристики адсорбционного насоса".

Тезисы V Всесоюзной научно-технической конференции по вакуумной технике, 1972 г., г.Казань.