

ЧУБАРОВ ОЛЕГ ЕВГЕНЬЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ КРИОАДСОРБЦИОННЫХ
«КАРМАНОВ» ДЛЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ ПОЛОСТЕЙ КРИОГЕННЫХ
СИСТЕМ**

**Специальность: 05.04.03 – Машины, аппараты и процессы холодильной и
криогенной техники, систем кондиционирования и
жизнеобеспечения**



АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Москва - 2013

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана и ООО «Криомаш – Балашихинский завод криогенного машиностроения»

Научный руководитель: Заслуженный деятель науки и техники РФ,
доктор технических наук, профессор
Архаров Алексей Михайлович

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, профессор,
генеральный директор ООО "Издательский дом
"Холодильное дело", шеф-редактор журнала
«Холодильный бизнес», вице-президент Меж-
дународной академии холода
Иванов Борис Александрович

Кандидат технических наук, старший
сотрудник, начальник отдела
ОАО «НПО Гелиймаш»
Краковский Борис Давыдович

Ведущая организация: ОАО «НПО «НАУКА»



Защита диссертации состоится «19» июня 2013 года в 16 часов 30 минут на заседании Диссертационного совета Д 212.141.16 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, Лефортовская наб., д.1, ауд. 314-Э (конф. зал).

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью, просим выслать по адресу: 105005. г. Москва, 2-ая Бауманская д.5, Ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.16.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан « » 2013 г.

Ученый секретарь
Диссертационного Совета Д 212.141.16,
кандидат технических наук, доцент

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'М.А. Колосов'.

Колосов М.А.

782

Актуальность работы. Для обеспечения эксплуатационных параметров систем накопления, хранения и выдачи (газификации) криогенных продуктов в теплоизоляционных полостях (ТИП) применяются встроенные криоадсорбционные устройства на базе откачных элементов с гранулированным или тканевым угольными адсорбентами СКТ-4 и КУТ-М, создающие и поддерживающие разрежение на уровне 10^{-2} - 10^{-3} Па на протяжении всего срока эксплуатации, достигающего 10-20 лет. Среди российских ученых занимавшихся созданием средств обеспечения технических параметров в ТИП криогенных систем, необходимо отметить Куприянова В.И., Каганера М.Г., Кряковкина В.П., Исаева А.В. Из зарубежных исследователей большой вклад в решение проблемы внесли Stern S.A., Rutenbur D.H., Bächler W., Forth H.

Первые конструкции криоадсорбционных карманов для ТИП криогенных хранилищ и трубопроводов выполнялись в виде сетчатых кассет, закрепленных на холодных поверхностях, в которые засыпался гранулированный адсорбент. Охлаждение адсорбента производилось только холодной стенкой изделия, по точкам контакта между гранулами и за счет радиационного излучения. Понятно, что эффективность охлаждения адсорбента определяет время достижения рабочего давления в ТИП, которое составляло около 5-ти часов. Более удачной конструкцией криоадсорбционного кармана является кассета для адсорбента, роль сетки в которой играет пористый газопроницаемый экран, изготовленный из спеченного медного порошка. В такой конструкции адсорбент, размещенный в кассете, охлаждается и за счет холодной стенки изделия, и за счет пористого медного экрана. Газ, поступающий к адсорбенту, при прохождении через каналы пористой стенки экрана, приобретает его температуру. Все это влечет увеличение скорости охлаждения адсорбента в кассете и более низкую среднюю температуру адсорбента в период работы устройства. Описанные адсорбционные элементы, обладают большей удельной емкостью, чем элементы с сетчатой стенкой, а время достижения рабочего давления сократилось в 1,7 раза.

К недостаткам этих карманов следует отнести высокую стоимость материалов (катодная медь М-1, фосфористая медь МФ-1), достаточно сложная, трудоемкая технология изготовления пористых медных экранов, хрупкость подложек из пористой меди, затрудняющих рихтовку адсорбционных элементов для ТИП трубопроводов Ду100, Ду150.

В качестве альтернативы применяемым откачным карманам предлагается простая в изготовлении и более технологичная конструкция элемента, содержащая перфорированные алюминиевые подложки (ПАП) и угольные адсорбенты. Создание и экспериментальное исследование криоадсорбционных устройств с ПАП является актуальной задачей.

Цель работы состоит в создании и исследовании новых, более эффективных и технологичных конструкций встроенных и автономных криоадсорбционных карманов с перфорированными алюминиевыми подложками и угольными адсорбентами и определении их рациональных структурных и геометрических параметров конструктивных элементов, обеспечивающих наилучшие рабочие характеристики.

Методы исследования. Экспериментальные исследования новых композиционных газопроницаемых экранов (КГЭ) с ПАП включают: изучение влияния геометрических и структурных параметров на технические характеристики КГЭ, удельной проводимости КГЭ различных композиций в молекулярном режиме течения газов, экспериментальное определение пыления мелкодисперсного адсорбента встроенных криоадсорбционных устройств с КГЭ при ударных циклических воздействиях. Исследование проводимости осуществлялось методом «двух манометров». Количественная оценка пыления мелкодисперсного адсорбента определялась методом «взвешивания».

Научная новизна. Впервые определены технические характеристики новых криоадсорбционных «карманов» на базе композиционных газопроницаемых экранов из перфорированного алюминия и стекlobумаги (газопроницаемость в молекулярном режиме течения газов), и криоадсорбционных каскадов, содержащих угольную ткань КУТ-М заключенную между перфорированными алюминиевыми подложками. Установлены взаимосвязи характеристик КГЭ с его геометрическими и структурными параметрами. Экспериментально определена масса мелкодисперсной фракции адсорбента, попадающей в реципиент через КГЭ с ПАП.

Практическая значимость. Разработана конструкция и технология изготовления композиционного газопроницаемого экрана из перфорированного алюминия и стекlobумаги для встроенных криоадсорбционных устройств криогенного оборудования. Выданы рекомендации по структурным и геометрическим параметрам КГЭ.

Разработаны конструкции встроенных криоадсорбционных «карманов» для криогенных резервуаров.

Разработаны конструкции криоадсорбционных «карманов» для адсорбционных секций криогенных трубопроводов и автономных крионасосов.

Достоверность полученных результатов. Достоверность полученных экспериментальных данных подтверждается применением аттестованных измерительных средств, апробированных методик исследований и воспроизводимостью результатов, а также сопоставлением с теоретическими и экспериментальными данными других авторов.

Внедрение результатов работы. Результаты работы внедрены в разработках встроенных криоадсорбционных карманов для транспортных газифи-

каторов холодных вместимостью до 10 м³, автономного насоса НКС-50Т, криоадсорбционных секциях криогенных трубопроводов. Рекомендации данной работы вошли в стандарты предприятия СТП БЗКМ-039-2011 «Устройства криоадсорбционные. Основы проектирования и расчета» и СТП БЗКМ-037-2011 «Испытание на герметичность масс-спектрометрическим методом. Типовые технологические процессы».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на XVIII научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника» с участием зарубежных специалистов, доклад (г.Судак, 2011 г.), на VII международной научно-технической конференции «Вакуумная техника, материалы и технология» (Москва 2012) и обсуждались на научно-техническом семинаре кафедры Э-4 холодильная, криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения, МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 статей, в том числе 6 статей в журналах рекомендованных ВАК РФ.

Автор защищает:

- разработанную физическую модель процесса откачки газа криоадсорбционными устройствами (насосами) с перфорированными алюминиевыми подложками и угольными адсорбентами;
- конструкцию, технологию изготовления и результаты экспериментальных исследований технических характеристик композиционного газопроницаемого экрана и установление взаимосвязи этих характеристик с его геометрическими и структурными параметрами;
- конструкцию откачивающего элемента с угольной тканью КУТ-М на базе ПАП для компактной криоадсорбционной кассеты и результаты экспериментальных исследований ее технических характеристик;
- конструкции встроенных и автономных «карманов» (насосов) на базе КГЭ для теплоизоляционных полостей криогенных систем и результаты экспериментальных исследований их технических характеристик;

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы (112 наименований работ). Содержит 129 страницы машинописного текста. Иллюстрируется 34 рисунками, 13 таблицами.

Содержание работы

Во введении определен круг вопросов, рассматриваемых в диссертации и обосновывается актуальность темы.

В первой главе («Конструкции криоадсорбционных встроенных и автономных устройств и физические процессы в них») определены основные проблемы создания криоадсорбционных устройств для криогенного оборудования

и рассмотрены конструкции криоадсорбционных насосов встроенных, автономных и их рабочих элементов для криогенных резервуаров и трубопроводов. Дан анализ работ, посвященных созданию компактной теплозащитной системы с достаточно высокой газовой проницаемостью, обеспечению эффективной регенерации адсорбента перед заливом криопродукта, обеспечению регенерации адсорбента в условиях рабочего режима, т.е. без слива криогенного продукта, удалению плохо адсорбируемых газов.

Проведенный анализ конструкций криоадсорбционных элементов на основе пористых теплопроводящих экранов и в первую очередь – криоадсорбционный элемент с угольной тканью, запеченной в высокопроводящую медную пористую структуру показывает, что элемент имеет большие габариты, трудоемкую технологию изготовления из спеченного медного порошка (СМП) (фракционирование, спекание в условиях свободной засыпки, сборка экранов из малогабаритных панелей), высокую стоимость комплектующих материалов (катодная медь М-1, фосфористая медь МФ-1).

Хрупкость подложек из пористой меди не позволяет рихтовать адсорбционные элементы по малым диаметрам. Поэтому создавать компактные касеты и на их базе криоадсорбционные секции с диаметрами 100 и 150 мм не представляется возможным.

Во второй главе («Теоретическое описание рабочего процесса в криоадсорбционных устройствах с перфорированными алюминиевыми подложками ПАП») рассматривается физическая модель процесса откачки систем криоадсорбционными «карманами» на основе угольных адсорбентов, заключенных между перфорированными алюминиевыми подложками. Задача охлаждения адсорбента сводится к решению задачи на охлаждение элемента из перфорированного алюминия, которая решается аналогично задаче на охлаждение неограниченной пластины, имеющую начальную температуру T_0 . В начальный момент времени боковые поверхности принимают температуру $T(x,0)=T_0$, которая поддерживается постоянной в течение всего процесса охлаждения (граничные условия первого рода). Внутри адсорбента существуют равномерно распределенные источники тепла удельной мощностью $q(T)$. Необходимо найти временную зависимость распределения температуры по толщине элемента из перфорированного алюминия. В математической форме данная задача записывается следующим образом:

$$\frac{\partial T(x,\tau)}{\partial \tau} = \alpha \frac{\partial^2 T(x,\tau)}{\partial x^2} + \frac{q(T)}{c\rho} \quad (\tau > 0; 0 < x < L)$$

$$T(x,0) = T_0; \quad T(L,\tau) = T_c; \quad \frac{\partial T(0,\tau)}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

где $\alpha = \frac{\lambda}{c\rho}$ – коэффициент температуропроводности;

λ, c, ρ – соответственно коэффициенты теплопроводности, теплоемкость и плотность материала элемента из алюминия и адсорбента.

Поскольку тепловой поток определяется излучением и в соответствии с законом Стефана – Больцмана является в данном случае функцией температуры экрана $q(T) \sim (T_o^4 - T^4)$, данная задача является краевой задачей с существенной нелинейностью, решение которой представляет определенные сложности. Упростить задачу можно линеаризацией теплового потока, представив его в виде линейной функции температуры

$$q(T) = b - kT \quad (2).$$

Для этого представим выражение для теплового потока, в следующем виде:

$$q(T) = \frac{\varepsilon_{\text{np}} \sigma_o}{\delta_s} (T_o^4 - T^4) = \frac{\varepsilon_{\text{np}} \sigma_o T_o^4}{\delta_s} \left(1 - \frac{T^4}{T_o^4}\right) = \frac{\varepsilon_{\text{np}} \sigma_o T_o^4}{\delta_s} \left(1 - \frac{T}{T_o}\right) \left(1 + \frac{T}{T_o}\right) \left(1 + \frac{T^2}{T_o^2}\right) = \frac{\varepsilon_{\text{np}} \sigma_o T_o^4}{\delta_s} \left(1 - \frac{T}{T_o}\right) \left(1 + \frac{T}{T_o} + \frac{T^2}{T_o^2} + \frac{T^3}{T_o^3}\right). \quad (3).$$

где ε_{np} – приведенная степень черноты системы элемент – трубопровод;

σ_o – постоянная Стефана – Больцмана;

T – текущая температура элемента.

С целью упрощения решения и уменьшения погрешности, вносимой линеаризацией теплового потока, целесообразно разбить диапазон температур от T_o до T_c на ряд участков, где можно получить λ и c постоянными, независимыми от температуры, а вместо текущей температуры T в последний сомножитель выражения (4) ввести температуру, соответствующую середине данного участка $\bar{T} = (T_i + T_{i+1})/2$, где T_i и T_{i+1} – граничные температуры участка. Тогда значение постоянных коэффициентов в выражении для потока (2) определяются следующим образом:

$$k = \frac{\varepsilon_{\text{np}} \sigma_o}{\delta_s} T_o^3 \left(1 + \frac{\bar{T}^3}{T_o^3} + \frac{\bar{T}^2}{T_o^2} + \frac{\bar{T}}{T_o}\right). \quad (4)$$

$$b = \frac{\varepsilon_{\text{np}} \sigma_o}{\delta_s} T_o^4 \left(1 + \frac{\bar{T}^3}{T_o^3} + \frac{\bar{T}^2}{T_o^2} + \frac{\bar{T}}{T_o}\right). \quad (5)$$

С учетом линеаризации теплового потока дифференциальное уравнение, описывающее процесс охлаждения экрана из перфорированного алюминия, будет иметь вид:

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \alpha \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} - \frac{k}{c\rho} T(x, \tau) + \frac{b}{c\rho} \quad (6)$$

Конечное выражение для поля температур экрана из перфорированного алюминия для момента τ времени имеет вид:

$$T(x, \tau) = T_0 - (T_0 - T) \frac{ch \sqrt{\frac{k}{\lambda}} x}{ch \sqrt{\frac{k}{\lambda}} L} + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{2\lambda\mu_n}{kL^2 + \lambda\mu_n^2} (T_0 - T_0) x \cos(\mu_n \frac{x}{L}) \exp \left[-\left(\frac{k}{c\rho} + \mu_n^2 \frac{\lambda}{L^2} \right) \tau \right] \quad (7)$$

где $\mu_n = (2n - 1)\pi/2$.

Подставляя решение (7) в выражение для условной массы адсорбента:

$V_A = B \cdot Mag \cdot \exp \{E/(R[T(\tau)])\}$ с учетом симметричности задачи и геометрических размеров криоадсорбционного устройства, получим:

$$V_A = 2B \rho m N h \int_0^L \exp [E/(RT(x, \tau))] dx;$$

где ρm – масса одного кв. метра угольной ткани;

N – число криоадсорбционных элементов в устройстве;

h – протяженность слоев угольной ткани в элементе вдоль трубопровода;

l – полуширина угольной ткани в элементе;

B – константа, которая соответствует динамической адсорбируемости;

E – теплота адсорбции.

Третья глава («Разработка и экспериментальное исследование встроенного криоадсорбционного кармана с перфорированными алюминиевыми подложками для криогенных резервуаров») посвящается экспериментальному исследованию технических характеристик композиционного газопроницаемого экрана (КГЭ) из перфорированного алюминия и установлению взаимосвязи этих характеристик с его геометрическими и структурными параметрами.

Стремление снизить себестоимость выпускаемого криогенного оборудования заставляет все шире использовать элементы конструкций из более дешевых материалов, а также применять менее затратные технологические процессы производства при условии сохранения на необходимом уровне характеристик работоспособности оборудования. В области криогенной техники одним из первоочередных объектов замены рассматриваются имеющие высокую стоимость газопроницаемые экраны из спеченного медного порошка для криоадсорбционных устройств теплоизоляционных полостей криогенного оборудования.

В качестве альтернативы применяемым откачным элементам предлагается перейти к менее трудоемкому производству новых криоадсорбционных «карманов» на основе газопроницаемых экранов композиционного типа из дешевых перфорированных алюминиевых листов с прокладкой из стеклотумаги между ними, пропускающей откачиваемые газы и удерживающей от высыпания мелкодисперсные составляющие адсорбента. Новый композиционный газопроницаемый экран (КГЭ) из алюминия позволяет создать условия, при которых температура адсорбента близка к температуре используемого криоагента. Были проведены исследования по определению рациональных структурных и геометрических параметров конструктивных элементов экрана, обеспечивающих наилучшие рабочие характеристики. Изменялись геометрия перфорации алюминиевых подложек, число слоев стеклотумаги в газопроницаемых прокладках, способы крепления элементов в криоадсорбционных устройствах. Схема композиционного газопроницаемого элемента из алюминия представлена на рис. 1.

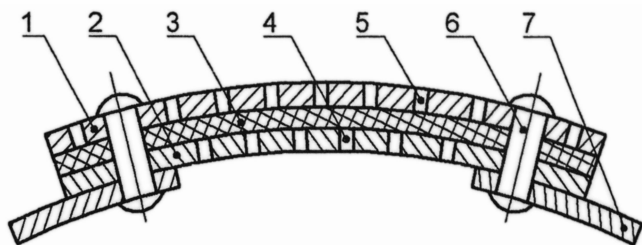


Рис. 1. Композиционный газопроницаемый экран

1 – верхняя алюминиевая подложка; 2 – нижняя алюминиевая подложка; 3 – газопроницаемая прокладка из стеклотумаги; 4, 5 – отверстия, перфорированные в подложках; 6 – заклёпка; 7 – окантовка полосой из нержавеющей стали

КГЭ состоит из верхней и нижней перфорированных подложек 1 и 2 с газопроницаемой теплоизолирующей прокладкой 3 между ними. Шаг и диаметр перфорированных отверстий 5 верхней подложки выбирался отличающимися от шага отверстий 4 перфораций нижней подложки для исключения возможного перекрытия отверстий совмещенных подложек. Для изготовления подложек КГЭ использовалась перфорированная алюминиевая лента АМц 1,5 х 0,6 м толщиной $1,5 \cdot 10^{-3}$ м и перфорированная лента толщиной $7 \cdot 10^{-4}$ м.

В главе представлены результаты экспериментального исследования по определению удельной проводимости семи вариантов КГЭ в молекулярном режиме течения газов, таблица 1.

Удельная проводимость определялась по соотношению:

$$U_{уд} = Q / (P_2 - P_1) \cdot S_0,$$

где $U_{уд}$ – удельная проводимость композиционного газопроницаемого элемента, $\text{м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$;

Q – газовый поток воздуха в камеру с образцом, $\text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}$;

P_1 – давление в откачиваемой части камеры, Па;

P_2 – давление в напорной части камеры, Па;

S_0 – площадь образца, м^2 .

Установлено, что композиция №3 КГЭ принятая за базовую, имеет проводимость $1,63 \text{ м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$ (подложки толщиной $\delta = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, диаметры отверстий $d_{\text{отв}} = 1,4 \cdot 10^{-3}$ и $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ и шаги отверстий $L_{\text{шо}} = 3,25 \cdot 10^{-3}$ и $3,926 \cdot 10^{-3} \text{ м}$). Это в 1,36 раза больше, чем у спеченного медного экрана (фракция порошка №3, $U_{уд} = 1,2 \text{ м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$). Другие варианты композиции (№4 и №5) имеют проводимость, меньшую проводимости композиции КГЭ №3 не более чем на 20%, и могут рассматриваться, как альтернативные.

Таблица 1

№	Характеристики подложек: δ -толщина, $d_{\text{отв}}$ -диаметр отверстий, $L_{\text{шо}}$ -шаг отверстий, газопроницаемая прокладка 5 слоев стекlobумаги	Проводимость, $\text{м}^3 / \text{с} \cdot \text{м}^2$
1	Перфорированный алюминиевый лист $\delta = 1,5 \text{ мм}$, верхняя подложка (ВП), $d_{\text{отв}} = 1,4 \text{ мм}$, $L_{\text{шо}} = 3,25 \text{ мм}$; нижняя подложка (НП), $d_{\text{отв}} = 2,5 \text{ мм}$, $L_{\text{шо}} = 9,0 \text{ мм}$	$1,95 \cdot 10^{-2}$
2	Повторение по п.1, но через КГЭ протрясён пылевидный адсорбент	$1,67 \cdot 10^{-2}$
3	Верхняя подложка повторение по п.1 нижняя подложка (НП), $d_{\text{отв}} = 1,2 \text{ мм}$, $L_{\text{шо}} = 3,926 \text{ мм}$	$1,63 \cdot 10^{-2}$
4	Верхняя подложка повторение по п.1 нижняя подложка (НП), $d_{\text{отв}} = 1,2 \text{ мм}$, $L_{\text{шо}} = 3,614 \text{ мм}$	$1,57 \cdot 10^{-2}$
5	Верхняя подложка повторение по п.1 нижняя подложка (НП), $d_{\text{отв}} = 1,2 \text{ мм}$, $L_{\text{шо}} = 4,279 \text{ мм}$	$1,41 \cdot 10^{-2}$
6	Пористый теплозащитный экран из спеченного медного порошка фракции №3 толщиной 3 мм	$1,2 \cdot 10^{-2}$
7	Пористый теплозащитный экран из спеченного медного порошка фракции №4 толщиной 3 мм	$1,6 \cdot 10^{-2}$

Была исследована зависимость удельной проводимости КГЭ от количества слоев стекlobумаги БмД-К в газопроницаемой прокладке. Установлено, что с увеличением толщины прокладки несколько возрастает (до 30%) удельная проводимость КГЭ из-за нарастания продольной проводимости по слою прокладки, рис. 2.

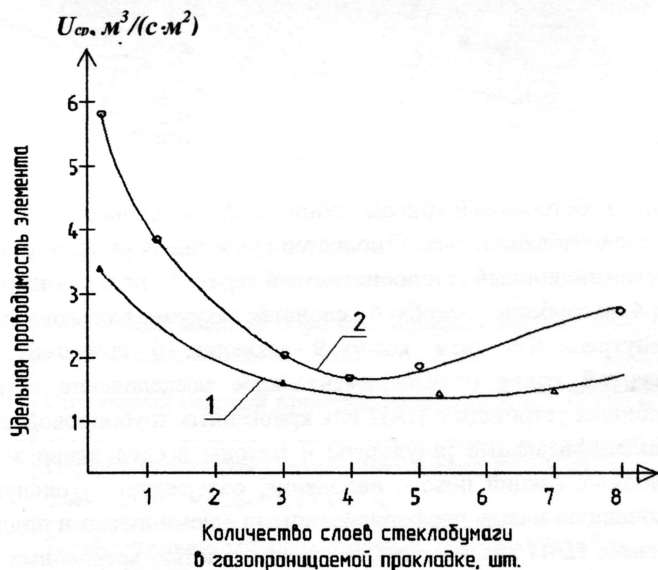


Рис. 2. График зависимости удельной проводимости КГЭ от количества слоев стекlobумаги БмД-К в газопроницаемой прокладке

1 – Верхняя подложка – толщина $\delta=1.5 \cdot 10^{-3}$ м, $d_{отв}=1,4 \cdot 10^{-3}$ м, $L_{шо}=3,25 \cdot 10^{-3}$ м;

Нижняя подложка – толщина $\delta=1,5 \cdot 10^{-3}$ м, $d_{отв}=1,2 \cdot 10^{-3}$ м, $L_{шо}=3,926 \cdot 10^{-3}$ м

2 – Верхняя подложка – толщина $\delta=1.5 \cdot 10^{-3}$ м, $d_{отв}=1,4 \cdot 10^{-3}$ м, $L_{шо}=3,25 \cdot 10^{-3}$ м;

Нижняя подложка – толщина $\delta=0,7 \cdot 10^{-3}$ м, $d_{отв}=2,5 \cdot 10^{-3}$ м, $L_{шо}=9,0 \cdot 10^{-3}$ м

Экспериментально определена масса пыления мелкодисперсным адсорбентом встроенных криоадсорбционных устройств с КГЭ. Исследования показали, что конструкции КГЭ с газопроницаемой прокладкой из 2-х слоев стекlobумаги БмД-К имеет в 2,8 раза, а экран с прокладкой из 5 слоев стекlobумаги БмД-К имеет в 6,4 раза меньшую удельную массу пыления по сравнению с пористым экраном из СМП. Конструкция встроенного криоадсорбционного кармана для ТИП криогенного оборудования представлена на рис. 3.

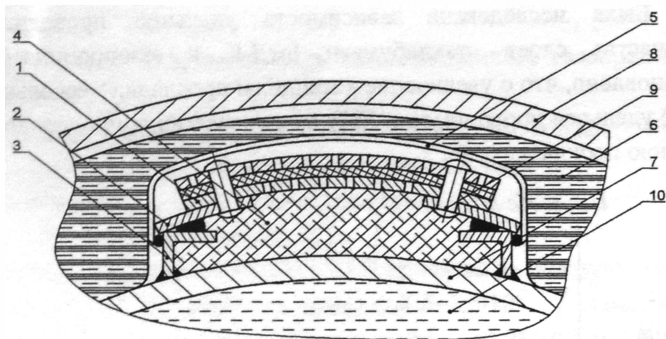
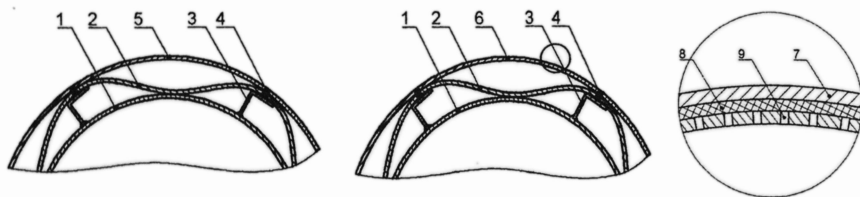


Рис. 3. Встроенный криоадсорбционный «карман» с ПАП для теплоизоляционных полостей криогенных резервуаров

- 1 - композиционный газопроницаемый экран; 2 - полоса-окантовка;
3 - уголок; 4 - адсорбент; 5 - скоба; 6 - слоистая вакуумная теплоизоляция;
7 - внутренний сосуд; 8 - кожух; 9 - заклепка; 10 - криоагент

В четвертой главе («Экспериментальное исследование встроенных криоадсорбционных устройств с ПАП для криогенных трубопроводов») представлены экспериментальные результаты и методы исследования элементов криоадсорбционных секций нового поколения, содержащих угольную ткань КУТ-М, заключенную между перфорированными алюминиевыми подложками (ПАП). Элемент с ПАП является откачивающей частью встроенных криоадсорбционных устройств. Подложки обладают газопроницаемостью и высокой теплопроводностью. Они обеспечивают свободный доступ газа к поверхности адсорбента и эффективное его охлаждение, т.е. создают условия для откачивающего действия адсорбента. Пластичные алюминиевые элементы позволили изготавливать многоуровневые компактные и емкие кассеты. Схема адсорбционного элемента с ПАП в одноуровневой и двухуровневой адсорбционной кассете представлены на рис. 4., а результаты экспериментального определения проводимости ПАП представлены в таблице 2.



А. Кассета «одноуровневая» с экраном

Б. Кассета «двухуровневая»

Рис. 4. Схемы компоновок кассет с ПАП криоадсорбционных секций криогенных трубопроводов

- 1 - внутренний трубопровод; 2 - элемент адсорбционный первого уровня;
 3 - теплопроводное ребро (уголок с алитированной полкой); 4 - сварной шов;
 5,7 - экран теплозащитный; 6 - элемент адсорбционный второго уровня;
 8 - криосорбирующая угольная ткань; 9 - нижняя алюминиевая подложка.

Удельная газовая проводимость перфорированных алюминиевых подложек адсорбционных элементов

Таблица 2

№	Характеристики подложек: δ -толщина, $d_{\text{отв}}$ -диаметр отверстий, $L_{\text{ш}}$ -шаг отверстий	Проводимость, $\text{м}^3/\text{с}\cdot\text{м}^2$
1	Спеченный медный порошок, Фракция №3, $\delta=3\cdot 10^{-3}$ м	$1,2\cdot 10^{-2}$
2	Спеченный медный порошок, Фракция №3-№4, $\delta=3\cdot 10^{-3}$ м	$1,6\cdot 10^{-2}$
3	Спеченный медный порошок, Фракция №4, $\delta=2\cdot 10^{-3}$ м	$2,0\cdot 10^{-2}$
4	Перфорированный алюминиевый лист, $\delta=1,5\cdot 10^{-3}$ м, $d_{\text{отв}}=1,2\cdot 10^{-3}$ м, $L_{\text{ш}}=3,25\cdot 10^{-3}$ м	$6,3\cdot 10^{-2}$
5	Перфорированный алюминиевый лист, $\delta=1,5\cdot 10^{-3}$ м, $d_{\text{отв}}=1,25\cdot 10^{-3}$ м, $L_{\text{ш}}=3,25\cdot 10^{-3}$ м	$7,6\cdot 10^{-2}$
6	Перфорированный алюминиевый лист, $\delta=1,5\cdot 10^{-3}$ м, $d_{\text{отв}}=1,2\cdot 10^{-3}$ м, $L_{\text{ш}}=3,926\cdot 10^{-3}$ м	$4,0\cdot 10^{-2}$
7	Перфорированный алюминиевый лист, $\delta=1,5\cdot 10^{-3}$ м, $d_{\text{отв}}=1,4\cdot 10^{-3}$ м, $L_{\text{ш}}=3,25\cdot 10^{-3}$ м	$8,1\cdot 10^{-2}$
8	Перфорированный алюминиевый лист, $\delta=0,7\cdot 10^{-3}$ м, $d_{\text{отв}}=2,5\cdot 10^{-3}$ м, $L_{\text{ш}}=9\cdot 10^{-3}$ м	$15,1\cdot 10^{-2}$

В такой конструкции откачка осуществляется с внутренней стороны поверхности криоадсорбционных элементов. Их внешняя сторона используется в качестве опорной для нанесения слоистой теплоизоляции. В результате конструкция освобождается от специального экрана, сокращаются габариты, а диаметр кожуха кассеты может быть сделан равным диаметру криогенного трубопровода.

Поглотительная способность исследуемых кассет определялась «объемным методом» путем подачи порцией азота из калиброванного объема в ваку-

умную камеру с одновременным контролем установившегося равновесного давления.

Быстрота действия кассет определялась методом «двух манометров».

Откачивающая способность элементов с угольной тканью адсорбционных кассет с ПАП, определялась с целью оценки их работоспособности по сравнению с применяемыми элементами с СМП. Надежно экранированный от внешних теплопритоков элемент с ПАП продемонстрировал удельную поглощательную способность в 2,2 раза большую, чем у элемента с СМП. В исследуемых кассетах применялись элементы с двумя и четырьмя слоями угольной ткани КУТ-М. Из полученных данных видно, что откачка газа через внешние слои угольной ткани вполне эффективна и удельная поглощательная способность четырехслойного пакета адсорбента не снижается.

В пятой главе («Практическая реализация результатов работы»)

описаны конструкции:

– криоадсорбционного насоса НКС-50Т с быстротой действия $5 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ предназначенного для создания и поддержания стерильной безмаслянной остаточной среды в полостях различных установок, а также для использования в качестве агрегатированных блок-приставок к масс-спектрометрическим течейскаателям с целью понижения порога чувствительности течейскаания;

– встроенного криоадсорбционного кармана для ТИП криогенных резервуаров;

– компактного встроенного насоса для криогенных трубопроводов.

В качестве основных рабочих органов в перечисленных выше конструкциях используются криоадсорбционные элементы с угольными адсорбентами, заключенными между перфорированными алюминиевыми листами. Приведены результаты экспериментальных исследований характеристик насоса НКС-50Т, встроенного криоадсорбционного кармана для ТИП резервуаров, компактного встроенного насоса для криогенных трубопроводов Ду25 в виде криоадсорбционной кассеты из двух откачивающих элементов с тканевым адсорбентом и перфорированными алюминиевыми подложками коробчатой формы. Новая кассета имеет улучшенные конструкторско-технологические параметры благодаря применению в откачивающих элементах развитого адсорбционного слоя в виде пакета из восьми слоев угольной ткани.

Основные выводы:

1. Разработаны конструкция и технология изготовления высокоэффективных композиционных газопроницаемых экранов для встроенных и автономных устройств (крионасосов) на основе тканевого и гранулированного угольных адсорбентов, заключенных между перфорированными алюминие-

выми подложками.

2. Описана физическая модель процесса откачки газа криоадсорбционным устройством с ПАП, рассматривающего процесс, как перетекание газа из откачиваемого реципиента вместимостью V_k в некоторый так называемый «условный объем» адсорбента, величина которого определяется уравнением адсорбции.

3. На основе предложенных криоадсорбционных элементов и результатов проведенных исследований разработаны и внедрены:

- конструкция встроенного криоадсорбционного кармана для транспортных газификаторов холодных вместимостью до 10 м^3 .
- конструкция криоадсорбционного насоса НКС-50Т для создания безмасляной среды в теплоизоляционных полостях различных установок, а также для использования в качестве агрегатированных блок-приставок к течеискателям. Экспериментально установлено, что насос НКС-50Т превосходит прототип насос НКС-50 с сферическим модулем по скорости действия в 5 раз, по производительности в 20 раз. Масса насоса НКС-50Т меньше массы насоса НКС-50 с сферическим модулем в 1,6 раза;
- конструкции криоадсорбционных секций с диаметром условных проходов от 0,025 до 0,1 м, отличающихся высокоскоростным режимом достижения рабочего давления в теплоизоляционных полостях криогенных трубопроводах;
- рекомендации работы включены в 2 стандарта предприятия СТП БЗКМ.

Оценочные расчеты экономической эффективности от внедрения КГЭ показали, что по стоимости материалов и изготовления предлагаемый элемент (алюминий АМц) в 16 раз дешевле аналогичного по размерам пористого экрана, спеченного из медного порошка.

4. Конструкторско-технологические проработки показали, что благодаря пластичности алюминиевых подложек и возможности наращивания количества слоев криосорбирующей угольной ткани «КУТ-М» в криоадсорбционных элементах удастся в 2-4 раза уменьшить длину кассет с перфорированными алюминиевыми подложками по сравнению с кассетой из спеченного медного порошка.

5. Проведены исследования работоспособности кассеты с перфорированными алюминиевыми подложками, в реальных условиях захолаживания трубопровода. Установлено, что откачка кассетой камеры-имитатора ТИП трубопровода до давления $6,65 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$ достигается за 41 минуту, что в 1,4 раза быстрее, чем при откачке кассетой Ду100 спеченной из медного порошка.

1. Встроенный криоадсорбционный карман с композиционным элементом из алюминия для теплоизоляционных полостей криогенных резервуаров / О.Е. Чубаров [и др.] // Вакуумная наука и техника. Материалы XVIII научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов. М., 2011. С. 99-100.

2. Адсорбционные секции с перфорированными алюминиевыми элементами для теплоизоляционных полостей криогенных трубопроводов / О.Е. Чубаров [и др.] // Вакуумная наука и техника. Материалы XVIII научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов. М., 2011. С. 97-99.

3. Криоадсорбционный насос НКС-50Т / О.Е. Чубаров [и др.] // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2012 . №1. С. 19-20.

4. Встроенный насос с алюминиевой адсорбционной кассетой для криогенных трубопроводов / О.Е. Чубаров [и др.] // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2012. №5. С. 22-24.

5. Комплекс оборудования термовакuumной установки для имитации условий космического пространства / О.Е. Чубаров [и др.] // Вакуумная техника, материалы и технология: Материалы VII Международной научно – технической конференции М., 2012 . С. 26-29.

6. Криоадсорбционный модуль с теплозащитным элементом из алюминия для криогенных магистралей / О.Е. Чубаров [и др.] // Химическое и нефтегазовое машиностроение, 2012. №10. С. 24-25.

7. Криоадсорбционные устройства с перфорированными алюминиевыми элементами для теплоизоляционных полостей криогенных систем / О.Е. Чубаров [и др.] // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Сер. 1. 2013. №1. С.109.