

КРИОСОРБЦИОННЫЕ УСТРОЙСТВА С ПЕРФОРИРОВАННЫМИ АЛЮМИНИЕВЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ДЛЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ ПОЛОСТЕЙ КРИОГЕННЫХ СИСТЕМ

Представлены результаты исследований встроенных криосорбционных устройств для криогенных резервуаров и трубопроводов в виде кассет из откачивающих элементов, содержащих криосорбирующую угольную ткань КУТ-М и гранулированный угольный адсорбент, заключенных между перфорированными алюминиевыми подложками. Экспериментально определены конструктивно-эксплуатационные параметры криосорбционных устройств. Разработаны конструкции встроенных криосорбционного кармана, а также адсорбционного устройства транспортных газификаторов ТГХ-0,6/1,6 и ТГХ-1,2/1,6.

E-mail: oe_chubarov@mail.ru

Ключевые слова: криосорбирующая угольная ткань, откачивающие элементы, перфорированные алюминиевые подложки, криосорбционные устройства, композиционный газопроницаемый элемент, криосорбционный карман.

Криосорбционные устройства (КСУ) являются основными средствами обеспечения вакуума в теплоизоляционных полостях (ТИП) криогенного оборудования со слоистой вакуумной теплоизоляцией, так как в самой основе криогенных систем заложена необходимая предпосылка, обуславливающая адсорбционную откачку с максимальной интенсивностью, а именно низкие температуры. В ТИП систем накопления, хранения и выдачи (газификации) криогенных продуктов применяются встроенные КСУ с гранулированным или тканым угольными адсорбентами СКТ-4 и КУТ-М [1, 2], создающие и поддерживающие разрежение в ТИП на уровне $10^{-2} \dots 10^{-3}$ Па.

Первые конструкции КСУ для ТИП криогенных хранилищ и трубопроводов были выполнены в виде закрепленных на холодных поверхностях сетчатых кассет, в которые засыпается гранулированный адсорбент. Адсорбент охлаждается только со стороны холодной стенки изделия по точкам контакта между гранулами и за счет излучения. Эффективность охлаждения адсорбента определяет время достижения рабочего давления в ТИП. Более удачной конструкцией КСУ [1, 3] является кассета для адсорбента, роль сетки в которой играет пористый газопроницаемый экран, изготовленный из спеченного медного порошка [2, 4]. Адсорбент, размещенный в кассете, охлаждается как со стороны холодной стенки изделия, так и от пористого экрана. Газ, поступающий к адсорбенту, при прохождении через каналы пористой стенки экрана приобретает его температуру. Все это влечет за собой повышение скорости охлаждения адсорбента в кассете и более низкую

среднюю температуру адсорбента в период работы устройства. Описанные адсорбционные элементы имеют бóльшую удельную емкость, чем элементы с сетчатой стенкой.

К недостаткам таких устройств следует отнести высокую стоимость материалов (катодной М-1 и фосфористой МФ-1 меди), хрупкость подложек из пористой меди, что не позволяет выполнить рихтовку адсорбционных элементов по малым диаметрам 80...100 мм для ТИП-трубопроводов Ду25, Ду50, а также применить достаточно сложную, трудоемкую технологию изготовления пористых медных экранов (фракционирование, спекание в условиях свободной засыпки, сборка экранов из малогабаритных панелей).

В качестве альтернативы применяемым откачным элементам предлагается перейти к менее трудоемкому производству принципиально новых газопроницаемых элементов композиционного типа из дешевых перфорированных алюминиевых листов с прокладкой из стеклотумаги между ними, пропускающей откачиваемые газы и удерживающей от высыпания мелкодисперсные составляющие адсорбента [5]. Новый композиционный газопроницаемый элемент (КГЭ) из алюминия позволяет создать условия, при которых температура адсорбента будет близка к температуре используемого криоагента. Были проведены исследования по определению рациональных структурных и геометрических параметров конструктивных элементов, обеспечивающих наилучшие рабочие характеристики. Изменялись геометрия перфорации алюминиевых подложек, число слоев стеклотумаги в газопроницаемых прокладках, способы крепления элементов в КСУ. Схема композиционного газопроницаемого элемента из алюминия представлена на рис. 1.

Композиционный газопроницаемый элемент состоит из верхней и нижней перфорированных подложек с газопроницаемой теплоизолирующей прокладкой между ними. Шаг и диаметр перфорированных отверстий верхней подложки выбирались отличающимися от шага отверстий перфораций нижней подложки для исключения возможного

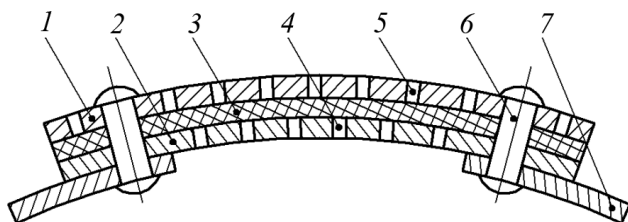


Рис. 1. Композиционный газопроницаемый элемент из алюминия:

1 и 2 — верхняя и нижняя подложки; 3 — газопроницаемая прокладка; 4, 5 — отверстия, перфорированные в подложках; 6 — заклепка; 7 — окантовка полосой из коррозионно-стойкой стали

перекрытия отверстий совмещенных подложек. Для изготовления подложек КГЭ использовалась перфорированная алюминиевая лента АМц $1,5 \times 0,6$ м толщиной $1,5 \cdot 10^{-3}$ м и перфорированная лента толщиной $7 \cdot 10^{-4}$ м.

В настоящей статье приведены результаты экспериментального исследования по определению удельной проводимости семи вариантов КГЭ в молекулярном режиме течения газов.

Удельная проводимость определялась по соотношению [6]

$$U_{\text{уд}} = Q / (p_2 - p_1) S_0,$$

где $U_{\text{уд}}$ — удельная проводимость композиционного газопроницаемого элемента; Q — газовый поток воздуха в камеру с образцом; p_1 — давление в откачиваемой части камеры; p_2 — давление в напорной части камеры; S_0 — площадь образца.

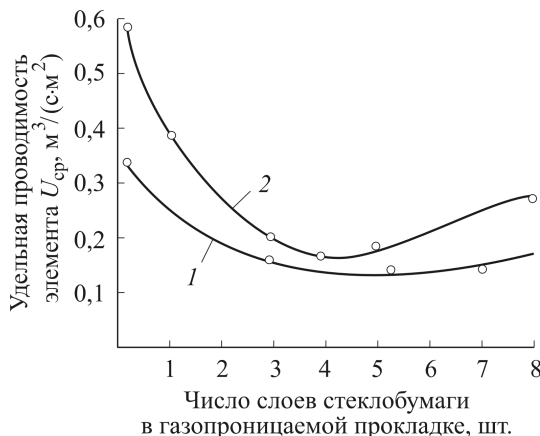
Установлено, что композиция № 3 КГЭ, принятая за базовую, имеет проводимость $1,63 \text{ м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$ (подложки толщиной $1,5 \cdot 10^{-3}$ м, диаметры отверстий $d_{\text{отв}} = 1,4 \cdot 10^{-3}$ и $1,2 \cdot 10^{-3}$ м и шаг отверстий $L_{\text{ш.о}} = 3,25 \cdot 10^{-3}$ и $3,926 \cdot 10^{-3}$ м). Это в 1,36 раза больше, чем у спеченного медного экрана (фракция порошка № 3, $U_{\text{уд}} = 1,2 \text{ м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$) [7]. Другие варианты композиции (№ 4 и № 5) имеют проводимость меньше на 20% (не более) проводимости композиции КГЭ № 3 и могут рассматриваться как альтернативные.

Результаты экспериментального определения удельной проводимости КГЭ в зависимости от характеристик подложек представлены в табл. 1.

Была исследована зависимость удельной проводимости КГЭ от числа слоев стеклот бумаги БмД-К в газопроницаемой прокладке. График этой зависимости представлен на рис. 2

Рис. 2. График зависимости удельной проводимости КГЭ от числа слоев стеклот бумаги БмД-К в газопроницаемой прокладке:

1 — верхняя подложка толщиной $\delta = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м, $d_{\text{отв}} = 1,4 \times 10^{-3}$ м, $L_{\text{ш.о}} = 3,25 \cdot 10^{-3}$ м; нижняя подложка — толщиной $\delta = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м, $d_{\text{отв}} = 1,2 \times 10^{-3}$ м, $L_{\text{ш.о}} = 3,926 \cdot 10^{-3}$ м; 2 — верхняя подложка — см п. 1; нижняя подложка толщиной $\delta = 0,7 \cdot 10^{-3}$ м, $d_{\text{отв}} = 2,5 \times 10^{-3}$ м, $L_{\text{ш.о}} = 9,0 \cdot 10^{-3}$ м



Удельная проводимость КГЭ в зависимости от характеристик подложек

№	Характеристики подложек	Проводимость, $\text{м}^3/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$
1	Перфорированный алюминиевый лист $\delta = 1,5$ мм; верхняя подложка, $d_{\text{отв}} = 1,4$ мм, $L_{\text{ш.о}} = 3,25$ мм; нижняя подложка, $d_{\text{отв}} = 2,5$ мм, $L_{\text{ш.о}} = 9,0$ мм	$1,95 \cdot 10^{-2}$
2	Повторение по п. 1, но через КГЭ протрясен пылевидный адсорбент	$1,67 \cdot 10^{-2}$
3	Верхняя подложка (повторение по п. 1) нижняя подложка, $d_{\text{отв}} = 1,2$ мм; $L_{\text{ш.о}} = 3,926$ мм	$1,63 \cdot 10^{-2}$
4	Верхняя подложка (повторение по п. 1) нижняя подложка, $d_{\text{отв}} = 1,2$ мм; $L_{\text{ш.о}} = 3,614$ мм	$1,57 \cdot 10^{-2}$
5	Верхняя подложка (повторение по п. 1) нижняя подложка, $d_{\text{отв}} = 1,2$ мм; $L_{\text{ш.о}} = 4,279$ 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	$1,6 \cdot 10^{-2}$

Примечание. Газопроницаемая прокладка — 5 слоев стеклобумаги.

Экспериментально определен уровень пыления мелкодисперсным адсорбентом встроенных КСУ с КГЭ. Исследования показали, что конструкции КГЭ с газопроницаемой прокладкой из двух слоев стеклобумаги БМД-К имеет в 2,8 раза, а с прокладкой из пяти слоев в 6,4 раза меньший удельный вынос по сравнению с пористым экраном из СМП. На базе КГЭ и полученных экспериментальных результатов разработана конструкция встроенного криоадсорбционного кармана для ТИП криогенного оборудования, схема которого представлена на рис. 3.

Представлены экспериментальные результаты и методы исследования элементов КСУ нового поколения, содержащих угольную ткань КУТ-М, заключенную между перфорированными алюминиевыми подложками (ПАП). Элемент с ПАП является откачивающей частью встроенных КСУ. 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 одно- и двухуровневой адсорбционных кассетах представлены на рис. 4.

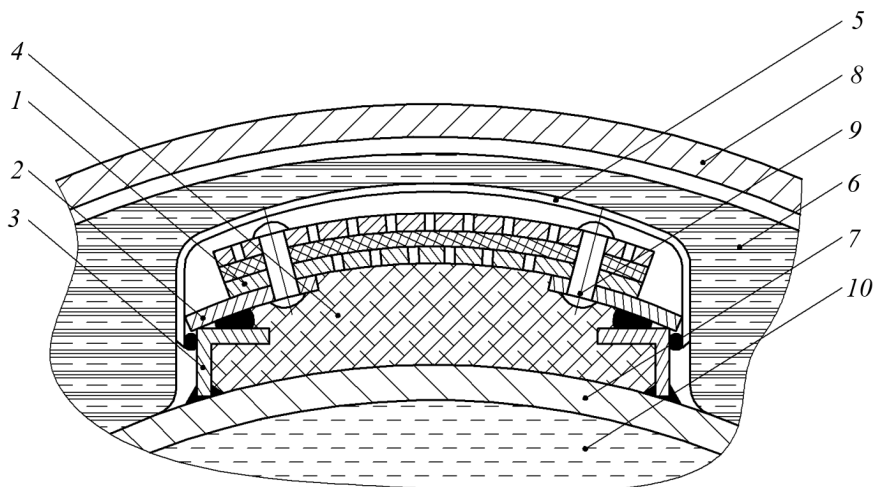


Рис. 3. Встроенный криоадсорбционный карман с КГЭ для ТИП криогенного оборудования:

1 — КГЭ из алюминия; 2 — полоса-окантовка; 3 — уголок; 4 — адсорбент; 5 — скоба; 6 — слоистая вакуумная изоляция; 7 — внутренний сосуд; 8 — кожух; 9 — заклепка; 10 — криоагент

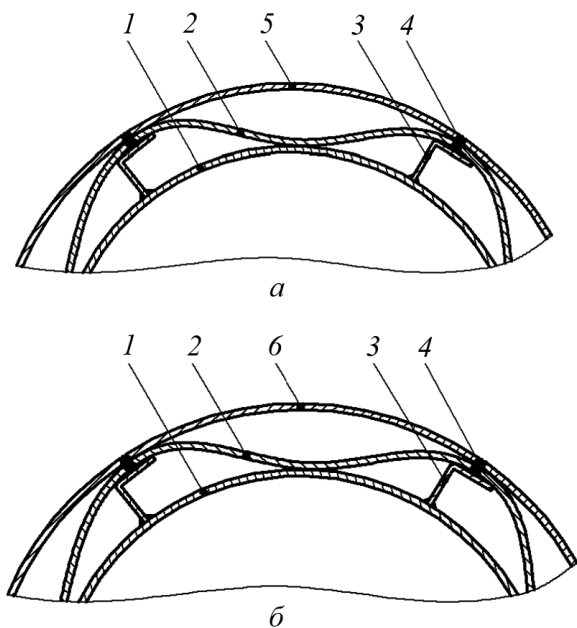


Рис. 4. Схемы компоновок одно- (а) и двухуровневых (б) кассет с ПАП адсорбционных секций криогенных трубопроводов:

1 — внутренний трубопровод; 2 и 6 — адсорбционные элементы первого и второго уровня; 3 — теплопроводное ребро (уголок с алитированной полкой); 4 — сварной шов; 5 — теплозащитный экран

В такой конструкции откачка осуществляется с внутренней стороны поверхности криоадсорбционных элементов. Их внешняя сторона используется в качестве опорной для нанесения слоистой теплоизоляции-

ции. В результате конструкция освобождается от специального экрана, сокращаются габаритные размеры, а диаметр кожуха КСУ может быть сделан равным диаметру криогенного трубопровода.

Поглотительная способность исследуемых кассет определялась объемным методом [8] путем подачи порций азота из калиброванного объема в вакуумную камеру с одновременным контролем установившегося равновесного давления. Быстрота действия кассет определялась методом постоянного давления.

Откачивающая способность элементов с угольной тканью адсорбционных кассет с ПАП определялась в целях оценки их работоспособности по сравнению с применяемыми элементами с СМП. Надежно экранированный от внешних теплопритоков элемент с ПАП продемонстрировал удельную поглотительную способность в 2,2 раза большую, чем у элемента с СМП.

Значительное возрастание быстроты действия элементов с ПАП объясняется хорошей газовой проводимостью перфорированных отверстий в алюминиевых подложках. Результаты экспериментального определения проводимости ПАП представлены в табл. 2.

Таблица 2

Удельная газовая проводимость перфорированных алюминиевых подложек адсорбционных элементов

№	Характеристики подложек	Проводимость, $\text{м}^3/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$
1	Спеченный медный порошок; фракция № 3; $\delta = 3 \cdot 10^{-3}$ м	1,2
2	Спеченный медный порошок; фракция № 3–№ 4; $\delta = 3 \cdot 10^{-3}$ м	1,6
3	Спеченный медный порошок; фракция № 4; $\delta = 2 \cdot 10^{-3}$ м	2,0
4	Перфорированный алюминиевый лист; $\delta = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м; $d_{\text{отв}} = 1,2 \cdot 10^{-3}$ м; $L_{\text{ш.о}} = 3,25 \cdot 10^{-3}$ м	6,3
5	Перфорированный алюминиевый лист; $\delta = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м; $d_{\text{отв}} = 1,25 \cdot 10^{-3}$ м; $L_{\text{ш.о}} = 3,25 \cdot 10^{-3}$ м	7,6
6	Перфорированный алюминиевый лист; $\delta = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м; $d_{\text{отв}} = 1,2 \cdot 10^{-3}$ м; $L_{\text{ш.о}} = 3,926 \cdot 10^{-3}$ м	4,0
7	Перфорированный алюминиевый лист; $\delta = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м; $d_{\text{отв}} = 1,4 \cdot 10^{-3}$ м; $L_{\text{ш.о}} = 3,25 \cdot 10^{-3}$ м	8,1
8	Перфорированный алюминиевый лист; $\delta = 0,7 \cdot 10^{-3}$ м; $d_{\text{отв}} = 2,5 \cdot 10^{-3}$ м; $L_{\text{ш.о}} = 9 \cdot 10^{-3}$ м	15,1

Выводы. 1. По результатам экспериментальных исследований разработана конструкция КГЭ из алюминия для встроенных КСУ криогенных систем. Предлагаемая конструкция КСУ состоит из верхней перфорированной алюминиевой подложки (материал – сплав АМц; толщина $\delta = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м; $d_{\text{отв}} = 1,4 \cdot 10^{-3}$ м; шаг отверстий $L_{\text{ш.о}} =$

= $3,25 \cdot 10^{-3}$ м), нижней перфорированной подложки (материал — сплав АМц; толщина $\delta = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м; $d_{\text{отв}} = 1,2 \cdot 10^{-3}$ м; шаг отверстий $L_{\text{ш.о}} = 3,926 \cdot 10^{-3}$ м) и газопроницаемой прокладки между ними (5 слоев стекlobумаги БмД-К), окантованных полосой из стали 12Х18Н10Т.

2. Установлено, что удельная проводимость композиционного элемента составляет $1,63 \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$, что на 36 % превышает удельную проводимость применяемого пористого экрана из спеченного медного порошка (фракция № 3, толщина экрана 3 мм, проводимость $1,2 \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$).

3. Установлено, что удельный вынос мелкодисперсного адсорбента через композиционный элемент при ударных циклических воздействиях в 6,4 раза меньше удельного выноса адсорбента через спеченный медный экран.

4. На основе криоадсорбционного элемента с ПАП изготовлены и исследованы три варианта адсорбционной кассеты Ду100 для скоростной откачки ТИП криогенных трубопроводов при их захолаживания.

5. Конструкторско-технологические проработки показали, что благодаря пластичности алюминиевых подложек и возможности наращивания числа слоев угольной ткани КУТ-М в КСУ удастся в 2–4 раза уменьшить длину кассет с ПАП по сравнению с серийной кассетой с СМП (длина 600 мм) при превышении в 1,3–2 раза откачных характеристик прототипа.

6. Проведены исследования на работоспособность кассеты с ПАП на неустановившемся режиме, воспроизводящем реальные условия захолаживания трубопровода. Установлено, что при откачке кассетой имитатора трубопровода давление $6,65 \cdot 10^{-2}$ Па достигается за 41 мин. Это в 1,4 раза быстрее, чем при откачке применяемой серийной кассетой Ду = 100 с СМП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.С. 449172 (СССР). Криоадсорбционный насос: Авт. изобрет. Беляков В.П., Исаев А.В., Куприянов В.И., Леонов В.В., Лунчев В.П., Макаров А.М., Филин Н.В. — заявл. 12.07.72 № 1811784/23-26; Оpubл. в Б.И., 1974, № 41; МКИ F04B37/02.
2. Б е л я к о в В. П. Криогенная техника и технология. — М.: Энергоатомиздат, 1982. — 271 с.
3. К р и о а д с о р б ц и о н н ы й элемент для высоковакуумных насосов / В.И. Куприянов, В.П. Кряковкин, С.М. Чопов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Общая и ядерная физика. — 1984. — Вып. 1(26). — С. 17–19.
4. А.с. 817307 (СССР). Способ изготовления сорбционного элемента; Авт. изобрет. Бусаров А.И., Исаев А.В., Куприянов В.И., Кряковкин В.П., Леонов В.В., Чопов С.М., Юшин И.П., Хлыстов М.И. — Заявл. 03.05.78, № 2609979/25-06; Оpubл. в Б.И., 1981, № 12; МКИ F04B37/04.

5. А.с. 1653811 (СССР). Адсорбционный элемент вакуумного насоса; Авт. изобрет. Алейник Ю.В., Исаев А.В., Куприянов В.И., Чубаров Е.В. – Заявл. 18.07.1998 № 4461268/26; Оpubл. в Б.И., 1991, № 21; МКИ FOND 37/02.
6. П и п к о А. И., П л и с к о в с к и й В. Я., П е н ч к о Е. А. Конструирование и расчет вакуумных систем. – М.: Энергия, 1970. – 318 с.
7. К р я к о в к и н В. П., К у п р и я н о в В. И. Экспериментальное исследование проводимости пористых экранов в молекулярном режиме / Физика и техника высокого и сверхвысокого вакуума: Тез. 5-й Всесоюзн. конф., Ленинград, 1985. – Ч. 1. – Л.: НТО Приборпром.
8. В а к у у м н а я техника: Справочник / Е.С. Фролов, В.Е. Минаичев, А.Т. Александрова и др.; Под общ. ред. Е.С. Фролова, В.Е. Минаичева. – М.: Машиностроение, 1992. – 396 с.

Статья поступила в редакцию 27.06.2012