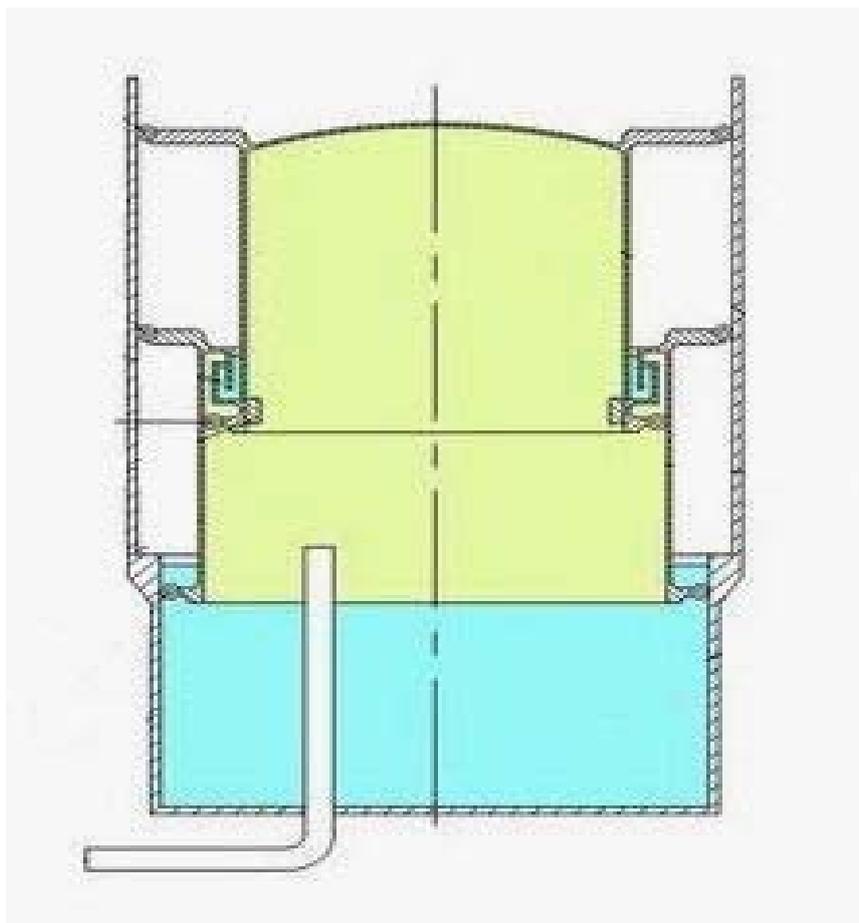


А.Ю. Баранов, Е.В. Соколова

ХРАНЕНИЕ И ТРАНСПОРТИРОВКА КРИОГЕННЫХ  
ЖИДКОСТЕЙ.  
ЧАСТЬ 1



Санкт-Петербург  
2017

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

**А.Ю. Баранов, Е.В. Соколова**

**ХРАНЕНИЕ И ТРАНСПОРТИРОВКА  
КРИОГЕННЫХ ЖИДКОСТЕЙ.  
ЧАСТЬ 1**

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО  
по направлениям подготовки 16.03.03 и 16.04.03  
в качестве учебного пособия для реализации основных профессиональных  
образовательных программ высшего образования  
бакалавриата и магистратуры

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

Санкт-Петербург

2017

**Баранов А.Ю., Соколова Е.В.** Хранение и транспортировка криогенных жидкостей. Часть 1: Учебное пособие.– СПб: Университет ИТМО, 2017. – 95 с.

Рецензенты:

Ежаков К.Б., к.т.н., главный инженер НПП «Крион»;

Вологжанина С.А., д.т.н., профессор, доцент кафедры ИПСЖ

Изложены теплофизические свойства криогенных жидкостей, рассмотрены связанные с этим особенности хранения криогенных жидкостей. Приведены основные типы изоляции, используемые в криогенной технике. Описываются конструкционные особенности сосудов и емкостей для хранения и транспортирования криогенных газов и жидкостей. Проведен анализ эффективности хранения и транспортирования криогенных газов в сжиженном и газообразном виде. Излагаются методики расчета: теплопритоков через изоляционную конструкцию и времени захолаживания емкости.

Пособие предназначено для работы студентов направления бакалавриата 16.03.03 Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения очной и заочной форм обучения по дисциплинам «Введение в специальность», «Регулирование и автоматизация криогенных машин и установок», «Транспортирование и хранение криогенных жидкостей», «Теплофизические процессы в криогенных системах» и магистратуры 16.04.03 Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения очной и заочной форм обучения по дисциплинам «Системы сжижения, хранения и транспортирования природного газа» и «Теплофизические процессы в криогенных системах».



**Университет ИТМО** – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2017

© Баранов А.Ю., Соколова Е.В., 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА I. СВОЙСТВА СЖИЖЕННЫХ КРИОГЕННЫХ ГАЗОВ.....	5
Сжиженные криогенные газы с температурой кипения 77К и выше (при $P = 0,1$ МПа) .....	7
Сжиженные криогенные газы с температурой кипения 27,1 К и ниже ( $P=0,1$ МПа) .....	9
ГЛАВА II. ТЕПЛОВАЯ ИЗОЛЯЦИЯ СОСУДОВ И ЕМКостей ДЛЯ СЖИЖЕННЫХ ГАЗОВ.....	14
Назначение тепловой изоляции. Требования, предъявляемые к изоляционным конструкциям. Характеристика теплоизоляционных материалов.....	14
Расчет теплопритока из окружающей среды через изоляционную конструкцию.....	31
ГЛАВА III. ХРАНЕНИЕ И ТРАНСПОРТИРОВАНИЕ НЕСЖИЖЕННЫХ КРИОГЕННЫХ ГАЗОВ.....	53
Газгольдеры переменного объема (постоянного давления). Определение давления газа в газгольдере.....	53
Газгольдеры постоянного объема низкого давления.....	56
Газгольдеры постоянного объема высокого давления.....	56
Конструктивные особенности и характеристика газгольдеров.....	56
Баллоны и реципиенты.....	63
ГЛАВА IV. СОСУДЫ И ЕМКости ДЛЯ ХРАНЕНИЯ И ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ СЖИЖЕННЫХ КРИОГЕННЫХ ГАЗОВ.....	68
Особенности конструкций сосудов Дьюара для хранения сжиженных криопродуктов.....	71
Особенности конструкций транспортных криогенных цистерн...	79
Газификационные установки.....	84
Охлаждение емкости. Расчет времени охлаждения.....	90
ЛИТЕРАТУРА.....	95

## ВВЕДЕНИЕ

Производство и потребление компонентов газовых смесей, получаемых в результате их разделения, зачастую разделено не только в пространстве, но и по времени. Потребитель может находиться на большом расстоянии от производства. Транспортирование газов потребителю в сжиженном виде с последующей регазификацией во многих случаях рентабельней транспортирования тех же объемов в газообразном виде. Таким образом, возникает задача хранения, транспортирования, а также последующей регазификации криогенных продуктов.

В данной части пособия изложены такие вопросы, как теплофизические свойства криогенных жидкостей, особенности их хранения. Приведены основные типы изоляции, используемых в криогенной технике. Описываются конструкционные особенности сосудов и емкостей для хранения и транспортирования криогенных газов и жидкостей. Проведен анализ эффективности хранения и транспортирования криогенных газов в сжиженном и газообразном виде. Излагаются методики расчета: теплопритоков через изоляционную конструкцию и времени захолаживания емкости.

Пособие предназначено для работы студентов направлений бакалавриата 16.03.03 Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения очной и заочной форм обучения по дисциплинам «Введение в специальность», «Регулирование и автоматизация криогенных машин и установок», «Транспортирование и хранение криогенных жидкостей», «Теплофизические процессы в криогенных системах» и магистратуры 16.04.03 Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения очной и заочной форм обучения по дисциплинам «Системы сжижения, хранения и транспортирования природного газа» и «Теплофизические процессы в криогенных системах».

## Глава I. СВОЙСТВА СЖИЖЕННЫХ КРИОГЕННЫХ ГАЗОВ

В жидком состоянии все вещества имеют относительно высокую плотность и малый удельный объем, поэтому ожижение газов является предпочтительным способом их подготовки к хранению. Плотность вещества в жидком и твердом состоянии в большинстве случаев близка по значению, при этом жидкие продукты гораздо удобнее перемещать и использовать. Из-за этого хранение газов в жидком состоянии получило широкое распространение промышленности, медицине, авиации и даже в быту.

Примером широко используемых сжиженных газов могут служить пропанобутановая смесь, хладоны, закись азота и диоксид углерода. В стандартном баллоне емкостью 50 л (ГОСТ 949-73) размещается 24,5 кг жидкого пропана и всего 6,1 кг метана. Разница вместимости баллона объясняется тем, что пропан в баллоне находится в сжиженном состоянии, метан в сжатом до давления 15 МПа. Очевидно преимущество перевозки газов в сжиженном состоянии, но для ряда веществ переход в жидкое состояние в условиях повышения давления и температуре окружающей среды невозможен. У каждого вещества есть критическая температура или температура, при превышении которой вещество переходит в газовое состояние. Если критическая температура газа ниже температуры окружающей среды для его перехода в жидкое состояние и хранения в сжиженном виде надо использовать охлаждение. Такая необходимость позволяет выделить группу криогенных газов, т.е. газов, критическая температура [1] которых ниже температуры окружающей среды (табл. 1.1.).

Таблица 1.1.

Значения критической температуры распространенных технических газов

Наименование газа	Химическая формула	Критическая температура, К
Бутан	$C_4H_{10}$	425
Пропан	$C_3H_8$	370
Закись азота	$N_2O$	309,4
Этан	$C_2H_6$	306
Углекислый газ	$CO_2$	304
Метан	$CH_4$	190,9
Кислород	$O_2$	154,5
Аргон	Ar	151
Фтор	$F_2$	144
Азот	$N_2$	126

Водород	H <sub>2</sub>	32,8
Гелий	He	5,25

Критическая температура соответствует состоянию, в котором линии насыщенной жидкости и насыщенного пара на диаграмме  $T-s$  (рис. 1.1) сходятся в одной точке. Для этой точки определена не только температура, но и давление, которое называют критическим давлением. Сама точка получила название критической.

Общим свойством всех криогенных газов является низкая температура в критической точке и сравнительно высокое критическое давление. В СССР сложилась практика хранения и транспортирования сжиженных криогенных газов при давлении, близком к атмосферному (обычно несколько более высоким), эта практика сохраняется и в России. За пределами Российской Федерации доминирует альтернативный способ хранения криопродуктов, при котором жидкости хранят и транспортируют при повышенном давлении. Значения давления хранения составляют 0,15, 0,4 и даже 2,5 МПа.

Хранение жидких криопродуктов при повышенном давлении требует использования специализированного емкостного оборудования, способного выдерживать возникающие механические нагрузки. Поставщики продуктов разделения воздуха утверждают, что доставка газов в сосудах при повышенном давлении снижает потери от испарения.

Распространение этой методики связывают с техническим влиянием криогенных компаний США, которое возросло во второй половине XX века.

Вне зависимости от выбора давления хранения все сжиженные криогенные газы имеют температуру существенно ниже температуры окружающей среды. Характерным для этих газов является малая объемная теплота парообразования при давлении  $P=0,1$  МПа. Например, теплота парообразования жидкого азота 199 кДж/кг, почти в 7 раз ниже аналогичной характеристики аммиака. Приток теплоты к криогенным газам, приводит к существенным потерям от испарения.

При их хранении и транспортировании основной задачей является полное исключение или доведение до минимума потерь жидкости.

Ниже рассматриваются физические и термодинамические свойства криогенных жидкостей, существенно влияющие на условия их хранения.

## Сжиженные криогенные газы с температурой кипения 77К и выше (при $P = 0,1$ МПа)

К имеющим практическое значение сжиженным криогенным газам с указанной температурой кипения относятся метан, воздух, кислород, азот, аргон и фтор. Хранение и транспортирование их имеет много общего.

### Кислород

Под атмосферным давлением при охлаждении до 90,18 К кислород сжижается в голубоватую жидкость, которая затвердевает при 54,36 К, образуя кристаллы синего цвета. При испарении 1 л жидкого кислорода образуется 800 л газообразного (при нормальных условиях  $T=273,15\text{К}$ ,  $P=0,1033$  МПа).

Кислород является сильным окислителем, образуя соединения со всеми химическими элементами, кроме инертных газов. Однако его окислительные свойства зависят от температуры. Окисление металлов кислородом, интенсивное при высокой температуре, резко замедляется в среде жидкого кислорода. Кислород хорошо поглощается (как в газообразном, так и в жидком виде) некоторыми адсорбентами (силикагелями, цеолитами).

Смешение жидкого кислорода с органическими веществами может привести к их охлаждению и замораживанию. Такие смеси взрывоопасны и чувствительны к внешнему воздействию. Особенно опасен с этой точки зрения ацетилен, который может попадать из атмосферы промышленных предприятий в низкотемпературные установки разделения воздуха, и в жидкий кислород. В целях безопасности при производстве жидкого кислорода следы ацетилена удаляют из конечного продукта адсорбционным способом.

### Азот

При атмосферном давлении и температуре 77,36 К представляет собой бесцветную жидкость, затвердевающую при 63,15 К. При испарении 1 л жидкого азота образуется 643 л газообразного азота. Он не токсичен и не взрывоопасен, однако насыщение им атмосферы помещения опасно, так как это приводит к недостатку кислорода, необходимого для дыхания.

### Аргон

Температура кипения аргона при атмосферном давлении составляет 87,29 К. Температура замерзания близка к температуре кипения и составляет 83,81 К. При испарении 1 л жидкого аргона

образуется 780 л газообразного аргона (при нормальных условиях). Аргон инертен и не ядовит. Однако благодаря высокой плотности ( $1,662 \text{ кг/м}^3$ ) аргон в газообразном состоянии способен накапливаться в непроветриваемых подвальных помещениях и вытеснять из них атмосферный воздух, что создает существенную угрозу жизни персонала.

### Воздух

Жидкий воздух получается из сухого и очищенного от  $\text{CO}_2$  атмосферного воздуха, который имеет такой состав: 20,95% об.  $\text{O}_2$ , 78,12% об.  $\text{N}_2$  и 0,93% об. Ar (здесь не учитываются микропримеси других компонентов: Ne, Kr, Xe,  $\text{H}_2$ , He и др.). При полной конденсации воздуха (температура начала конденсации – 78,8 К) полученная жидкость в момент сжижения имеет тот же состав. Если воздух недостаточно очищен, от примесей, то жидкость может содержать в виде кристаллов и в растворенном виде  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  (например, при получении жидкого воздуха в газовой холодильной машине). В случае неполной конденсации получаемый "жидкий воздух" обогащен (иногда значительно) кислородом.

При хранении жидкого воздуха, полученного при полной конденсации газообразного воздуха, он по мере испарения низкокипящего компонента (азота) обогащается кислородом. Жидкостной остаток может по составу приближаться к чистому кислороду. Поэтому термин "жидкий воздух" надо понимать условно и при обращении с этой жидкостью выполнять те же правила техники безопасности, которые относятся и к жидкому кислороду. Из-за нестабильности состава жидкого воздуха его нельзя рассматривать как товарный продукт разделения воздуха. В странах Евросоюза действует запрет на транспортирование и хранение жидкого воздуха.

При испарении 1 л жидкого воздуха образуется 675 л газообразного.

### Метан

Метан – прочный и устойчивый к химическим воздействиям углеводород. Является основным компонентом природного газа. В отечественных месторождениях природного газа составляет от 90 до 95 %, поэтому при технических расчетах связанных с транспортировкой и хранением сжиженного природного газа (СПГ) часто используют свойства чистого метана. Взрывоопасен. Сжижается под атмосферным давлением при температуре 111,67 К и затвердевает при 90,66 К. При испарении 1 л жидкого метана образуется 591 л газообразного.

## Фтор

В газообразном виде имеет бледно-желтый цвет и специфический запах. Фтор очень токсичен (воздух становится токсичным, когда содержание в нем фтора достигает  $2 \text{ см}^3$  на  $1 \text{ м}^3$ ) и является сильным окислителем. Активно реагирует со всеми элементами, в том числе с азотом, причем реакция часто сопровождается воспламенением. Реакция с водой иногда протекает с взрывом. В связи с этим при хранении жидкого фтора образующиеся пары нельзя выпускать в атмосферу. Он хранится без испарения в емкости, экранированной от теплопритоков извне жидким азотом, имеющим более низкую температуру кипения. Вся теплота, проникающая извне, воспринимается жидким азотом. Температура кипения фтора при атмосферном давлении составляет  $84,95 \text{ К}$ , точка замерзания –  $53,48 \text{ К}$ . При испарении  $1 \text{ л}$  жидкого фтора образуется  $866 \text{ л}$  газообразного.

## Сжиженные криогенные газы с температурой кипения $27,1 \text{ К}$ и ниже ( $P=0,1 \text{ МПа}$ )

К этим жидкостям относятся неон, водород и гелий. Они характеризуются более низкой температурой кипения и низкой (в особенности  $\text{H}_2$  и  $\text{He}$ ) теплотой парообразования. Кроме того, гелий и водород обладают специфическими свойствами, влияющий на процесс их хранения в жидком виде.

## Неон

Инертный газ, сжижающийся под атмосферным давлением при температуре  $27,1 \text{ К}$  и затвердевающий при  $24,54 \text{ К}$ . Получение его связано с большими материальными и энергетическими затратами. Плотность жидкого неона ( $1204 \text{ кг/м}^3$ ) значительно превышает плотность жидкого водорода ( $71 \text{ кг/м}^3$ ) и жидкого гелия ( $125 \text{ кг/м}^3$ ). При атмосферном давлении объемная теплоотводящая способность неона в  $3,3$  раза больше, чем водорода. По этой же причине, имея достаточно эффективную изоляцию, можно хранить жидкий неон со сравнительно небольшими потерями. При испарении  $1 \text{ л}$  жидкого неона образуется  $1340 \text{ л}$  газообразного.

## Водород ( $\text{H}_2$ )

В газообразном виде водород самый легкий из газов. Он обладает высокой скоростью к диффузии. Сжижается под атмосферным давлением при температуре  $20,38 \text{ К}$  и затвердевает при  $13,95 \text{ К}$ . Жидкий водород бесцветен, прозрачен и не имеет запаха. При испарении  $1 \text{ л}$  жидкого водорода образуется  $788 \text{ л}$  газообразного. Различают две

модификации молекулярного водорода: орто ( $o\text{-H}_2$ ) и параводород ( $p\text{-H}_2$ ). Переход орто-формы в пара-форму сопровождается выделением тепла. При нормальных условиях в водороде содержится 75% орто-водорода и 25% пара-водорода. Равновесный состав зависит от температуры. При температуре сжижения (около 20,4 К) устойчивая форма жидкого водорода соответствует почти чистому пара-водороду (99,8%). Поскольку при переходе из орто- в пара-модификацию выделяется теплоты конверсии, величина которого больше теплоты испарения, то при длительном хранении сжиженного нормального водорода, даже без учета теплопритоков извне, может произойти его полное испарение.

При низких температурах водород адсорбируется на поверхности металлов.

В газообразном виде водород взрывоопасен в смеси с воздухом в широком диапазоне концентраций (от 4 до 74 об. %), поэтому при хранении водорода в жидком виде, не допускается попадания его паров в атмосферу помещения. С этой целью осуществляется систематический анализ воздуха и устанавливается сигнализация, предупреждающая о концентрации водорода в воздухе, близкой к взрывоопасному уровню.

### Гелий (He)

Бесцветный, без запаха инертный газ, подобный аргону, неону. Жидкий гелий имеет очень незначительную плотность, высокую теплоемкость и теплопроводность, очень низкую теплоту испарения и самую низкую температуру кипения. Гелий существует в виде двух изотопов:  $He_4$  и  $He_3$ . При атмосферном давлении гелий кипит при температуре 4,21 К (изотоп гелий-4) и затвердевает при  $P=2,5$  МПа, имея температуру ниже 1,5 К. У гелия нет тройной точки. Обычно под гелием понимают его изотоп  $He\text{-}4$ . При испарении 1 л жидкого гелия образуется 700 л газообразного.

Получение сжиженных криогенных газов связано с большими энергетическими затратами, поэтому неоправданные потери вследствие испарения являются недопустимыми. Качество тепловой изоляции в связи с большим градиентом температуры, возникающим между окружающим воздухом и сжиженным газом, должно быть достаточно высоким, чтобы свести потери к минимуму. Эта задача усложняется тем обстоятельством, что ввиду малой величины объемной теплоты испарения (см. табл. 1) даже при небольшом количестве тепла, проникающего извне, потери значительны.

Учитывая то, что, как ранее было отмечено, на практике встречаются две концепции организации хранения криопродуктов: «советская», при которой давление паров жидкости незначительно

превышает атмосферное, и «американская», при которой давление паров выбирают в диапазоне от 0,15 до 2,5 МПа, проведем анализ эффективности этих двух концепций.

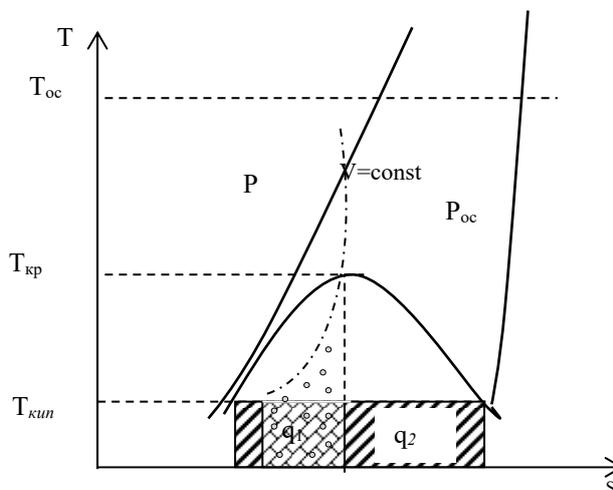


Рис. 1.1 Процесс испарения жидкости при  $V=\text{const}$  и  $P=\text{const}$ .

Для сопоставления эффективности способов хранения рассмотрим полностью герметичный сосуд с криогенной жидкостью и проанализируем происходящие в нем процессы с помощью  $T$ - $s$ -диаграммы (рис. 1.1). Несмотря на тепловую изоляцию хранилища, за счет большого градиента температуры  $T_{о.с}-T_{мин}$  в объем заполненный жидкость будет проникать теплота из окружающей среды. Воспринимая эту теплоту, жидкость в замкнутом объеме будет испаряться. Давление и температура в сосуде будут расти при  $V = \text{const}$  (изохорный процесс). При температуре  $T_{кр}$ . за счет подведенного тепла вся жидкость перейдет в газ, давление в сосуде резко возрастет, что может привести к его разрушению. Хранение в сосуде сжиженного криогенного газа при таких условиях потребовало бы весьма значительной толщины стенок и даже в этом случае не обеспечило бы его сохранения в жидком виде. Поэтому практически сжиженный газ хранится при постоянном (чаще всего атмосферном) давлении. За счет теплопритоков жидкость частично испаряется, а образующийся пар для сохранения постоянного давления отводится из сосуда.

Исключим из рассмотрения вопросы, связанные с прочностью сосуда. Тогда, сравнивая тепловые потоки  $q_1$  и  $q_2$  (рис. 1.1), приводящие к превращению всей жидкости в газ, можно констатировать, что  $q_2 \gg q_1$ . Иначе говоря, если к сосуду в условиях хранения при  $P=\text{const}$  подвести тепло  $q_1$ , то это приведет только к частичным потерям жидкости.

Таким образом, как из условий прочности, так и из условий со-

хранения, целесообразно криогенные жидкости хранить при постоянном давлении. В тех случаях, когда потери жидкости от испарения недопустимы, требуются более сложные технические решения, которые сводятся к полной компенсации теплопритоков извне тем или иным способом.

Хранение криопродуктов при повышенном давлении приводит к снижению значения теплоты парообразования и увеличивает потери жидкости от испарения. Кроме того, по мере роста давления увеличивается температура жидкости. Это приводит к уменьшению плотности насыщенной жидкости, что в свою очередь уменьшает вместимость сосуда. Например, при увеличении давления до 2,5 МПа плотность насыщенной жидкости уменьшается с исходных 805 кг/м<sup>3</sup> до 540 кг/м<sup>3</sup>, т.е. в 1,5 раза. Одновременно теплота парообразования уменьшается с 199 кДж/кг до 97 кДж/кг, т.е. в 2 раза. В результате объемная теплоотводящая способность жидкого азота снижается 3 раза. При прочих равных условиях при хранении жидкого азота по «американской» технологии потери от испаряемости могут возрастать на 200%. Единственным объяснением столь нерациональной организации хранения криопродуктов является то, что сосуды в которых она хранится, являются газификаторами, т.е. предназначены для выдачи продукта, как в жидком, так и в газообразном виде. Если потребитель заинтересован в получении газа, доставка жидкости в сосудах с высоким значением разрешенного давления, может в течение короткого периода обеспечить снижение потерь, за счет того, что испарившаяся под действием теплопритоков жидкость будет накапливаться в паровом пространстве.

Некоторые свойства сжиженных криогенных газов [2] приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Физические и термодинамические свойства сжиженных криогенных газов

Газ	Температура кипения при 0,1 МПа, К	Плотность жидкости, кг/м <sup>3</sup>	Теплота парообразования при 0,1 МПа		Объем газа (н.у) при испарении 1 л жидкости, л
			кДж/кг	кДж/л	
CH <sub>4</sub>	111,7	424	574	244	580
O <sub>2</sub>	90,2	1140	213,5	243	800
Ar	87,4	1374	163	224	790

F <sub>2</sub>	85	1505	172	257,5	880
CO	81,2	814	212	171,5	650
N <sub>2</sub>	77,36	808	199,5	161	645
Ne	27,17	1204	87	105	1840
H <sub>2</sub>	20,4	71	455	31,7	786
He	4,2	125	23,9	2,97	700

Физические характеристики сжиженных криогенных газов зависят от температуры. С повышением температуры плотность насыщенной жидкости и теплота парообразования понижаются, теплопроводность O<sub>2</sub>, Ar, N<sub>2</sub>, CO, F<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, Ne понижается, а у H<sub>2</sub> и He растет. Теплоемкость сжиженных газов с повышением температуры растет.

В стационарных условиях образовавшийся из-за испарения жидкости пар, если он представляет ценность, отводится в газгольдер для использования.

## Глава II. ТЕПЛОВАЯ ИЗОЛЯЦИЯ СОСУДОВ И ЕМКостей ДЛЯ СЖИЖЕННЫХ ГАЗОВ

Назначение тепловой изоляции.

Требования, предъявляемые к изоляционным конструкциям.  
Характеристика теплоизоляционных материалов

Ввиду того, что большая часть аппаратуры и трубопроводов низкотемпературных установок, находящихся в контакте с криогенными жидкостями или с холодными парами, а также и сами криогенные жидкости имеют температуру существенно ниже температуры окружающей среды, всегда существует поток теплоты, направленный из окружающей среды в низкотемпературную часть криогенной установки.

Назначение тепловой изоляции в криогенной технике – сводить до минимума приток теплоты из окружающей среды. Основное требование, предъявляемое к теплоизоляционным материалам, используемым в криогенной технике, это низкое значение коэффициента теплопроводности. Изоляционные материалы не должны вступать в химическое взаимодействие с криогенными жидкостями, а также с элементами конструкций. Материалы органического происхождения не могут быть использованы для тепловой изоляции сосудов с жидкими кислородом, так как в случае недостаточной герметичности может произойти возгорание или взрыв.

Изоляционные материалы должны обладать малой гигроскопичностью и плотностью. Волокнистые теплоизоляторы имеют плотность 150–450 кг/м<sup>3</sup>, а порошкообразные 60–130 кг/м<sup>3</sup> [3]. Учитывая большой объем теплового ограждения криогенных, установок изоляционные материалы должны быть сравнительно дешевыми.

Кроме указанных требований при выборе теплоизоляционного материала или вида изоляции необходимо учитывать следующие факторы: соотношение между теплопритоками непосредственно и через конструктивные элементы должно быть рациональным (т.е. нецелесообразно использовать эффективную дорогую изоляцию, не уделяя при этом должного внимания уменьшению теплопритоков по тепловым мостикам: опорам, подвескам, патрубкам и т.п.); монтаж изоляции должен быть удобным и надежным.

Не существует теплоизоляционного материала и типа изоляции, которые бы удовлетворяли одновременно всем перечисленным требованиям. Выбор типа изоляции для каждого конкретного случая зависит от многих факторов: от размеров и сложности конфигурации изоляционной конструкции, от допускаемой величины испарения, от

стоимости изоляционного материала, от температуры криогенной жидкости и т.п. Все эти факторы необходимо учитывать.

Теплоизоляционные материалы, используемые в криогенной технике, можно подразделить на волокнистые, порошкообразные (или зернистые) и пористые (или ячеистые). Данные по этим материалам заимствованы из [3,4,5].

### Волокнистые материалы

Волокнистые материалы используются в технике низких температур большей частью для теплоизоляции аппаратуры установок сжижения и разделения газов. Одним из самых дешевых и доступных материалов этого вида является минеральная (шлаковая) вата. Она состоит из стекловидных волокон, получаемых из расплавов горных пород (гранита, глины, доломита, кварцита) или шлаков металлургических печей.

Волокна имеют диаметры 6–10 мкм и длину от 3 до 20 мм. Допускается содержание в минеральной вате некоторого количества (7–10%) шариков – «корольков», так как не все капли расплава при раздуве успевают вытянуться в нити.

Коэффициент теплопроводности минеральной ваты зависит от диаметра волокон, содержания «корольков» и степени уплотнения. Вату следует набивать в изоляционное пространство до максимально возможной плотности (300–400 кг/м<sup>3</sup>), с тем, чтобы уменьшить конвективные токи газа заполняющего пустоты. Коэффициент теплопроводности минеральной ваты при средней температуре 180–190 К составляет 0,03–0,04 Вт/м·К.

Волокна минеральной ваты при монтажных работах поражают кожу и дыхательные пути. Этот недостаток в значительной мере устранен в гранулированной вате, состоящей из комочков размером 10–15 мм, образованных из волокон механическим путем. Минеральная вата обычно содержит до 1% масла, поэтому для обеспечения пожаробезопасности в кислородном производстве используется специально изготовленная вата, не содержащая масла.

Стекловолоконная вата изготавливается двумя способами: дутьевым и способом непрерывного вытягивания. Раздув непрерывных стеклянных волокон потоком горячих газов позволяет изготовить вату с диаметром волокон до 0,5 мкм. Коэффициент теплопроводности стекловаты с диаметрами волокон около 21 мкм при температуре 293К равен 0,047 Вт/м·К.

Из стекловолокна изготавливают маты и полосы. Такие маты имеют плотность 100–110 кг/м<sup>3</sup> и коэффициент теплопроводности 0,043 Вт/м·К. Высокими теплоизоляционными свойствами обладает вата из

ультратонкого волокна (УТВ), получаемая способом горячего раздува. Плотность такой ваты (без нагрузки) – 5–6 кг/м<sup>3</sup>, коэффициент теплопроводности – 0,03–0,032 Вт/м·К.

Для низкотемпературной изоляции применяют волокно, изготовленное из бесщелочных стекол. Стекловолоконистые материалы применяют также для вакуумно-многослойной изоляции, о чем речь пойдет ниже.

Шелковые очесы – отходы шелкопрядильной промышленности – применяются для изоляции установок разделения природного газа, где нет вероятности контакта изоляционного материала с кислородом и другими окислителями. По плотности и коэффициенту теплопроводности шелковые очесы близки к лучшим сортам минеральной и стеклянной ваты, хотя дороже их.

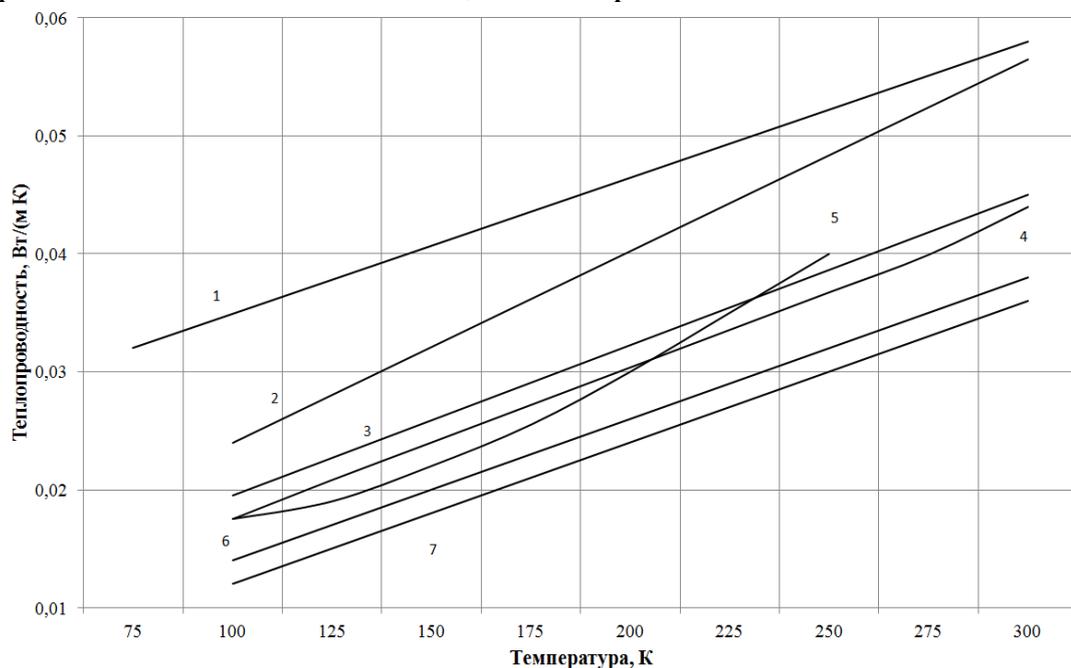


Рис. 2.1. Температурная зависимость коэффициента теплопроводности волоконистых изоляционных материалов:

- 1 – хлопковая вата ( $\rho=81 \text{ кг/м}^3$ ); 2 – минеральная вата ( $\rho=400 \text{ кг/м}^3$ );
- 3 – минеральная вата ( $\rho=260 \text{ кг/м}^3$ ); 4 – стеклянная вата ( $\rho=50 \text{ кг/м}^3$ );
- 5 – хлопковая вата ( $\rho=42 \text{ кг/м}^3$ ); 6 – шелковые очесы ( $\rho=58 \text{ кг/м}^3$ );
- 7 – минеральная вата ( $\rho=95 \text{ кг/м}^3$ ).

На рисунке 2.1. приведена температурная зависимость коэффициента теплопроводности волоконистых изоляционных материалов, из графика видно, что в интервале рабочих температур тепловой изоляции криогенных установок значения коэффициента теплопроводности одного материала изменяются в 2–3 раза. Это надо учитывать при проектировании изоляционных конструкций.

## Порошкообразные материалы

Для изоляции сосудов со сжиженными газами ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$  и  $\text{Ar}$ ) широко используются порошкообразные теплоизоляционные материалы, которые имеют низкий коэффициент теплопроводности как при атмосферном давлении, так и в условиях глубокого вакуума, что привело в дальнейшем к созданию вакуумно-порошковой изоляции.

Длительное время широко применялась для изоляции углекислая соль магния – магнезия «Альба» –  $4\text{MgCO}_3 \cdot \text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ . Это белый порошок, тонкоизмельченный, с насыпной плотностью 125–150 кг/м<sup>3</sup>. Однако, углекислая магнезия гигроскопична и при увлажнении слипается, кроме этого она отличается высокой стоимостью.

Вместо магнезии используют перлит, кремнегель, аэрогель кремневой кислоты и вермикулит.

Перлит – стекловидный материал вулканического происхождения. Основу составляет двуокись кремния. При соприкосновении с водой и нагревании перлит вспучивается и увеличивается в объеме в 5–15 раз. Плотность вспученного перлита колеблется от 40 до 300 кг/м<sup>3</sup>, размер частиц не превышает 3 мм.

Для изоляции аппаратов и машин низкотемпературных установок используется вспученный перлитовый порошок с плотностью при свободной насыпке 100 кг/м<sup>3</sup>. Коэффициент теплопроводности перлита при температуре 183 К колеблется в пределах 0,025–0,035 Вт/м·К.

Вспученный перлит дешев, негорюч, химически инертен, малогигроскопичен, характеризуется низкой адсорбционной способностью по отношению к парам воды и газам.

Кремнегель представляет собой отход производства суперфосфата. Это один из видов тонкодисперсного порошка двуокиси кремния (содержит до 95%  $\text{SiO}_2$ ). Плотность кремнегеля – 100–150 кг/м<sup>3</sup>, коэффициент теплопроводности – 0,030–0,035 Вт/м·К при 190 К.

Вспученный вермикулит получают из минерала вермикулита – сложного высокогидратированного алюмосиликата магния. При его нагревании до 700–1000°C содержащаяся в нем вода испаряется, происходит вспучивание и частицы минерала увеличиваются в объеме в 20–25 раз. Плотность вермикулита составляет 100–200 кг/м<sup>3</sup>. Этот материал дешев, имеет низкий коэффициент теплопроводности и поэтому находит широкое применение.

Наиболее эффективным из известных в настоящее время теплоизоляционных порошков является аэрогель кремневой кислоты, который обладает высокой пористостью и очень тонкой структурой. Благодаря этим свойствам он имеет коэффициент теплопроводности при 183 К порядка 0,015–0,016 Вт/м·К, т.е. ниже теплопроводности

спокойного воздуха. Насыпная плотность материала – 60–100 кг/м<sup>3</sup>. Аэрогель не горюч, очень текуч, поэтому легко заполняет все объемы изоляционного пространства. Недостатком этого материала является необратимое изменение структуры и увеличение коэффициента теплопроводности при попадании в него влаги. Для уменьшения гигроскопичности аэрогель специально обрабатывают парами кремнийорганических соединений.

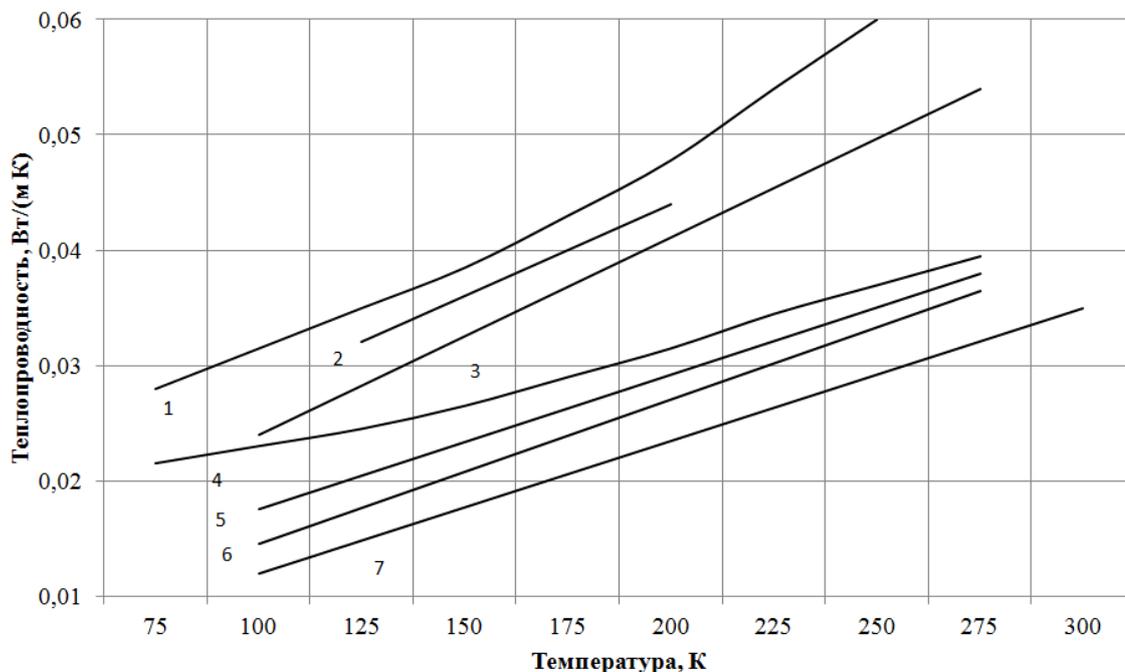


Рис. 2.2 Температурная зависимость коэффициента теплопроводности порошкообразных изоляционных материалов:

- 1 – вермикулит ( $\rho=216 \text{ кг/м}^3$ ); 2 – диатомит ( $\rho=272 \text{ кг/м}^3$ );  
 3 – перлит ( $\rho=210 \text{ кг/м}^3$ ); 4 – магнезия ( $\rho=131 \text{ кг/м}^3$ );  
 5 – пробка гранулированная ( $\rho=101 \text{ кг/м}^3$ ); 6 – перлит ( $\rho=45 \text{ кг/м}^3$ );  
 7 – пробка гранулированная ( $\rho=70 \text{ кг/м}^3$ ).

Порошковые изоляционные материалы защищают от увлажнения посредством продувки их объема газовыми потоками с низким влагосодержанием. В ВРУ для этого используют часть отбросного потока, а на крупных хранилищах СПГ для вентиляции газозаполненной изоляции специально добывают из воздуха азот.

### Пористые теплоизоляционные материалы

Пеноматериалы могут быть органического и неорганического происхождения. Наиболее широко используются органические материалы – пенопласты, в частности мипора.

Мипора – отвердевшая пена мочевино-формальдегидной смолы состава: С – 33,4%, N – 29,8%, O – 29,9%, H – 6,9%. Плотность блоков из мипоры – 10–20 кг/м<sup>3</sup>. Теплопроводность мипоры при 183 К равна

0,023 Вт/м·К. Мипора – гигроскопичный и огнеопасный в среде кислорода материал, поэтому для теплоизоляции установок разделения воздуха и сосудов с жидким кислородом использовать ее не рекомендуется.

Пенополистирол – пенопласт, состоящий из ячеек с замкнутыми порами. Изготавливается в виде плит различными методами. Особый интерес представляет метод получения этого материала из гранул непосредственно в изоляционном пространстве. Плотность такого материала – 20–60 кг/м<sup>3</sup>. Плотность плит из полистирола, изготовленных другими способами, – 150–200 кг/м<sup>3</sup>, коэффициент теплопроводности при 293 К составляет 0,03–0,052 Вт/м·К. Пенополистирол влагостоек, но имеет малую термостойкость. Кроме этого пенополистирол горюч, а при насыщении кислородом взрывоопасен, что исключает его применение в теплоизоляционных конструкциях ВРУ. Пенополиуретан наиболее современный теплоизоляционный материал. Пенополиуретан получают в результате сложных химических реакций в виде жидкой смеси, которая после заливки в форму и прогрева затвердевает. В зависимости от способа изготовления пенополиуретан может иметь плотность 100–220 кг/м<sup>3</sup> и коэффициент теплопроводности 0,047–0,057 Вт/м·К. при 293 К или плотность 30–60 кг/м<sup>3</sup> и коэффициент теплопроводности 0,031 Вт/м·К.

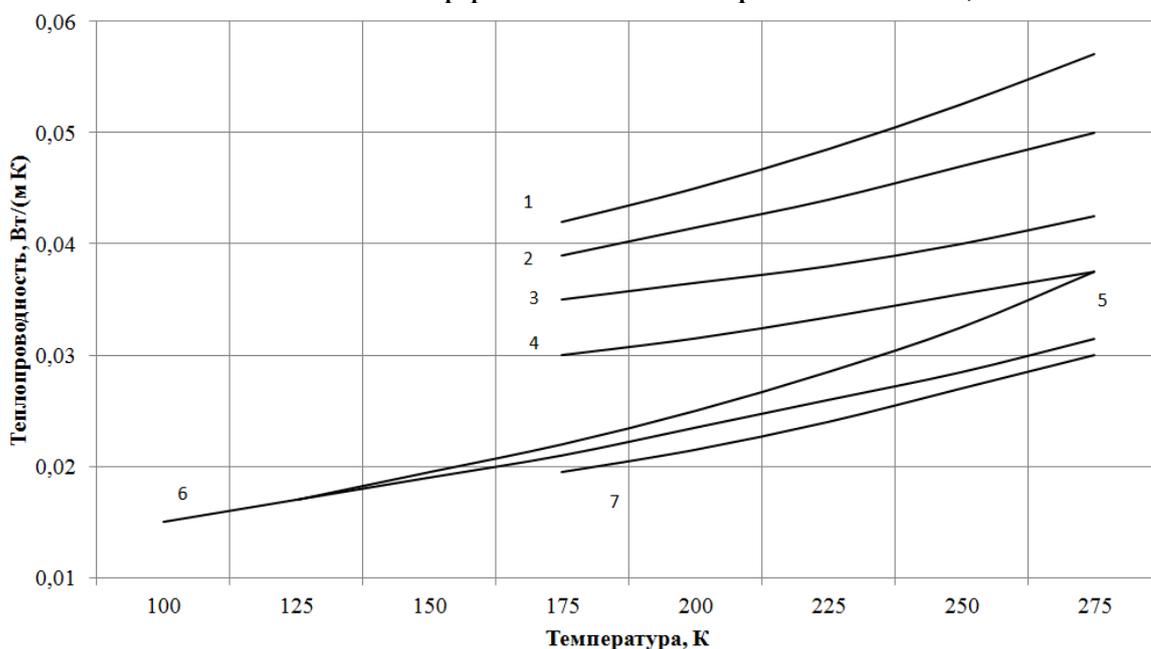


Рис. 2.3 Температурная зависимость коэффициента теплопроводности ячеистых изоляционных материалов:

- 1 – пеностекло ( $\rho=170\text{--}200\text{ кг/м}^3$ ); 2 – пенополивинилхлорид ( $\rho=190\text{--}200\text{ кг/м}^3$ );
- 3 – пробка ( $\rho=195\text{ кг/м}^3$ ); 4 – пробка ( $\rho=140\text{ кг/м}^3$ );
- 5 – пенополистирол ( $\rho=30\text{--}50\text{ кг/м}^3$ );
- 6 – мипора ( $\rho=20\text{--}50\text{ кг/м}^3$ ); 7 – вспученный эбонит ( $\rho=64\text{ кг/м}^3$ )

Преимуществом этого материала по сравнению с другими является возможность заполнения изоляционного пространства сложной конфигурации пенополиуретаном в жидком виде путем распыления, что значительно упрощает (без снижения качества) технику изоляционных работ. В качестве недостатка следует указать на ядовитость одного из компонентов – диизоцианата. Пенополиуретан горюч, особенно в присутствии обогащенного кислородом воздуха.

К неорганическим пенопластам относится пеностекло. Пеностекло – ячеистый материал, получаемый термической обработкой смеси порошкообразного стекла и газообразователя. Выпускается в виде плит и блоков плотностью 100–400 кг/м<sup>3</sup>. Материал имеет низкое влагопоглощение и сравнительно низкий коэффициент теплопроводности – 0,03–0,1 Вт/м·К при 293 К.

Учитывая относительно низкую эффективность газонаполненных теплоизоляционных материалов, толщина и объем изготовленного из них теплового ограждения низкотемпературных установок оказываются существенными, поэтому существенной может оказаться тепловая инерция изоляционной конструкции. Для учета затрат энергии на нагрев или охлаждение конструкции полезно знать значения удельной теплоемкости изолятора. Значения удельной теплоемкости типичных видов газонаполненной теплоизоляции приведены на рисунке 2.4.

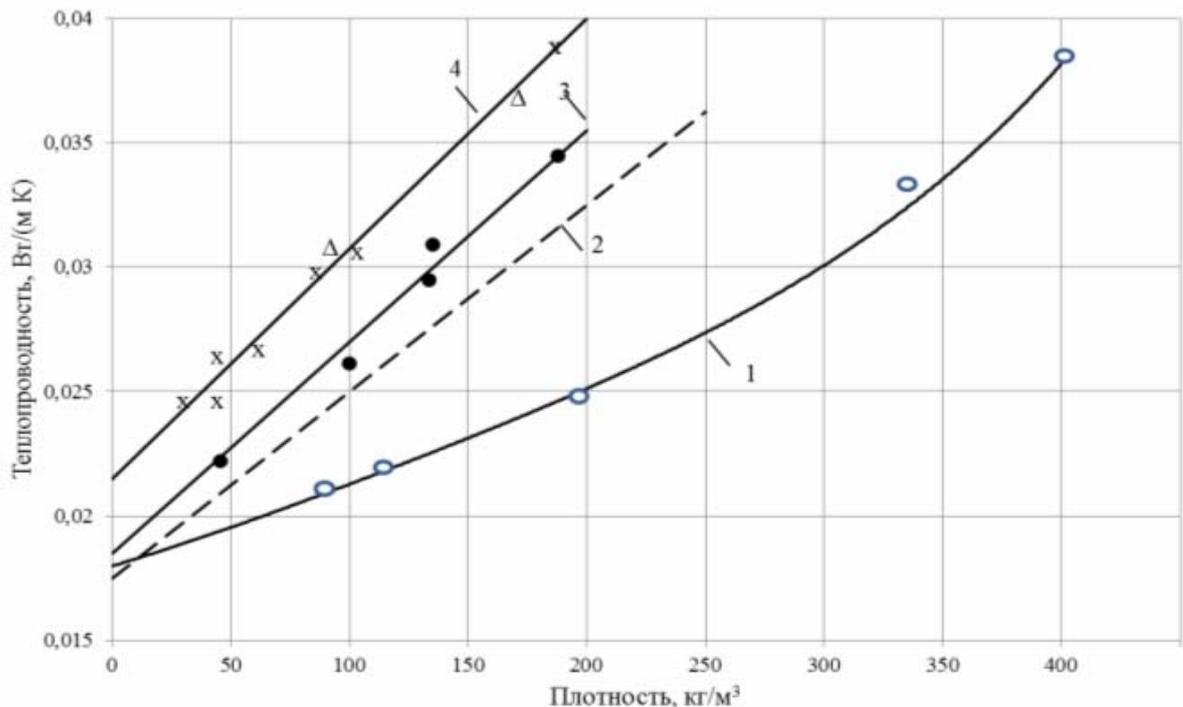


Рис. 2.4 Температурная зависимость удельной теплоемкости изоляционных материалов:

- 1 – хлопковая вата; 2 – мипора; 3 – пробка; 4 – стеклянная вата;
- 5 – минеральная вата; 6 – пеностекло

Теплофизические свойства изоляционных материалов зависят от температуры, плотности, влажности и состава газа, заполняющего поры (табл. 2.1).

Газонаполненная изоляция применяется на криогенных объектах в том случае, если минимальная температура в изоляционном объеме выше температуры конденсации атмосферного воздуха (81,8 К). Это условие выполнимо в установках сжижения и разделения природного газа и других углеводородных соединений. В установках разделения воздуха принимаются специальные меры для предотвращения конденсации воздуха на самых низкотемпературных частях установок. Основное преимущество такого вида изоляции заключается в том, что в этом случае не требуется помещать ее в герметичный кожух. В качестве изоляции может быть использован любой из перечисленных выше материалов.

Таблица 2.1

Коэффициент теплопроводности  $\lambda$  изоляционных материалов в среде различных газов

Изоляционный материал	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Средняя температура, К	при заполняющем газе, мВт/(м·град)					
			Kr	CO <sub>2</sub>	Воздух	N <sub>2</sub>	He	H <sub>2</sub>
Перлит	130	188	-	-	-	32,5	126	145
Аэрогель	100	188	-	-	-	19,6	62	80
Кремнегель	93	190	-	-	29,9	-	116	-
Мипора	56	190	10,2	-	21,5	-	122	-
Минеральная вата	150	190	14,2	-	31,3	-	136	-
Стекловолоконная вата (d <sub>вол</sub> =2,58 мкм)	74	338	-	25,5	35,6	-	181	-
Стекловолоконная вата (d <sub>вол</sub> =0,69 мкм)	174	338	-	25,9	35,5	-	126	198

В этом случае, когда температура некоторой холодной поверхности ниже 81,8 К и нежелательно вакуумирование изоляционного пространства, свободный объем изоляции может быть заполнен газом (путем наддува), неконденсирующимся при этой температуре.

Газонаполненная тепловая изоляция переживает новый виток развития, это связано со строительством стационарных и транспортных емкостей для хранения СПГ. Вместимость стационарных хранилищ СПГ превышает 200000 м<sup>3</sup>. Эти криогенные объекты значительно превосходят все низкотемпературные установки по размерам и

материалоемкости. Учитывая гигантские размеры емкостей, использование в их конструкции герметичных видов изоляции невозможно. Теплоизоляционная конструкция хранилища передает на внешний корпус гигантское усилие, создаваемое гидростатическим давлением сжиженного природного газа, поэтому должна иметь достаточную механическую прочность. Условиям работы теплового ограждения хранилищ СПГ в наибольшей степени соответствуют пористые теплоизоляционные материалы: пенополистирол, пенополиуретан и пеностекло. Для равномерного распределения давления жидкости на теплоизолятор, между ним и внутренней герметичной оболочкой емкости укладывают слой фанеры.

С учетом всех обстоятельств тепловая инерция ограждение криогенного хранилища СПГ обладает поистине гигантской тепловой инерцией, а первичное захлаживание криогенной емкости для СПГ представляет собой сложный технологический процесс.

Таблица 2.2

Температурный коэффициент линейного расширения теплоизоляционных материалов при низких температурах

Материал	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Температура (средняя или интервал), К	Коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$ , 1/град
1	2	3	4
Пробковая плита	110	247	59
-	110	194	47
Мат из минеральной ваты	229	319	15,5
-	229	247	8,8
-		192	4
Мат из стекловолокна	176	245	6,5
-	176	191	7,7
Пеностекло	170	247	7,6
-	170	193	6,5
Вспученная резина	78	247	48,6
-	78	193	43,2
Вспученный эбонит	64	323-148	59,8
Пенополивинилхлорид: жесткий	40-88	293-80	45
Эластичный	75-150	293-80	81
1	2	3	4
Пенополистирол	12-20	293-80	79
Пенополиуретан: эластичный	34-58	293-80	77
Пенополиуретан	170	247	7,6

Влажностные свойства теплоизоляционных материалов

Материал	Гигроскопичность при относительн. влажн. воздуха 100%, масс.%	Водопоглощение, об.%	Коэффициент диффузии водяного пара, $\mu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с
Минеральная вата	1	64–84	17–22
Стеклянная вата	1	40	17–22
Аэрогель	50	95–97	-
Аэрогель гидрофобный	3	20–40	-
Перлитовый порошок	1–6	50–60	8–17
Мипора	40	10–25	17–21
Пробка (плита)	10	4–13	1,4–5,5
Пенополистирол	1,5–5	0,5–2,0	0,14–0,55
Пенополиуретан	5–20	5–15	1,4–5,5
Пенополивинилхлорид	–	4	0,3
Пеностекло	1	6–9	0,8

#### Высоковакуумная изоляция

С понижением температуры сжиженного газа возрастают требования к качеству тепловой изоляции. Применение глубокого вакуума как изоляции исключает два вида переноса теплоты: за счет конвекции и за счет теплопроводности газа.

Высоковакуумная изоляция широко применяется в ожижителях, рефрижераторах и сосудах для хранения и транспортирования небольших количеств (5–100 л) ожиженных газов. В высоком вакууме (остаточное давление газа  $1,3 \cdot 10^{-3}$ – $1,3 \cdot 10^{-4}$  Па) тепловой поток передается в основном излучением. Остальная часть тепла передается вследствие теплопроводности остаточных газов в вакуумной полости и путем теплопроводности через элементы изоляционной конструкции (тепловые мостики).

При давлении менее 130 Па передача тепла конвекцией практически отсутствует. Общее количество тепла, проходящее в этом случае от теплой стенки к холодной, существенно ниже того, которое передается при использовании лучшей газонаполненной изоляции (при прочих равных условиях). Высоковакуумная изоляция более эффективна, однако сложнее в изготовлении и дороже газонаполненной изоляции. Значительные проблемы связаны с эксплуатацией объектов снабженных высоковакуумной изоляцией.

#### Порошково- и вакуумно-волокнистая изоляция

Применение высоковакуумной изоляции для крупных

резервуаров осложняется тем обстоятельством, что изготовление таких емкостей сопряжено с весьма жесткими требованиями к сварным швам и другим вакуумно-плотным соединениям, а также к обработке поверхностей. В этом случае предпочтительнее использовать вакуумно-порошковую и вакуумно-волокнистую изоляции.

В обычной насыпной газонаполненной изоляции тепло, в основном, переносится газом, заполняющим пустоты между частицами материала. Эту составляющую теплоподвода можно значительно уменьшить и даже практически полностью исключить, откачав газ из изоляционной полости. Коэффициент теплопроводности такой изоляции в десятки раз ниже коэффициента теплопроводности обычной насыпной изоляции.

Причем для такой изоляции не требуется очень высокий вакуум, следовательно, снижается жесткость требований при изготовлении емкостей. По эффективности же эти виды изоляции приближаются к высоковакуумной (а иногда и превосходят). Порошково- и волокнисто-вакуумная изоляции в основном применяются для крупногабаритных резервуаров с жидким кислородом, азотом, водородом в транспортных сосудах. В последнее время промышленность выпускает и небольшие лабораторные сосуды с изоляцией этого типа.

Для вакуумно-порошковой изоляции должны использоваться порошкообразные материалы с низким значением коэффициента теплопроводности и малой объемной массой. Они не должны содержать легколетучих примесей, которые усложняют поддержание в изоляционном объеме вакуума, и должны быть негорючими. Этим требованиям больше всего отвечают аэрогель кремневой кислоты и перлит. В некоторых случаях используется также кремнегель, мипора и белая сажа (тонкодисперсный порошок, состоящий, в основном, из двуокиси кремния). Достоинство аэрогеля – низкий коэффициент теплопроводности, незначительно возрастающий при увеличении давления. Перлит является более крупнопористым материалом, чем аэрогель, поэтому он адсорбирует меньше газов, обладает меньшей гигроскопичностью и легко вакуумируется. Недостатком перлита является сильная усадка при вибрации, что следует учитывать при использовании его для транспортируемых емкостей.

Для волокнисто-вакуумной изоляции используется обычно стеклянная вата. Наилучшие результаты дает применение стеклянного волокна диаметром 1,0–1,5 мкм (табл. 2.4).

Если, например, сопоставить коэффициент теплопроводности аэрогеля, работающего в обычных условиях (0,015–0,016 Вт/м·К), с аэрогелем в вакууме (0,0014 Вт/м·К), то видно, что его изоляционные

свойства улучшаются, по крайней мере, на порядок.

Таблица 2.4

Эффективный коэффициент теплопроводности зернистых, волокнистых и пористых материалов в вакууме при температурах граничных поверхностей 293 и 90К

Материал	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	$\lambda_{эф}$ , мВт/м·К	
		при давлении $1 \cdot 10^{-3}$ Тор	при давлении $1 \cdot 10^{-1}$ Тор
Аэрогель	120	1,5	2,3
	140	1,4	2,7
	110	1,4	2,1
Белая сажа	360	3,1	-
	250	2,1	-
	180	1,5	1,7
	170	0,9	-
Перлит	50	2,7	10
	100	1,5	5,6
Мипора	50	2,1	4,2
Стекловолоконная вата	160	5	16

В порошковой и вакуумно-волокнистой изоляции основной составляющей теплообмена является излучение, но в отличие от высоковакуумной изоляции здесь происходит теплообмен излучением в поглощающей и рассеивающей среде. Теплота передается также теплопроводностью остаточных газов, теплопроводностью изоляционного материала и вследствие контактного теплообмена между частицами или волокнами изоляции. При тепловых расчетах сложный механизм передачи тепла в такой изоляции заменяют наиболее простым – теплопроводностью. Эффективный коэффициент теплопроводности (включающий в себя все составляющие теплообмена) определяется для каждой модификации этого типа изоляции экспериментально (табл. 2.4).

В табл. 2.4 наглядно представлена зависимость  $\lambda_{эф}$  от давления. Более полно эту зависимость демонстрирует рис. 2.5.

Из графика видно, что вакуум глубже  $10^{-1}$  Па не дает заметного снижения величины  $\lambda_{эф}$ , так как при давлении меньше  $10^{-1}$  Па тепловой поток определяется, в основном, тепловым излучением и теплопроводностью изоляционного материала.

На величину  $\lambda_{эф}$  влияет также плотность изоляционного материала. Плотность волокнистого изоляционного материала может возрастать из-за увеличения толщины частиц или стен пор или вследствие возрастания числа частиц в единице объема при

одновременном уменьшении размеров пор. Плотность порошкового материала может возрастать при одновременном влиянии обоих факторов. При этом перенос тепла излучением уменьшится.

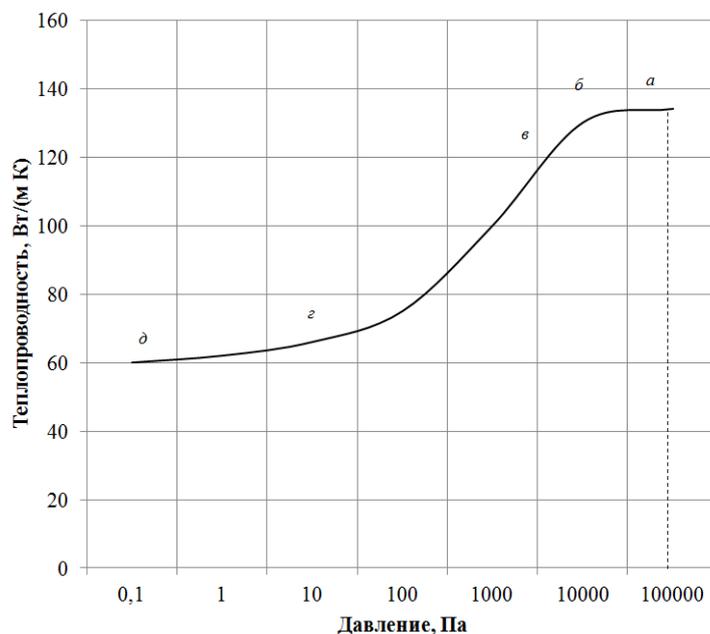


Рис. 2.5 Зависимость эффективного коэффициента теплопроводности вакуумно-порошковой изоляции от остаточного давления в межстеночном пространстве.

Но, с увеличением плотности растет тепловой поток по твердому скелету изоляционного материала. Таким образом, должно существовать оптимальное значение плотности заполнения изоляционного материала, обеспечивающее минимальное значение  $\lambda_{эф}$ . Эта плотность, как показывает эксперимент, лежит в пределах от 150 до 200 кг/м<sup>3</sup>.

Весьма важным является то, что при использовании рассматриваемого типа изоляции отпадает необходимость в полировании обращенных друг к другу поверхностей, так как в этом случае степень черноты граничных поверхностей оказывает влияние на  $\lambda_{эф}$  лишь при толщине слоя изоляции не более 10–20 мм. На практике же расстояние между стенками обычно составляет 150–300 мм.

Тепловое излучение является преобладающим при переносе тепла через вакуумно-порошковую изоляцию. Существует сравнительно простой метод уменьшения этой составляющей теплообмена. К изоляционным порошкам добавляют металлические порошки, которые, исполняя роль своеобразных экранов, ослабляют поток излучения.

Лучших результатов можно достичь при использовании дискообразных частиц (чешуек), получаемых на шаровых мельницах. Помимо малого размера и чешуйчатой формы частиц металлические

порошки должны иметь малую степень черноты и неокисленную поверхность. Обычно материалами для таких порошков служат алюминий, медь и их сплавы. Добавка металлических порошков в некоторых случаях повышает эффективность вакуумно-порошковой изоляции в 3–4 раза. Однако при добавлении металлических порошков следует учитывать, что при этом возрастает поток тепла по твердому телу. При незначительном излучении, например между поверхностями, имеющими температуры 76 и 20 К, такие добавки вообще вряд ли следует считать целесообразными.

Опытным путем установлено, что концентрация металлического порошка не должна превышать 60% по массе. Недостатками использования металлических порошков в качестве добавок является повышение пожароопасности (особенно при хранении жидкого кислорода) и возможность расслоения изоляции. Для устранения последнего недостатка следует засыпать смесь порошков с уплотнением под вакуумом. Данные по теплопроводности вакуумно-порошковой изоляции с добавлением металлических порошков представлены в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Эффективный коэффициент теплопроводности смесей аэрогеля (50%) и металлических порошков, полученных помолом на шаровой (давление ниже 0,4 Н/м<sup>2</sup>, температура граничных стенок 293 и 90 К) и ударно-вихревой мельницах

Порошок		Диаметр чешуек, мкм	$\lambda_{эф}$ , мВт/м·К
1		2	3
Шаровая мельница	Бронзовая пудра марки		
	БПЛ		75
	БПП		60
	БПФ		10–20
	БПФ		5–10
	Алюминевая пудра марки ПАК-3		75
	для радиоламп		1–10
Ударно-вихревая мельница	Медь М1		8–20
	Латунь ЛК80-3		5–10
	Сталь Х18Н10Т		5-15

### Экранно-вакуумная и экранно-вакуумно-порошковая изоляция

Экранно-вакуумная изоляция (или, как ее иногда называют, суперизоляция) является наиболее эффективным, хотя и наиболее сложным и дорогим типом изоляции. Используется она, в основном, для изолирования сосудов, предназначенных для хранения таких

низкотемпературных жидкостей, как Ne, He, и в космических криогенных объектах.

Как известно, снизить составляющую теплообмена в вакуумной полости, связанную и лучеиспусканием, позволяет установка экранов. Однако на практике установка в изоляционной полости нескольких экранов представляется сложной задачей. Успешному решению этой проблемы способствовало найденное принципиально новое решение, связанное с созданием экранов в виде металлизированной пленки или металлической фольги, для экранов наибольшее практическое распространение получила алюминиевая фольга толщиной 5-15 мкм, имеющая малую плотность, низкую стоимость и высокую отражательную способность, а также пленка из полиэфиров, на которую напылением нанесено алюминиевое покрытие. Эти экраны помещаются в вакуумную полость. Между каждым экраном имеются теплоизолирующие прокладки. Материалом для последних, чаще всего, служит стеклянная бумага, спрессованная из очень тонких волокон (толщина пресованного листа – 0,05 мм). В одном сантиметре по толщине изоляции размещается от 15 до 30 слоев (в некоторых случаях до 100 слоев). По сравнению с вакуумно-порошковой изоляцией коэффициент теплопроводности такой многослойной изоляции почти в 10 раз меньше.

Качество многослойной изоляции зависит от плотности укладки, применяемых материалов, технологии ее монтажа на теплоизолируемых поверхностях. При малом числе экранов возрастает теплообмен за счет конвекции, при очень плотной укладке увеличивается контактная теплопроводность. Оптимальным числом считается 25–40 слоев на 1 см. Плотность многослойной изоляции составляет 40–70 кг/м<sup>3</sup>. Многослойная изоляция изготавливается в виде отдельных матов или в виде непрерывной ленты в рулоне, которую монтируют путем намотки.

Для этого типа изоляции требуется более глубокий вакуум, чем для вакуумно-порошковой изоляции. Наилучшие результаты дает вакуум  $1,33 \cdot (10^{-4} - 10^{-5})$  Па. При использовании экранно-вакуумной изоляции и при ее расчете, как и для вакуумно-порошковой изоляции, сложный механизм передачи тепла (излучение, теплопроводность изолирующих прокладок и остаточных газов) условно заменяют теплопроводностью, определяя экспериментально эффективный коэффициент теплопроводности. Данные по величине  $\lambda_{эф}$  для экранно-вакуумной изоляции представлены в табл. 2.6.

Перенос тепла теплопроводностью остаточных газов в этой изоляции играет существенную роль даже при довольно высоком вакууме, так как расстояние между экранами небольшое.

К недостаткам экранно-вакуумной изоляции следует отнести ее дороговизну, требование высокого вакуума (который в данном случае достигается труднее, чем для вакуумно-порошковой изоляции), трудность монтажа, пожароопасность некоторых типов. Из-за трудности осуществления высококачественного монтажа на промышленных изделиях величина  $\lambda_{эф}$  часто не опускается ниже 0,1–0,5 мВт/м·К. Высокий вакуум  $1,33 \cdot (10^{-4} - 10^{-5})$  Па, который необходимо создать в вакуумно-многослойной изоляции, является одним из основных ее недостатков. Этот недостаток устранен в экранно-вакуумно-порошковой изоляции.

В этом типе изоляции пространство между соседними парами «экран–прокладка» заполняется тонкодисперсным порошком, который уменьшает перенос тепла остаточным газом уже при относительно низком вакууме. Исследования, проведенные во ВНИИ Криогенмаше с изоляцией такого типа, подтвердили ее высокие изоляционные качества по сравнению с порошковой и экранно-вакуумной изоляцией (рис. 2.6).

Применение многослойно-порошковой изоляции (с засыпкой перлита) уменьшает тепловой поток через нее в 3 раза, по сравнению с многослойно-вакуумной изоляцией, даже при давлении на порядок выше по сравнению с многослойной изоляцией.

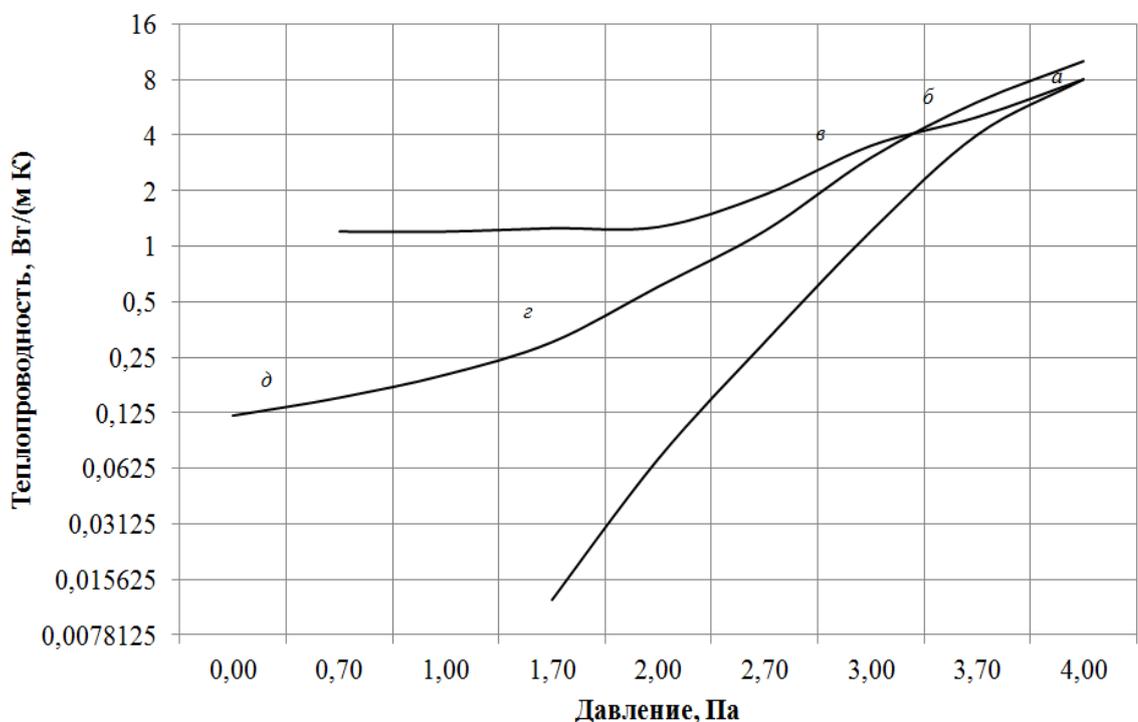


Рис. 2.6 Зависимость коэффициента теплопроводности различных типов изоляции (граничные температуры 293 и 90 К) от давления воздуха:

- 1 – порошковая (перлит);
- 2 – многослойная (алюминиевая фольга + стеклохолст ЭВТИ);
- 3 – многослойно-порошковая (алюминиевая фольга + ЭВТИ + перлит)

Таблица 2.6

Эффективный коэффициент теплопроводности экранно-вакуумной изоляции при различной толщине слоя (температура граничных стенок 293 и 90 К, давление ниже  $10^{-2}$  Н/м<sup>2</sup>)

Изоляция	Толщина слоя, мм	Эффективный коэффициент теплопроводности, мВт/(м·К)
Алюминиевая фольга + СБР-М (стекло - бумага) толщиной 0,05 мм:		
плотность укладки 25 экранов на 1 см (плоский слой)	4	0,027
то же	10	0,037
то же	18	0,03
плотность укладки 43 экрана на 1 см (цилиндрический слой)		
то же	10	0,089
то же	20	0,09
то же	40	0,09
Алюминиевая фольга + стеклохолст ЭВТИ толщиной 0,2 мм:		
15 экранов на 1 см (плоский слой)		
то же	12	0,086
то же	22	0,081
то же	32	0,102
то же	42	0,102
15 экранов на 1 см (цилиндрический слой)		
то же	10	0,105
то же	28	0,105
то же	50	0,104

В зависимости от типа изоляции эффективность ее меняется в весьма широких пределах. Это хорошо видно из таблицы 2.7.

Таблица 2.7

Сопоставление различных типов изоляции по коэффициенту  $\lambda_{эф}$ , определенному между температурами 293 и 90 К

Изоляционный материал	Коэффициент теплопроводности, мВт/м·К
Перлит при атмосферном давлении	32,4
Перлит при Р=1Па	34,0
Аэрогель при Р= 0,1Па	19,0
Аэрогель с металлическим порошком при Р=0,1Па	0,34
Вакуумно-слоистая изоляция	0,052

Целесообразность применения того или иного вида изоляции определяется ее теплофизическими характеристиками, технико-

экономическими показателями, конструкционными особенностями изолируемого оборудования, условиями работы.

## Расчет теплопритока из окружающей среды через изоляционную конструкцию

### Теплоперенос теплопроводностью остаточных газов

#### Высоковакуумная изоляция

Выше уже указывалось, что для хранения и транспортирования небольших по объему порций сжиженных газов (5–100 л) используют металлические сосуды Дьюара с высоковакуумной изоляцией. В двустенном пространстве, ограждающем криогенную жидкость, создается глубокий вакуум ( $10^{-3}$ – $10^{-4}$  Па).

Одна из стенок, контактирующая с жидкостью, имеет низкую температуру, а другая – температуру, близкую к температуре окружающей среды. Тепло в этом пространстве переносится двумя путями: теплопроводностью остаточных газов и тепловым излучением. Считается, что конвективным переносом теплоты при давлении менее 100 Па можно пренебречь.

При оценке интенсивности переноса теплоты теплопроводностью газа надо иметь в виду два крайних состояния:

1. средняя длина свободного пробега молекул в газе  $L$  значительно меньше расстояния между теплой и холодной поверхностями  $\delta$ , т.е.  $L \ll \delta$ ;

2. средняя длина свободного пробега молекул в газе  $L$  значительно больше расстояния между теплой и холодной поверхностями  $\delta$ , т.е.  $L \gg \delta$ .

В первом случае, на пути от одной стенки к другой каждая молекула испытывает большое число соударений. Во втором случае, молекула преодолевает расстояние между стенками без соударений.

Часто отношение  $L/\delta$  называют критерием Кнудсена ( $Kn$ ), в первом случае  $Kn \ll 1$ , а во втором  $Kn \gg 1$ .

Согласно кинетической теории газов выражение для средней длины свободного пробега молекулы газа имеет вид

$$L = \frac{b}{p} \left(1 + \frac{c}{T}\right), \quad (2.1)$$

где  $b$  и  $c$  – постоянные, зависящие от рода газа, поэтому каждого газа существует собственная зависимость  $L = f(p, T)$ .

Например, при остаточном давлении  $p=10$  Па и при температуре

окружающей среды  $T=293$  К длина свободного пробега молекул воздуха в межстенном пространстве сосуда будет, в соответствии с формулой (2.1), равна:

$$L = \frac{8,42 \cdot 10^{-3}}{10} / \left(1 + \frac{113}{293}\right) = 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 0,6 \text{ мм}$$

Если принять расстояние между стенками  $\delta \sim 10$  мм (что часто имеет место на практике) и учесть, что для воздуха  $b = 8,42 \cdot 10^{-3}$  Н/м,  $a c = 113$ К, то для этих условий  $Kn = 0,6/10 = 0,06$ .

С повышением давления величины  $L$  и  $Kn$  убывают, с понижением давления растут. При давлении более 10 Па коэффициент теплопроводности газа не зависит от давления.

При том же расстоянии между стенок  $\delta = 10$  мм, температуре газа  $T = 293$  К и давлениях от 0,1 до 0,01 Па критерий Кнудсена становится значительно больше 1. В таких условиях коэффициент теплопроводности  $\lambda$  уменьшается с понижением давления.

Физически это объясняется тем, что при  $Kn \gg 1$  переносчики теплоты (молекулы) пролетают от стенки к стенке без соударений, а снижение давления уменьшает число молекул и частоту их соударений со стенками вакуумной полости. При этом увеличение расстояния между стенками не снижает поток теплоты теплопроводностью газа, так как с удлинением пути пробега молекул  $L$  во столько же увеличивается и их число, поэтому число ударов приходящихся на единицу поверхности стенки остается неизменным. Имеет место так называемая свободная молекулярная проводимость. В этом случае кинетическая теория газов дает следующее выражение для количества теплоты  $Q$ , Вт, переносимого теплопроводностью остаточного газа между параллельными поверхностями (при  $Kn \gg 1$ ):

$$Q = 18,2 \cdot a \frac{k+1}{k-1} \cdot \frac{p}{\sqrt{MT}} \cdot F_1 (T_2 - T_1), \quad (2.2)$$

где  $a$  – коэффициент аккомодации, характеризующий степень полноты обмена энергией между молекулами газа и молекулами материала твердой стенки;  $k = c_p/c_v$  – показатель адиабаты;  $M$  – молекулярная масса;  $F_1$  – площадь внутренней поверхности;  $T_1$  и  $T_2$  – температуры внутренней и наружной поверхностей.

В реальных условиях, при соударениях молекул газа с ограничивающей стенкой, ввиду неполноты обмена энергией тепловое равновесие между стенкой и соударяющимися молекулами не устанавливается, что и оценивается коэффициентом аккомодации  $a$ :

$$a = \frac{T_i - T_e}{T_i - T_w}, \quad (2.3)$$

где  $T_l$  и  $T_e$  – температуры, соответствующие энергиям набегающих и отраженных молекул;  $T_w$  – температура стенки.

Отсюда видно, что в том случае, когда температура, соответствующая энергии отраженных молекул  $T_e$ , равна температуре стенки  $T_w$ ,  $a = 1$  (происходит полный обмен энергией). В действительности коэффициент аккомодации всегда меньше  $a < 1$ .

Коэффициент аккомодации  $a$  можно вычислить по следующей формуле:

$$a = \left[ \frac{1}{a_1} + \frac{F_1}{F_2} \left( \frac{1}{a_1} - 1 \right) \right]^{-1}, \quad (2.4)$$

где  $a_1$  и  $a_2$  – коэффициенты аккомодации, характеризующие обмен энергией между молекулами газа и соответственно внутренней и наружной поверхностями;  $F_2$  – площадь наружной поверхности.

Пусть температура наружной (теплой) стенки  $T_1$ , а внутренней (холодной)  $T_2$  (рис. 2.7). Температуры газовых

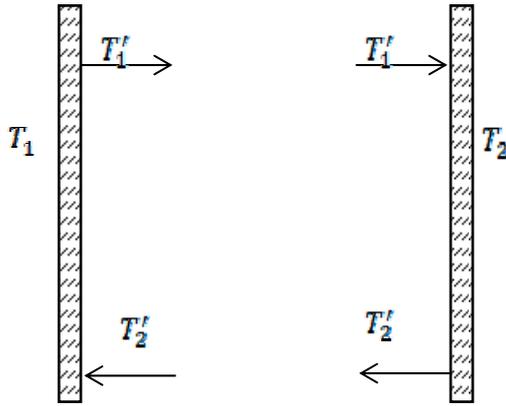


Рис. 2.7. Схема для определения значения коэффициента аккомодации

потоков, набегающих на стенки –  $T_1'$  и  $T_2'$ .

Тогда:

$$a_1 = \frac{T_2' - T_1'}{T_2' - T_1}; \quad a_2 = \frac{T_1' - T_2'}{T_1' - T_2};$$

$$T_1' < T_1; \quad T_2' > T_2.$$

Для анализа влияния массы молекул материала стенки и газа на коэффициент аккомодации используется следующее выражение:

$$a = 1 - \left( \frac{m - m'}{m + m'} \right)^2, \quad (2.5)$$

где  $m$  – масса молекулы материала твердой стенки;  $m'$  – масса молекулы газа. Из выражения (2.5) следует, что чем легче газ (т.е. чем меньше  $m'$ ), тем (при прочих равных условиях) меньше будет коэффициент аккомодации.

Величина коэффициента аккомодации  $a$  зависит от температуры поверхности и ее состояния. Часто на металлической поверхности стенки адсорбируются молекулы газа. В этом случае  $a$  согласно уравнению (2.5) возрастает, приближаясь в некоторых случаях к 1, так

как величине  $m$  в данном случае соответствует не масса молекулы твердого тела, а меньшая по величине масса молекулы адсорбированного газа. Чем больше коэффициент аккомодации  $a$ , тем больше поток теплоты переносимый теплопроводностью (см. выражение 2.2). Адсорбция газа на внутренней поверхности стенок вакуумной изоляции представляется отрицательным явлением.

На чистых металлических поверхностях при и температуре 300К коэффициент аккомодации разных газов составляет:

He  $a= 0,3$ ;

H<sub>2</sub>  $a= 0,3$ ;

O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>  $a= 0,8-0,9$ ;

Ne  $a= 0,3$ .

При понижении температуры коэффициент аккомодации  $a$  растет, приближаясь к 1 при температуре конденсации газа. Если давление в системе измеряется манометром, находящимся при температуре окружающей среды, то в уравнение (2.2) надо подставлять эффективную температуру  $T$ , равную температуре окружающей среды.

Для обеспечения хорошего изоляционного эффекта в межстенном пространстве сосуда с высоковакуумной изоляцией необходимо поддерживать остаточное давление газа на уровне не более 0,001 Па. Доля теплоты переносимой теплопроводностью остаточных газов через высоковакуумную изоляцию в общем тепловом потоке невелика.

### Радиационный перенос теплоты в вакуумной изоляции

Лучистая энергия передается от теплой стенки к холодной. Величина этого теплового потока при умеренно низких температурах, как правило, невелика, поэтому при инженерных тепловых расчетах радиационной составляющей теплопритока пренебрегают. При криогенных температурах лучистая энергия может иметь решающее значение.

Тепловым излучением называют электромагнитное излучение нагретых тел в диапазоне длин волн от 0,4 до 1000 мкм. Исследования этого излучения привели к выявлению закономерности, заключающейся в том, что интенсивность излучения главным образом зависит от температуры излучающей и принимающей поверхностей. Эта закономерность характеризуется графиком, представленным на рис. 2.8.

Как видно из графика, чем выше температура, тем больше общая энергия излучения (эквивалентная площади под кривой). Зависимость энергии излучения от длины волны имеет максимум, который с понижением температуры сдвигается в область более длинных волн.

При этом соблюдается закон Вина:

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2898 \text{ мкм} \cdot \text{К}$$

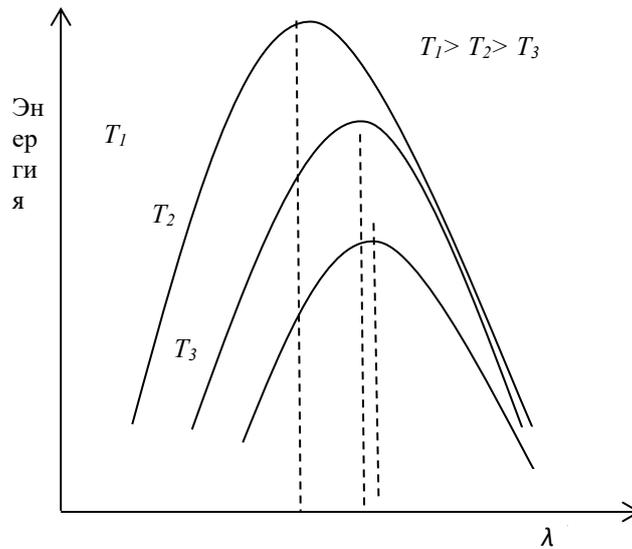


Рис. 2.8 Зависимость энергии излучения от длины волны и температуры

Монохроматическим излучением называется излучение, охватывающее узкий диапазон длин волн (от  $\lambda$  до  $\lambda + d\lambda$ ), а излучение, охватывающее весь диапазон (от  $\lambda = 0$  до  $\lambda = \infty$ ), называется интегральным излучением. Энергия, излучаемая  $1 \text{ м}^2$  поверхности тела в секунду, называется плотностью полусферического излучения. Под абсолютно черным телом понимают такое тело, которое полностью поглощает все падающие на него лучи.

Согласно закону Стефана-Больцмана, полный поток  $q$ , Вт, полусферического излучения абсолютно черного тела

$$q = \sigma \cdot F \cdot T^4, \quad (2.7)$$

где  $\sigma = 5,77 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$ .

В природе абсолютно черных тел не существует. Степень их черноты  $\varepsilon$  это отношение действительно излучаемой энергии  $E$  к энергии  $E_s$ , излучаемой абсолютно черным телом:

$$\varepsilon = E / E_s. \quad (2.8)$$

По закону Кирхгофа при монохроматическом излучении степень черноты реального тела равна поглощающей способности этого тела.

Серым называются тело, поверхность которого имеет одинаковую степень черноты на всех длинах излучаемых волн. Степень черноты серых поверхностей равна их поглощательной способности также и при интегральном излучении.

Для определения потока теплоты, передаваемой излучением от одного абсолютно черного тела к другому, закон Стефана-Больцмана

записывается следующим образом:

$$q_{1-2,0} = 5,77 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot H_{1-2}, \quad (2.9)$$

где  $H_{1-2}$  – взаимная поверхность излучения.

Определение величины  $H_{1-2}$  связано с большими затруднениями, так как связано с использованием углового коэффициента или коэффициента излучения:

$$\varphi_{1-2} = \frac{H_{1-2}}{F_1}.$$

Угловой коэффициент представляет собой долю общего излучения первого тела, передаваемого второму телу. Доля общего излучения второго тела, передаваемого первому, также характеризуется угловым коэффициентом:

$$\varphi_{1-2} = \frac{H_{2-1}}{F_2}.$$

Угловой коэффициент  $\varphi_{1-2}$ , определяется следующим образом:

$$\varphi_{1-2} = \int_{F_1} dF_1 \int_{F_2} \frac{\cos\varphi_1 \cdot \cos\varphi_2}{\pi r^2} \cdot dF_2, \quad (2.1)$$

где  $F_1$  и  $F_2$  – поверхности тел 1 и 2, участвующих в лучистом теплообмене, м<sup>2</sup> (рис. 2.9);

$\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – углы падения излучения на центры  $O_1$  и  $O_2$  элементарных площадок  $dF_1$  и  $dF_2$ ;

$r$  – расстояние между рассматриваемыми элементарными площадками, м.

Интегрирование выражения (2.10) является сложной задачей. Поэтому значения угловых коэффициентов определены для ограниченного числа сравнительно простых случаев.

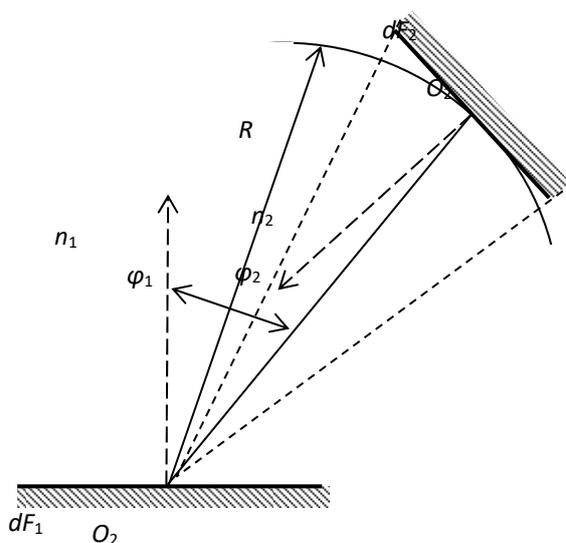


Рис. 2.9 Схема к расчету лучистого теплообмена между двумя произвольно расположенными в пространстве телами

Рассмотрим один из типичных случаев, когда имеются две сферические оболочки, расположенные одна в другой (см. рисунок 2.10). Такое взаимное расположение поверхностей встречается в сферических цистернах для хранения криопродуктов, которые используются для длительного, стационарного хранения значительных объемов жидкости.

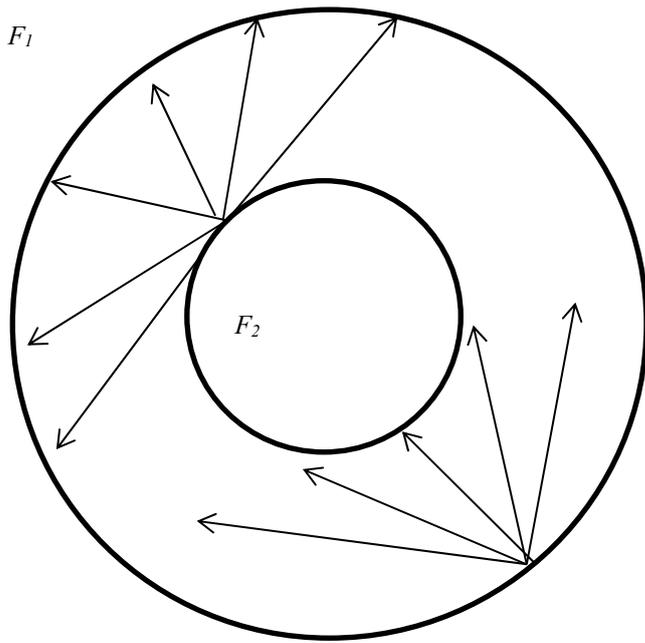


Рис. 2.10 Определение взаимной поверхности излучения двух concentрических сферических оболочек

Часть лучей, исходящих от поверхности  $F_1$ , минует поверхность  $F_2$ , тогда как все лучи от поверхности  $F_2$  попадают на поверхность  $F_1$ .

Для этого случая интегрирование дает такой результат:

$$H_{1-2} = \varphi_{1-2} \cdot F_1 = \frac{F_2}{F_1} \cdot F_1.$$

Это говорит о том, что, как уже указывалось, с поверхности  $F_1$  на поверхность  $F_2$  попадает лишь часть излучения  $F_2/F_1$ , т.е. взаимная поверхность излучения

равняется поверхности охватываемого тела.

Для серых тел закон Стефана-Больцмана выражается следующим образом:

$$q_{1-2} = \varepsilon_{np} \cdot q_{1-2,0} = \varepsilon_{np} \cdot 5,77 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot H_{1-2}, \quad (2.11)$$

где  $\varepsilon_{np}$  – приведенная степень черноты рассматриваемой системы излучающих тел.

Для интересующего нас случая:

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}. \quad (2.12)$$

Это выражение справедливо для двух коаксиально расположенных бесконечно длинных цилиндров или для двух concentрических сфер. Для остальных случаев результат, полученный по зависимости (2.12), дает завышенное значение.

Ввиду сложности определения  $\varepsilon_{np}$  для других случаев обычно пользуются этой зависимостью, так как с инженерной точки зрения завышенное значение потока переносимого излучением идет в запас расчета. Чем ближе поверхность  $F_1$  к поверхности  $F_2$ , тем ближе истинное значение  $\varepsilon_{np}$  для других случаев к значению, полученному по формуле (2.12). Близкие результаты также получаются, если  $\varepsilon_1 < \varepsilon_2$ .

Наиболее сложным вопросом является определение степени черноты поверхностей, особенно, если речь идет о низкотемпературной области. Радиационные характеристики поверхностей сильно меняются под воздействием различных твердых примесей, которые выпадают на них даже в вакууме (такими примесями могут быть пары  $H_2O$ , твердая двуокись углерода, а в водородных и гелиевых емкостях даже твердый воздух).

На основании анализа экспериментальных и практических данных по степени черноты различных поверхностей можно сделать следующие общие выводы.

1. Степень черноты металлов тем меньше, чем меньше их электрическое сопротивление.

2. С понижением температуры степень черноты тела уменьшается.

3. Степень черноты чистых металлов меньше, чем сплавов.

4. Загрязнение чистых металлических поверхностей приводит к увеличению степени черноты этих поверхностей.

5. Механическая обработка металлических поверхностей, приводящая к их упрочнению (полировка), увеличивает степень черноты поверхности.

#### Экранирование теплового излучения

Если имеются две поверхности, между которыми возможен лучистый обмен теплотой, то даже при уменьшении степени их черноты до практически возможной степени, при значительных перепадах температур количество теплоты, передаваемое излучением, остается значительным. Необходимо принимать специальные меры для уменьшения теплового потока излучением.

В этих целях используют непрозрачные для теплового излучения, охлаждаемые и неохлаждаемые, экраны. В ожижителях и сосудах для хранения водорода или гелия используются экраны, охлаждаемые жидким азотом.

В этом случае подвод теплоты излучением к жидкому водороду определяется уже не полным перепадом температур от 300 и 20 К, а лишь его частью от 80 и 20 К. Учитывая то, что при вычислении лучистого притока теплоты значения температуры поверхности возводятся в четвертую степень, применение охлаждаемого азотом экрана уменьшает поток лучистой энергии в несколько сотен раз. Конструктивные особенности охлаждаемых экранов будут подробно рассмотрены в главе 4.

Непрозрачные экраны – это такие экраны, поверхность которых

имеет высокую отражательную способность. Теория экранирования сложна, и излагать ее полностью в данном пособии нет необходимости. Приведем результаты исследований, позволяющие сознательно и надежно проанализировать роль экранов и понять сущность экранирования. Предположим, что в вакуумном пространстве подвешено  $n$  непрозрачных для теплового излучения экранов, а само пространство ограничено двумя поверхностями конечных размеров. Примем ряд упрощений:

1) толщина каждого экрана настолько мала, что обе его поверхности можно считать равными по площади;

2) степень черноты обеих поверхностей каждого экрана, а также всех  $n$  экранов одинакова.

Второе положение менее обосновано, так как с понижением температуры степень черноты поверхностей уменьшается.

Введем понятие о коэффициенте экранирования:

$$\eta_{\text{э}} = \frac{Q_{1-2,3}}{Q_{1-2}},$$

где  $Q_{1-2,3}$  – тепловой поток при наличии экранирования;  $Q_{1-2}$  – тепловой поток при отсутствии экранирования.

С учетом принятых выше допущений получим:

$$\eta_{\text{э}} = \left(1 + \frac{\varepsilon_{\text{нр.о}}}{\varepsilon_{\text{нр.э}}} \cdot n\right)^{-1}, \quad (2.13)$$

где  $\varepsilon_{\text{нр.о}}$  – приведенная степень черноты граничных поверхностей;

$\varepsilon_{\text{нр.э}}$  – приведенная степень черноты системы из двух экранов.

Проанализируем это выражение.

1. Если степень черноты граничных поверхностей и экранов одинакова, т.е.  $\varepsilon_{\text{нр.о}} = \varepsilon_{\text{нр.э}}$ . Тогда получаем:

$$\eta_{\text{э}} = (1+n)^{-1}, \quad (2.14)$$

т.е. тепловой поток при установке одного экрана уменьшается в два раза, при установке двух экранов – в 3 раза и т.д. Экранирование дает положительный эффект. Выражением (2.13) можно пользоваться для расчетов проводимости подвешенных экранов в криостатах.

2. Если наружная и внутренняя граничные вакуумного объема поверхности по своим свойствам приближаются к абсолютно черному телу. При этом  $\varepsilon_{\text{нр.о}} \approx 1$  (см. выражение (2.12)). Тогда из уравнения (2.13) получаем

$$\eta_{\text{э}} = 1 + \frac{n}{\varepsilon_{\text{нр.э}}}, \quad (2.15)$$

Как видно из уравнения (2.15), постановка между двумя черными

поверхностями даже одного экрана с малой степенью черноты уменьшает тепловой поток излучением в десятки раз.

3. Если приведенная степень черноты системы из двух экранов близка к единице, т.е.  $\varepsilon_{пр.э} \approx 1$  (экраны – абсолютно черные тела), уравнение(2.13) приобретает вид:

$$\eta_{э} = \frac{1}{1 + n\varepsilon_0}. \quad (2.16)$$

Обычно приведенная степень черноты системы является величиной малой. Если  $n\varepsilon_0 = 1$  (при этом  $n$  достигает нескольких десятков), то согласно формуле (2.16) количество тепла, передаваемого излучением, уменьшится в два раза, что эквивалентно наличию двух поверхностей с очень низкой степенью черноты. Таким образом, несколько десятков «черных» экранов дают такой же эффект, как две полированные оболочки с высокой отражательной способностью.

Этот случай представляет интерес при рассмотрении вакуумно-порошковой и вакуумно-волокнистой изоляции. Частицы изоляции близки к черным поверхностям, но таких частиц, т.е. экранов, огромное количество. Поэтому в вакуумно-порошковой изоляции лучистый теплообмен сильно затруднен.

Для неохлаждаемых экранов интересно рассчитать температуру произвольного  $m$ -ного экрана (считая от теплого конца системы), если общее число экранов равно  $n$ . С учетом принятых ранее допущений получаем следующую зависимость для температуры  $T_m$ , К:

$$T_m \approx \left[ T_1^4 - \frac{m}{n+1} (T_1^4 - T_2^4) \right]^{\frac{1}{4}}, \quad (2.16)$$

где  $T_1$  и  $T_2$  – температуры теплой и холодной граничных поверхностей.

С ростом совершенства изоляционных конструкций доля тепла излучением становится соизмеримой с другими видами проникающего тепла, тогда как при обычной, несовершенной изоляции другие статьи теплопритоков значительно выше, чем доля тепла излучением.

#### Подвод теплоты через «тепловые мосты» в вакуумном изоляционном пространстве

«Тепловые мосты» представляют собой различные твердые включения в вакуумную полость, теплопроводность которых значительно выше теплопроводность самой изоляции. К таким «тепловым мостам» относятся различные подвески, которые фиксируют положение внутреннего сосуда с криогенной жидкостью относительно наружного кожуха, опоры, которые применяются в транспортных емкостях и предотвращают перемещение при транспортировке

внутреннего сосуда относительно наружного кожуха.

«Тепловыми мостами» являются также различного рода трубопроводы, соединяющие внутренний сосуд с жидкостью с окружающей средой (линии газосброса, линии для заполнения и опорожнения сосуда с жидкостью, трубопроводы к указателям уровня, манометрам и т.п.).

В современных конструкциях криогенных емкостей относительная доля теплоты, проникающего по «тепловым мостикам», иногда превышает 50% от общего притока теплоты к жидкости. Ужесточение требований к снижению потерь жидкости при их хранении привело к необходимости совершенствования теплопроводящих элементов конструкций емкостей.

В емкостях для сжиженных криогенных газов материалом для подвесок чаще всего служит нержавеющая сталь X18H10T. Она имеет низкую теплопроводность (около 12 Вт/м·К) и высокую прочность и достаточную упругость при низких температурах.

Подвески могут изготавливаться в виде стержней, цепей, тросов. Общее выражение, определяющее величину притока теплоты по стержню (если  $\lambda = const$  и имеет среднее для данного диапазона температур значение), записывается в виде:

$$q = \frac{\lambda_{cp}}{l} \cdot F \cdot \Delta T. \quad (2.18)$$

Из зависимости (2.18) очевидны условия уменьшения  $q$ : это снижение теплопроводности материала стержня  $\lambda_{cp}$ , площади его поперечного сечения  $F$ , а также увеличение длины стержня  $l$ .

Подвеска обычно работает на растяжение. В крупных сосудах длина подвески  $l$  составляет не менее 1 м.

При двух концентрических оболочках ее выполняют так, чтобы она проходила касательно к внутреннему сосуду. Это позволяет значительно увеличить ее длину. Для этой же цели подвеску часто вводят во внутреннюю полость сосуда с жидкостью (см. рисунки 2.14, а и б).

Как видно из рисунка 2.14, использование варианта б позволяет удлинить подвеску в 2–3 раза по сравнению с вариантом а. Кроме того, подвеска экранируется от теплового излучения наружной обечайки 2 сосуда.

Так как площадь поперечного сечения подвески  $F$  определяется из отношения нагрузки на подвеску  $p$  к пределу текучести конструкционного материала  $\sigma$ :

$$F = p / \sigma,$$

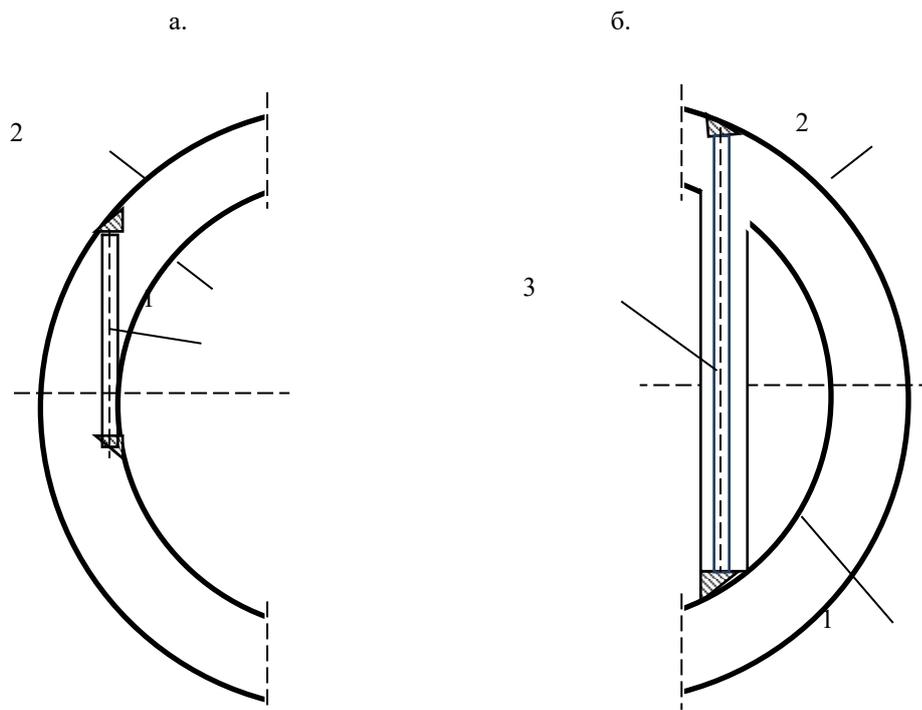


Рис. 2.14. Узел крепления вертикальных подвесок:  
 а) обычное крепление; б) крепление удлиненных подвесок

поэтому, материал для изготовления подвесок должен иметь наибольшее значение отношения предела текучести к коэффициенту теплопроводности:  $\sigma / \lambda_{cp}$ .

Выражение (2.18) может быть переписано следующим образом:

$$Q = \frac{p \cdot \Delta T}{l \cdot \sigma / \lambda_{cp}}$$

Обозначим отношение  $\sigma / \lambda_{cp}$  переменной  $u$ . Тепловой поток, идущий по подвеске, связан с переменной обратно пропорциональной зависимостью. Ниже приведены несколько значений  $u$  для разных конструкционных материалов при температуре около 190 К. Для наглядности значения представлены в виде отношения  $u/u_0$ . Где  $u_0$  отношение  $\sigma / \lambda_{cp}$  для нержавеющей стали.

Фропласт-4  $u/u_0 = 2,5$ ; текстолит  $u/u_0 = 5,0$ ; стекловолокно  $u/u_0 = 10-20$ . Рациональный выбор материала позволяет существенно снизить подвод теплоты теплопроводностью.

Теплоприток по подвеске можно существенно снизить, если изготовить ее в виде цепи. В местах контактов звеньев цепи возникает дополнительное термическое сопротивление.

Считается, что в местах соприкосновения звеньев цепи происходит контакт цилиндра с цилиндром. В этом случае теория упругости дает следующее выражение для расчета радиуса контактной площадки  $a$  (уравнение Герца):

$$a = \sqrt[3]{\frac{3}{2} \cdot \frac{1-\mu}{E} \cdot P_1 \cdot r}, \quad (2.19)$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $E$  – модуль упругости (модуль Юнга);  $P_1$  – сила, прижимающая цилиндр друг к другу;  $R$  – радиус цилиндров, входящих в контакт (радиус прутка, из которого изготавливаются звенья цепи).

Коэффициент Пуассона  $\mu$  представляет собой отношение относительного сужения образца к относительному удлинению (рис. 2.15)

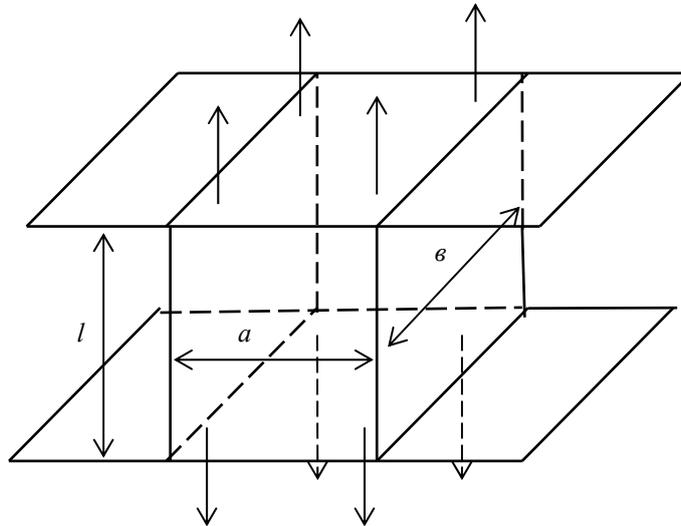


Рис. 2.15. К определению понятий коэффициент Пуассона и модуль Юнга

Для изотропного тела

$$\mu = \frac{\frac{a - \Delta a}{a}}{\frac{l + \Delta l}{l}} = \frac{\frac{b - \Delta b}{b}}{\frac{l + \Delta l}{l}}.$$

Величина  $\mu$  для стали чаще близка к 0,3. Модуль Юнга представляет собой отношение удельного напряжения к удельному удлинению, которое в области определенных удельных напряжений остается постоянной величиной и характеризует прочностные свойства материала:

$$E = \frac{P/S}{\Delta l/l},$$

где  $P$  – полное усилие, приложенное к образцу;  $S$  – площадь сечения образца ( $S = a \cdot b$ );  $l$  – длина образца;  $\Delta l$  – изменение длины образца под влиянием приложенного усилия.

Если принять  $\mu = 0,3$ , а  $E = 1,94 \cdot 10^5$  МПа, то для цепей из нержавеющей стали получим:

$$a = 0,0354r \cdot P^{1/3},$$

где  $P = P_1/2\pi r^2$  – удельная нагрузка на цепь, МПа, коэффициент 2 учитывает то, что звено контактирует с другими звеньями по двум сечениям одновременно.

К площадке, полученной в результате контактов звеньев (контактному пятну), стягиваются условные линии теплового потока, как показано на рис. 2.16.

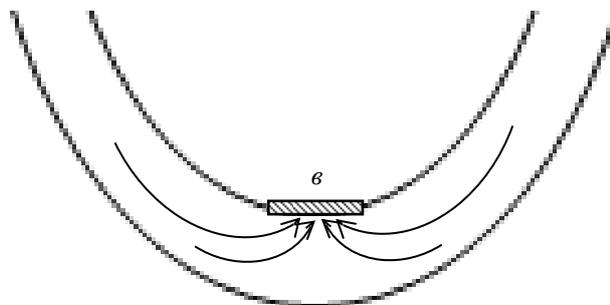


Рис. 2.16 Контактная площадка:

$b$  – длина области стягивания линий теплового потока.

Тепловое сопротивление контакта

$$R_k = \frac{k}{2a\lambda}, \quad (2.21)$$

где  $k$  – коэффициент, зависящий от формы тел, находящихся в контакте, и от отношения размеров тела к размерам контактного пятна.

Если длина области стягивания линий теплового потока  $b$  коротка, то величина  $k$  может быть определена из выражения

$$k = \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{b}{a}. \quad (2.22)$$

Экспериментальные данные по зависимости коэффициента  $k$  от удельной нагрузки представлены на рис. 2.17 [4].

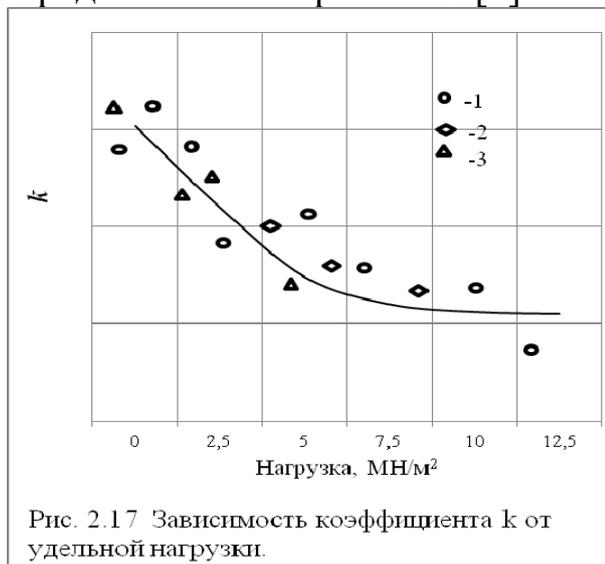


Рис. 2.17 Зависимость коэффициента  $k$  от удельной нагрузки.

На практике  $k$  меняется от 0,3 до 0,6. Тепловой поток, проходящий через звено:

$$Q = \frac{\lambda}{l_T} \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot 2 \cdot \Delta T_{зв}, \text{ или } Q = \frac{1}{R_{зв}} \cdot \Delta T_{зв}, \quad (2.23)$$

где  $\Delta T_{зв}$  – общий перепад температур в звене.

Отсюда тепловое сопротивление  $R_{зв}$ , К/Вт, звена

$$R_{зв} = \frac{2l_T}{\lambda \cdot \pi d^2}, \quad (2.24)$$

где  $l_T$  – вытянутая длина полузвена;  $d$  – диаметр прутка, из которого изготовлено звено (рис. 2.18).

При числе звеньев  $n$  число контактов будет  $n+1$ . Полное термическое сопротивление такой цепи может быть рассчитано по выражению:

$$R_{ц} = n \cdot R_{зв} + (n+1)R_K \approx \frac{nl_T \cdot 4}{2\lambda \cdot \pi d^2} + (n+1) \frac{k}{2 \cdot 0,0177dP^{1/3} \cdot \lambda},$$

или

$$R_{ц} \cong \frac{n}{\lambda d} \left( \frac{2l_T}{\pi d} + \frac{k}{0,0354 P^{1/3}} \right), \quad (2.25)$$

где  $R_{зв}$  и  $R_K$  отнесены ко всей площади теплопередачи.

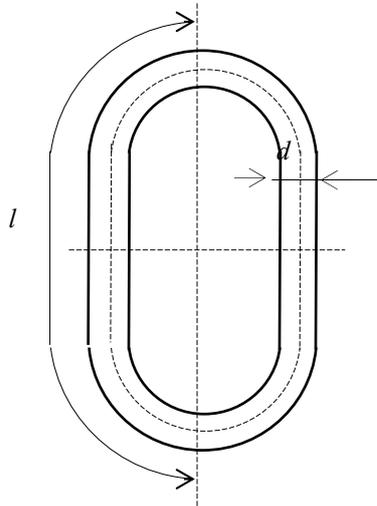


Рис. 2.18 Звено подвесной цепи для внутреннего сосуда криогенной емкости с вакуумной изоляцией

В реальных условиях нагрузки на цепные подвески из нержавеющей стали достигают 100–200 МПа. При этом термическое сопротивление контактов не превышает 30% от общего термического сопротивления цепи, так как с увеличением нагрузки растет радиус контактных пятен. Поэтому при больших нагрузках на подвески их в виде цепей не изготавливают.

Для транспортных емкостей наряду с подвесками применяются опоры, предотвращающие перемещение внутреннего сосуда относительно кожуха. Опоры короче подвесок, имеют большую площадь поперечного сечения и испытывают напряжение сжатия. Для изготовления опор используются материалы с низкой теплопроводностью. Интересным конструктивным решением является изготовление опор из набора тонких пластин из нержавеющей стали. Из-за шероховатости поверхностей тепловой контакт между пластинами можно считать точечным, т.е. площадь поверхности теплового контакта значительно меньше геометрической площади поверхности пластин, что создает существенное термическое сопротивление. Существует понятие о коэффициенте контакта  $\eta$ :

$$\eta = \frac{S_k}{S_n},$$

где  $S_k$  – общая площадь поверхности точечных контактов;

$S_n$  – полная поверхность соприкасающихся тел.

Величина  $S_k$  зависит от приходящейся на опору нагрузки сжатия. Для оценки величины  $\eta$  эмпирическим путем определена следующая зависимость:

$$\eta = \frac{P}{c\sigma_T} + S \cdot P^n, \quad (2.26)$$

где  $P$  – удельное давление на полную поверхность, МПа;  $\sigma_T$  – предел текучести;  $c$ ,  $S$  и  $n$  – постоянные, зависящие от обработки поверхности и ее материала. Обычно  $n \approx 0,7 \div 0,8$ ;  $c \approx 3$ .

Первый член правой части уравнения (2.26) характеризует удельную долю пластически (необратимо) деформированных выступов. Второй член правой части уравнения характеризует долю контакта полученную за счет упругой деформации выступов. При определении величины  $\eta$  основную роль играет первое слагаемое, а вторым слагаемым при выполнении инженерных расчетов можно пренебречь.

Опоры из металлических пластинок на практике не имеют очевидных преимуществ по сравнению со сплошными опорами из неметаллических (полимерных) материалов, так как эффективный коэффициент теплопроводности таких опор примерно в 50 раз меньше, чем для самой нержавеющей стали. При этом, благодаря высоким прочностным свойствам материала, площадь металлической опоры может быть значительно меньше, чем у опор из полимеров.

На характеристики криогенной емкости существенно влияет приток теплоты по проходящим через изоляционное пространство трубопроводам.

Различать два случая переноса теплоты за счет теплопроводности

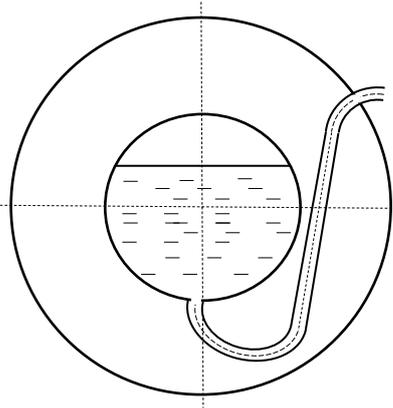


Рис. 2.19 Вывод трубопровода из криогенной емкости

материала трубопроводов. В первом случае теплоту переносит материал неохлаждаемой металлической трубы, например, трубы от низкотемпературного сосуда к манометру. Во втором случае теплоту переносит материал постоянно охлаждаемой трубы. Примером такой трубы может служить горловина заполненного криогенной жидкостью сосуда Дьюара.

Рассмотрим подвод теплоты по неохлаждаемому трубопроводу. В этом случае можно пренебречь теплообменом между стенками трубы и контактирующими с ними средами. Тепловой поток вдоль трубы определяется по формуле:

$$q = \frac{\lambda_{cp}}{L} \cdot \pi d_{cp} \cdot \delta \cdot \Delta T, \quad (2.27)$$

где  $d_{cp} = 0,5(d_n + d_{вн})$  ( $d_n$  и  $d_{вн}$  – наружный и внутренний диаметры трубы соответственно);  $\delta = 0,5(d_n - d_{вн})$  – толщина стенки трубы;  $\Delta T$  – разность граничных температур.

Для уменьшения притоков теплоты по трубам их максимально удлиняют, для чего располагают в изоляционном пространстве параллельно граничным поверхностям (рис. 2.19).

Пересекая изоляционное пространство, металлическая труба с переменной температурой поверхности вызывает дополнительный подвод к холодной граничной сосуда. Точный аналитический расчет величины такого притока теплоты затруднен. Особенно усложняется решение задачи в том случае, когда трубу охлаждает движущий по ней поток. В принципе такие расчеты надо выполнять методом математического моделирования, а для примерных расчетов использовать упрощенные решения.

Рассмотрим случай с трубой длиной  $L$ , через которую отводится холодный пар, образовавшийся из жидкости вследствие теплопритоков извне. С внешней стороны труба имеет температуру окружающей среды, а с внутренней температуру кипящей криогенной жидкости. Масса образующегося в единицу времени пара известна.

Для расчета приняты следующие допущения:

- 1) перепад температур между внутренне стенкой трубы и проходящим через нее газом одинаков по всей длине трубы;
- 2) по всей длине отсутствует теплообмен между трубой и окружающей ее изоляцией;

3) теплопроводность материала трубы линейно зависит от температуры, поэтому в расчете можно использовать ее среднее значение.

Удельный поток теплоты к жидкости  $q$ , Вт/м<sup>2</sup> вычисляется по уравнению:

$$q = mc_p \Delta T / (e^{\frac{mc_p L}{\lambda F}} - 1), \quad (2.28)$$

где  $m$  – массовый расход пара;  $c_p$  – теплоемкость пара;  $\Delta T$  – общий перепад температур;  $\lambda$  – среднее значение коэффициента теплопроводности;  $F$  – площадь поперечного сечения трубы (кольца);  $e$  – основание натурального логарифма.

Поток теплоты по охлаждаемой трубке в несколько раз меньше, чем по неохлаждаемому трубопроводу. Поэтому часто внутри трубы газосброса прокладывают измерительные и предохранительные линии, или соединяют неохлаждаемые линии с охлаждаемыми трубами с помощью теплопроводных перемычек. Эти меры значительно снижают приток теплоты по «тепловым мостам» в виде технологических трубопроводов емкости.

#### Перенос теплоты теплопроводностью через изоляционный материал

Для решения практических задач полезно ввести в рассмотрение понятие – оптимальная толщина теплоизоляции. Это понятие применимо к тем случаям, когда форма ограждения отлична от плоскости.

Тепловой поток через газонаполненную изоляцию, находящуюся между двумя цилиндрическими стенками с температурами  $T_1$  – теплой и  $T_2$  – холодной стенок, вычисляется по выражению:

$$q = \frac{2 \cdot \pi \cdot H \cdot \bar{\lambda} \cdot \Delta T}{\ln(D_1 / D_2)}, \quad (2.29)$$

где  $H$  – высота цилиндра;  $\bar{\lambda}$  – эффективный коэффициент теплопроводности при температуре  $T_{cp} = 0,5(T_1 + T_2)$ ;

$\Delta T = T_1 - T_2$ ;  $D_1$  и  $D_2$  – наружный и внутренний диаметры изоляции.

Тепловой поток через изоляцию ограниченную сферическими поверхностями определится из выражения:

$$q = \frac{\bar{\lambda}}{\delta} \cdot \Delta T \cdot \sqrt{F_1 \cdot F_2}, \quad (2.30)$$

где  $\delta$  – толщина изоляции;  $F_1$  и  $F_2$  – площади внешней и внутренней сферических поверхностей.

Формула (2.30) может применяться и к изоляции, отличающейся

по форме от шаровой, в тех случаях, когда отношение толщины изоляции к наименьшему размеру изолируемого аппарата не менее 0,15–0,2.

Приведенные выше аналитические выражения позволяют рассмотреть вопрос о выборе оптимальной толщине тепловой изоляции. Такая задача возникает при проектировании железнодорожных цистерн, емкостей, монтируемых на автомашинах, т.е. при заданных наружных габаритах емкости.

Оптимальная толщина изоляции должна обеспечивать минимальные потери криогенной жидкости от испаряемости. Обычно решения связанные с поиском оптимальной толщины изоляции предполагают постоянство диаметра изолируемого объекта, например трубопровода. В этом случае по мере роста толщины изоляционной конструкции возрастает наружная поверхность изоляции, что при определенных условиях может привести к увеличению потока теплоты через тепловое ограждение.

В рассматриваемом случае диаметр внешней поверхности определен конструктивными соображениями, поэтому наращивание толщины идет за счет уменьшения диаметра емкости с криогенной жидкостью. В таких условиях для всех рассмотренных выше видов изоляции обычной газонаполненной изоляции, за исключением высоковакуумной, рост толщины тепловой изоляции, приводит к уменьшению притоков теплоты к изолируемому объему. Понятие оптимальной толщины изоляции связано не с величиной теплопритоков, а удельной испаряемостью жидкого криопродукта, которая представляет собой отношение потерь от испаряемости за единицу времени, например за час,  $\Delta G$ , к максимальному весу жидкости в емкости  $G'$ :

$$\Delta g = \Delta G / G'.$$

Увеличение толщины изоляции сопровождается уменьшением подвода теплоты и снижением потерь от испаряемости  $\Delta G$ , но одновременно, уменьшается полезный объем внутреннего сосуда и максимальный вес жидкости в емкости  $G'$ .

Для решения задачи об оптимальной толщине тепловой изоляции криогенной емкости надо рассмотреть два типичных случая.

#### 1. Цилиндрическая криогенная емкость.

Допустим, что длина цилиндрической обечайки емкости  $L$  настолько велика, что доля теплоты, проникающего через торцевые, нецилиндрические сечения, не существенна (рис. 2.20).

Допустим, что коэффициент теплопроводности изоляции и общий перепад температур  $\Delta T = T_{oc} - T_{ж}$  известны. Ввиду большой теплопроводности металла термическим сопротивлением стенок можно пренебречь. Также незначительно влияние тепловых сопротивлений при передаче теплоты от окружающей среды к наружной стенке кожуха и от стенки внутренней емкости к кипящей жидкости. С учетом принятых допущений количество жидкости, испарившееся от теплопритока по цилиндрической части изоляционной конструкции за единицу времени определится из выражения:

$$\Delta G_{ц} = \frac{Q_{ц}}{r}, \quad (2.31)$$

где  $r$  – теплота парообразования криогенной жидкости,  $q_{ц}$  – тепловой поток через цилиндрическую часть тепловой изоляции. В общем случае:

$$q_{ц} = \frac{\pi \cdot L \cdot \Delta T}{\frac{1}{\alpha_1 D} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{D}{d} + \frac{1}{\alpha_2 d}}. \quad (2.32)$$

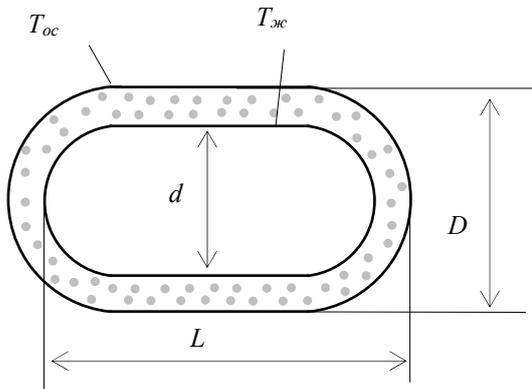


Рис. 2.20 Схема криогенной емкости с цилиндрической изоляцией.

В соответствии с принятыми выше упрощениями:

$$q_{ц} = \frac{2\pi\lambda L \Delta T}{\ln D/d}. \quad (2.33)$$

Количество жидкости  $G$ , кг, вмещающейся в цилиндрическую часть емкости:

$$G = \frac{\pi d^2}{4} \cdot L \cdot \rho, \quad (2.34)$$

где  $\rho$  – плотность криогенной

жидкости.

Совместно решая уравнения (2.31) – (2.34), получим:

$$\frac{\Delta G_{ц}}{G} = \frac{8\lambda\Delta T}{d^2 \ln(D/d) \cdot r \cdot \rho}. \quad (2.35)$$

Введем обозначения для комплекса постоянных величин:

$$c = \frac{8\lambda\Delta T}{r \cdot \rho} = const. \quad (2.36)$$

Уравнение (2.35) переписывается следующим образом:

$$\frac{\Delta G_{ц}}{G} = c \cdot \frac{1}{d^2 \ln D/d}. \quad (2.37)$$

Продифференцируем это выражение по диаметру внутренней емкости:

$$\frac{d\left(\frac{\Delta G_y}{G}\right)}{d(d)} = c \cdot \frac{-\left(2d \ln(D/d) \frac{1}{d} \cdot d^2\right)}{\left(d^2 \ln D/d\right)^2}. \quad (2.38)$$

Минимум соответствует значению переменной при котором производной функции равна нулю:

$$2d \ln \frac{D}{d} - d = 0, \quad (2.39)$$

откуда

$$\ln \frac{D}{d} = \frac{1}{2}, \quad \text{или} \quad \frac{D}{d} = e^{\frac{1}{2}}. \quad (2.40)$$

Оптимальный диаметр внутренней цилиндрической емкости:

$$d_{opt} = \frac{D}{1,65} \approx 0,6D, \quad (2.41)$$

а оптимальная толщина изоляции

$$\delta_{opt} = \frac{D - d_{opt}}{2} = 0,2D. \quad (2.42)$$

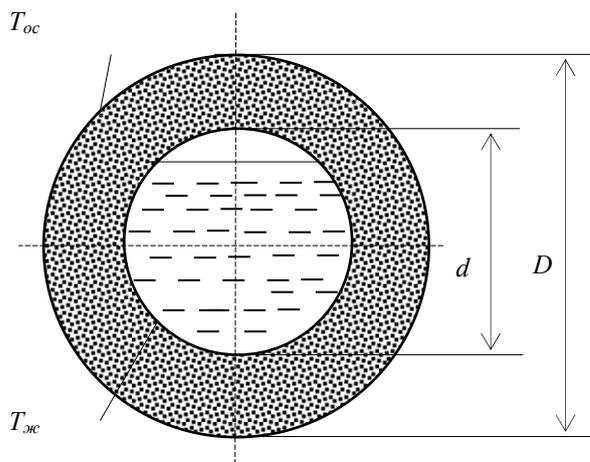


Рис. 2.21. Схема криогенной емкости со сферической теплоизоляцией.

2. Сферическая криогенная емкость.

Начальные условия и обозначения принимаем аналогично предыдущему случаю (рис. 2.21). Потери жидкости от притока теплоты через тепловую изоляцию определяются из выражения:

$$\Delta G = \frac{q}{r} = \frac{2\pi\lambda \cdot \Delta T \cdot d \cdot D}{r(D-d)}. \quad (2.43)$$

Максимальное количество жидкости в сферической емкости:

$$G = V \cdot \rho = \frac{1}{6}\pi d^3 \cdot \rho. \quad (2.44)$$

Удельная испаряемость криогенной жидкости:

$$\frac{\Delta G}{G} = \frac{12\lambda\Delta TD}{r \cdot \rho(D-d)d^2}. \quad (2.45)$$

Введем обозначение для комплекса постоянных величин:

$$\varepsilon = \frac{12\lambda\Delta TD}{r \cdot \rho} = const; \quad (2.46)$$

тогда:

$$\frac{\Delta G}{G} = \varepsilon \frac{1}{(D-d)d^2}. \quad (2.47)$$

Для определения минимального значения функции найдем производную:

$$\frac{d\left(\frac{\Delta G}{G}\right)}{d(d)} = \varepsilon \frac{-(2Dd - 3d^2)}{[(D-d)d^2]^2} \quad (2.48)$$

Определим значение переменной при которой функция имеет минимум:

$$-(2Dd - 3d^2) = 0, \quad (2.49)$$

откуда:

$$d_{opt} = \frac{2}{3}D. \quad (2.50)$$

Оптимальная толщина изоляции сферической емкости:

$$\delta_{opt} = \frac{D-d}{2} = 0,165D. \quad (2.51)$$

В криогенных емкостях толщина изоляции обычно выбирается меньше оптимального значения. Толщина изоляционной конструкции приближается к оптимальному расчетному значению лишь в сосудах сравнительно небольшой вместимости, так как в общий тепловой поток из окружающей среды к жидкости определяется не только толщиной и качеством изоляции.

### **Глава III. ХРАНЕНИЕ И ТРАНСПОРТИРОВАНИЕ НЕСЖИЖЕННЫХ КРИОГЕННЫХ ГАЗОВ**

В ряде случаев для хранения относительно больших количеств криогенных газов при температуре окружающей среды применяются специальные емкости – газгольдеры. При таком способе хранения нет необходимости тратить энергию на сжижение газа и не требуется изолировать емкость от теплопритоков извне. В криогенной технике газгольдеры используются не только как емкости для хранения, но и как буферные емкости на установках разделения и сжижения криогенных газов, сглаживающие пульсации и несоответствие практически постоянной производительности установки с неравномерной выдачей продуктов разделения. Они создают резерв и обеспечивают поддержание устойчивого давления на всасывании компрессоров.

Газгольдеры подразделяются на:

- 1) газгольдеры переменного объема низкого давления. К ним относятся так называемые "мокрые" газгольдеры;
- 2) газгольдеры постоянного объема низкого давления;
- 3) газгольдеры постоянного объема высокого давления (реципиенты).

Кроме того, для перевозок сжатого газа под высоким давлением (около 15 МПа) при температуре окружающей среды с последующим хранением и использованием на месте потребления применяются баллоны.

**Газгольдеры переменного объема (постоянного давления).**

**Определение давления газа в газгольдере**

Газгольдеры переменного объема с гидравлическим затвором (чаще всего водяным) получили название "мокрых". Они могут быть с вертикальными и винтовыми направляющими. В технике разделения воздуха лучше всего себя зарекомендовали газгольдеры с вертикальными направляющими. Давление газа в таком газгольдере составляет 500–4000 Па (50–400 мм вод.ст.). Существуют "мокрые" газгольдеры различного назначения:

- 1) газгольдеры, используемые в качестве буферной емкости между установкой, производящей криогенный газ, и компрессорной станцией, которая подает криогенный газ потребителю. Назначение такого газгольдера – сгладить несоответствие между производительностью установки и потреблением криогенного газа. В период умеренного потребления происходит накопление газа (например, кислорода) в газгольдере, который расходуется параллельно с газом, поступающим из установки, в часы пикового потребления;

2) газгольдеры, служащие для хранения запаса криогенного газа. Это газгольдеры большой емкости (до 30000 м<sup>3</sup>);

3) газгольдеры (наряду с ролью буферной емкости), служащие для обеспечения постоянного давления на линии всасывания компрессоров, несколько превышающего атмосферное давление для предотвращения образования вакуума.

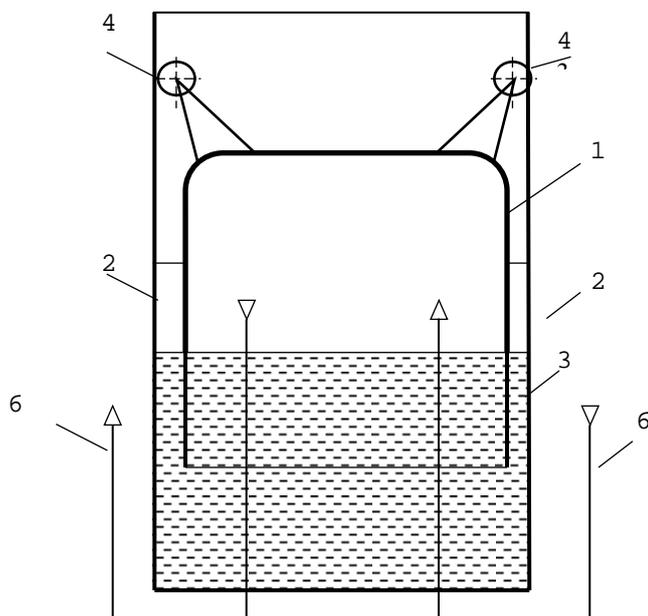


Рис. 3.1 "Мокрый" газгольдер с одним колоколом:

- 1 – колокол (стальной); 2 – направляющие стойки (в круглом газгольдере – направляющие колонны), расположенные симметрично относительно колокола;
- 3 – бассейн с водой; 4 – направляющие ролики;
- 5 – труба подачи газа в газгольдер; 6 – труба отвода газа из газгольдера

Составными элементами газгольдера являются водяной резервуар (бассейн); подвижной колокол без дна, помещаемый внутрь резервуара (крупные газгольдеры выполняются двух- и трехзвенной конструкции телескопического типа), и направляющие для обеспечения вертикального перемещения колокола.

Конструктивные элементы газгольдеров различного типа даны в следующем разделе.

Схема газгольдера с одним колоколом представлена на рисунке 3.1.

Для газгольдера, схематически изображенного на рисунке 3.1, удельное давление  $P$ , Па (на 1 кг зеркала):

$$P = P_1 - P_2 - P_3, \quad (3.1)$$

где  $P_1$  – давление, обусловленное, весом колокола;  $P_2$  – снижение давления вследствие действия архимедовой силы, которая создает усилие,

направленное вверх против силы тяжести для части колокола, погруженного в воду;  $P_3$  – добавочная сила, возникающая из-за разницы в удельных весах газа, хранящегося в газгольдере, и окружающего воздуха.

$$P_1 = \frac{G}{\frac{\pi D^2}{4}} \quad (3.2)$$

где  $G$  – вес колокола, Н;  $D$  – внутренний диаметр колокола, м.

$$P_2 = \frac{G_{\text{ц}} \cdot 10000}{78000 \cdot \frac{\pi D^2}{4}} \cdot \frac{H - h}{H} \quad (3.3)$$

где  $G_{\text{ц}}$  – вес цилиндрической части колокола, Н;

78000 – удельный вес стали, из которой изготовлен колокол, Н/м<sup>3</sup>

10000 – удельный вес воды, Н/м<sup>3</sup>;

$H$  – высота цилиндрической части колокола, м;

$h$  – высота цилиндрической части колокола, находящейся под водой, м.

Размеры  $D$ ,  $h$  и  $H$  показаны на рисунке 3.2.

$$P_3 = (\gamma_{\text{в}} - \gamma_{\text{г}})h \quad (3.4)$$

где  $\gamma_{\text{в}}$  и  $\gamma_{\text{г}}$  – соответственно удельные веса воздуха и газа в газгольдере, Н/м<sup>3</sup>.

С учетом уравнений (3.1) – (3.4) имеем:

$$P = \frac{G - G_{\text{ц}} \frac{H - h}{H} \cdot \frac{1}{7,8}}{\frac{\pi D^2}{4}} - (\gamma_{\text{в}} - \gamma_{\text{г}})h \quad (3.5)$$

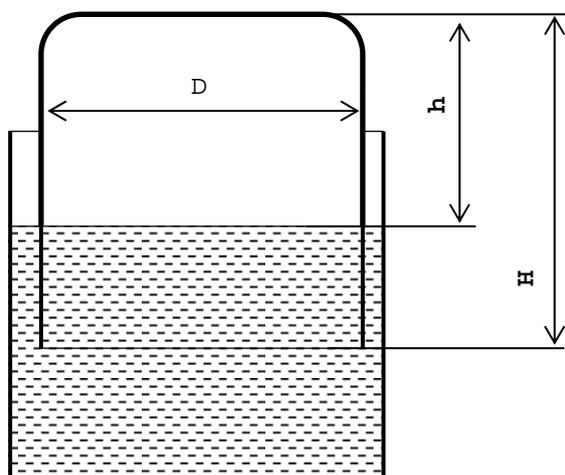


Рис. 3.2 Схематический разрез "мокрого" газгольдера

Газгольдер с одним колоколом имеет максимальную емкость 10000 м<sup>3</sup>. Более крупные газгольдеры имеют двух- или трехзвенную конструкцию телескопического типа.

### Газгольдеры постоянного объема низкого давления

Эти газгольдеры, в отличие от газгольдеров переменного объема, не имеют гидрозатвора. Они представляют собой горизонтальные металлические сосуды цилиндрической формы с максимальным давлением 0,3–0,9 МПа. К этому же типу относятся и так называемые мягкие газгольдеры, рассчитанные на небольшой объем газа (50 и 125 м<sup>3</sup>) и на небольшое избыточное давление (не более ~500 Па). Изготавливаются они из прорезиненной ткани. К недостатку газгольдеров этого типа можно отнести большую величину площади, ими занимаемой, которая превышает площадь, занимаемую "мокрыми" газгольдерами такой же емкости.

### Газгольдеры постоянного объема высокого давления

Эти газгольдеры представляют собой цилиндрические сосуды и высококачественной стали со сферическими днищами, давление в которых составляет 5,0–17,5 МПа. Часто они соединяются между собой в батареи. Большие количества газа в таких газгольдерах (или, как еще называют, реципиентах) обычно хранятся в подземных хранилищах, где они находятся ниже уровня промерзания грунта. Хранение газа в таких газгольдерах обходится значительно дешевле, чем в "мокрых" или в газгольдерах низкого давления. Они дешевле и занимают меньшую площадь.

Наземное хранение газов может осуществляться в такого же рода емкостях. Они устанавливаются стационарно либо в вертикальном, либо горизонтальном положении, а также на железнодорожных платформах.

### Конструктивные особенности и характеристика газгольдеров

#### "Мягкие" газгольдеры

Размеры таких газгольдеров представлены в табл. 3.1. Материалом для "мягких" газгольдеров служит диагонально дублированная прорезиненная ткань (перкаль А). Предохранением от повышения давления выше нормы (не более 50 мм вод.ст.) является гидравлический затвор, через который в этом случае газ вытесняется в атмосферу. В передвижных установках по сбору испаряющихся ценных газов (гелий, неон) используются "мягкие" газгольдеры, которые изготавливаются из материала с малым коэффициентом диффузии газа через стенку. В качестве такового применяется нейлоновая ткань,

пропитанная неопреном.

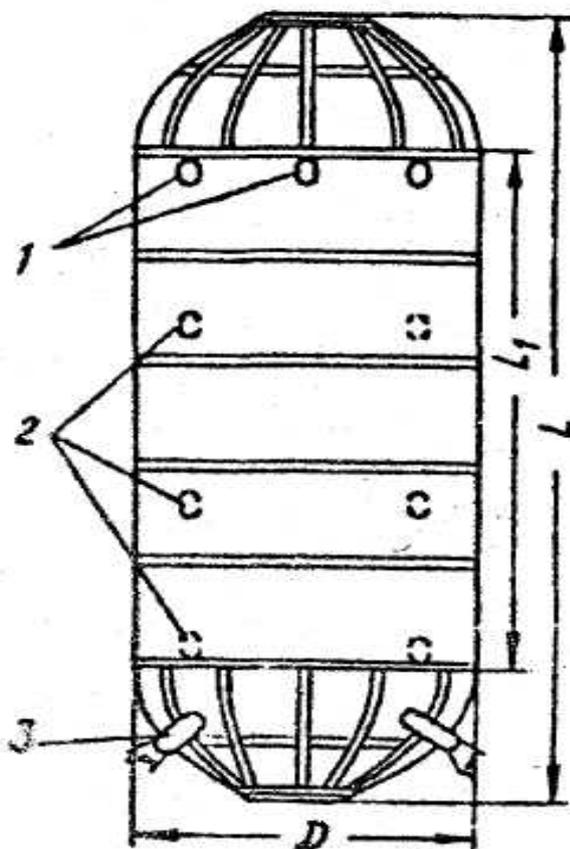


Рис. 3.3 Резино-тканевый газгольдер для кислорода:  
 1 – шайбы для вертикальной подвески газгольдера;  
 2 – шайбы для горизонтальной подвески газгольдера (расположены с противоположной стороны по отношению к аппендиксам);  
 3 – труба для присоединения шлангов диаметром 100 мм

Таблица 3.1

Емкость и размеры газгольдеров из прорезиненной ткани

Номинальная газгольдера емкость, м <sup>3</sup>	Размеры, мм		
	L	L <sub>1</sub>	D
50	8750	5900	2850
125	13110	9450	3660

### "Мокрые" газгольдеры

Простейших из этого типа газгольдеров – это газгольдер с одним колоколом. Он изображен на рисунке 3.4, этот газгольдер рассчитан на хранение газа объемом 4000 м<sup>3</sup> [6]. На изготовление его уйдет около 175 т стали. Объем воды в бассейне примерно равен объему газа, который вмещает колокол.

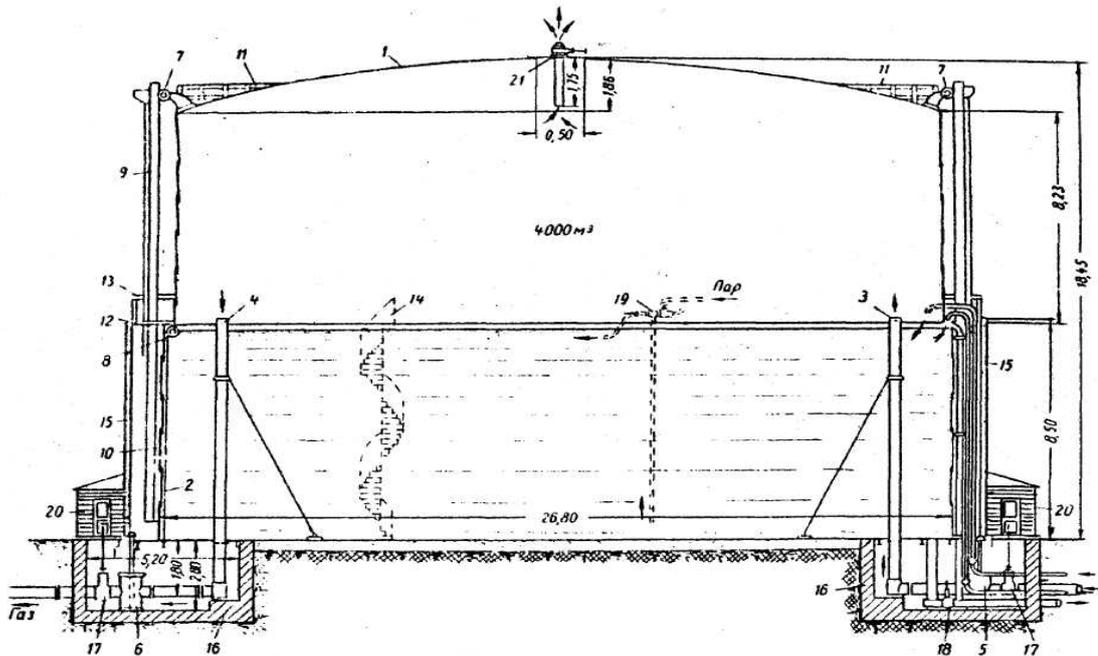


Рис. 3.4 "Мокрый" газгольдер с одним колоколом:

- 1 – плавающий в воде колокол; 2 – бассейн;
- 3 – труба для ввода газа; 4 – труба для отвода газа потребителю;
- 5 и 6 – емкости для сбора конденсирующихся паров воды;
- 7 и 8 – ролики, обеспечивающие вертикальное перемещение колокола;
- 9 и 10 – направляющие;
- 11 – решетчатые балочки, соединяющие верхние концы направляющих;
- 12 и 13 – кольцевая площадка с перилами; 14 – винтовая лестница;
- 15 – утепленная часть газгольдера (для предотвращения замерзания воды);
- 16 – колодцы; 17 и 18 – задвижки; 19 – труба для наполнения бассейна;
- 20 – утеплительная будка; 21 – труба для продувки воздуха перед заполнением газгольдера газом легче воздуха.

Значительно уменьшить расход воды удастся в газгольдерах телескопической конструкции. Газгольдеры состоят из вертикального цилиндрического резервуара, заполненного водой, одной или нескольких обечаек (телескопов), колокола, представляющего собой открытую снизу цилиндрическую оболочку с полой сферической кровлей, и направляющих (рис. 3.5). Через дно резервуара под колокол подводят трубопроводы для подачи и расходования газа. Как только давление газа на крышу колокола превысит его массу, колокол начинает подниматься, увлекая за собой телескопы.

В зависимости от числа подвижных частей (колокола и телескопов) газгольдер бывает однозвенным, двухзвенным и т.д. На рисунке 3.6 изображен двухзвенный газгольдер.

Такой газгольдера состоит из колокола и двух звеньев, потери газа предотвращаются за счет водяных затворов.

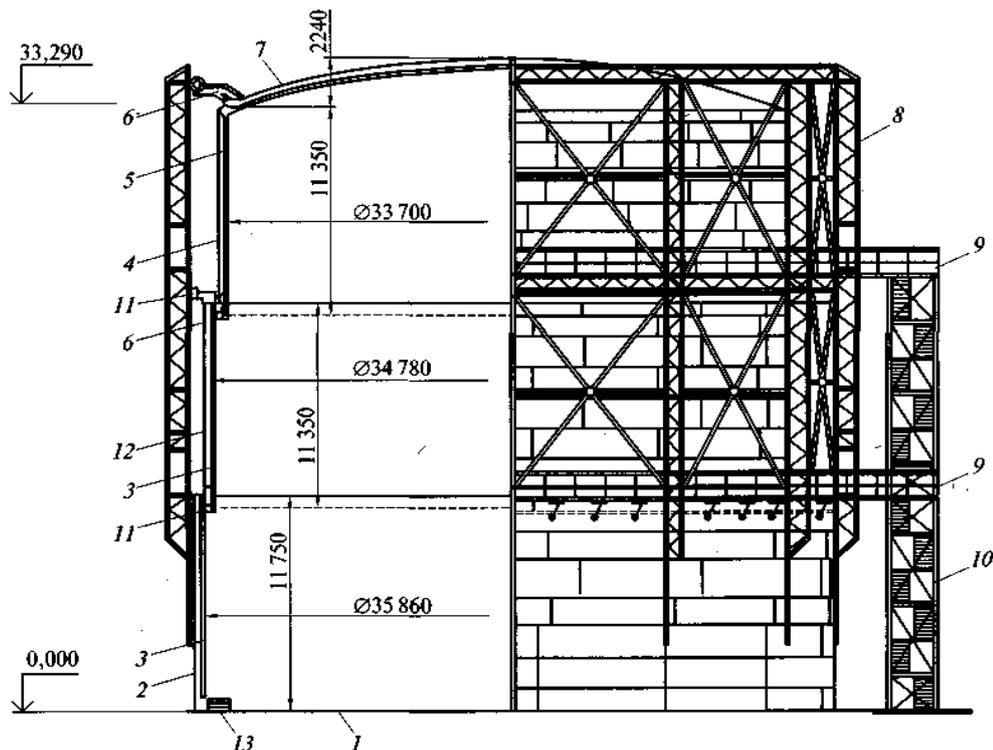


Рис. 3.5 Мокрый газгольдер с вертикальными направляющими объемом 20 000 м<sup>3</sup>:

- 1 — днище; 2 — корпус резервуара; 3 — внутренние направляющие; 4 — корпус колокола; 5 — стойки колокола; 6 — нижний и верхний ролики колокола; 7 — покрытие колокола; 8 — внешние направляющие; 9 — обслуживающие площадки; 10 — лестница; 11 — нижний и верхний ролики телескопа; 12 — корпус телескопа; 13 — опорные подкладки

На определенной высоте колокол входит в зацепление с затвором телескопа и далее движется вверх вместе с ним. При этом затвор колокола захватывает с собой воду из бассейна, в результате чего образуется газонепроницаемая гидравлическая подушка, противостоящая давлению газа в газгольдере. Правильное движение колокола и телескопа и ограничение их перекоса во время движения осуществляется с помощью наружных верхних и внутренних нижних роликов, которые катятся соответственно по наружным и внутренним направляющим. При отсутствии давления в газгольдере колокол и телескоп опираются на подставки, установленные на дне бассейна. При максимальном давлении газа внутри колокола он занимает наивысшее положение; величина давления зависит от массы телескопа, пригрузов, находящихся в затворах воды, объема и плотности газа, хранимого в газгольдере.

Полезный объем газгольдера соответствует объему газа, заключенному в газгольдере при верхнем положении всех его звеньев.

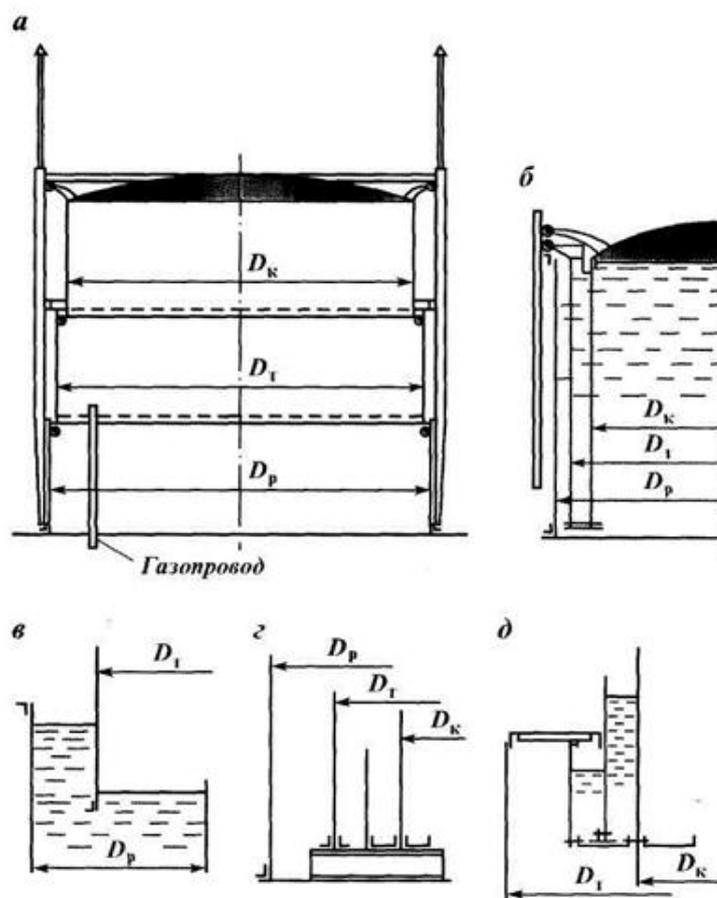


Рис. 3.6 Схема двухзвенного газгольдера:  
 а — при верхнем положении колокола и телескопа;  
 б — при нижнем положении колокола и телескопа;  
 в — при верхнем положении телескопа;  
 з — при нижнем положении колокола и телескопа;  
 д — при верхнем положении колокола;  
 $D_k$  — диаметр колокола;  $D_t$  — диаметр телескопа;  $D_p$  — диаметр резервуара

"Мокрые" газгольдеры оснащаются следующими предохранительными устройствами: перепускное устройство на крыше колокола; гидравлический затвор в камере газового ввода; автоматическое устройство для сброса газа в атмосферу; прожекторное освещение для наблюдения за положением колокола; пожарная сигнализация.

В установках лабораторного типа, предназначенных для ожижения водорода, гелия, неона, используются небольшие газгольдеры переменного объема с масляным затвором.

Время опорожнения газгольдеров различной емкости на 90% от объема вмещаемого газа дано в табл. 3.4.

Основные технологические характеристики "мокрых" газгольдеров даны в табл. 3.5 [7].

Таблица 3.4

Емкость газгольдера, м <sup>3</sup>	100	300	600	1000	3000	6000	10000	15000	20000	30000
Время опорожнения, мин	4,5	13,5	7	11	15,5	31	30	29	26,5	40

Таблица 3.5

Технологические характеристики "мокрых" газгольдеров постоянного давления с вертикальными направляющими

Емкость газгольдера, м <sup>3</sup>			Давление газа, мм вод. ст.		Диаметр газового ввода, мм	Максимальная пропускная способность, м <sup>3</sup> /ч		Расход воды		Диаметр водопровода, мм	
			Минимальное (без грузов)	Максимальное (с полным компл. грузов)		При подаче через один ввод (включение на проток или тупике)	При подаче через 2 ввода ((включение в тупике)	Единовременный м <sup>3</sup> /ч	Постоянный м <sup>3</sup> /ч	Со стороны подачи	Со стороны слива
номинальная	полезная										
	Максимальная (90% от номинальной)	Нормальная (65% от номинальной)									
100	90	65	205	400	200	2400	3100	150	5	80	100
300	270	195	202	400	200	2400	4800	430	5	80	100
600	540	390	189	400	400	8100	8100	770	5	80	100
1000	900	650	160	400	400	9400	13300	1220	5	80	100
3000	2700	1950	147	400	600	21000	29000	3410	5	150	200
6000	5400	3900	149	400	600	21000	42000	6700	5	150	200
10000	9000	6500	156	400	800	36400	48200	6180	5	150	200
15000	13500	9750	158	400	1000	56600	59600	9000	5	200	250
20000	18000	13000	139	400	1200	80300	83300	11900	5	250	300
30000	27000	19500	134	400	1200	81400	120100	17500	5	250	300

### Газгольдеры постоянного объема низкого давления

Конструкция относящегося к этому же типу мягкого газгольдера представлена выше (рис. 3.3).

На рис. 3.7 показан металлический газгольдер низкого давления цилиндрической формы [8]. Он представляет собой стальной цилиндр с полусферическими днищами. Газгольдер рассчитан на давления от 0,3 до 0,8 МПа. Несмотря на низкое давление, толщина стенки при большом диаметре составляет 9–13 мм.

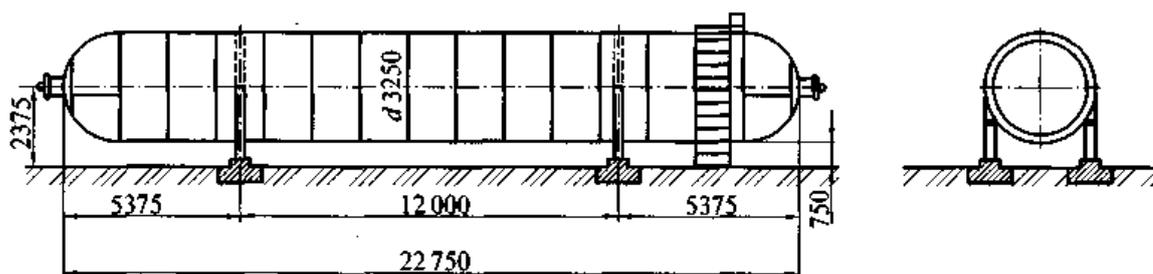


Рис. 3.7 Газгольдер постоянного объема низкого давления цилиндрической формы

Сферическая форма резервуаров по сравнению с цилиндрической отличается экономичностью по расходу стали, а значит стоимости. Разработана серия таких газгольдеров объемом 300–4000 м<sup>3</sup> с внутренним давлением 0,25–1,8 МПа диаметром 9–20 м. Внешний вид такого газгольдера показан на рис. 3.8. Диаметр сферы составляет 105 м, объем 600 м<sup>3</sup>. Шар опирается на шесть колонн из двутавровых балок.

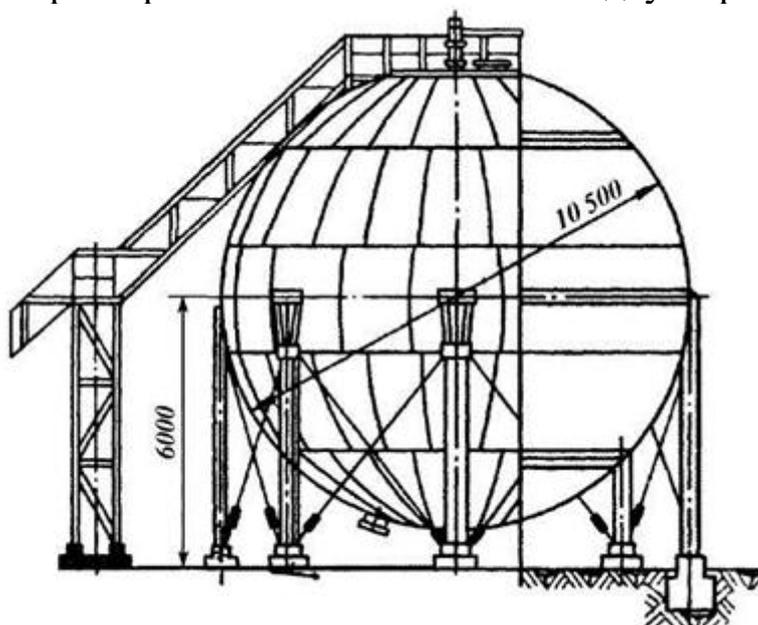


Рис. 3.8 Сферический газгольдер постоянного объема низкого давления цилиндрической формы

## Баллоны и реципиенты

Для хранения и транспортирования криогенных газов при температуре окружающей среды широко используются баллоны, рассчитанные на давление около 15 МПа.

Изготавливаются они из бесшовных труб, материалом служит углеродистая или легированная сталь.

Водяная емкость таких баллонов – от 0,4 до 55 л. Наиболее широко используются 40-литровые баллоны. На рисунке 3.9 изображен баллон для пропана и пропанобутановых смесей. Характеристика баллонов дана в табл. 3.6 [9].

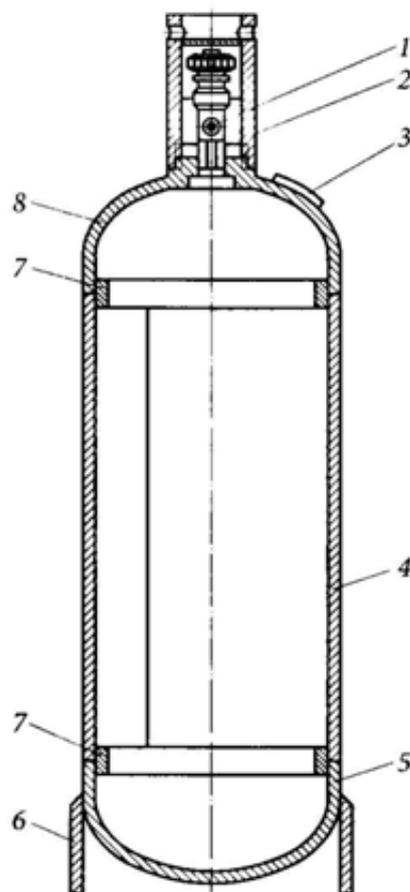


Рис. 3.9 Баллон для пропана и его смесей: 1 – вентиль; 2 – колпак предохранительный; 3 – табличка паспорта баллона; 4 – корпус; 5 – днище; 6 – опоры; 7 – подкладные кольца; 8 – верхняя сфера

В горловину баллона, как правило, на конической резьбе вворачивается вентиль. Конструкция вентиля кислородного баллона показана на рис. 3.10 [9].

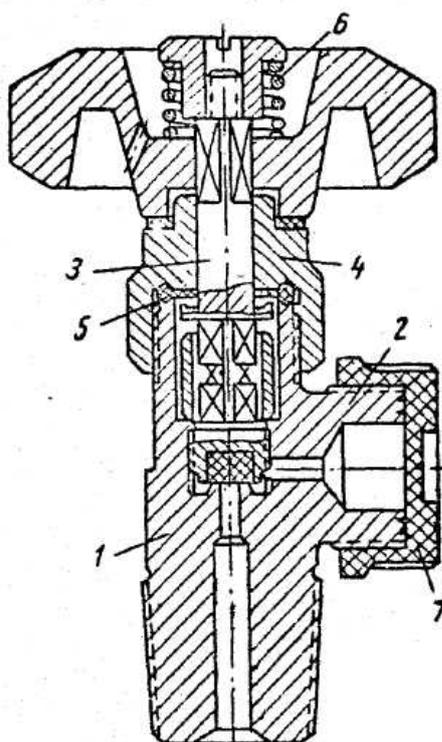


Рис. 3.10 Вентиль кислородного баллона:  
 1 – латунный корпус; 2 – боковой штуцер; 3 – шпindelь; 4 – гайка сальника;  
 5 – фибровая прокладка; 6 – пружина; 7 – заглушка

Таблица 3.6  
 Размеры и масса баллонов из углеродистой стали (типа Л–50) и  
 легированной (типа 150 Л)

Тип баллонов	Размеры, мм			Масса (без вентиля колпака и башмака), кг
	толщина стенки $S$ , не менее	длина корпуса, $l$	диаметр цилиндрической части, $D$	
Л–50	7,0	1390	219	60
150–Л	5,2	1340	219	43,5

В зависимости от хранящегося в них газа баллоны окрашиваются в соответствующий цвет (табл. 3.7) в соответствии с правилами Госгортехнадзора. Например, кислородные баллоны окрашиваются в голубой цвет. Верхняя сферическая часть баллона остается неокрашенной для маркировки (рис. 3.11).

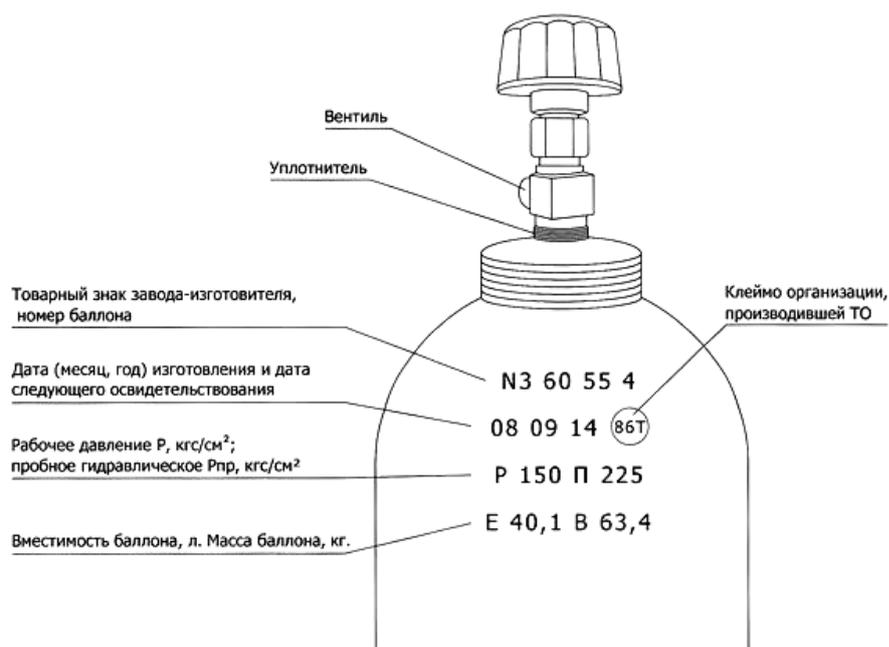


Рис. 3.11 Маркировка баллона

Таблица 3.7

Условные цвета окраски и надписи на баллонах со сжатыми газами  
(по ГОСТ 949–57)

Наименование газа	Окраска баллонов	Текст надписи	Цвет надписи	Цвет полосы
Азот	Черная	Азот	Желтый	Коричневый
Аммиак	Желтая	Аммиак	Черный	—
Аргон сырой технический чистый	Черная " Серая	Аргон сырой технический чистый	Белый Синий Зеленый	Белый Синий Зеленый
Ацетилен	Белая	Ацетилен	Красный	—
Водород	Темно-зеленая	Водород	Красный	—
Воздух	Черная	Сжатый воздух	Белый	—
Гелий	Коричневая	Гелий	Белый	—
Кислород	Голубая	Кислород	Черный	—
Фреон–11 Фреон–12 Фреон–13 Фреон–22	Алюминивая	Фреон–11 Фреон–12 Фреон–13 Фреон–22	Черный	Синий — 3 красные 2 красные

Хлор	Защитная	—	—	Зеленый
Циклопропан	Оранжевая	Циклопропан	Черный	—
Этилен	Фиолетовая	Этилен	Красный	—
Все другие горючие газы	Красная	Наименование газа	Белый	—

Наполнение баллонов сжатым газом осуществляется через наполнительную рампу (рис. 3.12). Рампа состоит из двух групп по пять или по десять баллонов: одна находится под наполнением, а в это время другая группа баллонов снимается и заменяется пустыми.

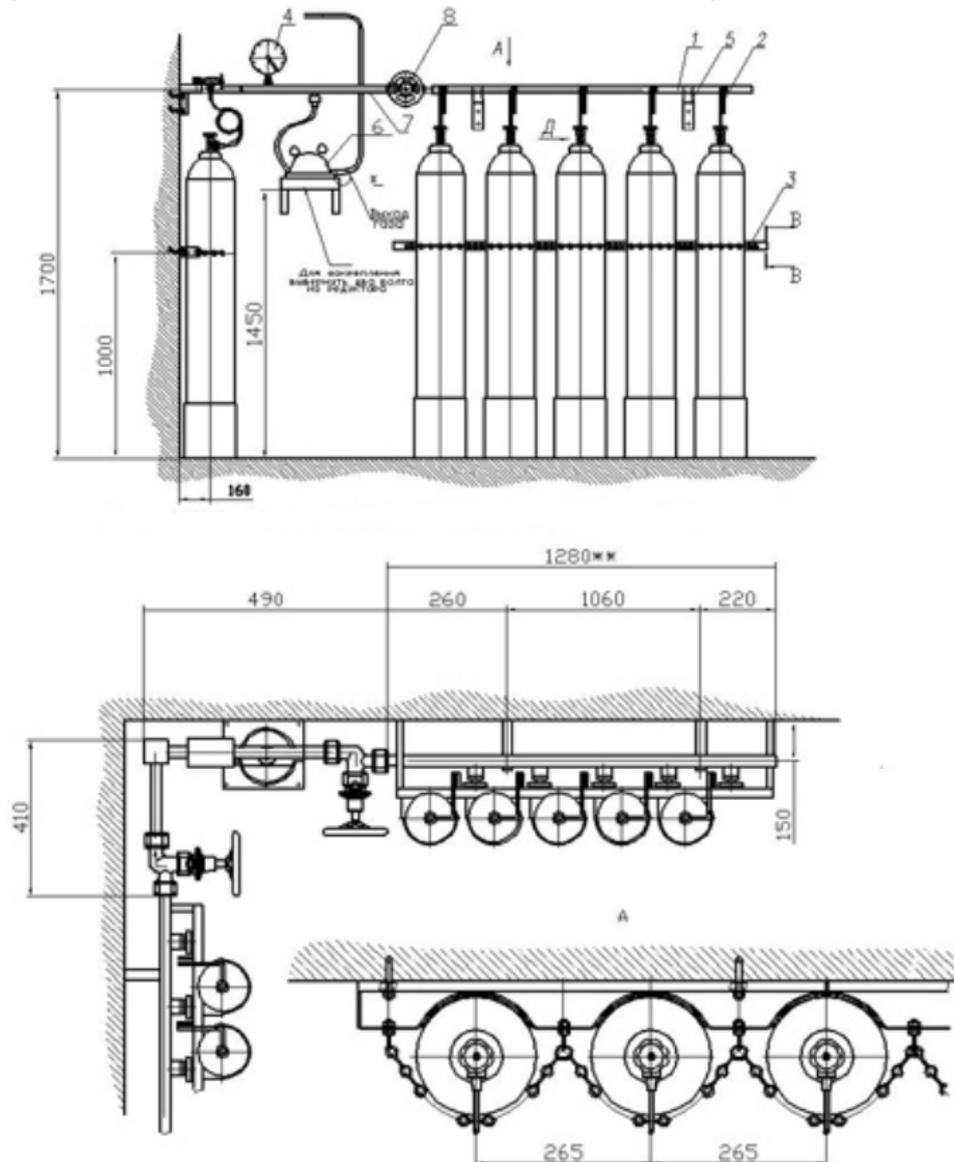


Рис. 3.12 Наполнительная рампа:

- 1 – коллектор; 2 – змеевик; 3 – цепи для крепления баллонов;  
 4 – манометр; 5 – уголок крепления; 6 – редуктор;  
 7 – узел соединения ветвей; 8 – вентиль отсечной

Баллоны могут перевозиться различным транспортом: в вагонах, на судах, на автомашинах, на электрокарах. Все баллоны снабжаются защитными колпаками и резиновыми колпачками, предохраняющими их от соударений.

Для стационарного хранения больших количеств газа под высоким давлением используют также реципиенты. По конструкции они схожи с баллонами, но их объем больше. Они устанавливаются вертикально в приямок с цементной подушкой и крепится хомутом к раме, группами (батареями). Общее количество реципиентов зависит от производительности установки и характера потребления газа.

## Глава IV. СОСУДЫ И ЕМКОСТИ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ И ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ СЖИЖЕННЫХ КРИОГЕННЫХ ГАЗОВ

### Некоторые общие положения

В ряде случаев хранение криогенных газов необходимо осуществлять в жидком виде. В ракетной, космической и атомной технике широко используются жидкий кислород, водород, фтор, азот, причем ожижительные станции не представляется возможным располагать в непосредственной близости от объектов потребления. Кроме того, иногда единовременное количество потребляемых сжиженных газов весьма велико (например, запуск космических аппаратов). Поэтому необходимо накапливать большие массы сжиженных газов и длительное время их хранить с минимальными потерями (а в некоторых случаях и вообще без потерь).

Вторым аспектом, связанным с хранением и транспортированием криогенных газов в жидком виде, является проблема наиболее экономичной доставки их на место потребления, если там они используются в газообразном виде. В качестве примера рассмотрим кислород.

Доставка газообразного кислорода с кислородных станций потребителю производится в кислородных 40-литровых баллонах под давлением 15 МПа. При этом вес самих баллонов в 8,5–9 раз превышает вес содержащегося в них кислорода. Большой парк баллонов и транспортных средств, расходы по наполнению и на перевозку в значительной степени удорожают стоимость кислорода.

В связи с этим перевозка кислорода в жидком виде с газификацией его на месте потребления в большинстве случаев представляется значительно более экономичной, чем перевозка его в баллонах. Например, для хранения  $2400 \text{ м}^3$  газообразного кислорода массой 3430 кг требуется четыреста 40-литровых баллонов (каждый вмещает  $6 \text{ м}^3$  кислорода, приведенных к нормальным условиям) [10]. Общая масса этих баллонов составляет 27 т. Для перевозки такого же количества кислорода в жидком виде потребуется один танк массой 1800 кг, занимающий небольшую площадь. Для перевозки этого количества баллонов со сжатым кислородом требуется шесть пятитонных автомашин, в то время как для перевозки такого же количества жидкого кислорода требуется только одна пятитонная автомашина.

Жидкий кислород одной и той же массы, что и сжатый, занимает объем в 5,3 раза меньше. Масса тары при транспортировке жидкого кислорода в сосудах Дьюара в 6,5 раз меньше, чем при перевозке того

же количества кислорода в баллонах. Но при сравнении транспортирования кислорода в жидком и газообразном виде следует учитывать, что хранение жидкого кислорода, наполнение емкости, газификация на месте потребления связаны с потерями жидкости, достигающими иногда до 30–40%. Газификация требует специального оборудования и квалифицированного обслуживающего персонала. Все это в ряде случаев, в частности при небольшом потреблении, может обесценить преимущества транспортирования в жидком виде.

Емкости относительно небольшой вместимости (от 0,5 до 5000 л) используются только для кратковременного хранения сжиженных газов и их транспортирования. Для их стационарной установки не требуется специально подготовленных площадок. Длительное хранение жидкости в подобных емкостях сопровождается значительными потерями. Более крупные емкости (10000–50000 л) размещаются на специально оборудованных площадках, фундаментах или опорах. В отличие от небольших емкостей, изготавливаемых на заводе, такие резервуары собирают и монтируют на месте установки.

К резервуарам для хранения сжиженных криогенных газов предъявляется ряд требований. Они должны обеспечивать:

- малые потери от испаряемости;
- безопасность при длительном хранении (с сохранением кондиций хранимой жидкости);
- химическую и механическую стойкость используемых материалов при контакте с жидкостью;
- быстрое заполнение и опорожнение резервуаров;
- относительную дешевизну;
- малые потери жидкости при первоначальном заполнении.

Оптимальной формой резервуара является сферическая или цилиндрическая с высотой, равной диаметру. Такая форма обеспечивает минимальный расход конструкционных и изоляционных материалов, а также минимальные потери жидкости в процессе хранения.

Относительная величина потерь зависит от вместимости резервуара [4]:

$$c = \frac{a}{V^{1/n}} * 100\%, \quad (4.1)$$

где  $V$  – емкость резервуара, м<sup>3</sup>;  $c$  – относительные потери в сутки, % от полной емкости;  $a$  и  $n$  – постоянные коэффициенты, зависящие от рода хранимой жидкости, размеров емкости и вида изоляции.

Если диаметр резервуара оставлять без изменений, а длину его увеличивать, то удельная поверхность его при этом практически не изменится, так же как и удельные потери от испарения ( $n=\infty$ ).

Если же размеры резервуара увеличиваются при сохранении геометрического подобия и толщины изоляции, то удельные потери уменьшаются ( $n = 3$ ). При использовании высоковакуумной изоляции показатель также близок к 3. Если толщина изоляции увеличивается пропорционально линейным размерам сосуда, то  $n$  падает до 1,5. В соответствии с опытными данными для кислородных сосудов с высоковакуумной изоляцией:  $a = 2,4$  и  $n = 4,3$ . Величина  $n$  отличается от значения  $n=3$  в связи с дополнительным теплопритоком по горловине и опорам. Если используется аэрогель или перлит под вакуумом, то  $a=1,3$  и  $n=1,9$ . Вакуумно-многослойная изоляция дает  $a=0,5$  и  $n=1,6$ .

Потери жидкости зависят от формы резервуара и уровня жидкости в нем. С увеличением степени заполнения потери на испарение возрастают, но их относительная величина падает.

Очевидно, что потери зависят также от качества изоляции и от величины теплопритоков по подвескам, трубам, опорам. Доля этих теплопритоков зависит от вместимости сосуда и его конструктивных особенностей. При увеличении емкости сосуда с вакуумно-порошковой изоляцией от 1 до 100 м<sup>3</sup> удельные потери жидкости уменьшаются в 10 раз.

Материалы, используемые для изготовления криогенных емкостей, должны отвечать определенным требованиям. Особенно это касается внутренних сосудов, работающих при низких температурах. Используемый для их изготовления материал должен обладать достаточно высокой прочностью и ударной вязкостью при низких температурах, иметь малую теплопроводность, хорошую свариваемость, малую степень черноты поверхности. Для сосудов с высоковакуумной изоляцией обычно используют медь: она имеет малую степень черноты, хорошо паяется и обрабатывается. Для средних и крупных резервуаров, где используются другие виды изоляции, внутренний сосуд изготавливается либо из нержавеющей стали Х18Н9Т, либо из алюминиевого сплава АМц, аргонодуговая сварка которого позволяет получить высококачественные вакуумно-плотные швы. В последнее время начинают использоваться сплавы титана. Наружный кожух резервуаров обычно изготавливается из стали 20. Для уменьшения массы кожуха его делают тонкостенным с ребрами жесткости. Разработаны способы надежного соединения алюминия и его сплавов с другими металлами. Для этого используют либо химическое омеднение алюминия, либо металл, соединяемый с алюминием с помощью аргонодуговой сварки, предварительно покрывают слоем расплавленного алюминия, после чего обе детали соединяют аргонодуговой сваркой.

Для изготовления подвесок используются стали марки 000Х21Н16АГ8.

Особенности конструкций сосудов Дьюара для хранения сжиженных азота, кислорода, аргона, водорода, неона, гелия

#### Сосуды Дьюара серии СДП

Сосуды подобного типа используются для транспортирования и хранения небольших количеств криогенных жидкостей. Большинство из них имеют вакуумно-порошковую изоляцию. Конструктивно сосуды Дьюара изготавливаются по типу "сосуд в сосуде". Внутренний контейнер с жидкостью подвешивается в кожухе на горловине, служащей для заполнения и опорожнения и для выхода паров.

Сосуды серии СДП (сосуды Дьюара промышленные) производятся НПО "Гелиймаш", г.Москва и представляют собой современную техническую реализацию длительное время выпускавшихся в СССР сосудов СК-16 и СК-25.

Они предназначены для транспортирования и длительного, до 180 суток, хранения криопродуктов. Внешний вид сосуд приведён на рисунке 4.1., а техническая характеристика в таблице 4.1 [11].



Рис. 4.1 Внешний вид сосудов серии СДП

Таблица 4.1.

Технические характеристики сосудов Дьюара серии СДП

Наименование параметра	СДП-6	СДП-16	СДП-20	СДП-35/60	СДП-35/90
Вместимость, л	6	16	20	35	35
Масса порожнего сосуда, кг	5,6	12	16	18	19
Потери жидкого азота от испарения, г/ч	8,0	5,9	6,5	6,5	8,0

Время полного испарения азота, суток	25	90	100	180	145
Габаритные размеры:					
- диаметр, мм	255	390	516	516	516
- высота, мм	525	625	645	742	742
Диаметр горловины, мм	58	58	58	58	88

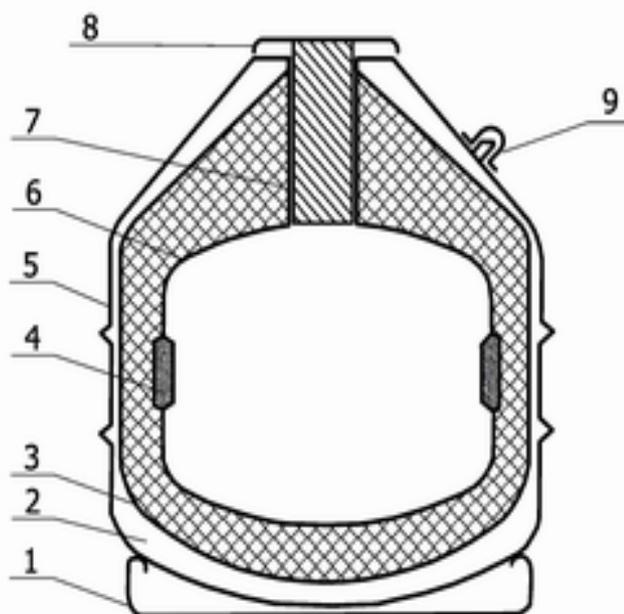


Рис. 4.2 Схема сосуда:

1 – основание, 2 – днище эллиптическое, 3 – экранирующая пленка, 4 – адсорбент, 5 – обечайка цилиндрическая, 6 – сосуд внутренний, 7 – горловина внутреннего сосуда, 8 – крышка горловины сосуда, 9 – штуцер вакуумной откачки

Несущее основание сосуда 1 изготовлено из штампованного алюминия и на него опирается эллиптическое днище вакуумного кожуха сосуда 2. Внутри вакуумного кожуха находится многослойная экранно-вакуумная изоляция, сформированная слоями экранирующей пленки 3. Для повышения степени разряжения в вакуумном пространстве на внутреннем сосуде 5 размещены контейнеры с адсорбентом 4. При заполнении сосуда криогенной жидкостью адсорбционная емкость адсорбента повышается, и в его порах конденсируются остаточные газы вакуумного пространства. Вакуумное пространство ограничено обечайкой 5. Внутренний сосуд 6 висит в вакуумном кожухе на горловине 7, которая изготовлена из композитных материалов. Ранее в сосудах серии СК горловина изготавливалась из металлических гофр, но при эксплуатации сосудов металлический гофр часто деформировался при переливе жидкости из одного сосуда в другой. Конструкцию сосуда завершает крышка горловины 8, которая

предупреждает проникновение во внутреннее пространство сосуда влаги из атмосферного воздуха. Сосуд снабжен вакуумным штуцером 9, через который производится его вакуумирование.

В принципе конструкция не рассчитана на восстановление вакуума, однако описываются удачные работы по восстановлению сосудов этой серии [11].

Для хранения различных биопрепаратов (стволовых клеток, генетической продукции и т.д.), а также для проведения экспериментов, требующих охлаждения испытуемых объектов до температуры 77 К, в РФ налажено производство специализированных сосудов с высококачественной изоляцией, длительным сроком хранения и специальным приспособлением для размещения в слое азота контейнеров с ампулами, в которых помещен биопрепарат. В связи с тем, что основным потребителем сосудов этого класса являются станции животноводства, сосуды этого класса получили название сосуды сельскохозяйственный или СДС.

На рис. 4.3 приведен внешний вид данных сосудов.



Рис. 4.3 Внешний вид сосудов Дьюара сельскохозяйственных серии СДС, производитель НПО «Гелиймаш».

Принципиальная схема приведена на рисунке 4.4. Внутри сосуда размещается 6 контейнеров с биопрепаратом 1. В зависимости от задач хранения сосуд с контейнером может размещаться в зоне насыщенных паров азота, так и с погружением в слой жидкого азота 2. Контейнер удерживается во внутреннем объеме сосуда при помощи подвеса, который изготовлен нержавеющей проволоки и имеет низкую теплопроводность. Конструкция подвеса такова, что после ввода контейнера по горловине он поворачивается и возникает возможность вывести контейнер из сечения горловины. Таким образом, при малом сечении горловины можно разместить внутри 6 контейнеров.

Внутренний сосуд с жидким азотом ограничен высококачественной экранно-вакуумной изоляцией, которая изготавливается при помощи установки орбитальной намотки многослойной изоляции криогенных сосудов. Пространство между слоями вакуумируется. На верхней поверхности внутреннего сосуда корзина с адсорбентом 4, который поглощает из внутреннего пространства вакуумного кожуха 6 остаточные газы.

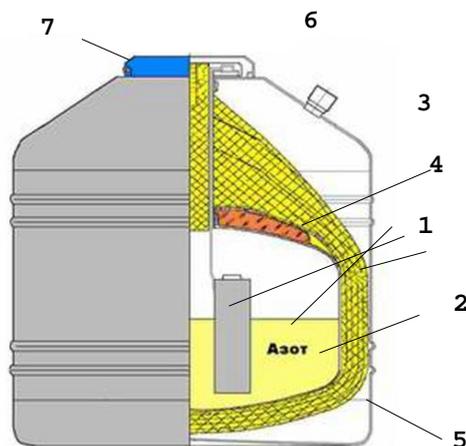


Рис. 4.4 Конструкция сосудов Дьюара сельскохозяйственных серии СДС

Для ориентации и удерживания кассет с пробирками на верхней крышке сосуда предусмотрено отдельное устройство, в которое устанавливается держатель сосуда. После установки контейнеров в горловину сосуда вводится теплоизолирующая крышка 7. Крышка снабжена стержнем-сепаратором из пенополистирола, который удерживает контейнеры от раскачивания во время транспортировки.

Пары азота, которые образуются за счет теплопритока из окружающей среде через изоляцию, отводятся из внутренне сосуда по каналам, которые образованы зазором между держателями контейнеров, горловиной сосуда и пенопластовой крышки 7. Движение газа позволяет отводить к отбросному газовому потоку теплопритоки, которые переносятся вдоль материала держателя за счет его теплопроводности.

Очевидно, что конструкция данного сосуда сложнее, чем сосудов серии СДП, это объясняется значительным увеличением времени испарения жидкого азота в сосуде. Как видно из таблицы 4.2 продолжительность испарения жидкого азота из данного типа сосудов составляет от 42 до 200 суток в зависимости от объема. Причем размещение в сосуде контейнеров несколько увеличивает потери от испаряемости, однако, несмотря на это, продолжительность хранения может превышать 6 месяцев.

Сосуды СДС используются для разных целей, как для длительного хранения (СДС-35), так и для транспортирования биоматериалов на молочные или животноводческие фермы (СД-6). Таким образом, используются сосуды разной емкости.

Таблица 4.2.

Техническая характеристика сосудов Дьюара сельскохозяйственных (СДС)

Параметры	Обозначение сосудов				
	СДС-6	СДС-35	СДС-35М	СДСТ-35	СДСТ-35М
Вместимость, л, не менее	6	35	35	35	35
Потери жидкого азота от испарения, г/ч, не более: без канистр/ с канистрами	5,1/5,3	5,3/5,6	3,9/4,2	5,9/6,5	5,9/7,3
Время полного испарения азота, суток, не менее : без канистр /с канистрами	44/42	220/210	300/278	200/185	200/165
Габаритные размеры сосудов, мм, не более:					
диаметр	262	516	516	516	516
высота	625	752	752	755	755
Размеры горловины, мм, не более	58	58	58	88	88
Масса порожнего сосуда, кг, не более	7,1	21	19	20	20
Количество канистр, шт	6	6	6	6	9
Габаритные размеры канистры, мм, не более					
Высота канистры	190	190	190	280	190
Диаметр канистры	45	45	45	70	45
Высота общая	488	488	616	616	616

Практика показала, что эти сосуды по испаряемости и сроку эксплуатации не только не уступают, но и превосходят многие зарубежные аналоги. Однако их внедрение в развивающуюся в России сферу криобиологических технологий осложняется тем, что многие специализированные учреждения приобретают емкостное оборудование вместе с лицензией на основную технологию, например, технологию хранения стволовых клеток. Поэтому широкое применение этот вид сосудов нашел только в области племенного животноводства.

Длительное хранение жидких водорода, неона и гелия по сравнению с другими сжиженными криогенными газами представляется более сложной задачей. Кроме очень низкой температуры эти жидкости имеют небольшую объемную теплоту испарения. В связи с этим конструкции сосудов Дьюара для их хранения являются более

сложными. Они должны обеспечивать минимальную величину притока тепла из окружающей среды. В качестве изоляции таких сосудов может использоваться высоковакуумная изоляция с охлаждаемыми экранами и вакуумно-многослойная изоляция. По конструкции сосуды можно разделить на две основные группы:

- 1 – с вспомогательным охлаждением жидким азотом;
- 2 – без азотного охлаждения.

Азотное охлаждение в сочетании с высоковакуумной изоляцией преимущественно применяется для сосудов емкостью до 500 л.

Устройство сосуда Дьюара для хранения жидкого гелия или водорода с азотным охлаждением емкостью 10 л показано на рис. 4.5. Сосуды такой конструкции изготавливаются емкостью до 100 л.

Внутренний резервуар 1 с хранимой жидкостью с помощью тонкостенной трубки 8 из нержавеющей стали подвешивается внутри корпуса 6. Этот резервуар окружается азотным экраном (ванной). Жидкий азот принимает на себя основную долю теплопритоков, теплопритоки излучением к внутреннему сосуду уменьшаются в сотни раз. К наружной поверхности сосудов с жидким гелием (водородом, неоном) и жидким азотом прикрепляются адсорбционные камеры 7, обеспечивающие поддержание высокого вакуума в изоляционном пространстве в процессе хранения. Емкости изготавливаются из меди или алюминиевых сплавов. Поверхности, обращенные в вакуумное пространство, полируются. Труба 8 контактирует с азотной ванной, что уменьшает приток тепла к хранящейся жидкости по деталям подвески.

Без защитного кожуха сосуд имеет массу около 16 кг и испаряемость в сутки 70–100 см<sup>3</sup> жидкого гелия. Расход жидкого азота составляет около 2 л/сутки. При транспортировании гелия в таких сосудах испаряемость в зависимости от условий перевозки может возрасти по сравнению со стационарными условиями в 1,6–1,8 раза, а в некоторых случаях увеличивается в 3–8 раз.

В табл. 4.3 даны характеристики рассмотренных сосудов в случае хранения жидкого гелия.

Применение азотных экранов усложняет конструкцию и эксплуатацию сосудов, а также увеличивает их массу. Поэтому крупные емкости выполняются без азотных экранов с применением высокоэффективной многослойной изоляции. Однако в небольших сосудах одна многослойная изоляция не обеспечивает требуемого снижения потерь. В этом случае при отказе от азотного охлаждения вопрос решается использованием экрана, охлаждаемого выходящим паром.

Примерные механические характеристики сосудов для жидкого гелия с вспомогательным азотным охлаждением

Емкость по гелию, л	Объем азотной ванны, л	Испаряемость, л/сутки		Полный вес заполненного сосуда, кг
		Жидкого гелия	Жидкого азота	
10	12–15	0,20–0,40	1,75–3	45–65
25	33–35	0,30–0,45	2,25–4	78–86
50	42–60	0,45–0,50	2,75–4	130–160
100	48–65	0,50–0,65	4,5–5	200–225

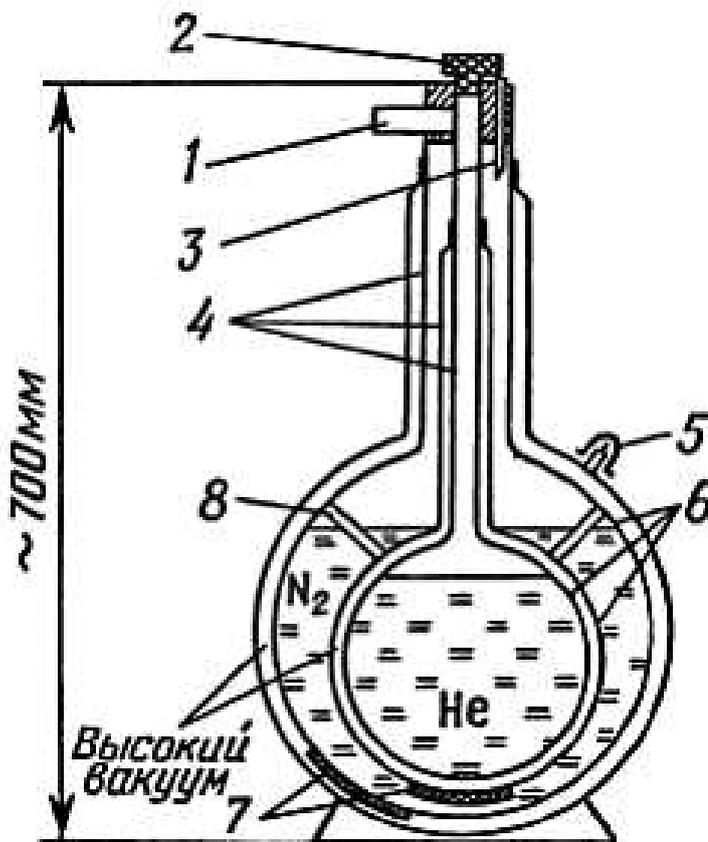


Рис 4.5. Конструктивная схема сосуда СД-10Г для хранения и перевозки жидкого гелия или водорода:

- 1 — трубка для выхода испаряющегося гелия; 2 — отверстие для переливания жидкого гелия, закрытое пробкой; 3 — трубка для заливки жидкого азота; 4 — тонкостенные трубки из нержавеющей стали; 5 — штуцер вакуумной откачки; 6 — медные полированные сферы, каждая из которых спаяна из двух полусфер; 7 — адсорбент; 8 — трубки, соединяющие между собой вакуумные полости и одновременно служащие распорками

Конструкция такого сосуда емкостью 25 л показана на рис. 4.6. Внутренний сосуд с жидким гелием 1 окружен медным экраном 2, который припаивается к горловине сосуда 3. Горловина изготовлена из нержавеющей трубки диаметром 15x0,3 мм. К наружной поверхности экрана в виде змеевика припаивается медная трубка 4, по которой проходит испаряющийся гелий. Концы змеевика присоединены к

горловине. Внутренний сосуд вместе с экраном обнесен многослойной изоляцией. После заполнения сосуда в его горловину вставляется поршень 10, который предотвращает выход газа через горловину и направляет его в змеевик. За счет этого экран охлаждается до температуры 96 К. Примерно через двое суток, когда экран и изоляция достаточно охлаждены, поршень вынимается, и охлаждение экрана осуществляется потоком газа, проходящим по горловине.

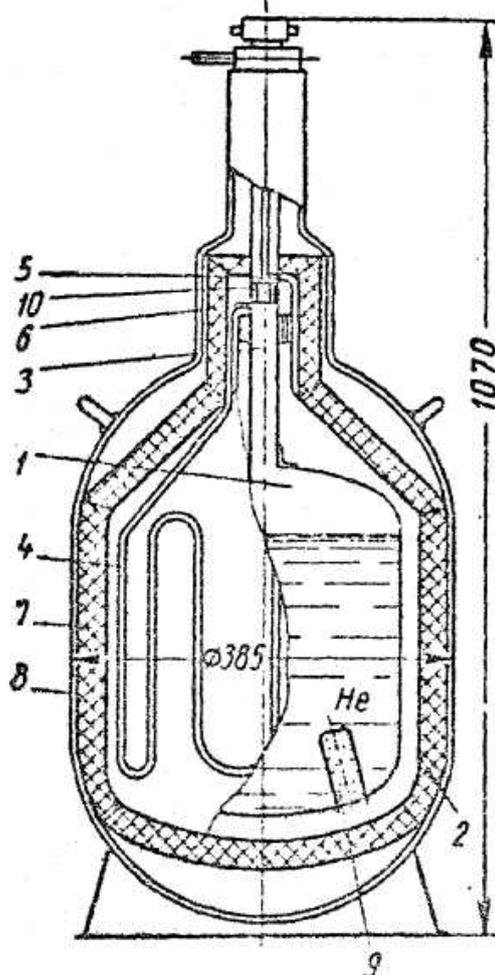


Рис. 4.6. Сосуд емкостью 25 дм для жидкого гелия с экраном, охлаждаемым выходящим паром:

- 1 – внутренний сосуд; 2 – экран; 3 – горловина; 4 – змеевик;
- 5 – трубка выхода газа из змеевика; 6 – трубка входа газа в змеевик;
- 7 – изоляция; 8 – кожух; 9 – адсорбент; 10 – пробка поршня

Аналогичной конструкции сосуда изготавливаются для жидкого гелия емкостью 100 л. Испаряемость в них составляет 1,7% в сутки. Масса такого сосуда составляет 91 кг. Сосуд такой же емкости с азотным экраном имеет массу примерно 210 кг.

Конструкция сосуда для жидкого гелия с несколькими экранами, охлаждаемыми его парами, проходящими через горловину, показана на рис. 4.7.

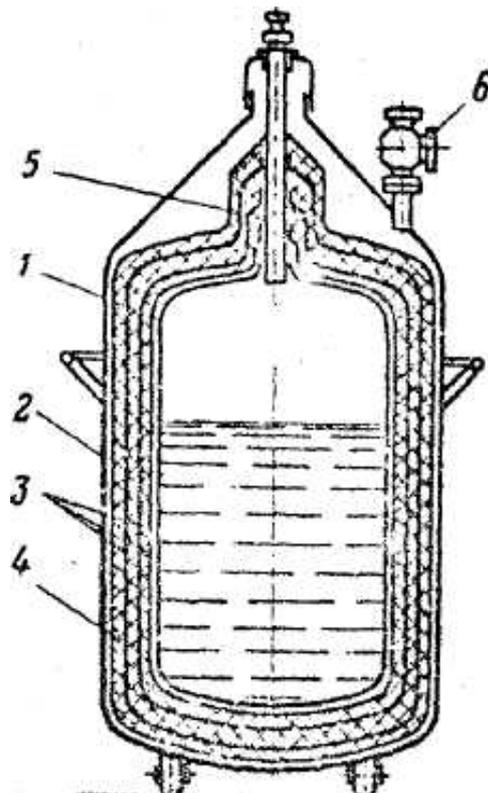


Рис. 4.7. Сосуд для жидкого гелия с вакуумно-многослойной изоляцией и экранами: 1 – емкость для гелия; 2 – кожух; 3 – экраны; 4 – многослойная изоляция; 5 – центральная труба; 6 – вентиль для откачки изоляции

### Особенности конструкций транспортных криогенных цистерн

Для транспортирования средних объемов сжиженных газов в РФ налажен выпуск линейки цистерн транспортных криогенных (ЦТК). Технические характеристики этих цистерн приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4

Технические характеристики цистерн транспортных криогенных серии ЦТК

Характеристика	Ед. изм.	Наименование емкостей						
		ЦТК–0,5/0,25	ЦТК–1/0,25	ЦТК–1,6/0,25	ЦТК–2,5/0,25	ЦТК–3,2/0,25	ЦТК–5/0,25	ЦТК–6,3/0,25
Вместимость	м <sup>3</sup>	0,5	1	1,6	2,5	3,2	5	6,3
Масса азота	кг	380	900	1230	2100	2320	4200	4800
Максимальное давление	МПа	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Потери жидкого азота от испарения, не более:	кг/ч	0,18	0,62	0,72	0,6	0,52	1,5	1,13

Габаритные размеры	мм							
– длина		1250	2600	2750	3630	4100	3910	5480
– ширина		1250	1275	1550	1630	1550	2000	1950
– высота		1430	1430	1550	1850	1650	1995	2200
Масса (без продукта)	кг	250	930	850	1800	1400	2500	2250

Цистерны различаются по вместимости, объем внутреннего теплоизолированного сосуда цистерн меняется от 0,5 м<sup>3</sup> (ЦТК-0,5/0,25) до 6,3 м<sup>3</sup> (ЦТК-6,3/0,25). В зависимости от вместимости запас жидкого азота в цистернах может варьироваться от 380 кг до 4,8 тонн.

Все цистерны рассчитаны на максимальное рабочее давление 0,25 МПа, однако по такому важному показателю, как испаряемость имеются существенные различия. Наилучшим показателем удельной испаряемости отличается цистерна ЦТК-0,5, у которой потери жидкости составляют всего 0,18 кг/ч, это обеспечивается тем, что эта цистерна имеет вертикально ориентированную схему расположения теплоизолированного сосуда (рис. 4.8), а также снабжена экранно-вакуумной изоляцией.

Показатели цистерн с вакуумно-порошковой изоляцией ЦТК-1,0 и ЦТК-1,6 (рис. 4.10) существенно хуже, например, цистерна ЦТК-1,0 в 2 раза больше по вместимости, а потери от испаряемости выше в 3,5 раза.

К негативным показателям данных цистерн также относятся большие затраты на первичное охлаждение, т.к. масса охлаждаемого материала в этих теплоизолирующих конструкциях значительно выше.

Хорошие эксплуатационные ЦТК-0,5 позволяют использовать её для широкого круга задач, поэтому эта емкость является довольно распространенной как на предприятиях, так и в сферах решения прикладных задач.

Внешний вид цистерны приведен на рис. 4.8.

Цистерна представляет собой цилиндрический сосуд, симметричный относительно вертикальной оси. Сосуд снабжен опорами, которые для механизации погрузочных работ часто монтируют на палетах. Система управления размещена в арматурном ящике, который расположен в верхней части сосуда. Для контроля уровня жидкости цистерна имеет указатель жидкости 1, манометр 2 позволяет контролировать давление в емкости.

Управление наполнения и выдачи газа осуществляется с помощью вентиля 3, 4, 5. Вентиль 4 регулирует подачу жидкости в испаритель 7, для подъема давления в паровом пространстве емкости. Вентиль 5 позволяет открывать/перекрывать магистраль наполнения – выдачи, которая соединяет сосуд со штуцером 6. Вентиль 3, так называемый вентиль газосброса, сообщает паровое пространство сосуда с окружающей средой. Прочие органы управления и безопасности цистерны собраны во внутренней полости арматурного ящике 8 и на этой схеме не видны.



Рис. 4.8 Внешний цистерны транспортной криогенной ЦТК–0,5/0,25:  
 1–указатель уровня, 2–манометр, 3– вентиль «Газосброс»,  
 4 – «Жидкость в испаритель», 5– вентиль «Наполнение–выдача»,  
 6– штуцер «Наполнение–выдача»  $D_y=16$  мм, 7– испаритель жидкости,  
 8 –арматурный ящик

Технологическая схема цистерны поясняется на рисунке 4.9. Наряду с перечисленными ранее элементами цистерна снабжена предохранительными клапанами 5, один из которых защищает паровое пространство цистерны, а второй шланг подачи жидкости. Кроме этого у цистерны имеется дополнительный штуцер заправки цистерны от воздухоразделительной установки. Вакуумный кожух 7 снабжен вентилем вакуумной откачки 6 и предохранительной разрывной мембраны 10. На линии подачи жидкости в испаритель установлен обратный клапан 9.

Принцип подъема давления достаточно прост, при открытии вентиля жидкость самотеком поступает в испаритель, расположенный в нижней части цистерны, переходит в газообразное состояние и возвращается в паровое пространство емкости.

Последнее время отдельные предприятия выполняют модернизацию данной цистерны и устанавливают на линии подачи паром систему автоматизированного управления давлением.

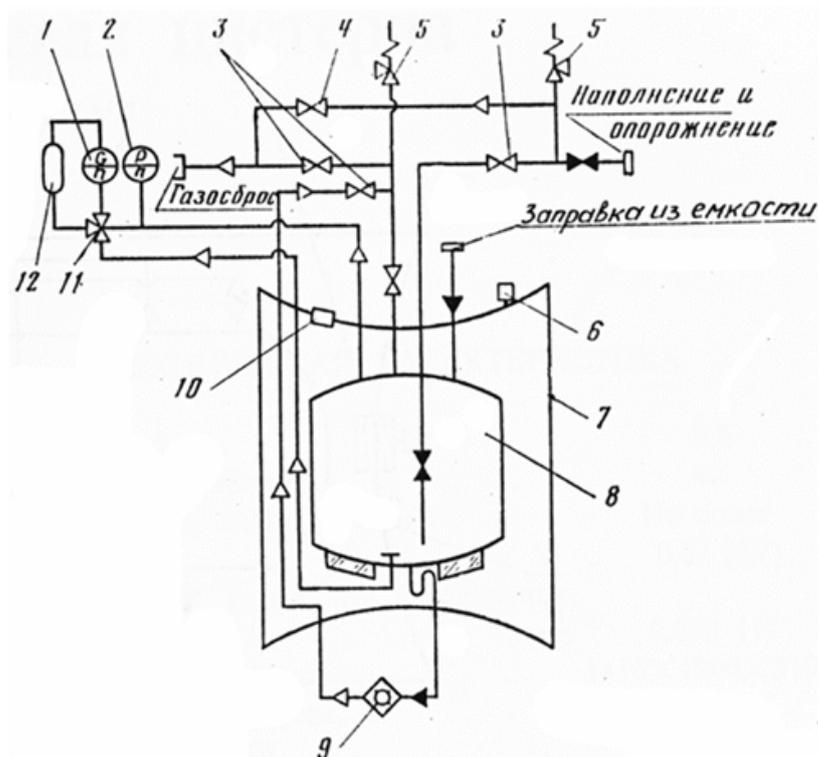


Рис. 4.9 Принципиальная схема цистерны транспортной криогенной ЦТК-0,5/0,25:

- 1 – указатель уровня, 2 – манометр, 3 – вентили запорные («Газосброс» и «Жидкость в испаритель», «Наполнение – опорожнение»),
- 4 – вентиль «Сброс из шланга», 5 – предохранительные клапана парового пространства и шланга, 6 – штуцер вакуумного пространства,
- 7 – вакуумный кожух, 8 – внутренний сосуд, 9 – обратный клапан

Все остальные цистерны серии ЦТК представляют собой горизонтально ориентированные двухстеночные сосуды. На рисунке 4.10 представлен внешний вид цистерн ЦТК-1,0/0,5 и ЦТК-1,6/0,25, которые существенно отличаются как по внешнему виду, так и по дизайну. ЦТК-1,0/0,25 воплощает конструкцию ранее использующихся в СССР цистерн серии ТРЖК, в частности ТРЖК-2У. У нее все органы управления расположены на передней горизонтальной панели и защищены от механического повреждения стальным обручем. Практика показывает, что при

эксплуатации стальной обрuch не обеспечивает надежной защиты, поэтому очень часто элементы системы повреждаются при транспортировании цистерны. В современных цистернах ЦТК- 6,0 и далее арматурный ящик выполнен таким образом, что органы управления в большей степени защищены от механических повреждений, то же относится и к элементам испарительной системы.

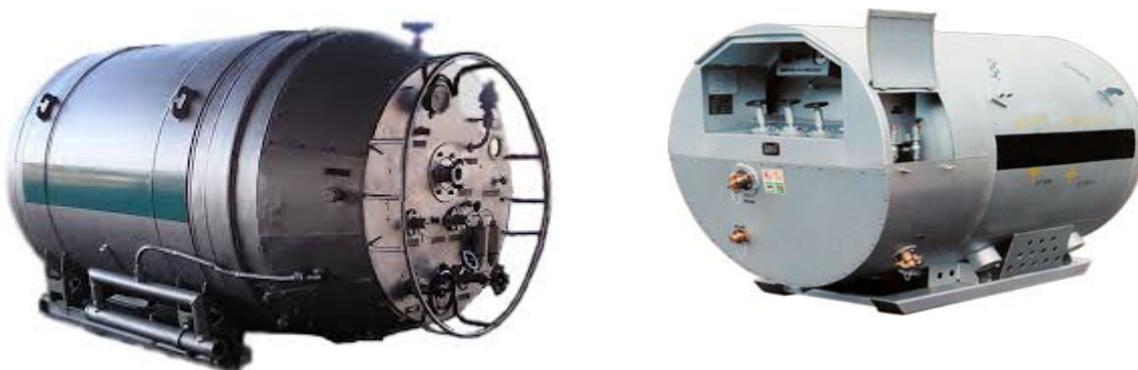


Рис. 4.10 Внешний вид цистерн ЦТК-1,0/0,25 (слева) и ЦТК-1,6/0,25 (справа)

Несмотря на разный внешний вид, принципиально технологическая схема всех цистерн этого класса имеет незначительные различия. Принцип действия будет пояснен на примере цистерны транспортной криогенной ЦТК-1,0/0,25 (рис. 4.11).

Сосуд имеет вакуумную изоляцию, однако в качестве изолирующего элемента использована засыпка вакуумного пространства порошком. Цистерна ориентирована вдоль горизонтальной оси, поэтому несколько иначе решается задача отбора жидкости в испаритель. В этих системах используются 2 испарителя, расположенных вдоль чуть ниже емкости и параллельно ее оси симметрии. Отбор жидкости в испаритель осуществляется при помощи запорного вентиля, установленного на жидкостной линии, что существенно отличает данную конструкцию от конструкции ЦТК-0,5. Наличие запорного органа для управления жидкостью не лучшее инженерное решение, потому что создает дополнительные эксплуатационные проблемы, например, неплотное закрытие вентиля и т.п.

Цистерны имеют дифманометрический указатель уровня, манометр, который расположен на передней панели арматурного ящика.

Для заправки цистерны предусмотрено 2 штуцера:

- штуцер 1 Ду 16 мм, который предназначен для выдачи сосуда Дьюара и малорасходному потребителю;
- штуцер с проходным сечением 32 мм, который используется преимущественно в случае транспортирования жидкости для наполнения и выдачи жидкости.

Так как цистерны этого класса часто работают в составе ВРУ, то их снабжают ещё одним штуцером 3, который не имеет запорной арматуры и при работе ВРУ напрямую подключен к коммуникациям автомобильной станции АКДС-70.

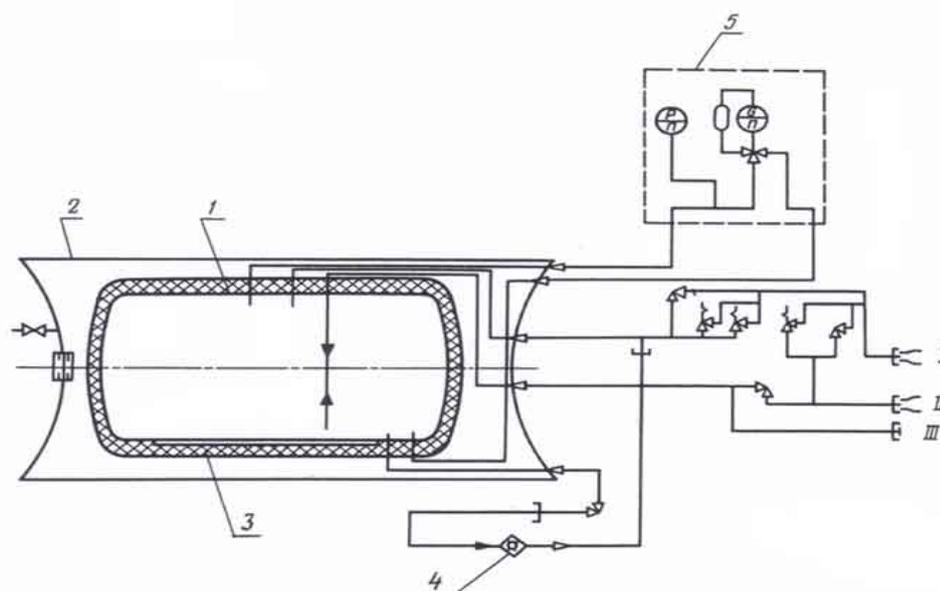


Рис. 4.11 Принципиальная схема цистерны транспортной криогенной ЦТК-1,0/0,25

- 1 – внутренний сосуд, 2 – вакуумный кожух цистерны,
- 3 – вакуумно-порошковая изоляция, 4 – обратный клапан испарителя,
- 5 – приборный щиток (манометр, указатель уровня, трехходовой вентиль отключения указателя уровня)
- I – штуцер «Наполнение-выдача» Ду=16 мм,
- II – штуцер «Наполнение-выдача» Ду=32 мм,
- III – штуцер подключения АКДС-70

### Газификационные установки

Газификаторы криопродуктов используются для перевода жидкого азота, аргона и кислорода в газообразное состояние в тех случаях, когда потребитель использует продукты разделения воздуха в виде газа или сжатого газа.

Основным преимуществом такой схемы снабжения потребителя газообразным продуктом является большой объем хранения криопродукта в жидком виде и низкие затраты на транспортировку тары. Вес криогенных емкостей, которые

используются в качестве конструктивной базы газификаторов многократно ниже веса аналогичного по объему количества баллонов для транспортирования продуктов в сжатом виде. Поэтому в конце XX века криогенные газификаторы продуктов разделения воздуха получили широкое распространение не только в промышленности, но и в медицине и сельском хозяйстве. Особенно актуально применение газификаторов в медицине, где наличие запаса кислорода в ряде случаев имеет определяющее значения для успеха медицинских операций.

По принципу действия газификаторы делятся на два класса:

- «холодные» газификаторы;
- «теплые» газификаторы или газификационные установки.

Принцип построения холодных газификаторов мало отличается от транспортной емкости (рис. 4.12), так как давление газообразного продукта на выходе из газификатора равно давлению паров в объеме криогенной цистерны.

Пример на рисунке 4.12 приведен холодный газификатор, построенный на базе криогенных цистерн ЦТК-0,5.

Газификационная установка создана путем добавления к криоцистерне 1 внешнего испарителя криопродуктов 3.

В связи с тем, что количество газифицированных продуктов определяется количеством теплоты, подведенной из окружающей среды к криогенной жидкости, штатного испарителя недостаточно, и он используется только для подъема давления паров внутри емкости. Под этим давлением жидкость выдавливается во внешний испаритель 3, который иногда принудительно обдувают атмосферным воздухом, подогревают при помощи воды или электронагревателя.

На рисунке 4.13 приведена схема холодного газификатора ГХК-3/1,6. Техническая характеристика газификатора приведена в таблице 4.4.

Этот газификатор является продуктом специально изготовленным для газификации криогенных жидкостей и представляет собой вертикально установленную цистерну с системой управления выдачи жидкости или газа. Схема приведена на рисунке. В отличие от криогенной цистерны этот газификатор имеет дополнительный внешний испаритель Z, который обеспечивает достаточно высокий расход газообразных продуктов. В отдельных случаях можно отбирать из газификатора и сжиженный продукт, для этого он снабжен вентилем V4'. В остальном принцип

действия органы управления газификатора мало отличаются от устройства криогенных емкостей.



Рис. 4.12 Внешний вид «холодного» газификатора на базе цистерны криогенной транспортной ЦТК-0,5/0,25

Технические характеристики газификаторов, приведенные в таблице 4.5, показывают, что все холодные газификаторы российского производства рассчитаны на максимальное давление 1,6 МПа, а производительность газообразного продукта может составлять от 35 до 2000 м<sup>3</sup>/ч. Емкость газификаторов варьируется от 1 м<sup>3</sup> до 25 м<sup>3</sup>. Отдельно в таблице представлен холодный газификатор построенный на базе цистерны ЦТК-0,5, который состоит из двух цистерн этого типа, наличие двух систем повышает удобство эксплуатации газификатора, так как можно производить заправку одной из емкостей не прерывая процесс выдачи продукта потребителю, что особенно важно для медицинских учреждений, поэтому данный газификатор широко распространен в больницах и клиниках.

Газификационные установки используют для подъема давления жидкости, направляемой во внешний испаритель, жидкостные насосы. Криогенные жидкости несжимаемы, поэтому, используя жидкостной насос, можно добиться значительного повышения давления и эти установки используют преимущественно для заправки баллонов вне воздухоразделительных предприятий. Как видно из таблицы 4.6 установки этого типа могут быть рассчитаны до давления 20 МПа, а в отдельных случаях до 40 МПа, что особенно важно на станциях заправки сжиженным природным газом. Производительность в н.м<sup>3</sup> таких установок может достигать 3150 м<sup>3</sup>/ч.

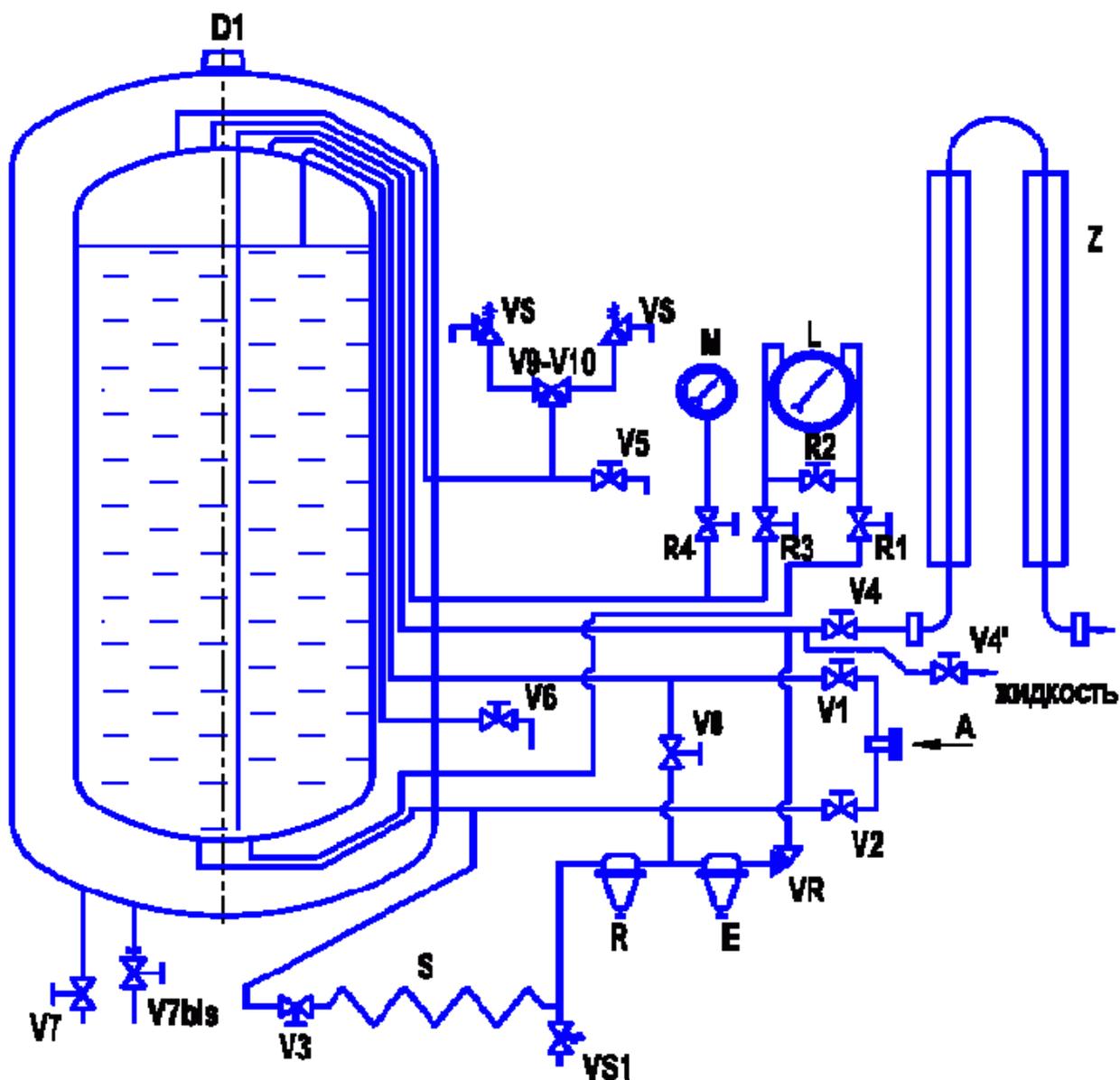


Рис. 4.13 Принципиальная технологическая схема  
холодного газификатора ГХК-3/1,6-200:

D1 – защитный диск корпуса , E – экономайзер ,L – индикатор уровня,  
M – манометр, R – регулятор давления, S – испаритель подъема давления,  
VR – обратный клапан, VS – клапан предохранительный, V1 – вентиль  
загрузки сверху, V2 – вентиль загрузки снизу, V3 – вентиль испарителя  
подъема давления, V4 – вентиль подачи жидкости на испаритель,  
V4' –вентиль выдачи жидкости из емкости,  
V5 – вентиль сброса в атмосферу, V6–вентиль перелива,  
V7–вентиль вакуумной откачки, V7bis – вентиль контроля вакуума,  
V8 – вентиль отключения E–R–S, V9–V10 – трехходовой кран,  
VS1 – предохранительный клапан испарителя подъема давления,  
R1–R3 – блок вентиляей подключения индикатора уровня,  
R4 –вентиль подключения манометра с фланцем подсоединения  
контрольного манометра.

Таблица 4.5.

## Холодные газификаторы криопродуктов

Показатель	ГХ-1-0,035/1,6	ГХК-3/1,6-200	ГХК-8/1,6-500	ГХК-8/1,6-1000	ГХК-25/1,6-500	ГХК-25/1,6-2000
Емкость, м <sup>3</sup>	0,5х2	3,2	8	8	25	25
Масса криопродукта, кг: · азота · аргона · кислорода	380х2	2300	5150	5150	18100	18100
	660х2	4010	10000	10000	31200	31200
	540х2	3290	8200	8200	25600	25600
Максимальное давление, МПа	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
Производительность, м <sup>3</sup> /ч	35	250	500	1000	500	2000
Высота газификатора, м	2,5	3,25	6,16	6,16	6,08	6,08
Занимаемая площадь, м <sup>2</sup>	7,4	13,6	21,3	41,3	32,8	86,6
Масса газификатора, кг	900	4100	7500	8500	17350	19900

Таблица 4.6

## Газификационные установки для криопродуктов

Тип	Расход газа, м <sup>3</sup> /ч	Мощность, кВт	Давление газа, МПа		Вместимость резервуара (аргон), кг
			Макс.	Раб.	
ГУ-2/20 П	200	20	32	20	3600
ГУ-2/40 П	300		42	40	
ГУ-5/20 П	450	60	32	20	6000
ГУ-5/40 П	610		42	40	
ГУ-8/20 П	450		32	20	8000
ГУ-8/40 П	610		42	40	
ГУ-18/40 П	3150	110	42	40	25700

На повышения давления затрачивается существенное количество энергии, поэтому потребляемая мощность газификационных установок этого типа составляет от 20 до 110 кВт. В отдельных случаях газификационные установки размещают на автомобильном шасси, что позволяет наполнять баллоны на удаленных объектах.

Различают 2 типа газификационных установок «теплого» типа. Это установки с внешним жидкостным насосом (рис. 4.14). Установка построена на базе цистерны ЦТК-1,6, к которой добавлен блок газификации, состоящий из пульта управления и жидкостного насоса. Так как эксплуатация таких установок сопряжена с некоторыми трудностями, в связи с тем, что на линии криопродукта неизбежно подводится теплота из окружающей среды, возможно его частичное вскипание перед насосом.

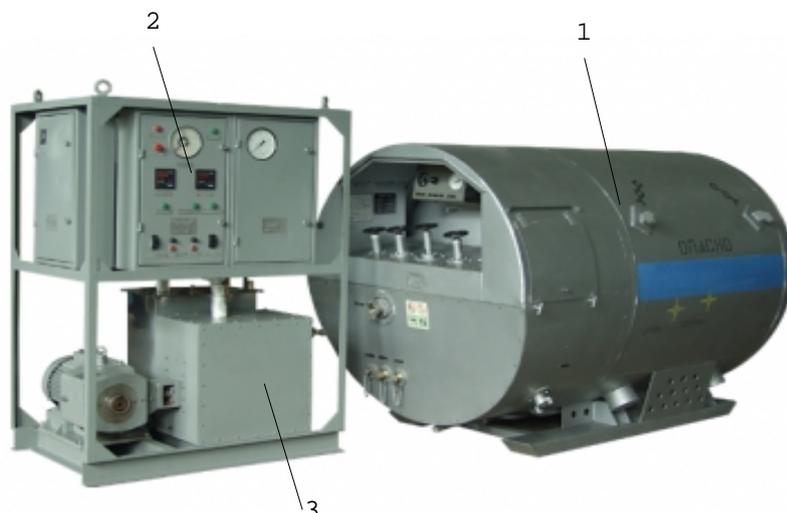


Рис. 4.14 Газификационная установка на базе криогенной транспортной цистерны ЦТК-1,6/0,25 с внешним насосом для криоагента:

- 1 – цистерна, 2 – пульт управления газификацией,
- 3 – внешний насос для криогенной жидкости

Для того чтобы этого избежать, в отдельных случаях жидкостной насос погружает в криогенную жидкость (рис. 4.15). В данном случае ГУ создана на базе серийной емкости ЦТК-1, а насос 2 размещен над емкостью. На рисунке виден только редуктор насоса, сам насос погружен в жидкость, забор жидкости производится прямо из объема хранения. Управление технологическим процессом осуществляется при помощи пульта 4.

Данная схема имеет свои недостатки, так размещения насоса в изолированном пространстве снижает качество тепловой изоляции, большое количество теплоты переносится по

движущимся частям насоса и испаряемость такого вида ГУ выше. Поэтому данная схема рекомендована для мобильных газификаторов, в которых, как правило, не осуществляется длительное хранения продукта в жидком виде. Схема с внешней установкой жидкостного насоса применяется, когда испаряемость продукта относительно не велика и основной функцией криогенной цистерны является его хранение.

В настоящее время на рынке РФ присутствует большое количество криогенных сосудов газификаторов импортного производства, построенных по холодной схеме.

Их главное отличие – это высокая степень автоматизации и повышенное разрешенное давление, которое достигает 2,5 МПа. Эти сосуды имеет широкую линейку емкостей от 40 до 2000 литров. Недостаток этих емкостей – при их заправке необходимо использовать источники криопродуктов с высоким давлением.



Рис. 4.15 Газификационная установка с погружным насосом для криопродукта на базе ЦТК-1,0/0,25:

- 1 – транспортная цистерна, 2 – редуктор привода погружного насоса,  
3 –дополнительный испаритель криопродукта,  
4 –пульт управления газификационной установкой

### Охлаждение емкости.

#### Расчет времени охлаждения

При наполнении теплой криогенной емкости сжиженным газом часть жидкости испаряется, охлаждая сосуд, изоляцию и

элементы изоляционной конструкции, служащие связями между внутренним сосудом и наружным кожухом и придающие всей конструкции жесткость. В этот нестационарный период происходит понижение температуры изоляции и всей изоляционной конструкции. Через некоторое время охлаждение изоляционной конструкции прекращается и наступает стационарный период. Испарение криогенной жидкости в стационарный период происходит только за счет тепла, проникающего из окружающей среды через изоляционную конструкцию.

Рассмотрим процесс охлаждения сферической емкости. Полагаем, что температура стенки внутреннего шара емкости постоянна и равна температуре криогенной жидкости, а температура стенки наружного шара также постоянна и равна температуре окружающей среды. Это допущение не дает сколь угодно существенного искажения вследствие того, что  $\lambda/\alpha$  имеет малое значение:

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи от наружного воздуха к поверхности кожуха (от поверхности внутреннего шара к жидкости),

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности изоляции.

Выделим элемент изоляции, представляющий элементарный ее объем, ограниченный сечениями, образующими центральные углы  $d\varphi_1$  и  $d\varphi_2$  и сферическими поверхностями с радиусами  $r$  и  $(r + dr)$  (рис. 4.16).

Согласно закону Фурье количество тепла, проникающего через элементарную шаровую поверхность радиуса  $r$ , за время  $d\tau$  составит:

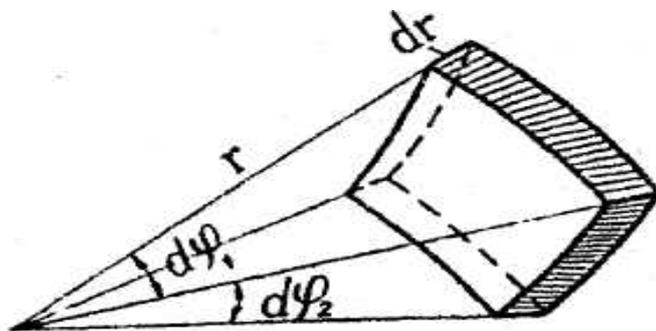


Рис. 4.16 Элементарный шаровой слой

$$Q_1 = -\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \cdot dF \cdot d\tau = -\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \cdot r^2 d\varphi_1 d\varphi_2 d\tau \quad (4.2)$$

Через элементарную шаровую поверхность с радиусом

$(r+d/r)$  за то же

время при ее температуре  $(T + \frac{\partial T}{\partial r} dr)$  пройдет тепла:

$$dQ_2 = -\lambda \frac{\partial T}{\partial r} (T + \frac{\partial T}{\partial r} dr) (r + d/r)^2 d\varphi_1 d\varphi_2 d\tau - \lambda (\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} dr) (r^2 + r dr + \partial r^2) d\varphi_1 d\varphi_2 d\tau \quad (4.3)$$

Пренебрегая бесконечно малыми высшего порядка, получаем

$$dQ_2 = -\lambda (\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} dr) (r^2 + r dr + \partial r^2) d\varphi_1 d\varphi_2 d\tau \quad (4.4)$$

Разность входящего в выделенный элемент и выходящего из него потоков тепла аккумулируется этим элементом. Количество аккумулированного тепла:

$$dQ = cdv \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} \cdot \partial \tau = c\rho (r + \frac{dr}{2})^2 \cdot d\varphi_1 d\varphi_2 \cdot dr \frac{\partial T}{\partial \tau} \cdot \partial \tau; \\ dQ = c\rho (r^2 + r dr) d\varphi_1 d\varphi_2 dr \frac{\partial T}{\partial \tau} \partial \tau \quad (4.5)$$

Приравниваем названные тепловые потоки:

$$dQ = dQ_1 - dQ_2 = -\lambda \frac{\partial T}{\partial r} r^2 d\varphi_1 d\varphi_2 d\tau + \\ \lambda (\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} dr) (r^2 + r dr + \partial r^2) d\varphi_1 d\varphi_2 d\tau = c\rho (r^2 + \\ r dr) d\varphi_1 d\varphi_2 dr \frac{\partial T}{\partial \tau} \partial \tau$$

Или после упрощений:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} r^2 + \lambda \frac{\partial T}{\partial r} r^2 + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} dr \cdot r^2 + 2\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \partial r + 2\lambda r \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} dr^2 = \\ c\rho r^2 \frac{\partial T}{\partial \tau} \partial r + c\rho r \frac{\partial T}{\partial \tau} dr^2 \quad (4.6)$$

Пренебрегая бесконечно малыми высшего порядка, получаем после упрощений:

$$c\rho r^2 \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} r^2 + 2\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \quad (4.7)$$

Откуда

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (4.8)$$

Учитывая, что  $\frac{\lambda}{c\rho} = a$  коэффициент температуропроводности, получаем:  $\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right)$

В уравнениях (4.2)–(4.9), кроме ранее принятых, введены такие обозначения:

$C$  – теплоемкость материала изоляции, Дж/кг·К

$\rho$  – плотность материала изоляции, кг/м<sup>3</sup>

$T$  – температура, К

$\tau$  – время

Граничные условия: при  $r = r_{вн}$   $T = T_{ж} = const$

при  $r = r_{кож}$   $T = T_{o.c.} = const$

Здесь  $r_{вн}$  – наружный радиус внутреннего шара, м;  $T_{ж}$  – температура криогенной жидкости в емкости, К;  $r_{кож}$  – наружный радиус кожуха, ограждающего изоляцию, м;  $T_{o.c.}$  – температура окружающей среды, К. Коэффициент теплоотдачи от стенки внутреннего шара к жидкости –  $\alpha_l$ , Вт/м<sup>2</sup>.К. Коэффициент теплоотдачи от окружающей среды к кожуху –  $\alpha$ , Вт/м<sup>2</sup>.К.

Решение уравнения (4.9) осуществляем методом конечных разностей. Этот метод, как известно, заменяет непрерывное изменение температуры во времени и пространстве скачкообразным. Метод конечных разностей является приближенным, но при достаточно малых интервалах изменения времени и радиуса дает удовлетворительные результаты.

Шаровой слой изоляции ( $r_{вн} \leq r \leq r_n$ ) разбиваем на ряд концентрических слоев  $i$  толщиной  $\Delta R$  ( $i = 0, 1, 2, \dots, n$ ), а время ( $0 \leq \tau \leq \tau_{кон}$ ) – на отрезки  $K$  продолжительностью  $\Delta \tau$  ( $K = 0, 1, 2, \dots, m$ ).

Уравнение (4.9) в этом случае принимает вид:

$$\frac{T_i^{k+1} - T_i^k}{\Delta \tau} = \alpha \left( \frac{T_{i+1}^k - 2T_{i,k} + T_{i-1,k}}{\Delta r^2} + \frac{2}{r} \frac{T_{i+1}^k - 2T_{i,k} + T_{i-1,k}}{2\Delta r} \right) \quad (4.10)$$

Откуда  $T_i^{k+1} = T_i^k + \alpha \Delta \tau \left( \frac{T_{i+1}^k + T_{i-1,k}}{r \Delta r^2} - \frac{2T_{i,k}}{\Delta r^2} + \frac{T_{i+1}^k + T_{i-1,k}}{r \Delta r} \right)$ , или

$$T_i^{k+1} = \frac{\alpha \Delta \tau}{\Delta r^2} (T_{i+1}^k + T_{i-1,k}) + \frac{\alpha \Delta \tau}{r \Delta r} (T_{i+1}^k + T_{i-1,k}) + \left( 1 - \frac{2\alpha \Delta \tau}{\Delta r^2} \right) T_{i,k} \quad (4.11)$$

Перепишем уравнения (4.11) в таком виде:

$$T_i^{k+1} = \frac{\alpha \Delta \tau}{\Delta r^2} \left( 1 + \frac{\Delta r}{r} \right) T_{i+1}^k + \frac{\alpha \Delta \tau}{\Delta r^2} \left( 1 - \frac{\Delta r}{r} \right) T_{i-1}^k + \left( 1 - \frac{2\alpha \Delta \tau}{\Delta r^2} \right) T_{i,k} \quad (4.12)$$

Задавись при расчете величиной разбиения по радиусу  $\Delta R$ , величину  $\Delta \tau$  определяем из условия

$$\frac{2\alpha \Delta \tau}{\Delta R^2} = 1 \quad (4.13)$$

Отсюда

$$\Delta \tau = \frac{\Delta R^2}{2\alpha} \quad (4.14)$$

В этом случае уравнение (4.11) принимает вид

$$T_i^{k+1} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\Delta r}{r} \right) T_{i+1}^k + \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{\Delta r}{r} \right) T_{i-1}^k \quad (4.15)$$

При нахождении изменения температуры в процессе охлаждения емкости исходим из начальной постоянной температуры изоляции, равной температуре окружающей среды  $T_{o.c.}$

Уравнение (4.15) позволяет, исходя из известного

распределения температуры в середине слоев изоляции в момент  $k \cdot \Delta t$ , определить температуры середины слоев изоляции в момент  $(k + 1) \Delta t$ . Так, идя от начального распределения, можно шаг за шагом найти распределение температуры насадки, в середине слоев в последующие моменты времени. Охлаждение изоляции заканчивается, когда температура изоляции перестает изменяться, т.е. когда наступает стационарный режим. Такой расчет позволяет исходя из получаемого распределения температуры для любого момента времени, прошедшего от заполнения емкости, найти количество тепла, проникшего из окружающей среды в изоляцию, отведенного от изоляции и подведенного внутри сосуда. Метод конечных разностей позволяет учесть изменение физических свойств изоляции с изменением температуры. При изменении коэффициента температуропроводности изоляции  $a$  отрезок времени  $\Delta t$  будет изменяться согласно уравнению (4.14).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по физико-техническим основам криогеники. Под ред. М.П.Малкова. Изд.2-е, доп. и перер. М., "Энергия", 1973.
2. Акулов Л.А., Борзенко Е.И., Зайцев А.В. Теплофизические свойства и фазовое равновесие криопродуктов: Справ. – СПбГУНиПТ, 2009.
3. Ильинский А.А. Транспорт и хранение промышленных сжиженных газов. М., "Химия", 1976.
4. Каганер М.Г. Тепловая изоляция в технике низких температур, М., "Машиностроение", 1966.
5. Абрамов Г.П., Бродянский В.М. Хранение и транспорт сжиженных газов Учебное пособие. М., Изд. МЭИ, 1975.
6. Яковлев Е.М. Газовые сети и газохранилища: Учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Недра, 1991.
7. "Кислород". Справочник. Под ред. Д.Л. Глизманенко, Т.2. М., "Металлургия", 1973.
8. Рипс С.М. Хранение, транспортировка и газификация кислорода. М., Машгиз, 1959.
9. "Кислород". Справочник. Поп, ред. Д.Л. Глизманенко. Ч.2. М., "Металлургия", 1967.
10. Герш С.Я. Глубокое охлаждение. Ч.2, М.-Л., Госэнергоиздат, 1960.
11. Электронный ресурс <http://www.geliymash.ru/products/>
12. Электронный ресурс <http://www.agtsamara.ru/>
13. Электронный ресурс <http://www.xn--80affk5ct.xn--p1ai/gazifustanovki.html>

**Миссия университета** – генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.

---

## **КАФЕДРА КРИОГЕННОЙ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА**

Основана 30 августа 1953 года, имеет богатую историю, сложившиеся традиции и перспективные планы развития. В 2012 году научная школа кафедры «Техника и физика низких температур» вошла в список ведущих научных школ Университета ИТМО.

Кафедра обеспечивает подготовку специалистов в области криогенных (сверхнизких) температур. Подготовка высококвалифицированных кадров (бакалавров и магистров техники и технологии) ведется по пяти профессиональным образовательным программам бакалавриата:

- 14.03.01 Ядерная энергетика и теплофизика, профиль «Техника и физика низких температур»;
  - 16.03.03 Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения, профиль «Криогенная техника и технологии»;
  - 16.03.03 Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения, профиль «Низкотемпературная техника и энергетика»;
- и магистратуры:
- 16.04.03 Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения по программам «Системы ожижения и разделения газов и их транспортирование» и «Технологии СПГ».

Основные научные направления кафедры:

- Ожижение, хранение и транспортирование природного газа;
- Криомедицинские системы (криохирургия, системы криогенного хранения);
- Криотерапевтические системы;
- Твердотельные сегнетоэлектрические охладители;
- Криостатирование сверхпроводящих систем;
- Получение сверхчистых газов;
- Поршневые детандеры и компрессоры;
- Безмасляные вакуумные насосы;
- Криогенная адсорбция.

Баранов Александр Юрьевич  
Соколова Екатерина Владимировна

**ХРАНЕНИЕ И ТРАНСПОРТИРОВКА  
КРИОГЕННЫХ ЖИДКОСТЕЙ.  
ЧАСТЬ 1**

**Учебное пособие**

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе