ПРЕДИСЛОВИЕ

Техника низких температур развивается бурными темпами. Она вторгается в самые различные отрасли науки и народного хозяйства. В связи со все более широким применением кислорода в черной и цветной металлургии, химической и других отраслях промышленности быстро растет отечественное кислородное машиностроение.

Широкое внедрение низких температур потребовало серьезного усовершенствования теплоизоляции, защищающей холодную аппаратуру от притока тепла из окружающей среды. Это требование было удовлетворено в результате разработки и внедрения в промышленность новых эффективных видов изоляции с использованием вакуума, позволивших снизить потери сжиженных газов от испарения при хранении и транспортировании в пять-десять и более раз.

По тепловой изоляции, применяемой в теплотехнике (область температур выше 300° К) и технике умеренного холода (область температур 150—300° К), в Советском Союзе и за рубежом опубликовано большое число монографий и справочников. Однако работ, посвященных тепловой изоляции для техники глубокого охлаждения (область температур ниже 150° К), крайне мало. Опубликованные за последние годы в периодической литературе многочисленные работы по низкотемпературной изоляции нашли лишь частичное освещение в книгах по технике низких температур.

В данной монографии сделана попытка систематизировать имеющиеся в литературе разрозненные опытные данные по теплоизоляции для низких температур, обобщить накопленный опыт, дать теоретический анализ ряда закономерностей теплообмена в низкотемпературной изоляции. Полученные на основе анализа

формулы позволяют рассчитать теплообмен в изоляции и дают согласующиеся с экспериментальными данными результаты. В книге использованы наряду с другими данными результаты исследований, выполненных во ВНИИКИМАШ (Всесоюзном научно-исследовательском институте криогенного, кислородного и компрессорного машиностроения).

АВТОР

Введение

Теплоизоляция в технике низких температур защищает аппаратуру от притока тепла из окружающей среды. Требования к эффективности теплоизоляции низкотемпературного оборудования возрастают по мере понижения температуры, так как при этом, с одной стороны, увеличивается теплоприток через изоляцию, т. е. потери холода и, с другой стороны, резко возрастает стоимость потерь холода.

Кроме того, теплота парообразования различных жидкостей, отнесенная к единице объема, тем меньше, чем ниже их температуры кипения. Следовательно, небольшое количество тепла вызывает испарение сравнительно большого количества сжиженного газа с низкой температурой кипения. Отсюда ясно, почему к теплоизоляции для низких температур предъявляются особенно высокие требования по уменьшению тепловых потоков через нее. Эти требования тем выше, чем меньше размеры изолируемого оборудования, т. е. больше его удельная поверхность.

Основным требованием к теплоизоляции, применяемой в криогенной технике, является, как это ясно из изложенного, минимальная величина коэффициента теплопроводности. Коэффициент теплопроводности некоторых изоляционных материалов, применяемых при низких температурах, лишь в 1,5—2 раза больше теплопроводности спокойного воздуха, а аэрогель кремниевой кислоты имеет даже более низкий, чем у воздуха коэффициент теплопроводности.

Еще на заре развития криогенной техники исследователи столкнулись с невозможностью сколько-нибудь длительного хранения небольших количеств жидкого воздуха в сосудах с обычной (насыпной) изоляцией. Решение проблемы впервые нашел д'Арсонваль, изготовивший в 1887 г. цилиндрические стеклянные сосуды с двойными стенками, из пространства между которыми был откачан воздух, т. е. сосуды с вакуумной изоляцией. При создании в изоляционной полости достаточно высокого вакуума перенос тепла теплопроводностью газа практически исключается, и приток тепла из окружающей среды осуществляется, в основ-

ном, излучением. Заслуга значительного усовершенствования сосудов с вакуумной изоляцией принадлежит Дж. Дьюару, который разработал в 1893 г. способ уменьшения переноса тепла излучением путем серебрения стеклянных стенок сосуда. Дьюар предложил также использовать адсорбент (активированный уголь) для улучшения и длительного сохранения вакуума, что позволило изготовлять сосуды из металлов, выделяющих в вакууме большое количество газов по сравнению со стеклом. Сосуды с вакуумной изоляцией обычно называют «сосудами Дьюара», а иногда и просто «дьюарами». Они широко применяются и в настоящее время.

В 1910 г. польский ученый М. Смолуховский опубликовал результаты своих работ по теплопередаче через порошки в условиях вакуума. Он установил, что коэффициент теплопроводности порошков быстро снижается при уменьшении давления газа. Поток тепла через пространство, заполненное некоторыми порошками при низком вакууме, был близок по величине к потоку через пустое пространство при высоком вакууме между стенками с высокой отражательной способностью. Опыты Смолуховского и развитая им теория наметили пути изучения вакуумно-порошковой изоляции. Исторический обзор исследований этого вида изоляции до 1959 г. дан в работе [62]. Промышленное применение вакуумно-порошковой изоляции началось лишь в 40-х годах нашего века. С тех пор эта изоляция получила широкое распространение в технике низких температур.

Значительный вклад в усовершенствование низкотемпературной теплоизоляции внес П. Петерсен, опубликовавший [113] в 1958 г. результаты своих опытов. Он испытал, в частности, вакуумно-порошковую изоляцию с экранированием излучения металлическим порошком, которая применяется в настоящее время в сосудах для сжиженных газов.

Петерсен применил также способ, уменьшающий перенос тепла в вакуумной изоляции излучением. При этом способе на изолируемый сосуд наматываются экраны из алюминиевой фольги, разделенные стекловолокнистыми матами. Эта изоляция, представляющая собой в сущности помещенную в вакуумированное пространство изоляцию типа «альфоль», получила название вакуумно-многослойной, экранно-вакуумной, вакуумно-слоистой суперизоляции (наиболее обоснованным можно считать первое название). Она является наиболее эффективной из известных видов изоляции и все шире внедряется в технику низких температур.

Теплообмен во всех видах низкотемпературной изоляции осуществляется излучением, теплопроводностью газа и твердого тела. Анализ теплообмена осложняется тем, что помещаемые в изоляционное пространство материалы имеют дисперсную структуру. Проблемам переноса тепла теплопроводностью и излучением в дисперсных средах посвящены известные монографии проф. А. Ф. Чудновского и проф. К. С. Шифрина, а также ряд работ других советских ученых. В настоящей книге эти проблемы рассматриваются применительно к тепловой изоляции.

Теплоперенос теплопроводностью газа в широком диапазоне от атмосферного давления до высокого вакуума определяется отношением длин свободного пробега молекул газа между соударениями друг с другом (L) и между соударениями их со стенками твердого тела (l). Расчет переноса тепла газом зависит от правильного подхода к оценке величины l, определяемой структурой дисперсного материала.

Теплоперенос теплопроводностью в зернистых материалах обычно рассчитывают, принимая какую-либо упорядоченную (например, кубическую или тетраэдрическую) укладку зерен. Рассматривая зернистый материал, как слой беспорядочно расположенных зерен, в котором число касаний одного зерна с соседними взаимосвязано с пористостью материала, удалось получить новую формулу для определения коэффициента теплопроводности зернистых материалов. Использование теории контактного теплообмена позволило также найти зависимость коэффициента теплопроводности зернистых и волокнистых материалов от механического давления на них.

Лучистый тепловой поток в изоляции ослабляется в результате рассеяния и поглощения изоляционным материалом. Он (поток) задерживается также металлическими экранами в виде фольги или мелких частиц. Теория рассеяния излучения отдельными частицами продвинулась довольно далеко в своем развитии, чего нельзя сказать о теории переноса излучения в дисперсных средах. Сопоставление результатов экспериментального исследования вакуумно-порошковой изоляции с данными теории для отдельных частиц дает возможность оценить влияние различных факторов на рассеяние излучения малыми частицами в дисперсных средах.

Как видно, все виды теплообмена в дисперсной среде зависят в первую очередь от ее структуры. Поэтому изучение структуры (размеров частиц и пор, удельной поверхности) является важной составной частью исследования теплообмена в низкотемпературной изоляции.

ГЛАВА I

Перенос тепла в изоляции теплопроводностью

Теплопроводность является одним из основных способов переноса тепла в изоляции. Тепло передается по твердому скелету изоляционного материала и через газ, заполняющий пустоты в изоляции.

По мере увеличения пористости материала последний путь становится преобладающим. Поэтому коэффициент теплопроводности лучших теплоизоляционных материалов приближается по величине к теплопроводности заполняющего газа, которым обычно является воздух.

Согласно основному уравнению теории теплопроводности установившийся (стационарный) тепловой поток через изотермическую поверхность тела равен

$$q = -\lambda \operatorname{grad} T, \tag{1}$$

где $\operatorname{grad} T$ — температурный градиент, равный изменению температуры на единицу длины нормали к изотермической поверхности;

λ — коэффициент теплопроводности тела.

Величина температурного градиента определяется обычно условиями работы изолируемого оборудования. Поэтому основной способ уменьшения теплового потока через изоляцию состоит в понижении ее коэффициента теплопроводности. Это стало возможным в первую очередь в результате уменьшения переноса тепла газом при создании вакуума.

В общем виде, при нестационарных условиях, уравнение теплопроводности имеет вид

$$a\nabla^2 T = \frac{\partial T}{\partial \tau}, \tag{2}$$

где $\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$ — оператор Лапласа;

τ — время;

$a = \frac{\lambda}{c\rho}$ — коэффициент температуропроводности тела;

c — теплоемкость;

ρ — плотность.

Точные решения уравнения (2) найдены для ряда относительно простых случаев, один из которых рассмотрен в гл. IX.

В этой главе рассматриваются особенности теплообмена теплопроводностью при стационарном состоянии в условиях работы тепловой изоляции.

Перенос тепла теплопроводностью газа

Кинетическая теория газов обычно рассматривает два крайних случая переноса тепла проводимостью газа, а именно $L \ll \delta$ и $L \gg \delta$ (L — средняя длина свободного пробега молекул в газе, δ — расстояние между теплообменивающимися поверхностями). Отношение $\frac{L}{\delta}$ называют критерием Кнудсена и обозначают Кп.

Средняя длина свободного пробега связана с давлением p и температурой T газа соотношением

$$L = \frac{k}{p} \cdot \frac{1}{1 + \frac{T_y}{T}}, \tag{3}$$

где k и T_y — постоянные, зависящие от рода газа. Для воздуха $k = 8{,}42 \cdot 10^{-3}$ *н/м* и $T_y = 113°$ К.

При условии Кп $\ll 1$ теплопроводность согласно теории не зависит от величины давления газа и связана с коэффициентом динамической вязкости μ и изохорной теплоемкостью c_v газа соотношением

$$\lambda = \varepsilon \mu c_v, \tag{4}$$

где $\varepsilon = \frac{9\gamma - 5}{4}$, (5)

γ — отношение изобарной и изохорной теплоемкостей.

Расстояние между стенками сосудов с высоковакуумной теплоизоляцией обычно порядка 1 *см*. Средняя длина пробега молекул в воздухе при 293° К и давлениях более 10 *н/м*^{2} ($7{,}5 \times \times 10^{-2}$ *мм рт. ст.*) не превышает 0,06 *см*. Следовательно, в этом случае перенос тепла не зависит от величины давления.

При достаточно низких давлениях, когда выполняется условие Кп $\gg 1$, молекулы газа пролетают от стенки к стенке, не

сталкиваясь между собой. В этих условиях количество переносимой теплоты пропорционально количеству молекул, принимающих участие в теплообмене и, следовательно, давлению газа. При увеличении расстояния между стенками увеличивается путь молекул, а также возрастает их количество, приходящееся на единицу поверхности. В результате скорость переноса теплоты не зависит от расстояния между стенками. Поэтому здесь неприменимо понятие коэффициента теплопроводности, выражающего проводимость вещества, отнесенную к единице толщины его слоя.

Кинетическая теория газов приводит [13] в случае $Kn \gg 1$ к следующему решению для переноса тепла между двумя поверхностями, которые расположены одна внутри другой или параллельны

$$Q = \alpha \frac{\gamma+1}{\gamma-1} \sqrt{\frac{R}{8\pi}} \frac{p}{\sqrt{MT}} F_1 (T_2 - T_1); \qquad (6)$$

$$\alpha = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{F_1}{F_2}\left(\frac{1}{\alpha_2} - 1\right)}, \qquad (7)$$

где Q — количество переносимого тепла;
α — коэффициент аккомодации;
R — универсальная газовая постоянная;
M — молекулярная масса;
F — площадь поверхности.

Индексы 1 и 2 относятся соответственно к внутренней и наружной поверхности.

Коэффициент аккомодации учитывает неполноту обмена энергией между молекулами газа и поверхности и определяется выражением

$$\alpha = \frac{T_2' - T_1}{T_2 - T_1}, \qquad (8)$$

где T_1 — температура, соответствующая энергии молекул, ударяющихся с поверхностью с температурой T_2;
T_2' — температура, соответствующая энергии отраженных молекул.

Если $T_2' = T_2$, то $\alpha = 1$, т. е. отраженные от стенки молекулы имеют энергию, соответствующую температуре стенки. В действительности коэффициент аккомодации всегда меньше единицы. Согласно теории

$$\alpha = \frac{4mm'}{(m+m')^2} = 1 - \left(\frac{m-m'}{m+m'}\right)^2, \qquad (9)$$

где m' — масса молекул газа;
m — масса молекул твердой поверхности.

Из уравнения (9) следует, что α понижается по мере уменьшения массы молекул газа. Экспериментальные данные подтверждают это положение. Коэффициент аккомодации зависит также от температуры и состояния поверхности. Большое влияние на него оказывает наличие на поверхности адсорбированных газов. В этом случае молекулы газа сталкиваются не с тяжелыми молекулами твердого тела, а с адсорбированными на нем более легкими молекулами, что приводит к увеличению α в соответствии с уравнением (9). При отсутствии адсорбированных газов $\alpha = 0{,}05 \div 0{,}07$ для гелия и неона, тогда как при наличии адсорбированной пленки α приближается для ряда газов к 1. Коэффициент аккомодации резко возрастает вследствие адсорбции на поверхности: по данным одних исследований при $p = 0{,}04$—$0{,}07$ *н/м²* (3—$5{,}25 \cdot 10^{-4}$ *мм рт. ст.*), по другим данным — при $p = 1{,}5$—7 *н/м²* ($1{,}12$—$5{,}25 \cdot 10^{-2}$ *мм рт. ст.*).

Коэффициент аккомодации на чистой металлической поверхности при 300° К равен 0,3 для гелия и водорода, 0,7 для неона, 0,8—0,9 для азота и кислорода. Если температура понижается, то α увеличивается, приближаясь к 1 при температуре конденсации газа.

При выводе уравнения (6) принимается, что температура T представляет собой эффективную температуру неравновесного газа. Это приводит часто к ошибочному заключению, что вместо T следует подставлять среднюю температуру газа, равную $\frac{T_1 + T_2}{2}$.

В системах с $L \gg \delta$ имеет место эффект термической транспирации (существование градиента давления при наличии температурного градиента), выражающийся законом $p/\sqrt{T} = \text{const}$. Величина $p/\sqrt{T}$ входит в уравнение (6) и согласно его выводу не должна зависеть от места измерения в системе. На практике давление в системе измеряют манометром, находящимся при температуре окружающей среды. Эту температуру и следует подставлять вместо T в уравнение (6).

Постоянная $\sqrt{\frac{R}{8\pi}}$ в уравнении (6) равна 18,2, если $q = \frac{Q}{F}$ выражено в *вт/м²*, p в *н/м²* и T в °К. Для случая переноса тепла воздухом уравнение приводится к виду

$$q = \frac{Q}{F_{вн}} = 0{,}93 p (T_2 - T_1). \qquad (10)$$

Процесс переноса теплоты газом при промежуточных давлениях, при которых средняя длина пробега молекул имеет тот же порядок, что и расстояние между стенками, имеет более сложный характер. Рассмотрение облегчается введением понятия температурного скачка между стенкой и газом при наличии градиента температуры. Величина скачка [13, 47] равна

$$\Delta T = \frac{2\varepsilon}{\gamma+1} \frac{2-\alpha}{\alpha} L \frac{dT}{dn} = \frac{2\gamma}{\gamma+1} \frac{1}{\mathrm{Pr}} \frac{2-\alpha}{\alpha} L \frac{dT}{dn}, \qquad (11)$$

где $\frac{dT}{dn}$ — градиент температуры, нормальный к поверхности;

$\mathrm{Pr} = \frac{\mu}{a\rho}$ — критерий Прандтля.

В частности, для одноатомных газов $\gamma = \frac{5}{3}$, откуда $\varepsilon = \frac{5}{2}$ и $\frac{2\varepsilon}{\gamma+1} = \frac{15}{8} = 1{,}875$. Более точный вывод для одноатомного газа показывает, что $\frac{2\varepsilon}{\gamma+1} = \frac{75\pi}{128} = 1{,}84$.

В результате существования температурного скачка у граничных стенок перенос тепла газом уменьшается так же, как при увеличении расстояния δ между стенками на величину $\frac{2\Delta T}{\frac{dT}{dn}}$.

Тепловой поток в этом случае

$$Q = \frac{\lambda_0 F (T_2 - T_1)}{\delta + \frac{2\Delta T}{\frac{dT}{dn}}} = \frac{\lambda_0 F (T_2 - T_1)}{\delta (1 + 2\beta\,\mathrm{Kn})}, \qquad (12)$$

где $\beta = \frac{2\varepsilon}{\gamma+1} \cdot \frac{2-\alpha}{\alpha}$;

λ_0 — коэффициент теплопроводности газа при атмосферном давлении, определяемый формулой (4).

Уравнение (12) иногда представляют в виде зависимости коэффициента теплопроводности газа от критерия Кнудсена

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{1 + 2\beta\,\mathrm{Kn}}. \qquad (13)$$

При этом следует иметь в виду, что величина λ, выражаемая уравнением (13), в действительности не является коэффициентом теплопроводности, так как зависит от расстояния δ между теплообменивающимися стенками.

Уравнение (12) при давлениях, близких к атмосферному, сводится к обычной форме уравнения теплопроводности, а при низких давлениях — к уравнению (6).

В случае цилиндрических граничных стенок уравнение (12) заменяется на

$$Q = \frac{2\pi r_1 \lambda (T_2 - T_1) l}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1} + 2\beta L \left(\frac{r_1}{r_2} + 1\right)}, \qquad (14)$$

где r_1 и r_2 — радиусы внутренней и наружной стенок.

Приведенные на рис. 1 опытные кривые по тепловому потоку через воздух между стенками сосуда Дьюара удовлетворительно согласуются с уравнением (12). Коэффициент аккомодации здесь равен 1. Переходная область охватывает диапазон $0{,}05 < \mathrm{Kn} < 5$. В сосудах Дьюара для жидкого кислорода расстояние между стенками находится в пределах 10—20 *мм*. В этом случае перенос тепла газом начинает уменьшаться при давлениях ниже 5 *н/м²* и при давлении менее 0,1 *н/м²* изменяется пропорционально давлению. Для уменьшения переноса тепла теплопроводностью остаточных газов до весьма малой величины (не более 5%

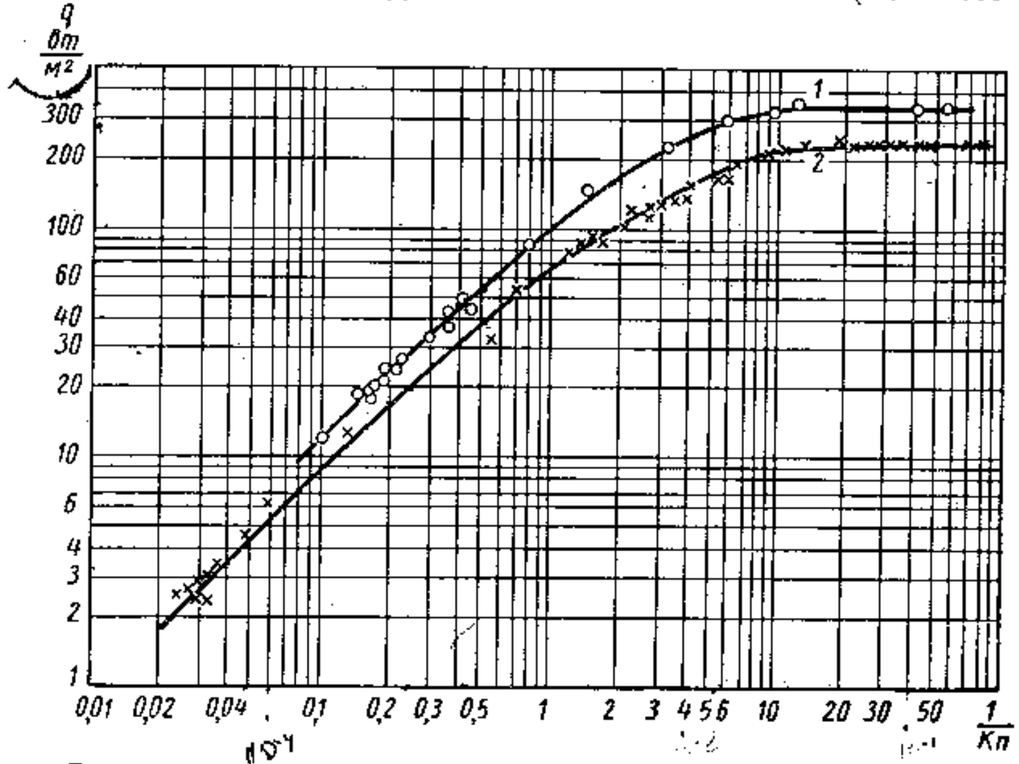


Рис. 1. Зависимость удельного теплового потока через воздух от критерия Кнудсена:

1 — сосуд Дьюара емкостью 5 *дм³*; *2* — сосуд Дьюара емкостью 15 *дм³*

от переноса тепла излучением) необходимо поддерживать в межстенном пространстве сосуда Дьюара давление не более 0,001 *н/м²*. Результаты испытаний показывают, что в сосудах Дьюара удается на практике поддерживать такое и даже более низкое давление.

Перенос тепла в дисперсных средах

Механизм теплообмена в дисперсных средах весьма сложен. Его теоретическому и экспериментальному исследованию посвящено много работ; подробный анализ многих из них дан в монографиях [65] и [66].

Теплообмен в дисперсной среде осуществляется посредством:

а) теплопроводности вдоль отдельной частицы — элемента твердого скелета материала;

б) контактного теплообмена между соседними частицами в местах их касания;

в) теплопроводности газа, заполняющего промежутки между частицами;

г) конвекции в газе между частицами;

д) излучения от частицы к частице.

В данном разделе рассматривается только перенос тепла теплопроводностью газа и твердого тела, составляющий в условиях атмосферного давления и низких температур в большинстве случаев более 90% от полного теплового потока. Для зернистых сред наилучшее приближение теории к эксперименту дают уравнения, в основу которых положена модель в виде слоя плотно уложенных шаров. К этим уравнениям относятся формулы В. З. Богомолова, А. С. Ляликова [38] и Г. Н. Дульнева и З. В. Сигаловой [12].

Формула В. З. Богомолова

$$\frac{\lambda}{\lambda_г} = \frac{3\pi}{k}\left(\frac{1}{k}\ln\frac{1-0{,}82\frac{r}{r+a}k}{1-k\frac{r}{r+a}} - 0{,}09\frac{r}{r+a}\right). \qquad (15)$$

где $k = 1 - \frac{\lambda_г}{\lambda_м}$;

λ, $\lambda_г$ и $\lambda_м$ — теплопроводность зернистого слоя, заполняющего его газа и материала зерен;

r — радиус зерен;

a — толщина газовой прослойки между зернами в местах, соответствующих контактам (наибольшему сближению).

Принимая $k = 1$ и $a = r\frac{m-0{,}26}{3(1-m)}$ (m — пористость), получаем упрощенное уравнение

$$\frac{\lambda}{\lambda_г} = 3\pi\ln\frac{0{,}43+0{,}31m}{m-0{,}26}. \qquad (16)$$

В работе [38] показано, что при выводе уравнения (15) допущена ошибка: численный коэффициент в уравнениях (15) и (16) равен 3 вместо 1,5. Однако уравнение (16) лучше согласуется с опытными данными при коэффициенте 3, который должен рассматриваться как эмпирический.

Формула А. С. Ляликова

$$\frac{\lambda}{\lambda_г} = \frac{6(1-m)}{k}\left(\frac{1}{k}\ln\frac{1+\frac{\delta_0}{r}}{1+\frac{\delta_0}{r}-k} - 1\right), \qquad (17)$$

где $\delta_0 = \frac{1{,}7\cdot10^{-8}}{p}$ м (давление в $н/м^2$) — член, учитывающий температурный скачок между зернами и газом.

Формула Г. Н. Дульнева и З. В. Сигаловой (без членов, учитывающих теплообмен излучением и контактный теплообмен).

$$\frac{\lambda}{\lambda_г} = \frac{1}{A}\left[\frac{4{,}45}{1+\frac{B}{p\delta_{m1}}}\left(A\ln\frac{A}{A-1} - 1\right) + \frac{Cf(m)}{1+\frac{B}{p\delta_{m2}}} + 2{,}23\frac{1{,}41A-1}{1+\frac{B}{p\delta_{m3}}}\right], \qquad (18)$$

где $A = 1 + \frac{a}{r} = \sqrt[3]{\frac{0{,}74}{1-m}}$;

$B = 2\beta pL$;

$f(m) = \frac{0{,}26}{m} - 0{,}35m + 0{,}09$;

$\delta_{m1} = r\left(A - \frac{\pi}{4}\right)$, $\delta_{m3} = 2r(1{,}41A - 1)$;

C и δ_{m2} — величины, зависящие от механических свойств материала зерен, числа контактов между двумя соседними зернами и нагрузки на зерна.

Уравнения (15) — (18) получены вычислением теплового потока в зазоре между шарами при наиболее плотной упаковке, для которой $m = 0{,}2595$. Эти уравнения отличаются одно от другого, в основном, способом учета влияния пористости среды на коэффициент теплопроводности. При выводе формул (15) и (18) предполагается, что зерна окружены газовым ореолом, ширина которого увеличивается по мере увеличения пористости, т. е. зерна в этой модели равномерно раздвигаются во все стороны. Г. Н. Дульнев и З. В. Сигалова объясняют это наличием микрошероховатостей на поверхности зерен. В модели А. С. Ляликова предполагается, что при увеличении пористости высота зернистого слоя остается постоянной и зерна раздвигаются только в одном (горизонтальном) направлении. В обеих моделях принимается, что при увеличении пористости контакты между зернами сохра-

няются, т. е. каждое зерно, как при плотнейшей упаковке, находится в контакте с 12 соседними зернами.

В реальных зернистых материалах частицы расположены хаотически, причем по мере увеличения пористости число контактов между зернами уменьшается.

Представим зернистый материал в виде слоя хаотически расположенных сферических частиц одинакового диаметра. При выводе уравнения для определения коэффициента теплопроводности такого слоя используем механизм теплопроводности в зернистом материале, принятый при выводе формул (15) — (18). Обозначим пористость слоя через m и число касаний одной частицы с другими, т. е. координационное число упаковки слоя, через N. Рассмотрим перенос тепла между двумя соприкасающимися шарами (рис. 2). Принимаем, что изотермические поверхности представляют собой плоскости, проходящие через центры шаров перпендикулярно линии, соединяющей их центры.

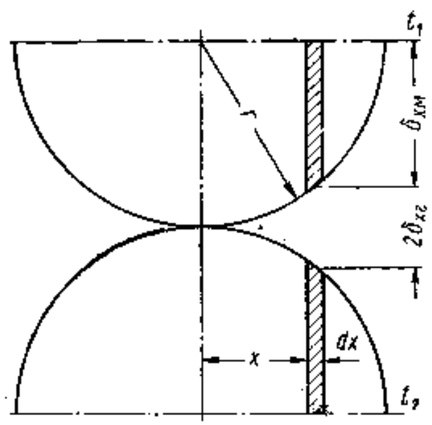


Рис. 2. Схема теплообмена между двумя шарами

Тепло, передаваемое от зерна к зерну через кольцевой элемент с шириной dx

$$dQ_1 = \frac{\Delta t}{R_x}\, dS = \frac{\Delta t}{\frac{2\delta_{xм}}{\lambda_м} + \frac{2\delta_{xг}}{\lambda_г}}\, dS. \qquad (19)$$

Как следует из рис. 2

$$\delta_{xм} = \sqrt{r^2 - x^2}; \quad \delta_{xг} = r - \sqrt{r^2 - x^2}; \quad dS = 2\pi x dx.$$

Подставляя соответствующие значения в уравнение (19), получаем

$$dQ_1 = \frac{\Delta t \pi x\, dx}{\frac{r}{\lambda_г} + \left(\frac{1}{\lambda_м} - \frac{1}{\lambda_г}\right)\sqrt{r^2 - x^2}} = \Delta t \pi \lambda_г \frac{x\, dx}{r - k\sqrt{r^2 - x^2}}. \qquad (20)$$

Интегрируя уравнение (20) в пределах от 0 до r, находим

$$Q_1 = \Delta t \pi \lambda_г \int_0^r \frac{x\, dx}{r - k\sqrt{r^2 - x^2}} = \Delta t \pi \lambda_г \left| \frac{1}{k}\left[\frac{r}{k} \ln\left(\frac{r}{k} - \sqrt{r^2 - x^2} + \right.\right.\right.$$

$$\left.\left.\left. + \sqrt{r^2 - x^2}\right)\right]\right|_0^r = \Delta t \pi \lambda_г \frac{r}{k}\left(\frac{1}{k} \ln \frac{\lambda_м}{\lambda_г} - 1\right). \qquad (21)$$

Коэффициент теплопроводности зернистого слоя равен

$$\lambda = \frac{Q}{S\frac{dt}{dh}} = \frac{Qh}{S\Delta t}, \qquad (22)$$

где Q — тепловой поток через зерно;

h — высота слоя, соответствующая перепаду температур Δt;

S — площадь слоя, приходящаяся на одно зерно.

Каждый шар соприкасается с N соседними шарами, следовательно, направлению каждой из трех взаимно перпендикулярных осей соответствует $\frac{N}{3}$ касаний, а каждому из двух противоположных направлений вдоль одной из осей — $\frac{N}{6}$ касаний. В действительности шар не может контактировать в каком-либо направлении больше, чем с одним шаром. Физический смысл высказанного выше положения состоит в том, что численное значение вектора теплового потока через одно зерно в направлении перепада температур

$$|\vec{Q}| = \frac{Q_1 N}{6}. \qquad (23)$$

Соответствующее значение величины h равно $2r$. Площадь слоя, приходящаяся на одно зерно, связана с другими параметрами слоя соотношением

$$m = 1 - \frac{V_э}{hS} = 1 - \frac{4\pi r^3}{3hS}, \qquad (24)$$

где $V_э$ — объем зерна.

Из уравнения (24) находим

$$S = \frac{2\pi r^2}{3(1 - m)}. \qquad (25)$$

Подставляя значения Q, S и h в уравнение (22), получаем окончательно

$$\lambda = \frac{\lambda_г}{k} \frac{N}{2}(1 - m)\left(\frac{1}{k} \ln \frac{\lambda_м}{\lambda_г} - 1\right). \qquad (26)$$

Для того чтобы можно было рассчитывать по формуле (26), нужно знать зависимость координационного числа N от пористости зернистого материала. Теоретические значения N и m известны лишь для нескольких типов упорядоченных упаковок (табл. 1).

Таблица 1

Характеристика упорядоченных упаковок шаров

Тип упаковки	Координационное число	Пористость в %
Плотнейшая (гексагональная плотная, кубическая гранецентрированная)	12	25,95
Кубическая объемноцентрированная	8	31,98
Простая кубическая	6	47,64
Структура алмаза и льда	4	65,99

Следуя А. В. Киселеву [32], можно предположить, что в реальных хаотических упаковках частицы располагаются равномерно по объему и число их касаний определяется пористостью упаковки. Зависимость числа касаний от объема, занимаемого шарами (рис. 3), может быть выражена при $m > 0{,}3$ формулой

$$N = 11{,}6\,(1 - m). \quad (27)$$

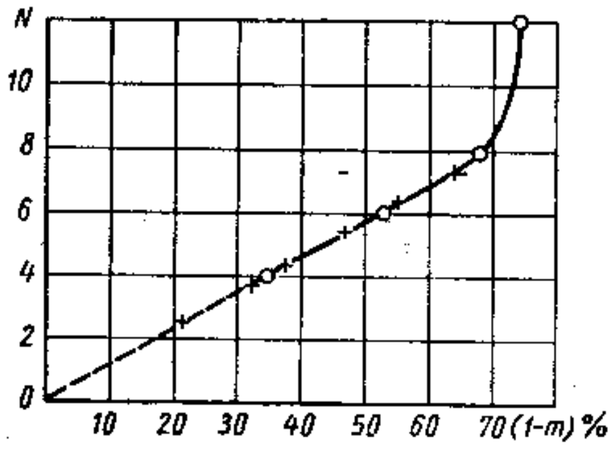


Рис. 3. Зависимость числа касаний от доли объема, занимаемого шарами:
○ — упорядоченные упаковки; × — хаотическая укладка [32]

На рис. 3 нанесены также значения числа касаний между элементарными сферическими частичками силикагелей, вычисленные А. В. Киселевым из адсорбционных измерений.

Подстановка в уравнение (26) дает

$$\lambda = \frac{\lambda_г}{k} 5{,}8\,(1 - m)^2 \left(\frac{1}{k} \ln \frac{\lambda_м}{\lambda_г} - 1\right). \quad (28)$$

При пористости менее 0,3 следует пользоваться исходной формулой (26). Так, например, при плотнейшей укладке $m = 0{,}26$ и $N = 12$, следовательно, коэффициент в формуле (28) возрастает с 5,8 до 8,1.

При больших m газом переносится дополнительное количество тепла, которое может быть учтено на основе следующих соображений. Любое теоретически обоснованное уравнение для определения коэффициента теплопроводности зернистого материала должно удовлетворять двум дополнительным условиям:

$$\lambda = \lambda_г \text{ при } \lambda_м = \lambda_г;$$

$$\lambda = \lambda_г \text{ при } m = 1.$$

При $\frac{\lambda_м}{\lambda_г} \to 1$, что соответствует $k \to 0$, выражение

$$\frac{1}{k}\left(\frac{1}{k} \ln \frac{\lambda_м}{\lambda_г} - 1\right) \to \frac{1}{2}.$$

Анализ показывает, что для удовлетворения указанных выше условий это выражение следует заменить на

$$\frac{1}{k}\left(\frac{1}{k} \ln \frac{\lambda_м}{\lambda_г} - 1 - \frac{k}{2}\right) + 1.$$

В результате уравнение (28) принимает следующий вид:

$$\lambda = \lambda_г \left[\frac{5{,}8\,(1 - m)^2}{k}\left(\frac{1}{k} \ln \frac{\lambda_м}{\lambda_г} - 1 - \frac{k}{2}\right) + 1\right]. \quad (29)$$

Дополнительный тепловой поток через поры, учитываемый в этом уравнении, должен становиться равным нулю при простой кубической упаковке, то есть при пористости 47,64%. Согласно уравнению (29) он становится равным нулю при пористости 41,4%, что можно считать достаточно удовлетворительным. При меньших значениях пористости величина потока через поры становится отрицательной. Тем самым отчасти компенсируется погрешность, связанная с допущением о независимости друг от друга тепловых потоков через зазоры между зернами. В действительности, для случая малых величин пористости зазоры между зернами, площадь которых принята при выводе формул (15), (17) и (18) равной площади поперечного сечения зерна, налагаются друг на друга, и реальный тепловой поток через плотный зернистый слой должен быть меньше вычисленного при указанном допущении.

На рис. 4 теоретические значения коэффициента теплопроводности сопоставлены с экспериментальными, полученными при различных соотношениях $\lambda_м$ (металлы и неметаллы) и $\lambda_г$ (гелий, водород, воздух, углекислота, аргон).

Экспериментальные данные получены для сред с пористостью в пределах 40—50%. Расчетные кривые нанесены для средней пористости 45%. Уравнения (17) и (29) правильно описывают зависимость $\frac{\lambda}{\lambda_г}$ от $\frac{\lambda_м}{\lambda_г}$. При этом уравнение (29) лучше аппроксимирует опытные данные.

На рис. 5 дано сопоставление экспериментальных и вычисленных значений коэффициента теплопроводности кварцевого песка при различной пористости. Теплопроводность кварца [64] принята при расчетах равной 6 *вт/(м·град)*. Расчеты по уравнению (18) существенно затрудняются отсутствием данных по числу контактов между соседними зернами и нагрузке на них, определяемой в обычных условиях весом испытываемого образца.

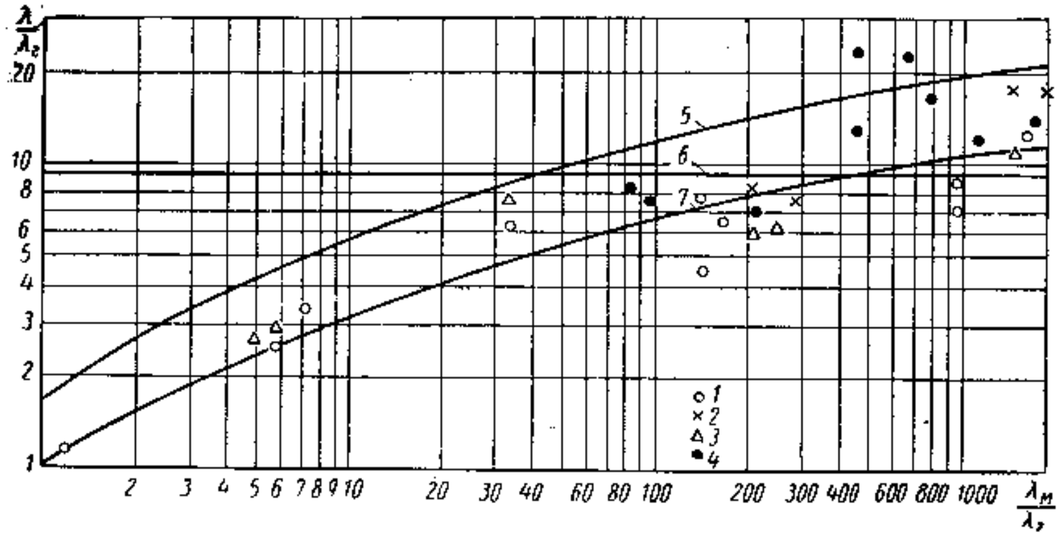


Рис. 4. Зависимость коэффициента теплопроводности зернистого слоя от коэффициентов теплопроводности материала зерен и заполняющего газа:

1 — по данным Канулуика и Мартина; *2* — по данным Шумана и Фоса; *3* — по данным Вейцингера и Шнейдера; *4* — по данным Дейслера и Боегли [83]; *5* — по уравнению (17); *6* — по уравнению (18); *7* — по уравнению (29)

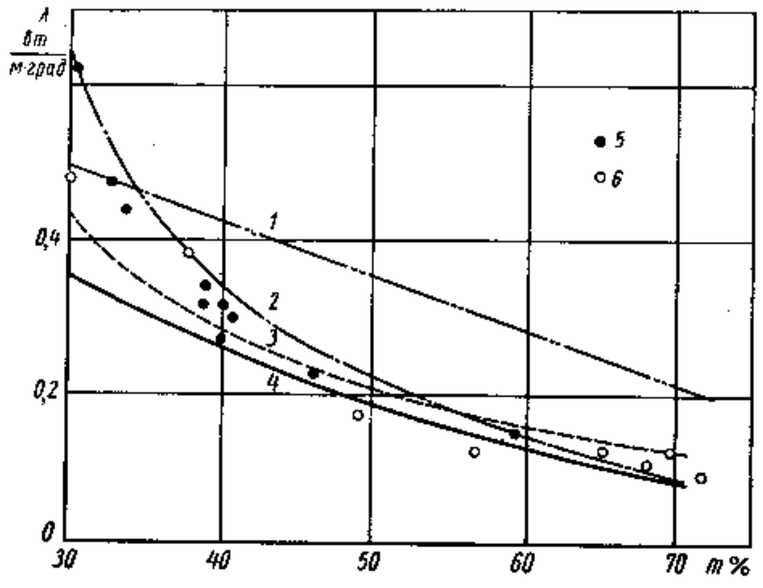


Рис. 5. Зависимость коэффициента теплопроводности от пористости зернистого слоя:

1 — по уравнению (17); *2* — по уравнению (16); *3* — по уравнению (18); *4* — по уравнению (29); *5* — по данным Богомолова; *6* — по данным Чудновского [65]

Учитывая, что нагрузка входит во второй член уравнения (18) в степени $\frac{1}{18}$ (см. работу [12]), можно принять в первом приближении величину C постоянной. Значение C было выбрано из условия наилучшего аппроксимирования опытных данных. При этом условии уравнения (18) и (29) дали близкие значения λ во всем диапазоне значений пористости.

При увеличении длины свободного пробега молекул газа, т. е. понижении давления газа, или при уменьшении размера зерен коэффициент теплопроводности зернистой среды уменьшается благодаря уменьшению теплопроводности заполняющего газа в соответствии с уравнением (13). В этом случае величина λ, выражаемая уравнением, не зависит от расстояния между граничными стенками, т. е. от толщины дисперсного слоя, и представляет собой коэффициент теплопроводности газа, заполняющего пустоты между зернами. Эта величина зависит от критерия Кп, который в рассматриваемом случае равен отношению средней длины свободного пробега молекул газа между столкновениями друг с другом к средней длине свободного пробега молекул газа между столкновениями с твердой поверхностью, т. е. к средней ширине пустот в дисперсной среде. Для учета влияния критерия Кп на теплообмен нужно в уравнение (29) вместо $\lambda_г$ подставить $\frac{\lambda_г^\circ}{1+2\beta\frac{L}{\delta_{ср}}}$, где $\delta_{ср}$ — средняя величина зазора между зернами, и $\lambda_г^\circ$ — коэффициент теплопроводности газа при $Кп \gg 1$, т. е. при $Кп \ll 1$ атмосферном давлении.

В результате уравнение (29) принимает вид

$$\lambda = \frac{\lambda_г^\circ}{1+2\beta\frac{L}{\delta_{ср}}}\left[\frac{5{,}8(1-m)^2}{k}\left(\frac{1}{k}\ln\frac{\lambda_м\left(1+2\beta\frac{L}{\delta_{ср}}\right)}{\lambda_г^\circ} - 1 - \frac{k}{2}\right)+1\right]. \qquad (30)$$

Средняя величина зазора $\delta_{ср}$ представляет собой средний диаметр пустот между зернами. Для слоя сферических частиц

$$\delta_{ср} = d_п = \frac{2}{3}\frac{m}{1-m}d_э. \qquad (31)$$

На рис. 6 опытные данные Канулуика и Мартина для порошков карбида кремния сопоставлены с вычисленными по формуле

$$\lambda = \frac{\lambda_г^\circ}{1+\frac{B}{p}}\left[A + C\ln\left(1+\frac{B}{p}\right)\right] + \lambda_0, \qquad (32)$$

где

$$A = \frac{5{,}8(1-m)^2}{k}\left(\frac{1}{k}\ln\frac{\lambda_к}{\lambda_г^\circ} - 1 - \frac{k}{2}\right) + 1;$$

$$B = \frac{2\beta L}{\delta_{ср}};$$

$$C = \frac{5{,}8(1-m)^2}{k^2},$$

λ_0 — проводимость тепла излучением и через контакты между частицами (определяется из опытных данных при высоком вакууме).

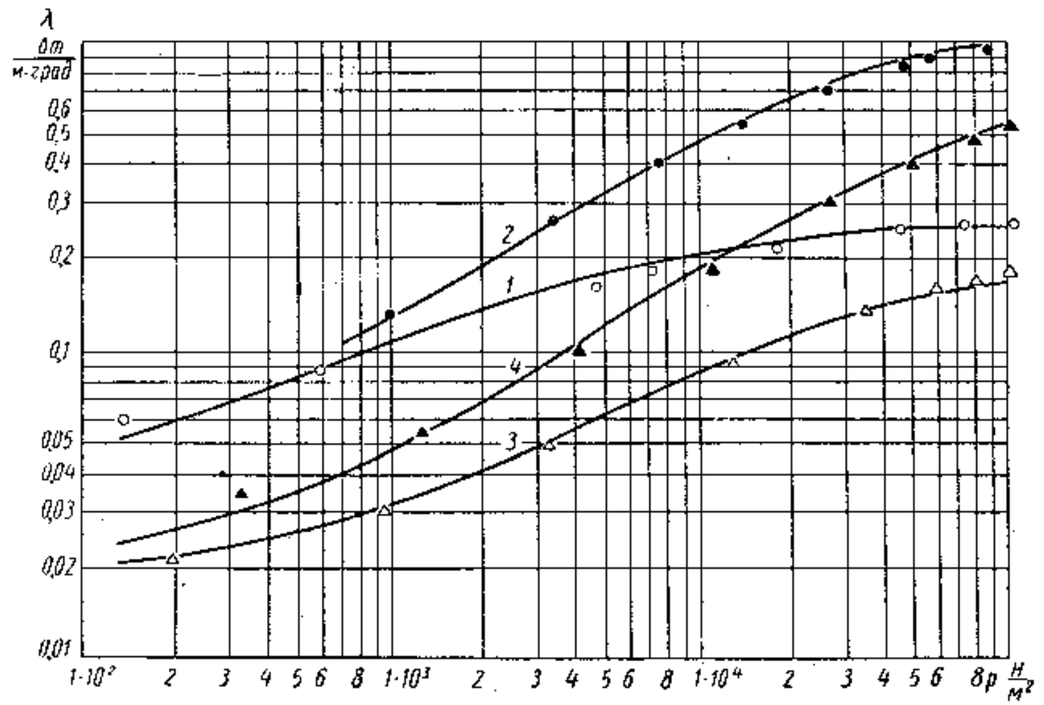


Рис. 6. Зависимость коэффициента теплопроводности порошков карбида кремния от давления газа [точки — по опытным данным, линии — по уравнению (32)]:

1 — при размере частиц $d_э$ = 0,194 *мм* (заполняющий газ — воздух); *2* — при $d_э$ = 0,194 *мм* (гелий); *3* — при $d_э$ = 0,027 *мм* (воздух); *4* — при $d_э$ = 0,027 *мм* (водород)

Значения постоянных A, B и λ_0 были найдены из опытных данных. Экспериментальные значения A в данном случае примерно на 20% выше теоретически вычисленных и взяты вместо последних для наглядности сопоставления теоретической и экспериментальной зависимости теплопроводности от давления газа. Кривые, построенные по уравнению (32), хорошо аппроксимируют опытные данные.

Значения $\delta_{ср}$, полученные [1] для порошка № 90, на 10% ниже, а для порошка № 600 на 30% выше вычисленных по уравнению (31). Они найдены из постоянных B для воздуха при условии, что коэффициент аккомодации $\alpha = 0{,}8$. Отсюда можно найти, что в опытах с водородом $\alpha = 0{,}6$ и с гелием — $\alpha = 0{,}48$.

[1] Злесь и в табл. 2 порошки № 90 и 600 указаны по данным Канулуика и Мартина, что соответствует № 16 и 3 соответственно по ГОСТу 3647—59.

Таблица 2

Значения постоянных в уравнении (32) для порошков карбида кремния

Материал	Размер частиц в *мм*	Пористость	Газ	*A* в *вт/(м·град)*		*B* в *кн/м²*	λ_0 в *вт/(м·град)*	$\delta_{ср}$ в *мм*
				теоретически	экспериментально			
Порошок карбида кремния № 90	0,194	0,41	Воздух	12,5	8,7	29,3	0,038	0,10
			Гелий	7,8	6,5	213	0,038	0,10
Порошок карбида кремния № 600	0,027	0,51	Воздух	9,0	7,1	200	0,019	0,014
			Водород	5,6	4,5	600	0,019	0,014

Перенос тепла в изоляционных материалах

Наиболее рыхлая из упорядоченных структур зернистого слоя имеет пористость 66%. При дальнейшем увеличении пористости шары верхнего слоя «провалятся» в нижний слой. Однако существуют дисперсные среды, имеющие значительно большую пористость. Величина пористости некоторых материалов достигает 95—98%. Благодаря столь высокой пористости эти материалы обладают очень низким коэффициентом теплопроводности и используются для целей теплоизоляции.

Каким образом можно объяснить существование зернистых материалов со столь большой пористостью? Авторы работы [12] высказали предположение, что причина заключается в наличии на поверхности зерен микрошероховатостей, удерживающих зерна на значительных расстояниях друг от друга. Основываясь на этом предположении, авторы указанной работы получили уравнение (18).

Исследование структуры зернистых теплоизоляционных материалов показывает, что зерна многих из них имеют округлую форму с довольно гладкой поверхностью. Высокая пористость в этих материалах достигается благодаря вторичной пористой структуре зерен. Зерна представляют собой, как например в случае аэрогеля кремниевой кислоты, конгломераты маленьких шаровидных частиц диаметром 10—20 *нм* (100—200 Å) или имеют ячеистую структуру, как в случае вспученного перлита. Это

вносит существенное усложнение в расчет коэффициента теплопроводности.

Модель зернистого теплоизоляционного материала может быть построена на основе следующих соображений. Отдельные зерна имеют шаровидную форму и расположены хаотично. Опыт показывает, что объем пустот между зернами составляет большей частью 0,4—0,6 от общего объема материала, оставаясь обычно в пределах 0,3—0,7. Число касаний между зернами соответственно изменяется приблизительно от 4 до 8. Зерна пронизаны порами, представляющими собой ячейки, окруженные стенками твердого скелета, или пустоты между шаровидными частицами. Объем пор в зернах составляет 0,4—0,9 от объема зерен.

Коэффициент теплопроводности такой зернистой системы можно определить по формуле (29), предварительно определив коэффициент теплопроводности зерен. Если зерна представляют собой конгломераты шаровидных частиц, то их коэффициент теплопроводности

$$\lambda_з = \lambda_г \left[\frac{5{,}8(1-m')^2}{1-\frac{\lambda_г}{\lambda_т}} \left(\frac{1}{1-\frac{\lambda_г}{\lambda_т}} \ln \frac{\lambda_т}{\lambda_г} - 1 - \frac{k}{2} \right) + 1 \right], \quad (33)$$

где m' — пористость зерен;

$\lambda_т$ — коэффициент теплопроводности материала частиц.

Для коэффициента теплопроводности ячеистой структуры предложено несколько формул [66], из которых наиболее употребительными являются формула Рэлея — Эйкена

$$\lambda_з = \lambda_т \frac{1+\frac{2m(1-\nu)}{2\nu+1}}{1-m\frac{1-\nu}{2\nu+1}} = \lambda_т \frac{\frac{2+\frac{1}{\nu}}{1-\frac{1}{\nu}} - 2m}{\frac{2+\frac{1}{\nu}}{1-\frac{1}{\nu}} + m} \quad (34)$$

и формула Руссела

$$\lambda_з = \lambda_т \frac{m^{2/3} + \nu(1-m^{2/3})}{m^{2/3} - m + \nu(1-m^{2/3}+m)}, \quad (35)$$

где $\nu = \frac{\lambda_т}{\lambda_г}$.

Обе формулы дают близкие значения коэффициента теплопроводности.

Более обоснованными, хотя и более сложными являются формулы О. Е. Власова, развитые в различных вариантах А. У. Франчуком и Б. Н. Кауфманом [66].

Коэффициент теплопроводности зернистого изоляционного материала может быть вычислен по формуле

$$\lambda = \lambda_г \left[\frac{5{,}8(1-m'')^2}{1-\frac{\lambda_г}{\lambda_з}} \left(\frac{1}{1-\frac{\lambda_г}{\lambda_з}} \ln \frac{\lambda_з}{\lambda_г} - 1 - \frac{k}{2} \right) + 1 \right], \quad (36)$$

где m'' — объем пустот между зернами;

$\lambda_з$ — коэффициент теплопроводности зерен, вычисленный по одной из формул (33)—(35).

На основе приведенного анализа может быть объяснена отмеченная в литературе [65, 66] противоречивость опытных данных по зависимости коэффициента теплопроводности дисперсных систем от пористости (или от плотности). Согласно одной группе опытов (см., например, рис. 4) коэффициент теплопроводности связан с пористостью (или плотностью) степенной зависимостью, тогда как по данным Б. Н. Кауфмана и других он изменяется приблизительно линейно. Причина этой противоречивости состоит в следующем. В первом случае измерения проведены с кварцевым песком, зерна которого монолитны и не имеют вторичной пористости. Поэтому коэффициент теплопроводности кварцевого песка следует уравнению типа (29).

Во втором случае для нахождения зависимости коэффициента теплопроводности зернистых материалов от плотности были взяты разные зернистые материалы, зерна которых имеют вторичную пористость (причем в различной степени): кирпич, шлак, зола, трепел, пемза. Указанная зависимость должна здесь описываться уравнением типа (36) вместе с уравнениями типа (34)—(35). Объем пустот между зернами изменяется сравнительно мало, изменение плотности происходит, в основном, за счет изменения объема пор в зернах. Расчеты показывают, что коэффициент теплопроводности изменяется в зависимости от плотности приблизительно линейно.

Рассмотрим в качестве примера зависимость коэффициента теплопроводности от плотности для вспученного перлитового песка. Истинная плотность перлита в виде сплошного тела составляет приблизительно 2400 *кг/м*³. Перлит близок по структуре и химическому составу к стеклу [31], его коэффициент теплопроводности $\lambda_т$ может быть оценен в 0,7 *вт/(м·град)* при 190° К. Интегральные структурные кривые перлитового песка (см. гл. III) имеют при $m = 0{,}6$—$0{,}7$ точку перегиба, показывающую, что это значение соответствует объему пустот между зернами. К этому же значению приводят измерения водопоглощения [17], при которых водой заполняются, в основном, поры в зернах материала. Таким образом, для вспученного перлитового песка

можно принять $m'' \approx 0{,}65$ независимо от величины его плотности в пределах 50—150 *кг/м*³. Уменьшение веса происходит за счет увеличения m'. Эта величина связана с плотностью ρ соотношением

$$m' = 1 - \frac{\rho}{\rho_{ист}(1 - m'')}. \qquad (37)$$

Определяя отсюда m', вычисляем коэффициент теплопроводности зерен по формуле (35) и, наконец, теплопроводность вспученного перлитового песка по формуле (36). Хорошее согласова-

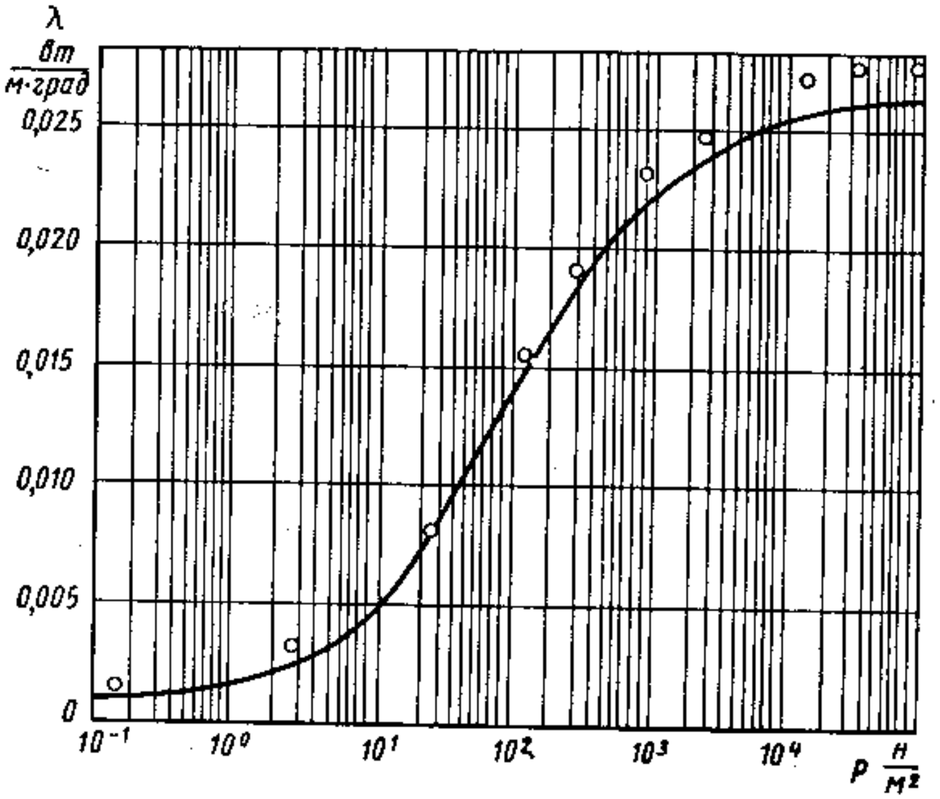


Рис. 7. Зависимость коэффициента теплопроводности вспученного перлитового песка от давления воздуха [точки — по опытным данным, кривая — по уравнению (36)]

ние опытных и вычисленных значений (см. ниже рис. 22) подтверждает правильность описанной модели зернистого теплоизоляционного материала. При плотностях более 150 *кг/м*³ вычисленные значения меньше опытных, что можно объяснить постепенным уменьшением m'' до обычной величины 0,4—0,45.

Формула (36) может быть использована и для определения коэффициента теплопроводности изоляционных порошков в условиях вакуума при соблюдении условия $\lambda_з/\lambda_г > 1$. Это условие выполняется, в частности, если зерна имеют ячеистую структуру (вспученный перлит). Величина $\lambda_з$ может быть определена из формулы (35), в которую следует подставить величину $\lambda_г$, вычис-

ленную по уравнению (13). Значение δ, необходимое для вычисления Кп, близко к среднему диаметру пор в зернах. Подставляя в формулу (36) вычисленную величину $\lambda_з$, а также $\lambda_г$, определенную для пустот между зернами из условия, что величина δ приблизительно равна радиусу зерен, находим коэффициент теплопроводности изоляционного порошка в условиях вакуума.

В качестве примера на рис. 7 сопоставлены экспериментальные данные с расчетами по формуле (36) для образца перлита $К_8$ с диаметром зерен 0,25—0,5 *мм* и плотностью 60 *кг/м*³.

Сложнее обстоит дело в случае зернистых материалов, у которых зерна представляют собой агрегаты, состоящие из отдельных частичек (аэрогель кремниевой кислоты). При понижении давления коэффициент теплопроводности зерен у таких материалов может уменьшаться быстрее, чем теплопроводность газа, заполняющего пустоты между зернами.

Отношение $\frac{\lambda_з}{\lambda_г}$ становится меньше 1, формула (33) не может быть использована. Для нахождения зависимости коэффициента теплопроводности материала от давления газа в этом случае может быть применен другой способ, изложенный в гл. IV.

Контактный теплообмен в дисперсных материалах

При уменьшении давления газа, заполняющего пустоты в дисперсном материале, перенос тепла газом уменьшается и в идеальном случае, при $p = 0$ полностью отсутствует. В этом случае согласно уравнениям, приведенным в предыдущем разделе, коэффициент теплопроводности дисперсного материала становится равным нулю. В действительности его величина остается довольно заметной даже при отсутствии переноса тепла излучением. Причиной этого является теплообмен между отдельными частицами в местах контакта. Контактный теплообмен тем больше, чем больше сила, прижимающая частицы друг к другу. В обычных условиях этой силой является вес материала. Поэтому измеряемый коэффициент теплопроводности дисперсного материала должен зависеть от его плотности и толщины слоя (в вертикальном направлении). Еще большее влияние может оказывать нагружение материала внешней нагрузкой. Соответствующие закономерности необходимо знать, в частности, для расчетов теплоизоляции с применением вакуума, воспринимающей нагрузку от атмосферного давления.

А. А. Некрасов вывел формулу, дающую зависимость между коэффициентом теплопроводности дисперсного материала и нагрузкой на него для случая кубической укладки шаров [65]. В работе [38] показано, что при выводе формулы Некрасов допустил ошибку.

Г. Н. Дульнев и З. В. Сигалова предположили, что контакт между зернами происходит в n точках, представляющих собой микровыступы на округлой основе зерна, и получили следующую формулу для теплопроводности дисперсного материала за счет контактного теплообмена

$$\lambda_к = f(m) \cdot 0{,}02 \frac{\lambda_т p^{31/18} n^{1/2} E^{6/9}}{\sigma_c^{1/2} A}, \qquad (38)$$

где n — число контактирующих микровыступов между двумя зернами;
p — удельная нагрузка на материал;
E — модуль Юнга;
σ_c — предел прочности при сжатии;
$f(m)$ и A — функции пористости [см. уравнение (18)].

Расчет по этой формуле затрудняется необходимостью нахождения числа контактирующих микровыступов в каждом конкретном случае. Более удобную для расчетов формулу можно получить из следующих соображений, используя соотношения (22) — (28). Допустим, что дисперсный материал состоит из хаотически расположенных оферических частиц. Каждая частица соприкасается с N соседними частицами. При нагружении дисперсного материала удельным давлением p в точках соприкосновения образуются контактные пятна, радиус a которых определяется формулой Герца для случая контакта между двумя шарами

$$a = \sqrt[3]{\frac{3}{4} \cdot \frac{1-\mu^2}{E} P_1 r}, \qquad (39)$$

где μ — коэффициент Пуассона;
P_1 — сила, прижимающая шары друг к другу.

Среднее значение P_1 находим следующим путем. Направлению каждой из трех взаимно перпендикулярных осей соответствует $\frac{N}{3}$ касаний, а каждому из двух противоположных направлений вдоль одной из осей, в частности направлению нагрузки на материал, — $\frac{N}{6}$ касаний. Средняя нагрузка на один контакт

$$P_1 = \frac{pS}{\frac{N}{6}} = p \frac{2\pi r^2}{3(1-m)} \cdot \frac{6}{11{,}6(1-m)} = \frac{0{,}345}{(1-m)^2} p\pi r^2, \qquad (40)$$

где S — площадь слоя, приходящаяся на одно зерно и определяемая по формуле (25).

Подставляя значение P_1 в уравнение (39), получим

$$a = 0{,}93r \sqrt[3]{\frac{(1-\mu^2)p}{E(1-m)^2}}. \qquad (41)$$

В области контакта между двумя телами линии тока (теплового или электрического) стягиваются к контактному пятну. Величина электрического сопротивления области стягивания линий тока к контактному пятну на поверхности полуограниченного тела определяется [63] по уравнению

$$R_к^э = \frac{\rho}{2\pi a} \operatorname{arctg} \frac{b}{a}, \qquad (42)$$

где ρ — удельное электрическое сопротивление;
b — длина области стягивания.

На основании электротепловой аналогии тепловое сопротивление области стягивания равно

$$R_к^т = \frac{1}{2\pi a\lambda} \operatorname{arctg} \frac{b}{a}. \qquad (43)$$

При длинной области стягивания ($b = \infty$) получаем для одного контактного элемента

$$R_к^т = \frac{1}{4a\lambda}. \qquad (44)$$

Тепловое сопротивление всей области стягивания, расположенной в обоих контактных элементах

$$R_к = \frac{1}{2a\lambda}. \qquad (45)$$

Полное тепловое сопротивление R участка, включающего контакт между двумя телами, равно

$$R = R_0 + R_к,$$

где R_0 — тепловое сопротивление участка в предположении, что $R_к = 0$.

Возвратимся к случаю зернистого слоя. Тепловой поток проходит последовательно через зерна и контактные пятна между ними. Область стягивания здесь деформируется ввиду ограниченных размеров контактирующих тел. Поэтому применение уравнения (45), полученного для контакта между полуограниченными телами, может дать неточные результаты. Кроме того, R_0 может стать заметной величиной в сравнении с $R_к$, тогда как для полуограниченного тела $R_0 = 0$.

Аналитическое решение задач о распространении тепла в контактах между телами различной геометрической формы затруднительно. Сопротивление деформированной области стягивания рассчитывают приближенными методами, в частности, методами релаксации и криволинейных квадратов.

Определим методом криволинейных квадратов тепловое сопротивление зерна (имеющего форму шара) с двумя контактными пятнами, расположенными на противоположных сторонах

по диаметру. Найдем решение для частного случая $\frac{d}{a} = 10$. На рис. 8 сетка криволинейных квадратов схематично нанесена на четверти поперечного сечения шара. Методика расчета несколько усложняется тем, что расчет должен быть произведен для тела вращения. В этом случае трубку тока можно представить как кольцеобразное тело вращения, поперечное сечение которого на рис. 8 ограничено двумя соседними линиями тока. Тепловое сопротивление такой трубки равно

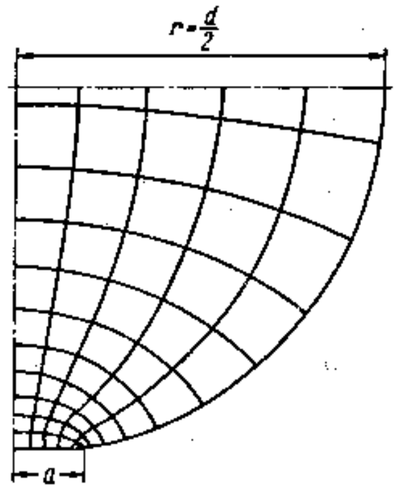


Рис. 8. Криволинейные квадраты контактирующего шара

$$R_{тр} = \frac{1}{2\pi\lambda} \sum_{к=1}^{n} \frac{1}{r_к},$$

где $r_к$ — расстояние от криволинейного квадрата в сечении трубки до оси вращения тела.

Полное тепловое сопротивление тела, включающего m параллельных трубок

$$R = \frac{1}{\sum_{1}^{m} \frac{1}{R_{тр}}}.$$

Тепловое сопротивление половины шара, примыкающей к одному контактному пятну, равно половине сопротивления четверти шара, вычисленного описанным методом, а тепловое сопротивление всего шара равно удвоенному сопротивлению полушара, т. е. сопротивлению одной четверти шара.

Расчет для схемы, изображенной на рис. 8, дает

$$R = R_0 + R_к = \frac{0{,}55}{a\lambda}.$$

Таким образом полное сопротивление шарового зерна с двумя контактными пятнами при $\frac{d}{a} = 10$ лишь на 10% превышает сопротивление двух контактных пятен, определяемое по формуле (45). Из уравнения (41) можно найти, что отношение d/a при нагрузках не более 1 $Мн/м^2$ для теплоизоляционных материалов, как правило, превышает 20, а для обычных зернистых сред — 100. По мере увеличения этого отношения тепловое сопротивление зерна, включая область контактных пятен, будет приближаться по величине к тепловому сопротивлению контактных пятен на поверхности полуограниченного тела, определяемому формулой (45). Следовательно, по этой формуле можно с удовлетвори-

тельной точностью определить тепловое сопротивление зернистых сред, возникающее в контактах между зернами.

Тепловой поток через зерно равен

$$Q = \frac{\Delta t \cdot N}{R \cdot 6}. \tag{46}$$

Проводимость зернистого слоя находим по формуле

$$\lambda_к = \frac{3{,}70(1-m)^2 \lambda_т a}{r}, \tag{47}$$

получаемой путем подстановки формул (25), (27) и (46) в формулу (22).

После подстановки выражения для a формула (47) принимает вид

$$\lambda_к = \frac{3{,}37(1-m)^{4/3}\lambda_т p^{1/3}}{E^{1/3}}. \tag{48}$$

Из формул (38) и (48) следует, что контактная проводимость зернистой среды не зависит от диаметра зерен. Следовательно, эти формулы должны быть справедливы и для теплоизоляционных материалов типа аэрогеля, в которых зерна представляют собой агрегаты из множества малых частиц.

Экспериментальные данные по влиянию нагрузки на теплопроводность зернистых материалов весьма ограничены. В работе [54] приведены следующие значения теплопроводности песка с размером зерен менее 0,2 *мм* и стеклянных шариков диаметром 4,8 *мм* в условиях вакуума при средней температуре 338° К.

Коэффициент теплопроводности в *мвт/(м·град)*

	Без нагрузки (λ_0)	Под нагрузкой 0,1 $Мн/м^2$ (λ_p)	$\lambda_p - \lambda_0$
Песок	3,64	36,0	32,4
Стеклянные шарики	11,0	40,0	29,0

Характеристики материалов в работе [54] не приведены. Примем для песка следующие значения: $m = 0{,}4$; $\lambda_т = 3$ *вт/(м·град)*; $E = 50$ $Гн/м^2$; $\sigma_c = 100$ $Мн/м^2$. Кроме того, n в уравнении (38) примем равным 1. Подстановка этих значений в уравнения (38) и (48) дает соответственно $\lambda_к = 123$ и 64 *мвт/(м·град)*. Для стеклянных шариков при $\lambda_т = 1{,}0$ *вт/(м·град)* и тех же значениях остальных величин получаем $\lambda_к = 41$ и 21,3 *мвт/(м·град)*.

Кистлер и Колдуэлл определили коэффициент теплопроводности под нагрузкой для аэрогеля кремневой кислоты с плотностью 120 $кг/м^3$ в условиях вакуума при средней температуре 307° К:

Нагрузка $Мн/м^2$	0,0028	0,037	0,105
λ в *мвт/(м·град)*	5,31	5,86	6,28

Для аэрогеля $\lambda_т$ принимаем равным коэффициенту теплопроводности аморфной двуокиси кремния 1,3 *вт/(м · град)*. По плотности аэрогеля находим его пористость $m = 0{,}95$. Значения E, σ_c и n принимаем те же, что и для песка. Вычисленные по уравнениям (38) и (48) величины $\lambda_ж$ при нагрузке 0,105 *Мн/м²* равны соответственно 1,04 и 1,07 *мвт/(м · град)*. Экспериментальное значение $\lambda_ж$, которое можно считать равным разности значений теплопроводности под нагрузкой и без нее, составляет 0,97 *мвт/(м · град)*.

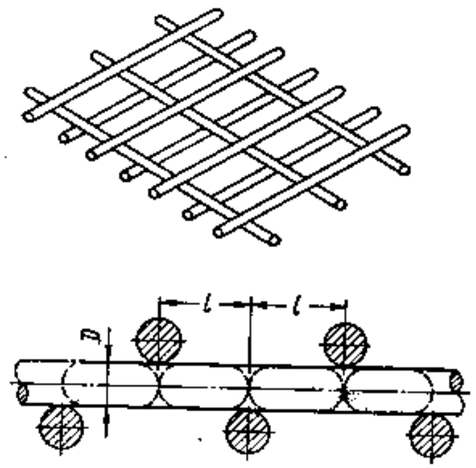


Рис. 9. Схема теплообмена между волокнами

Таким образом, обе формулы (38) и (48) дают удовлетворительные результаты [формула (48) более проста и удобна для расчетов].

В вакуумно-волокнистой и вакуумно-многослойной теплоизоляции применяются волокнистые материалы, в которых волокна располагаются в плоскостях, перпендикулярных направлению теплового потока. Перенос тепла проводимостью по твердому телу в этом случае может быть рассчитан, если представить лист волокнистого материала в виде упорядоченной структуры (рис. 9).

При контакте двух волокон образуется контактная площадка, радиус которой a определяется по формуле Герца для случая перекрещивающихся цилиндров

$$a = \sqrt[3]{\frac{3}{2}\frac{1-\mu^2}{E}P_1 r}\,. \qquad (49)$$

Тепловой поток проходит через эти площадки и затем вдоль волокон к следующим контактам (рис. 9). Рассмотрим тепловой поток по волокну между двумя контактными площадками. Если принять идеализированную схему контактов между волокнами, представленную на рис. 9, то тепловое сопротивление участка между контактами будет равным сумме сопротивлений цилиндрического участка и двух шаровых сегментов, у которых одно основание представляет собой диаметральное сечение шара, а второе является контактной площадкой. Тепловое сопротивление двух таких сегментов определяется формулой (45). Находим тепловое сопротивление рассматриваемого участка

$$R = \frac{4l}{\pi D^2 \lambda_т} + \frac{1}{2a\lambda_т}\,, \qquad (50)$$

где D — диаметр элементарного волокна;

l — расстояние между контактными пятнами на волокне.

Тепловой поток, проходящий через контактное пятно, разветвляется на два потока, идущих к контактным пятнам с волокнами следующего слоя. Полный тепловой поток через 1 *см²* площади изоляции равен

$$q = 2n\frac{\Delta T_c}{R} = \frac{\lambda_т}{\frac{2l}{\pi D^2} + \frac{1}{4a}}\, n\Delta T_c, \qquad (51)$$

где n — число контактов между волокнами в 1 *см²* одного ряда;

ΔT_c — перепад температур в одном ряду волокон.

Приведем формулу (51) к виду, удобному для практического использования. С этой целью выразим l и n через пористость

$$1 - m = \frac{1}{D}\,\frac{1}{2l}\,\frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi D}{8l}\,, \qquad (52)$$

откуда

$$l = \frac{\pi D}{8(1-m)}\,. \qquad (53)$$

Аналогичным образом находим

$$n = \frac{1}{2l}\cdot\frac{1}{2l} = \frac{1}{4l^2} = \frac{16(1-m)^2}{\pi^2 D^2}\,. \qquad (54)$$

Значение ΔT_c связано с полным перепадом температуры ΔT на листе волокнистого материала соотношением

$$\Delta T_c = \Delta T\,\frac{D}{\delta}\,,$$

где δ — толщина листа.

Подставляя полученные выражения для l, n и ΔT_c в формулу (51), получаем окончательно

$$q = \frac{16(1-m)^2}{\pi^2}\,\frac{\lambda_т}{\frac{D}{4a} + \frac{1}{4(1-m)}}\,\frac{\Delta T}{\delta}\,. \qquad (55)$$

В работе [84] дана без вывода следующая формула для определения теплового потока в рассматриваемом случае

$$q = \frac{16(1-m)^2}{\pi}\,\frac{\lambda_т}{\ln\frac{2D^2}{a^2} + \frac{\pi}{2(1-m)}}\,\frac{\Delta T}{\delta}\,. \qquad (56)$$

Анализ формулы (56) показывает, что выражение $\ln\frac{2D^2}{a^2}$ характеризует тепловое сопротивление шарового сегмента, вычисленное при условии, что все изотермические поверхности представляют собой плоскости, параллельные контактному

пятну. Как видно (см. рис. 8), такое предположение не соответствует действительности. Указанный член в формуле (56), как правило, по величине в несколько раз меньше второго члена в знаменателе, характеризующего тепловое сопротивление собственно волокон. Согласно формуле (55), напротив, тепловое сопротивление контактных областей значительно больше сопротивления волокон.

Преобразуем формулу (55) к виду, более удобному для расчетов. Нагрузка на один контакт равна

$$P_1 = \frac{p}{n} = \frac{\pi^2}{16} \frac{pD^2}{(1-m)^2}. \qquad (57)$$

Подставляя выражение для a с учетом формулы (57) в формулу (56) и переходя к теплопроводности, получаем

$$\lambda_к = \frac{16(1-m)^2}{\pi^2} \frac{\lambda_т}{\frac{1}{1{,}86Ap^{1/3}} + \frac{1}{4(1-m)}}. \qquad (58)$$

где

$$A = \sqrt[3]{\frac{1-\mu^2}{E(1-m)^2}}.$$

Из формулы (58) следует, что коэффициент теплопроводности сжатого волокнистого материала не зависит от диаметра волокон. Это удовлетворительно согласуется с опытными данными [54]. Коэффициент теплопроводности стеклянных волокон, хорошо ориентированных в плоскостях, перпендикулярных тепловому потоку, возрастает лишь в 1,3 раза при увеличении диаметра волокон от 0,2 до 14 *мкм*, т. е. в 70 раз. Выведя формулу, аналогичную формуле (56), и обнаружив резкие расхождения между теоретическими значениями и результатами своих экспериментов, авторы работы [54] пришли к ошибочному выводу, что теплопроводность волокнистых материалов резко возрастает при увеличении диаметра волокон.

Маты из стеклянного волокна, которые испытывали авторы работы [54], имели плотность около 250 *кг/м*^{3} ($1 - m \approx 0{,}1$). Расчет по формуле (58) дает для этих матов $\lambda_к = 0{,}41$ *мвт/(м* $\times$ $\times$ *град)*. Согласно опытным данным коэффициент теплопроводности матов из стекловолокон диаметром 4 *мкм* без нагрузки и под нагрузкой 0,1 *Мн/м*^{2} находится в пределах 1,63—2,18 *мвт/(м·град)*. Отсутствие заметного изменения теплопроводности может быть объяснено уплотнением стекловолокна при сжатии, в результате которого увеличение проводимости по твердому телу компенсируется уменьшением проводимости излучением.

Более полное сопоставление теории с опытными данными для волокнистых материалов даже ниже в гл. V.

ГЛАВА II

Перенос тепла в изопяции излучением

В случае низкотемпературной изоляции с применением вакуума перенос тепла теплопроводностью газа практически исключается и лучистый теплообмен, несмотря на небольшую величину его, становится преобладающим способом переноса тепла из окружающей среды к низкотемпературному оборудованию. Лучистый поток задерживается веществом в результате процессов отражения, поглощения и рассеяния. Все механизмы уменьшения лучистого теплообмена использованы при разработке наиболее эффективных видов современной низкотемпературной теплоизоляции.

Прежде чем перейти к рассмотрению теплообмена излучением в изоляции, целесообразно напомнить кратко основные законы теплового излучения.

Основные законы изпучения

Излучение представляет собой процесс переноса энергии электромагнитными волнами. Тепловым излучением называют электромагнитное излучение нагретых тел. Волны, переносящие тепловое излучение, имеют большей частью длину от 0,3 до 1000 *мкм* и охватывают, в основном, так называемую инфракрасную область спектра электромагнитных колебаний.

Излучение, охватывающее узкий интервал длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$, называют монохроматическим. Интегральным называется суммарное излучение во всем интервале волн от 0 до ∞. Количество энергии, излучаемое телом с единицы поверхности в единицу времени, называется плотностью потока полусферического излучения. Спектральной интенсивностью плотности полусферического излучения обычно называют плотность потока монохроматического полусферического излучения, отнесенную к рассматриваемому интервалу длин волн.

Спектральная интенсивность плотности теплового излучения

абсолютно черного тела, т. е. тела, которое полностью поглощает все падающие на него лучи, определяется законом Планка.

$$I_\lambda = \frac{c_1}{\lambda^5 \left(e^{c_2/\lambda T} - 1\right)} \; [вт/м^3], \qquad (59)$$

где λ — длина волны в $м$; T — температура в °К; $c_1 = 0{,}37413 \times \times 10^{-15}$ $вт \cdot м^2$ и $c_2 = 0{,}014388$ $м \cdot °К$.

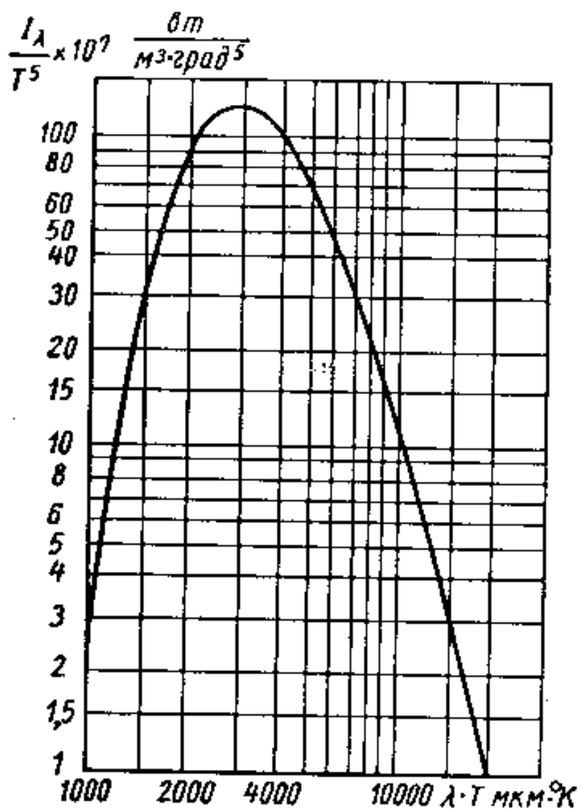


Рис. 10. Зависимость интенсивности теплового излучения абсолютно черного тела от длины волны и температуры

Закон Планка можно записать в более удобной для практического применения форме

$$\frac{I_\lambda}{T^5} = f(\lambda T). \qquad (60)$$

Уравнение (60) графически представлено на рис. 10. Интенсивность достигает максимального значения при

$$\lambda_{max} T = 2898 \; мкм \cdot °К. \qquad (61)$$

Это соотношение называется законом Вина. Излучение тела, нагретого до температуры T, часто характеризуют длиной волны λ_{max}, вычисленной по формуле (61). Правильнее в этом случае применять длину волны, делящую спектр нагретого тела на две области равной энергии и определяемую формулой

$$\lambda_{0,5Q} T = 4110. \qquad (62)$$

Полная плотность полусферического излучения абсолютно черного тела определяется интегрированием уравнения (59) и равна

$$E_s = \sigma_s T^4 \; вт/м^2, \qquad (63)$$

где $\sigma_s = 5{,}77 \cdot 10^{-8}$ $вт/(м^2 \cdot °К^4)$.

Уравнение (63) известно под названием закона Стефана-Больцмана.

Практически все реальные тела являются нечерными. Их излучательные свойства характеризуются степенью черноты (излучательной способностью)

$$\varepsilon = \frac{E}{E_s},$$

где E — полная плотность полусферического излучения нечерного тела.

При монохроматическом излучении степень черноты равна поглощательной способности тела (закон Кирхгофа).

Серой поверхностью называется поверхность, имеющая одинаковую степень черноты при всех длинах волн. Степень черноты серых поверхностей равна их поглощательной способности также и при интегральном излучении.

Распределение лучистых потоков в зависимости от направления определяется законом Ламберта, согласно которому количество энергии, испускаемое диффузно излучающей поверхностью в каком-нибудь направлении, пропорционально косинусу угла между направлением луча и нормалью к поверхности.

Оптические свойства металлов

В условиях высоковакуумной и вакуумно-многослойной изоляции перенос тепла излучением происходит между металлическими поверхностями.

Излучение полированных металлических поверхностей сильно поляризовано, что приводит к значительным отклонениям от закона Ламберта. Плотность излучения металла минимальна в направлении нормали и возрастает с увеличением угла между лучом и нормалью. В результате такого распределения полусферическая степень черноты ε_{nc} в 1,1—1,3 раза больше нормальной степени черноты ε_n. В расчетные формулы теплообмена излучением в сосудах с вакуумной изоляцией нужно подставлять величину ε_{nc}.

Зависимость между излучательной (ε) и поглощательной (a) способностями металлов по теории определяется следующими соотношениями:

$$a(T_s) = \varepsilon(T_m) \qquad (64)$$

и

$$T_m = \sqrt{T_s T_i}, \qquad (65)$$

где T_i — температура черного тела, излучение которого падает на металлическую поверхность с температурой T_s.

Оптические свойства металлов характеризуются комплексным показателем преломления

$$m = \sqrt{\varkappa - i \frac{2}{\rho c} \lambda} = n - i\chi, \qquad (66)$$

где $\varkappa$ — диэлектрическая постоянная;
ρ — удельное электрическое сопротивление;
c — скорость света;
n — вещественная часть показателя преломления;
χ — показатель поглощения.

Для хорошо проводящих материалов при $\varkappa = 0$

$$n = \chi = \sqrt{\frac{\lambda}{\rho c}}. \tag{67}$$

Распространение излучения в металле описывается уравнением

$$I = I_0 e^{-4\pi\chi\frac{\delta}{\lambda}}, \tag{68}$$

где I_0 — интенсивность падающего излучения,
I — интенсивность излучения на глубине δ.

Величина $\frac{1}{4\pi\chi}$ характеризует степень проникновения излучения внутрь вещества и называется относительной глубиной проникновения. Если она меньше 1, то вещество обладает сильным поглощением. Для металлов обычно $\chi > 1$, т. е. относительная глубина проникновения меньше 0,08. Под действием падающего на металл излучения в нем возбуждаются вынужденные колебания свободных электронов, которые создают сильную отраженную волну. Таким образом, то что обычно именуется «поглощением» излучения в металле, на самом деле есть затухание электромагнитных волн в нем с отбрасыванием большей части потока энергии в виде вторичных, отраженных волн.

Поглощательная способность металла при нормальном падении излучения (формула Бера)

$$a_\lambda = \frac{4n}{(n+1)^2 + \chi^2}. \tag{69}$$

Для хорошо проводящих металлов n и χ достаточно велики и близки друг к другу; для таких металлов приближенно

$$a_\lambda = \frac{2}{n}. \tag{70}$$

Подставляя значение n из формулы (67), получаем

$$a_\lambda = 0{,}365\sqrt{\frac{\rho}{\lambda}}, \tag{71}$$

где ρ в *ом · м* и λ в *м*.

Формула (71) получена теоретически Друде. Опыты Гагена и Рубенса подтвердили ее правильность в инфракрасной области спектра при $\lambda > 10$ *мкм*. Из этой формулы следует важный практический вывод: для увеличения отражательной способности поверхности в области инфракрасного излучения ее следует выполнять из металлов с наибольшей электропроводностью.

Формула классической теории (71) перестает быть справедливой в области низких температур, при которых наблюдается так называемый аномальный скин-эффект. Скин-эффектом на-

зывается явление концентрирования электрического тока высокой частоты на поверхности проводника. Явление нормального скин-эффекта хорошо объясняется на основе уравнений Максвелла и закона Ома.

При низких температурах благодаря возрастанию проводимости глубина проникновения поля высокой частоты в металле уменьшается, тогда как средний свободный пробег электронов увеличивается, так что он может стать в несколько раз больше глубины скин-слоя. Поэтому электрон за время свободного пробега будет двигаться через области с разной напряженностью поля; добавочная скорость, которую он получит, будет зависеть от напряженности поля вдоль всего пути движения. Результаты строгого математического решения показывают [51], что напряженность электрического поля определяется сложным выражением, но не имеет экспоненциального вида, который предсказывается классической теорией. Так как распространение волны не является более экспоненциальным, то классическое представление о комплексном показателе преломления в общей теории теряет свой физический смысл. Однако все измеряемые величины могут быть выражены в зависимости от «поверхностного импеданса», который равен отношению напряженностей электрического и магнитного полей на поверхности металла, умноженному на $\frac{4\pi}{c}$. Явление аномального скин-эффекта приводит к значительному увеличению поглощательной способности по сравнению с вычисленной по уравнению (71). В результате поглощательная способность чистых металлов уменьшается с понижением температуры гораздо меньше, чем этого можно было ожидать в соответствии с классической теорией.

Длина волны $\lambda_{0,5Q}$ излучения теплой граничной стенки сосуда для сжиженного газа, имеющей температуру 300° К, равна 13,7 *мкм*. Поэтому для расчетов необходимы данные по излучательной способности (степени черноты) теплой стенки и поглощательной способности холодной стенки по отношению к излучению с длиной волн 10—20 *мкм*.

Сводка опытных данных по поглощательной способности металлов при температурах 90 и 77° К приведена в табл. 3. В работе [126] определена нормальная поглощательная способность по отношению к излучению с длиной волн 8—18 *мкм*. В остальных работах измерена полусферическая поглощательная способность по отношению к излучению поверхности, имеющей комнатную температуру. В этой же таблице даны значения нормальной степени черноты при 300° К по отношению к излучению с длиной волн 10—14 *мкм*.

В соответствии с классической теорией поглощательная способность чистых металлов при 70° К должна быть примерно в 4 раза меньше, чем при комнатной температуре.

Таблица 3

Поглощательная способность различных металлов при низких температурах

Металл	Обработка поверхности, способ нанесения	$\varepsilon_н$ в % при 300° К	$a_{пс}$ в % при 90° К [76]	[126]	[16]	при 77° К [85]	[129]	[128]
Алюминий	Полирование	2,7	5,5	—	6,0	—	—	—
	Очистка кислотой	—	—	—	—	2,8	—	—
	Фольга	—	—	—	—	1,8	—	4,3
	Напыление на полиэтилентерефталатную пленку	—	—	—	—	4	—	21
Железо	Полирование	2,7	—	1,7	—	—	—	—
Золото	Полирование	—	2,6	—	—	1,0	1,6	—
	Слой покрытия	1,5	—	—	—	2,5	—	—
Кадмий	Полирование	1,8	5,4	—	—	—	—	—
Латунь (62—65% Cu)	Полирование	—	4,6	—	2,9	2,9	—	—
Манганин	—	7,7	—	7,3	—	—	—	—
Медь	Полирование	—	3,5	—	2,4	3,0	—	—
	Полирование и восстановление	—	1,9	—	—	1,5	—	—
Медь электролитическая	Полирование	2,0	—	0,82	—	1,9	1,5	—
Монель	Полирование	—	—	—	—	—	—	11
Никель	Полирование	—	—	—	—	2,2	—	—
Олово	Полирование	3,0	3,8	—	—	1,3	—	—
Припой оловянно-свинцовистый	—	—	—	—	—	3	—	4,7
Свинец	—	—	—	—	—	3,6	—	—
Серебро	Полирование	1,1	3,6	—	—	0,8	1,6	—
	Гальваническое покрытие	1,1	2,3	—	—	0,9	0,8	—
Сталь Х18Н10	Полирование	—	9,6	—	5,5	4,8	—	—
Хром	Полирование	7,0	6,5	—	—	—	—	—
	Гальваническое покрытие	—	—	—	—	8,0	—	8,4
Цинк	—	1,7	—	—	—	2,0	—	—

В действительности отношение не превышает 2. Причиной этого расхождения является аномальный скин-эффект. Еще более резкое отклонение имеет место при температуре жидкого гелия. Экспериментальные данные сопоставлены с теоретическими в табл. 4. Теория с учетом аномального скин-эффекта дает значения, хорошо согласующиеся с экспериментальными.

Таблица 4

Сравнение экспериментальных и теоретических значений нормальной поглощательной способности металлов при низких температурах

Металл	Поглощательная способность в %		
	Экспериментальные данные	Классическая теория	Теория с учетом аномального скин-эффекта
Медь [Дингль] при 293° К	1,2	0,5	0,8
Медь [Дингль] при 90° К	0,8	0,09	0,5
Медь [Дингль] при 4,2° К	0,6	0,003	0,4
Металлы [116] при 4,2° К:			
алюминий	1,11	0,13	1,03
медь	0,62	0,10	0,94
медь (механическое полирование)	1,47	0,10	0,94
олово	1,24	0,04	1,14
свинец	1,15	0,06	1,18
латунь	1,78	1,84	1,94
олово+1% индия	1,25	0,65	1,26
олово+5,4% индия	1,74	1,64	1,90

Применявшаяся ранее методика расчета переноса тепла излучением в сосудах Дьюара [48], основанная на классической теории, дает заниженные величины теплового потока. Наличие расхождений отмечалось и ранее [76], однако правильное объяснение было дано лишь на базе теории аномального скин-эффекта.

Наименьшая поглощательная способность поверхности металла обеспечивается при отсутствии нарушений упорядоченной кристаллической структуры поверхности. Для получения минимальной поглощательной способности следует снять напряжение в поверхностном слое и очистить поверхность без создания остаточных напряжений (например, путем отжига и травления или восстановлением в среде водорода). Хорошие результаты дает электрополировка. Наименьшую поглощательную способность имеют поверхности (при достаточной толщине пленки) металлов, нанесенных испарением в вакууме, электролитическим или химическим способами. При механическом полировании поглощательная способность возрастает вследствие нагартовки поверхностного слоя металла.

По данным Биркбэка, Спэрроу и Эккерта отражательная способность металлических поверхностей по отношению к инфракрасному излучению при средней высоте неровностей $R_a = 0{,}3$ *мкм* (9-ый класс чистоты по ГОСТ 2789—59) снижается почти в 2 раза по сравнению с хорошо полированной поверхностью. Согласно данным этих исследователей для достижения максимальной отражательной способности поверхность должна иметь $R_a < 0{,}04$ *мкм*, т. е. чистоту не менее 12-го класса.

Теплообмен излучением между твердыми телами в непоглощающей и нерассеивающей среде

Уравнение теплообмена излучением между поверхностями двух тел имеет следующий вид:

$$Q_{1,2} = \varepsilon_{np}\sigma_s \cdot 10^8\left[\left(\frac{T_2}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_1}{100}\right)^4\right]H_{1,2}, \qquad (72)$$

где ε_{np} — приведенная степень черноты;
T_1 и T_2 — температуры поверхностей тел 1 и 2;
$H_{1,2}$ — взаимная поверхность излучения;
$\sigma_s = 5{,}77 \cdot 10^{-8}$ *вт/м*$^2 \cdot {}^\circ$K^4.

Решение уравнения (72) сводится, в основном, к отысканию $H_{1,2}$, определяемой, в свою очередь, так называемым коэффициентом облученности или угловым коэффициентом

$$\varphi_{1,2} = \frac{H_{1,2}}{F_1} = \int_{F_1}\int_{F_2}\frac{\cos\varphi_1\cos\varphi_2}{\pi r^2}\,dF_1\,dF_2, \qquad (73)$$

где r — расстояние между элементарными площадками dF_1 и dF_2 поверхностей тел 1 и 2;
φ_1 и φ_2 — углы падения излучения на центры элементарных площадок.

Вычисление угловых коэффициентов представляет собой сложную задачу; они вычислены лишь для ограниченного числа сравнительно простых случаев. Результирующий поток $Q_{1,2}$ значительно легче отыскать, используя метод расчета на основе лучистых сальдо, разработанный Г. Л. Поляком.

Сосуд с вакуумной теплоизоляцией представляет собой две замкнутых оболочки, одна из которых находится внутри другой. В этом случае при отсутствии вогнутостей на внутренней оболочке $\varphi_{1,2} = 1$ и $H_{1,2} = F_1$.

В сосудах для сжиженных газов результирующий тепловой поток $Q_{2,1}$ идет от наружной оболочки к внутренней. Согласно свойству взаимности лучистых потоков $Q_{2,1} = Q_{1,2}$.

Приведенная степень черноты в рассматриваемом случае определяется по формуле Христиансена

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2}\left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)}. \qquad (74)$$

Эта формула строго справедлива лишь в следующих случаях:
1) два коаксиальных бесконечно длинных цилиндра;
2) две концентрические сферы;
3) сфера с бесконечно тонким диском, расположенным в экваториальной плоскости, причем радиус диска равен радиусу сферы.

Во всех других случаях формула (74) дает завышенные значения. Отыскание точных формул для каждого случая является весьма сложной задачей. Поэтому, несмотря на приближенность формулы (74), ею широко пользуются в технических расчетах. Отклонения уменьшаются, если F_1 и F_2 близки между собой и $\varepsilon_1 < \varepsilon_2$.

Экранирование излучения

Лучистый теплообмен между двумя поверхностями можно значительно уменьшить, если установить между ними один или несколько непрозрачных для теплового излучения экранов. Эффективность экранов определялась с помощью методов матричной алгебры [82]. Последующие рассуждения относятся к независимо подвешенным в вакууме («плавающим») экранам.

Обозначим через η эффективность экранирования, определяемую как отношение результативных лучистых потоков с экранами и без них. Если имеем n тонких экранов, т. е. таких экранов, у которых площади обеих поверхностей можно принять равными, то

$$\eta = \left[1 + E_0 f_1\left(\frac{1-t_1}{t_1}\right) + E_0 f_1 f_2\left(\frac{1-t_2}{t_2}\right) + \ldots \right.$$
$$\left. \ldots + E_0 f_1 f_2 \ldots f_n\left(\frac{1-t_n}{t_n}\right)\right]^{-1}, \qquad (75)$$

где

$E_0 = \frac{\varepsilon_0}{2-\varepsilon_0}$ — приведенная степень черноты системы из двух граничных поверхностей;
f_m — доля отраженного излучения от падающего на m-й экран излучения;

$$\frac{1}{t_m} = \frac{1}{\varepsilon_{mk}} + \frac{1}{\varepsilon_{ml}};$$

ε_k и ε_l — степени черноты обеих поверхностей экрана.

При экранировании теплового излучения в изделиях с вакуумной теплоизоляцией, представляющих собой замкнутые оболочки, каждый последующий экран охватывает предыдущий. В этом случае

$$f_m = \frac{F_{m-1}}{F_m}.$$

Формула (75) может быть упрощена при введении некоторых допущений. Примем, что степень черноты обеих поверхностей каждого экрана одинакова. Это допущение часто оправдывается на практике. Например, степень черноты матовой и блестящей сторон алюминиевой фольги, применяемой для многослойной теплоизоляции, различается примерно лишь на 10% [74]. Принимая, что $\varepsilon_{mk} = \varepsilon_{ml} = \varepsilon_m$, находим

$$\frac{1-t_m}{t_m} = \frac{2-\varepsilon_m}{\varepsilon_m}.$$

Дальнейшее упрощение формулы (75) основывается на допущении об одинаковой степени черноты всех экранов. Это допущение необосновано, так как экраны имеют различную температуру, а степень черноты уменьшается с понижением температуры. Тем не менее, ввиду сложности проблемы, обычно для приближенного анализа ее и технических расчетов принимают, что все экраны имеют одинаковую степень черноты. Дополнительным оправданием такого допущения может служить подобие температурного поля при различном числе экранов и постоянных температурах граничных поверхностей.

Принимая $\varepsilon_m = \varepsilon_э = \text{const}$ и обозначая через $E_э = \frac{\varepsilon_э}{2-\varepsilon_э}$ приведенную степень черноты системы из двух соседних экранов, получаем

$$\eta = \left[1 + \frac{E_0}{E_э}(f_1 + f_1f_2 + \ldots + f_1f_2 \ldots f_n)\right]^{-1}. \qquad (76)$$

Найдем эффективность экранирования в условиях, имеющих обычно место при низкотемпературной изоляции. При использовании экранов в сосудах с вакуумной теплоизоляцией (например, при многослойной изоляции) расстояние между соседними экранами является постоянной величиной. При установке n экранов между оболочками радиусом r_1 и r_2 расстояние между экранами

$$\delta = \frac{r_2 - r_1}{n+1}.$$

При этом условии в случае цилиндрических экранов находим

$$f_m = \frac{r_1 + \frac{m-1}{n+1}(r_2 - r_1)}{r_1 + \frac{m}{n+1}(r_2 - r_1)}.$$

Отсюда

$$f_1f_2 \ldots f_m = \frac{r_1}{r_1 + \frac{1}{n+1}(r_2 - r_1)} \times \frac{r_1 + \frac{1}{n+1}(r_2 - r_1)}{r_1 + \frac{2}{n+1}(r_2 - r_1)} \times \ldots$$

$$\ldots \times \frac{r_1 + \frac{m-1}{n+1}(r_2 - r_1)}{r_1 + \frac{m}{n+1}(r_2 - r_1)} = \frac{r_1}{r_1 + \frac{m}{n+1}(r_2 - r_1)}$$

С учетом этого соотношения формула (75) принимает вид

$$\eta = \left(1 + \frac{E_0}{E_э} r_1 \sum_{m=1}^{n} \frac{1}{r_1 + \frac{m}{n+1}(r_2 - r_1)}\right)^{-1}. \qquad (77)$$

Аналогичным образом для сферических экранов получаем

$$\eta = \left(1 + \frac{E_0}{E_э} r_1^2 \sum_{m=1}^{n} \frac{1}{\left[r_1 + \frac{m}{n+1}(r_2 - r_1)\right]^2}\right)^{-1}. \qquad (78)$$

В простейшем случае плоских экранов $f_m = 1$ и

$$\eta = \left(1 + n\frac{E_0}{E_э}\right)^{-1}. \qquad (79)$$

Рассмотрим три частных случая применения формулы (79).

1) Степень черноты граничных поверхностей и экранов одинакова. Отсюда следует, что $E_0 = E_э$, и формула (79) приводится к виду

$$\eta = (1+n)^{-1} = \frac{1}{n+1}. \qquad (80)$$

Это соотношение наиболее известно и обычно приводится в учебниках для характеристики действия экранов. Оно соответствует применению одного или нескольких подвешенных металлических экранов в сосудах Дьюара. В этом случае установка одного экрана уменьшает перенос тепла излучением в 2 раза.

2) Степень черноты граничных поверхностей близка к 1, т. е. $E_0 \approx 1$. Тогда

$$\eta = \left(1 + \frac{n}{E_э}\right)^{-1} = \frac{1}{1 + \frac{n}{E_э}} . \qquad (81)$$

Установка одного экрана с малой степенью черноты приводит здесь к снижению теплового потока в несколько десятков раз.

3) Степень черноты экранов приблизительно равна 1, т. е. $E_э \approx 1$. Тогда

$$\eta = (1 + nE_0)^{-1} = \frac{1}{1 + nE_0} . \qquad (82)$$

Тепловой поток уменьшается в 2 раза при $nE_0 = 1$. Следовательно, несколько десятков черных экранов дают такой же эффект, как и полированные оболочки с высокой отражательной способностью. Этот случай имеет место при использовании вакуумно-порошковой или вакуумно-волокнистой изоляции.

Определение температур отдельных экранов в общем случае представляет собой довольно сложную задачу. В простейшем случае, соответствующем формуле (80), температура m-го экрана определяется уравнением

$$T_m = \left[T_2^4 - \frac{m}{n+1}\left(T_2^4 - T_1^4\right)\right]^{1/4}. \qquad (83)$$

Теплообмен излучением в поглощающей и рассеивающей среде

В эффективных видах низкотемпературной теплоизоляции с применением вакуума поток лучистой энергии задерживается (ослабляется) в значительной мере за счет поглощения и рассеяния его частицами теплоизоляционного материала. Теория ослабления излучения дисперсными материалами разработана довольно полно, она широко применяется в астрономии и световой оптике и частично используется в теплотехнике.

Закономерности теплообмена излучением в изоляции не подвергались достаточно полному анализу на теоретической основе. В данном разделе кратко изложены теоретические основы теплообмена излучением в ослабляющих средах.

Ослабление излучения отдельными частицами. Если лучистая энергия проходит через однородную среду, она не рассеивается. Необходимым условием рассеяния излучения является нарушение однородности среды. Физическая сущность такого нарушения состоит в наличии границы раздела между отдельными участками среды, имеющими различные показатели преломления. Твердая частица в газовой среде представляет собой типичный пример неоднородности, рассеивающей излучение. Детальный анализ рассеяния излучения отдельными частицами дан в работах [67] и [8].

Пусть полная энергия, рассеиваемая частицей по всем направлениям, будет равна энергии, падающей на площадь F_p. Площадь F_p называется сечением рассеяния. Обозначим через F геометрическое поперечное сечение частицы. Безразмерная постоянная

$$k_p = \frac{F_p}{F}$$

называется коэффициентом рассеяния частицы.

Аналогичным образом определяются поперечное сечение и коэффициент поглощения F_n и k_n, а также поперечное сечение и коэффициент ослабления (экстинкции) F_o и k_o.

Задача об определении коэффициентов ослабления, рассеяния и поглощения излучения сводится к определению составляющих электромагнитного поля, образующегося в результате взаимодействия между полем падающей волны и полем, создаваемым частицей как вторичным излучателем, под воздействием падающей волны. Общее решение этой задачи для случая рассеяния плоской волны однородным шаром было получено Г. Ми путем интегрирования уравнений Максвелла и дано в виде бесконечных рядов по амплитудам парциальных электрических и магнитных колебаний. Амплитуды являются функциями комплексного показателя преломления шара и параметра $x = \frac{\pi d}{\lambda}$ (d — диаметр шара, λ — длина волны).

Таким образом эффективность ослабления излучения частицей зависит от диаметра частицы, длины волны, а также показателей преломления и поглощения вещества частицы, зависящих в свою очередь от длины волны.

При изучении степени ослабления излучения изоляционным материалом следует принимать во внимание не только коэффициент рассеяния, но и направление рассеяния излучения. Согласно теории Максвелла электромагнитная волна переносит не только энергию, но и импульс, направление которого совпадает с направлением распространения волны. Часть направленного вперед компонента импульса, теряемого падающим пучком вследствие рассеяния частицей и не возмещаемого направленным вперед компонентом импульса рассеянной волны, пропорциональна величине

$$F_\partial = F_o - \overline{\cos\theta}\, F_p, \qquad (84)$$

где $\overline{\cos\theta}$ — средневзвешенное значение $\cos\theta$ (θ — угол между направлениями падающего и рассеянного луча).

На рассеивающую частицу действует некоторая сила в направлении распространения падающей волны. Это хорошо известное явление лучевого давления. Назовем величину

$$k_д = \frac{F_д}{F}$$

коэффициентом лучевого давления. Чем больше $k_д$, тем меньшая доля рассеянного излучения распространяется в направлении падающего излучения. Величина $k_д$ наилучшим образом характеризует эффективность ослабления частицами теплового излучения. В случае непоглощающих частиц коэффициент лучевого давления называют также коэффициентом обратного рассеяния ($k_{обр.\ р}$).

В литературе имеется много работ, содержащих результаты вычислений по уравнениям Ми для различных значений x и m.

В ряде случаев выведены сравнительно простые формулы, которые могут быть получены и как частные решения общих уравнений Ми.

Фазовый сдвиг луча, проходящего сквозь шар вдоль его диаметра,

$$\rho = 2x(m-1)$$

является важным параметром, характеризующим рассеяние излучения частицами.

Процессы рассеяния оказываются совершенно различными в зависимости от того, велики или малы фазовые сдвиги по сравнению с 1. Для малых частиц сдвигом фаз можно пренебречь. В результате поле, создаваемое малой частицей, как вторичным излучателем, можно рассматривать, как поле диполя. Поле, создаваемое большими частицами, является полем более высокого порядка.

В случае малых сферических частиц, диаметр которых значительно меньше длины волны ($x \ll 1$), можно ограничиться рассмотрением лишь одной парциальной волны электрических колебаний, так как амплитуды остальных волн пренебрежимо малы.

Уравнения Ми сводятся к

$$k_p = \frac{8}{3} x^4 \left| \frac{m^2-1}{m^2+2} \right|^2; \qquad (85)$$

$$k_n = -4x \operatorname{Im}\left(\frac{m^2-1}{m^2+2} \right). \qquad (86)$$

Символ Im означает мнимую часть комплексного переменного. Согласно уравнению (85) рассеяние излучения малыми частицами увеличивается пропорционально четвертой степени диаметра частиц. Формула (85) в несколько ином виде была

впервые выведена Рэлеем. Рассеяние света малыми частицами, следующее этой формуле, получило название рэлеевского. Следует подчеркнуть, что необходимым условием рэлеевского рассеяния является неравенство $\rho \ll 1$ (частицы должны быть диэлектрическими). В этом случае распределение интенсивности рассеянного излучения по различным направлениям описывается известной формулой Рэлея

$$I_\theta = K(1 + \cos^2\theta), \qquad (87)$$

где K — постоянная.

Кривая распределения интенсивности рассеянного излучения называется индикатрисой рассеяния. Индикатриса рэлеевского рассеяния показана на рис. 11, *а*. Максимальное, одинаковое по величине рассеяние имеет место в направлении падающего излучения и в обратном направлении. Рассеяние в боковом направлении в два раза меньше.

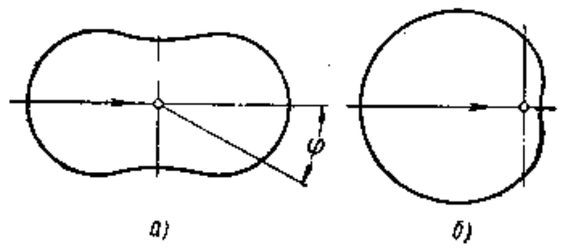


Рис. 11. Индикатрисы рассеяния малых шаровых частиц:

а — диэлектрической частицы (Рэлеевское рассеяние); *б* — идеально проводящей частицы

При очень больших значениях m сдвиг фаз ρ может стать большим даже при весьма малом диаметре частиц. На практике этот случай встречается у металлических частиц и представляет для нас существенный интерес ввиду использования металлических порошков для экранирования излучения в изоляции.

Коэффициент ослабления излучения идеально проводящей (отражающей) частицей с $|m| \to \infty$

$$k_o = k_p = k = \frac{10}{3} x^4. \qquad (88)$$

Максимум рассеяния здесь направлен назад, против хода лучей (рис. 11, *б*). Интенсивность рассеяния вперед составляет $^1/_9$ интенсивности рассеяния назад, так как, кроме электрического дипольного излучения, вступает в действие также магнитное дипольное излучение.

При увеличении диаметра частиц зависимость коэффициента ослабления от фазового сдвига ρ ослабевает. Эта зависимость имеет весьма сложный характер (рис. 12). Коэффициент рассеяния достигает максимума при значении ρ, несколько большем 4, и затем постепенно уменьшается, проходя последовательно через ряд затухающих минимумов и максимумов. По мере увеличения диаметра частиц значение коэффициента рассеяния стремится к предельному значению 2. Таким обра-

зом, поперечное сечение ослабления большой частицы в 2 раза больше ее фактического поперечного сечения, что противоречит обычным соотношениям геометрической оптики. Такое

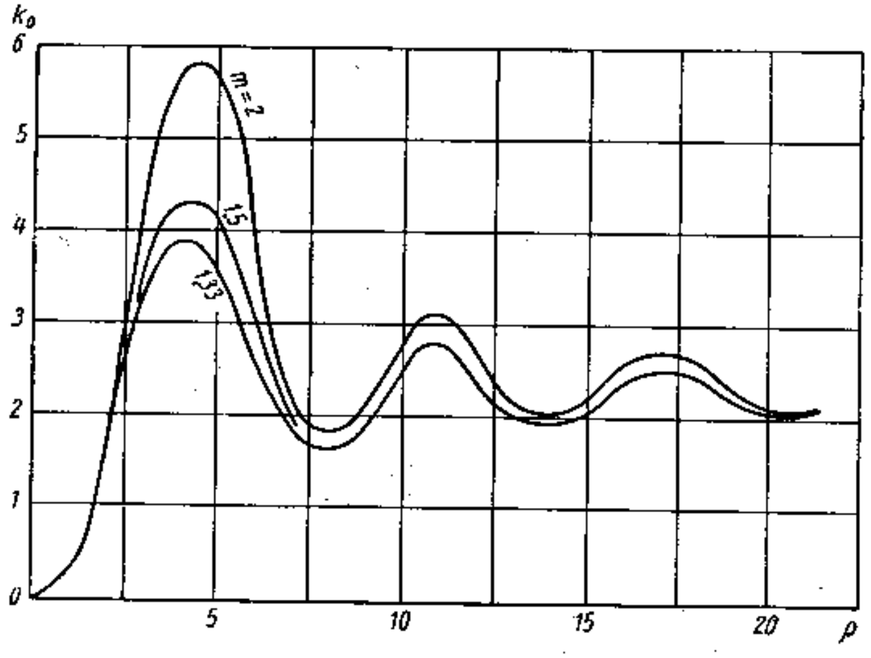


Рис. 12. Зависимость коэффициента ослабления излучения отдельной шаровой частицей от фазового сдвига

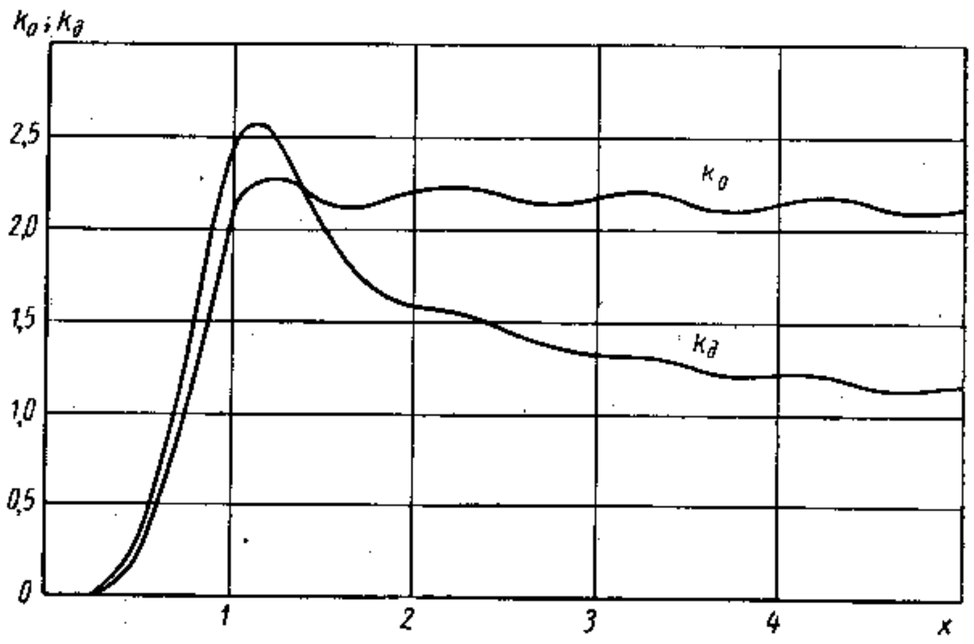


Рис. 13. Зависимость коэффициентов ослабления излучения и лучевого давления для металлического шара от параметра x

удвоение ослабления связано с наличием особых дифракционных явлений на больших частицах, приводящих к специфическому характеру их индикатрис рассеяния.

Коэффициент ослабления металлических частиц также приближается по величине к 2 при увеличении диаметра частиц (рис. 13); причем в этом случае переход происходит более плавно и при меньшем диаметре. На рис. 13 нанесены также значения $k_д$. Он достигает максимума при $x \approx 1{,}25$. При дальнейшем увеличении x коэффициент $k_д$ уменьшается вследствие вытягивания индикатрисы рассеяния в направлении распространения падающего излучения. Все же у больших ($x \gg 1$) металлических частиц $k_д$ не снижается меньше 1, т. е. металлическая частица рассеивает в обратном направлении излучение, падающее на площадь, равную или большую, чем ее поперечное сечение.

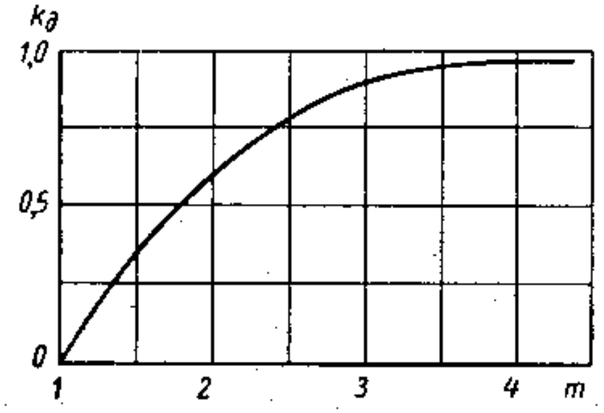


Рис. 14. Зависимость коэффициента лучевого давления для шаровой частицы от комплексного показателя преломления

У диэлектрических частиц вытягивание индикатрисы рассеяния вперед происходит в еще большей степени. На рис. 14 показано изменение $k_д$ в зависимости от комплексного показателя преломления. При уменьшении m от ∞ (металлические частицы) до 1,5 рассеяние излучения частицей назад уменьшается приблизительно в 3 раза, а при дальнейшем уменьшении m до 1,1 оно снижается в 12 раз.

Все приведенные выше уравнения и вычисленные по ним численные значения получены для рассеяния монохроматического излучения сферической частицей. На практике частицы порошков имеют форму, отличающуюся от сферической, а тепловое излучение не является монохроматическим (см. рис. 10).

Диаграмма рассеяния, обусловленная отражением от сравнительно больших выпуклых частиц любой формы, ориентированных случайным образом, тождественна с диаграммой рассеяния при отражении от шаров из того же вещества с теми же свойствами поверхности. При этом среднее геометрическое поперечное сечение выпуклой частицы, ориентированной случайным образом, составляет $^1/_4$ площади ее поверхности.

С малыми частицами дело обстоит сложнее. Строгие решения имеются лишь для частиц сравнительно простой геометрической формы (эллипсоидов, цилиндров, круглых дисков). При

$x \ll 1$ коэффициент рассеяния для эллипсоидов и круглых дисков пропорционален x^4, для цилиндров — x^3.

Согласно уравнению (85) рассеяние на малых частицах обратно пропорционально четвертой степени длины волны падающего излучения. Поэтому при прохождении теплового излучения через слой частиц малых размеров прошедшее излучение обогащается длинноволновыми компонентами, а рассеянное — короткими. При больших размерах частиц такого явления не будет.

Ослабление излучения дисперсной средой. Изоляционный материал представляет собой дисперсную среду, состоящую из множества частиц. При достаточно больших расстояниях между частицами рассеяние излучения одной частицей не зависит от присутствия других частиц (однократное рассеяние независимыми частицами). В первом приближении достаточным условием является расстояние между частицами, в три раза превышающее радиус и заметно превышающее длину волны.

При тепловой изоляции условия рассеяния независимыми частицами могут выполняться в первом приближении в некоторых случаях, например, для тонкодисперсных материалов, а также для металлических порошков, добавляемых с целью экранирования излучения.

При однократном рассеянии коэффициент ослабления (экстинкции) γ дисперсной среды из частиц одинакового диаметра d

$$\gamma = NF_o = N\frac{\pi d^2}{4}k_o, \qquad (89)$$

где N — число частиц в единице объема.

Ослабление дисперсной средой лучистого потока в определенном направлении характеризуется величиной коэффициента лучевого давления k_∂, который и должен подставляться в этом случае в формулу (89) вместо k_o.

Если частицы имеют сферическую форму, то число частиц легко находится по их концентрации a *кг/м*^{3}

$$N = \frac{6a}{\pi d^2 \rho},$$

где ρ — плотность вещества частиц.

Подставляя это выражение в уравнение (89), находим с учетом сделанного замечания

$$\gamma = 1{,}5\frac{a}{\rho}\cdot\frac{k_\partial}{d}. \qquad (90)$$

Аналогично коэффициент рассеяния среды σ равен

$$\sigma = 1{,}5\frac{a}{\rho}\frac{k_p}{d}. \qquad (91)$$

Подставляя в формулу (90) выражения для k_o малых и больших частиц, находим, что коэффициент ослабления облака малых частиц пропорционален кубу диаметра частиц, а больших частиц — обратно пропорционален диаметру. При этом положение максимума коэффициента ослабления облака частиц сдвинуто в сторону меньших значений диаметра по сравнению с положением максимума коэффициента ослабления одной частицы.

При постоянных значениях длины волны, абсолютного показателя преломления среды n_c и концентрации частиц величина коэффициента рассеяния среды является функцией диаметра частиц и показателя преломления вещества частиц относительно среды n, равного отношению абсолютных показателей преломления вещества частиц и среды. При постоянном показателе n величина коэффициента рассеяния проходит через максимум при определенном значении фазового сдвига ρ, соответствующем оптимальному размеру частиц.

Для определения положения максимума и соответствующего ему оптимального диаметра частиц при значениях $n = 1{,}05 - 2{,}0$ предложены [124] следующие формулы:

$$\rho_{max} = \frac{2{,}98}{n_c}, \quad \text{откуда} \quad d_{max} = \frac{0{,}475\lambda}{n_c(n-1)}; \qquad (92)$$

$$\rho_{max} = \frac{1{,}8}{n_c}\cdot\frac{n^2+2}{n+1}, \quad \text{откуда} \quad d_{max} = \frac{0{,}287\lambda(n^2+2)}{n_c(n^2-1)}. \qquad (93)$$

Если принять постоянным размер частиц вместо длины волны, то зависимость отношения d/λ от показателя n несколько изменится. В этом случае пользуются другими формулами для d_{max}, с помощью которых определяют диаметр частиц, измеряя на спектрофотометре прозрачность порошка (обычно в виде суспензии) по отношению к свету с различной длиной волн. Результаты исследований показывают хорошее согласование данных, полученных этим способом, с измерениями размеров частиц адсорбционным методом, электронным микроскопом и другими методами.

На практике мы обычно имеем дело с полидисперсными средами. Методика расчета коэффициента ослабления для этого случая дана в работе [7].

Коэффициент ослабления излучения полидисперсной средой может быть определен также по формуле

$$\gamma = \frac{1}{4}Sak_\partial, \qquad (94)$$

где S — удельная поверхность частиц в *м*^{2}/*кг*.

Опыты [6] с золовой пылью, имеющей различную концентрацию и удельную поверхность частиц, подтвердили применимость

формулы (94) к полидисперсным средам. По данным этой работы связь между k_o и x в интервале $x = 5 \div 50$ описывается формулой

$$k_o = Ax^{1/3},$$

где A — постоянная, зависящая от вида золы.

Среднее значение A равно 0,6. При $x = 40 \div 50$ экспериментальная величина k_o близка к 2, что хорошо согласуется с теорией.

В работе [98] приведены данные об измерении спектрофотометрическим методом коэффициента рассеяния излучения с длиной волны 0,25—0,7 *мкм* для нескольких порошков с различными размерами частиц. Был измерен, в частности, коэффициент рассеяния образцов применяющегося в теплоизоляции порошка аэросила, имевших плотность 107 *кг/м*^{3}, удельную поверхность от 38 до 376 *м*^{2}*/г* и размер частиц 0,01—0,08 *мкм* ($x = 0{,}05 \div 1$). Коэффициент рассеяния возрастал пропорционально $\lambda^{-\alpha}$, причем величина α по мере возрастания удельной поверхности увеличивалась с 2,6 до 3,6. Последнее значение близко к теоретическому, равному 4 при $x \ll 1$.

В опытах с относительно крупнозернистыми стеклянными порошками ($d = 2{,}5 \div 15$ *мкм*; $x > 10$) σ в соответствии с теорией не зависел от длины волны и изменялся обратно пропорционально диаметру частиц.

Особый интерес для нас представляют исследования, включающие измерения в районе максимума ослабления. На рис. 15 нанесены результаты измерений коэффициента ослабления излучения с длиной волны 0,726 и 0,436 *мкм* суспензиями каолина и глинистого ила с различными размерами частиц (К. И. Иванов). Величина $\frac{\gamma}{a}$ проходит через максимум при $\frac{d}{\lambda} \approx 2$.

Найдем теоретическое положение максимума. Коэффициенты преломления каолинита и воды относительно воздуха равны 1,56 и 1,33 соответственно. Подставляя эти значения в формулы (92) и (93), получаем величину $\left(\frac{d}{\lambda}\right)_{max}$ соответственно равную 2,06 и 1,94, что очень хорошо согласуется с экспериментом. При больших диаметрах частиц коэффициент ослабления в соответствии с теорией обратно пропорционален диаметру.

На рис. 16 приведены [103] зависимости коэффициента обратного рассеяния излучения абсолютно черного тела ватой из стеклянных волокон различного диаметра при разных температурах. Кривые имеют максимум при диаметре волокон 2—5 *мкм*. При прохождении интегрального излучения от абсолютно черного тела через дисперсную среду в качестве расчетного

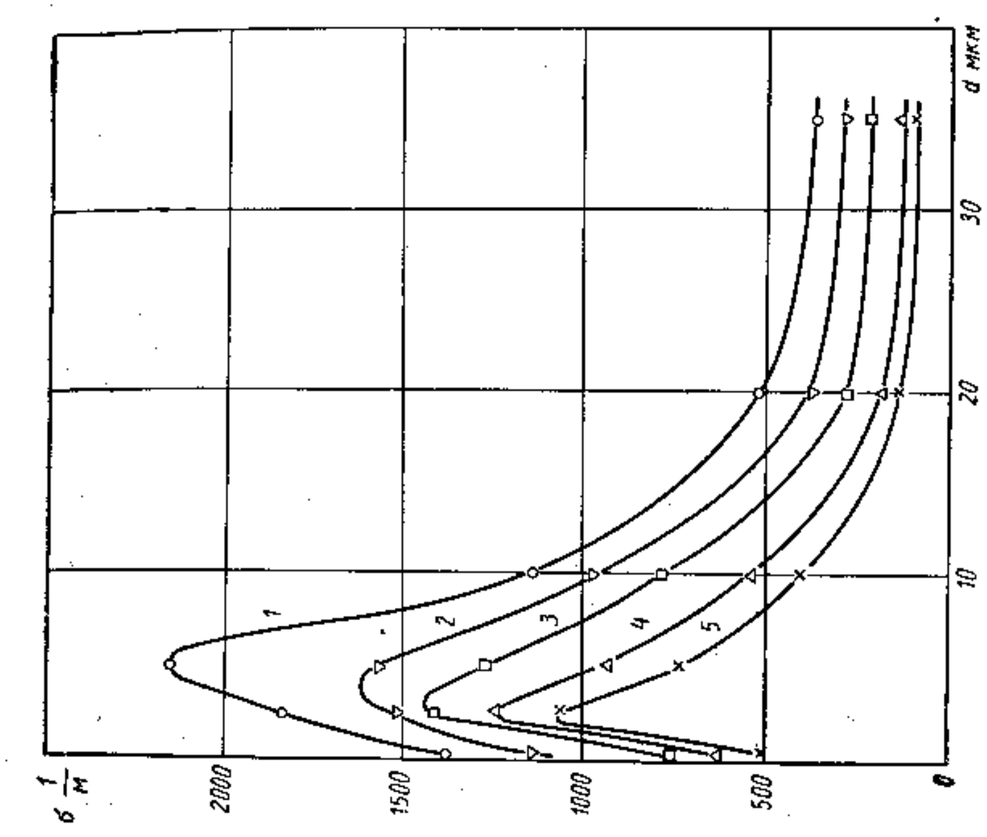


Рис. 16. Зависимость коэффициента обратного рассеяния излучения стеклянной ватой от диаметра волокон при температуре источника излучения (черного тела):
1 — 366° К, *2* — 422° К; *3* — 477° К; *4* — 589° К; *5* — 700° К

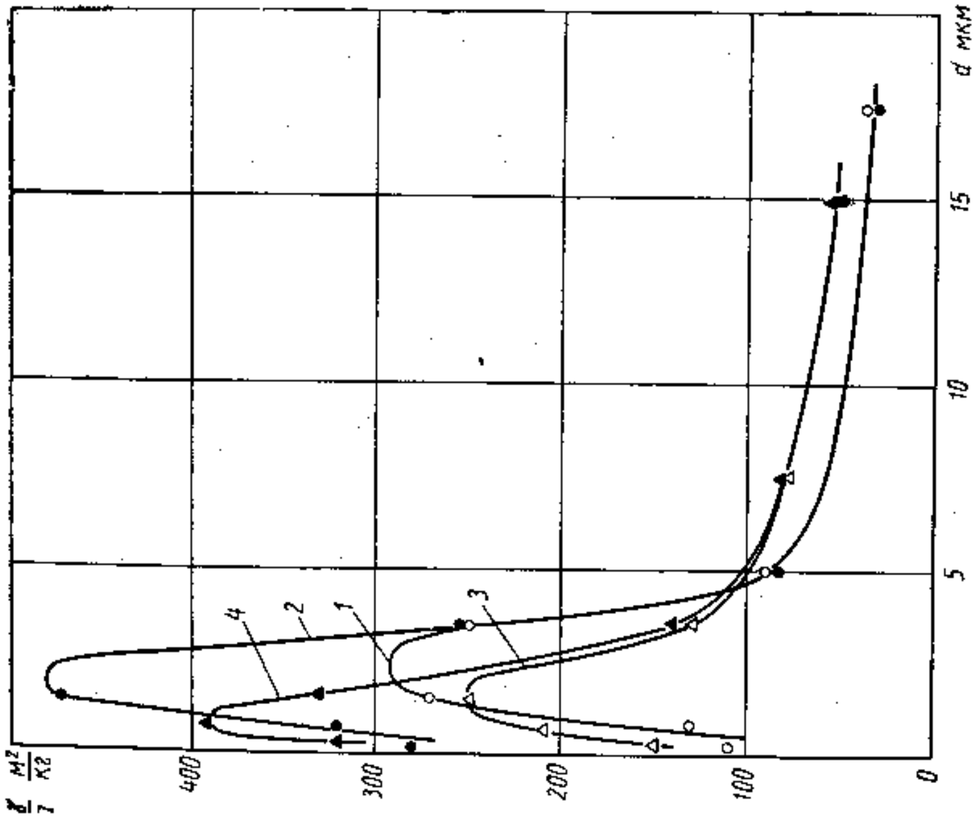


Рис. 15. Зависимость коэффициента ослабления излучения суспензией от диаметра частиц:
1 — каолин (длина волны излучения $\lambda = 0{,}726$ *мкм*); *2* — каолин ($\lambda = 0{,}436$ *мкм*); *3* — глинистый ил ($\lambda = 0{,}726$ *мкм*); *4* — глинистый ил ($\lambda = 0{,}436$ *мкм*)

значения длины волны для приближенных вычислений можно принять длину $\lambda_{0,5Q}$, определяемую формулой (62).

Отношение $\frac{d}{\lambda_{0,5Q}}$ в точках максимумов на рис. 16 находится в пределах 0,29—0,34.

Кривые ослабления для сферических частиц (см. рис. 12) и очень длинных цилиндров, которыми можно считать нити стекловолокна, имеют аналогичный вид. Максимум для цилиндров достигается при фазовом сдвиге $\rho = 3{,}7$ вместо 4,1 для шариков. Теоретический расчет оптимального диаметра стекловолокон затрудняется в рассматриваемом случае значительными изменениями коэффициента преломления стекол в области инфракрасных волн. Достаточно полные данные для стекол отсутствуют. Характер изменения можно проследить на примере кварцевого стекла, у которого коэффициент преломления при длине волн 0,8—3,5 *мкм* равен 1,41—1,45, снижается до 0,4 при 8 *мкм* и затем возрастает до 3,9 при 9,5 *мкм*. Эффективные значения длин волн в опытах, по результатам которых приведены кривые на рис. 16, находятся в пределах 7—14 *мкм*.

Средний коэффициент преломления по формуле (92) равен 2,5. Полученное значение довольно правдоподобно, хотя формула (92) выведена лишь для сферических частиц с коэффициентом преломления 1,05—2,0.

Коэффициент лучевого давления для одной частицы дисперсного материала может быть вычислен по формуле (90). Согласно данным работы К. И. Иванова k_∂ частиц каолина возрастает до 1,0 и остается постоянным при дальнейшем увеличении диаметра частиц. Аналогичным образом изменяется в зависимости от диаметра волокон и k_∂ в случае стеклянной ваты [103]. При этом постоянное значение k_∂ при больших диаметрах волокон уменьшается с 2,7 при температуре источника излучения 366° К до 0,9 при 700° К.

Таким образом, имеющиеся экспериментальные данные по ослаблению излучения рассеянием в малопоглощающих дисперсных материалах качественно и в ряде случаев количественно согласуются с теорией при допущении о независимом рассеянии излучения отдельными частицами. Положение максимума рассеяния удовлетворительно определяется формулами (92) и (93). При $x \ll 1$ имеет место рэлеевское рассеяние. В области $x > 50$ коэффициент k_∂ постоянен, причем его значение в рассматриваемых работах находится, в основном, в пределах от 1 до 2, т. е. составляет 50—100% от теоретического значения k_o.

Перенос тепла излучением в поглощающей и рассеивающей среде. В большинстве случаев переноса излучения в дисперсных средах необходимо учитывать многократность рассеяния частицами. Многие задачи теории переноса лучистой энергии через дисперсные среды приводят к интегро-дифференциальным уравнениям, строгое и точное решение которых пока невозможно. Даже приближенное решение интегро-дифференциального уравнения переноса излучения в общем виде удается найти только в исключительных случаях. Весьма плодотворным оказался метод упрощения проблемы (для одномерной задачи), разработанный Шустером и заключающийся в переходе от интенсивностей к потокам излучения, что позволяет заменить интегро-дифференциальное уравнение системой дифференциальных уравнений.

Допустим, что неограниченная в горизонтальных направлениях изотропнорассеивающая среда, облучается со стороны ее верхней границы. Индикатриса рассеяния частиц принимается симметричной относительно плоскости, перпендикулярной направлению луча (см., например, рис. 11, *а*). Уравнение переноса в этом простейшем случае примет вид

$$\mu \frac{dI(x, \mu)}{dx} = \gamma I(x, \mu) - \frac{1}{2}\sigma \int_{-1}^{+1} I(x, \mu')\, d\mu', \qquad (95)$$

где x — расстояние от верхней граничной поверхности;

$\mu = \cos\theta$ (θ — угол между направлением луча и нормалью к облучаемой поверхности);

I — интенсивность лучистой энергии.

Индекс $'$ относится к точке объема, из которой исходит излучение в рассматриваемую точку.

Плотности лучистых потоков, идущих сверху вниз и снизу вверх, соответственно равны

$$E_+(x) = \int_{-1}^{0} I(x, \mu)\, d\mu \quad \text{и} \quad E_-(x) = \int_{0}^{1} I(x, \mu)\, d\mu.$$

Принимая потоки диффузными в любом сечении, можно получить

$$\left.\begin{aligned} \frac{dE_+}{dx} &= -(2\alpha + \sigma)E_+ + \sigma E_-; \\ \frac{dE_-}{dx} &= (2\alpha + \sigma)E_- - \sigma E_+, \end{aligned}\right\} \qquad (96)$$

где α — коэффициент поглощения среды.

Таким образом, интегро-дифференциальное уравнение (95) заменяется системой двух однородных линейных дифференциальных уравнений первого порядка, решение которой легко находится.

Полное решение системы уравнений (96) имеет следующий вид:

$$E_+ = A\beta e^{Dx} + Be^{-Dx}; \qquad (97)$$

$$E_- = Ae^{Dx} + B\beta e^{-Dx}, \qquad (98)$$

где

$$\beta = \frac{1 - \sqrt{\frac{\alpha}{\gamma}}}{1 + \sqrt{\frac{\alpha}{\gamma}}},$$

$$D = 2\sqrt{\alpha\gamma},$$

A и B — постоянные, определяемые граничными условиями.

Граничные условия в общем случае могут быть заданы в виде

$$E_+|_{x=0} = E_1 \quad \text{и} \quad E_-|_{x=\delta} = E_2.$$

Определяя с помощью заданных граничных условий константы A и B, получаем [1]

$$E_+ = \frac{E_1}{1-\psi^2}(e^{Dx} - \psi^2 e^{-Dx}) - \frac{E_2\psi}{1-\psi^2}(e^{Dx} - e^{-Dx}); \qquad (99)$$

$$E_- = \frac{E_2}{1-\psi^2}(e^{D(\delta-x)} - \psi^2 e^{-D(\delta-x)}) - \frac{E_1\psi}{1-\psi^2}(e^{D(\delta-x)} - e^{-D(\delta-x)}), \qquad (100)$$

где

$$\psi = \frac{e^{D\delta}}{\beta}.$$

Лучистый поток через дисперсную среду равен

$$q_л = E_+ - E_-.$$

Значения E_1 и E_2 определяются из дополнительных граничных условий. В частности, если дисперсная среда не заключена между граничными стенками, или их поверхности являются абсолютно черными, имеем дополнительное условие $E_2 = 0$. Пропускательная способность слоя, которая обычно представляет наибольший интерес, в этом случае равна

$$T = \frac{E_+|_{x=\delta}}{E_1} = e^{-D\delta}\frac{1-\beta^2}{1-\beta^2 e^{-2D\delta}}. \qquad (101)$$

Систему уравнений (96) можно свести к одному дифференциальному уравнению вида

$$\frac{dr}{dx} = \sigma r^2 - (2\alpha + \sigma)r + \sigma, \qquad (102)$$

где $r = \frac{E_-}{E_+}$.

Это уравнение легко интегрируется, причем решение имеет простой вид с применением гиперболических функций [103]. В частности, при $E_2 = 0$.

$$T = \frac{1}{\mathrm{ch}D\delta + \frac{\alpha+\gamma}{D}\mathrm{sh}D\delta}. \qquad (103)$$

Разлагая это уравнение в ряд, получаем

$$T = \frac{2De^{-D\delta}}{\alpha+\gamma+D}\sum_{n=0}^{\infty}\left(\frac{\alpha+\gamma-D}{\alpha+\gamma+D}\right)^n e^{-2nD\delta}. \qquad (104)$$

При достаточно больших толщинах слоя дисперсной среды ($e^{-2D\delta} \ll 1$) знаменатель в уравнении (101) и ряд в уравнении (104) приближаются к единице и пропускательная способность связана с толщиной следующей зависимостью:

$$T = (1-\beta^2)e^{-D\delta} = \frac{2D}{\alpha+\gamma+D}e^{-D\delta}. \qquad (105)$$

Г. В. Розенберг [49] получил другим путем в более общем виде уравнение для дисперсных сред большой толщины

$$T = e^{-k(\delta-\delta_0)}, \qquad (106)$$

где $k = \sqrt{\frac{\alpha\gamma}{q}}$,

δ_0 и q — постоянные.

Уравнения (105) и (106) выражаются прямыми линиями в полулогарифмических координатах $\lg T - \delta$. Эксперименты подтверждают такую закономерность. В. А. Тимофеева исследовала распределение яркости света в сильно рассеивающих мутных средах (молочной, канифольной) и нашла, что при достаточно больших глубинах уменьшение яркости происходит по уравнению (106). Аналогичные результаты получены Ф. Я. Сидько и И. А. Терсковым, которые измеряли ослабление светового потока при прохождении через суспензию эритроцитов.

На рис. 17 приведены кривые, полученные [103] при пропускании стекловолокном теплового излучения от источника в виде абсолютно черного тела с температурой 478° К. Экспериментальные кривые следуют уравнению (104), а при больших толщинах — уравнению (105). По экспериментальной зависимости пропускательной способности дисперсного материала от толщины слоя могут быть определены коэффициенты ослабления излучения.

Наклон прямолинейного участка в полулогарифмических координатах определяет величину D, а по точке пересечения экстраполированной прямой с осью ординат можно найти β. С помощью этих двух величин нетрудно определить α, σ и γ.

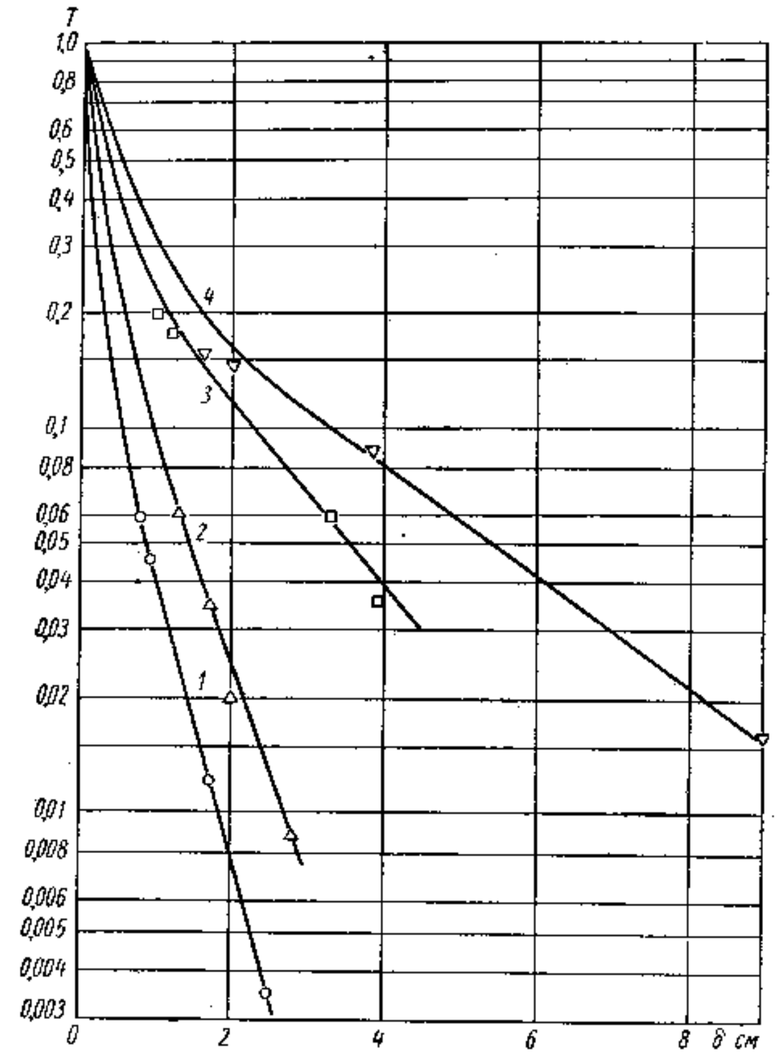


Рис. 17. Зависимость пропускательной способности стекловолокна по отношению к тепловому излучению черного тела при 478° К от толщины слоя:
1 — при $d_в = 5$ мкм; 2 — при $d_в = 10$ мкм; 3 — при $d_в = 20$ мкм; 4 — при $d_в = 35$ мкм

Пропускательная способность чисто поглощающей, нерассеивающей среды ($\sigma = 0$) находится из формулы (101) подстановкой $\alpha = \gamma$

$$T_{\sigma=0} = e^{-2\alpha\delta}. \tag{107}$$

Уравнение (107) известно под названием закона Бугера, а безразмерная величина $\alpha\delta$ получила название критерия Бугера.

Для чисто рассеивающей, непоглощающей среды ($\alpha = 0$) анализ формулы (101) приводит к зависимости

$$T_{\alpha=0} = \frac{1}{1+\sigma\delta}. \tag{108}$$

Сложнее дело обстоит в случае, если частицы дисперсной среды сами являются источниками излучения. Именно такой случай мы имеем при переносе через дисперсную среду теплового излучения. Слой dx среды поглощает из лучистого потока часть $\alpha E_{\pm} dx$ и излучает в обоих направлениях энергию $\alpha E(T)$.

Таким образом, система уравнений (96) преобразуется в следующую систему:

$$\left.\begin{aligned} \frac{dE_+}{dx} &= -(2\alpha + \sigma)E_+ + \sigma E_- + \alpha E(T); \\ \frac{dE_-}{dx} &= (2\alpha + \sigma)E_- - \sigma E_+ - \alpha E(T). \end{aligned}\right\} \tag{109}$$

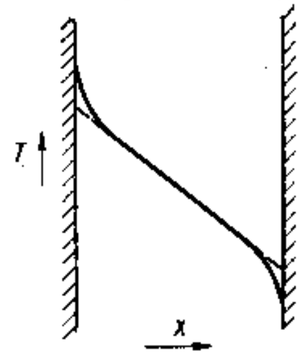


Рис. 18. Схема распределения температур по слою дисперсного материала при переносе тепла излучением

Для случая малой разности граничных температур Гамейкер получил решение в виде

$$q = -\lambda\left(1 + \frac{4\sigma_s T^3}{\lambda\gamma}\right)\frac{dT}{dx}. \tag{110}$$

Температурное поле имеет вид, изображенный на рис. 18.

Градиент температуры в дисперсном слое сохраняется постоянным за исключением небольших участков, прилегающих к граничным поверхностям. Для приближенного решения при большой разности температур граничных стенок может быть сделано допущение о постоянстве температурного градиента по всей толщине слоя. Это допущение линеаризует уравнения (109). Оно справедливо при условии, что плотность результативного лучистого потока не изменяется существенно по толщине слоя или она является небольшой долей от общего теплового потока и теплопроводность материала постоянна.

Если дисперсный слой заключен между граничными поверхностями, имеющими степень черноты ε_1 и ε_2, то граничные условия могут быть записаны так:

$$E_1 = \sigma_s T_1^4 \varepsilon_1 + (1-\varepsilon_1)E_-|_{x=0};$$
$$E_2 = \sigma_s T_2^4 \varepsilon_2 + (1-\varepsilon_2)E_+|_{x=\delta}.$$

Аналитическое решение [103] при этих граничных условиях имеет довольно громоздкий вид и неудобно для практического

применения. При отсутствии поглощения формула для лучистого потока через дисперсную среду принимает простой вид

$$q_л = E_+ - E_- = \frac{\sigma_s \left(T_1^4 - T_2^4\right)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 + \sigma\delta}. \qquad (111)$$

В. Н. Адрианов [2] получил методом итераций уравнение для переноса тепла излучением и теплопроводностью в поглощающей среде при отсутствии рассеяния излучения

$$q = \frac{\lambda (T_1 - T_2)}{\delta} + A_э \sigma_s \left(T_1^4 - T_2^4\right). \qquad (112)$$

Эффективная радиационная функция $A_э$ связана с излучательными параметрами среды и граничных стенок следующим уравнением:

$$A_э = \frac{\begin{array}{c} 4\alpha\delta\left(1 - R_1 R_2 e^{-4\alpha\delta}\right) - (R_1 + R_2)\left(1 - e^{-2\alpha\delta}\right)^2 - \\ -2\left(1 - R_1 R_2 e^{-2\alpha\delta}\right)\left(1 - e^{-2\alpha\delta}\right) \end{array}}{4(\alpha\delta)^2\left(1 - R_1 R_2 e^{-4\alpha\delta}\right)}, \qquad (113)$$

где $R_1 = 1 - \varepsilon_1$ и $R_2 = 1 - \varepsilon_2$ — отражательные способности граничных стенок.

При значениях критерия Бугера $\alpha\delta < 3$ степень черноты граничных стенок оказывает существенное влияние на функцию $A_э$. При степени черноты менее 0,5 эта функция проходит через максимум с увеличением критерия Бугера. В области $\alpha\delta > 3$ функция монотонно убывает с увеличением критерия, причем ее величина сравнительно мало зависит от степени черноты стенок.

Дифференциальные уравнения типа (96) и (109) составлены и решены лишь для случая бесконечного плоскопараллельного ослабляющего слоя. Рассмотрим влияние формы ослабляющего слоя на прохождение лучистого потока через него. Проблема эта весьма сложна и исследована для двух наиболее простых случаев: $\alpha = 0$ и $\sigma = 0$.

Уравнение (111) дает величину лучистого потока через бесконечный плоскопараллельный рассеивающий слой. При больших значениях оптической плотности $\sigma\delta$ это уравнение аналогично уравнению переноса тепла проводимостью. Величина

$$\lambda_{изл} = \frac{\sigma_s (T_1 + T_2)\left(T_1^2 + T_2^2\right)}{\sigma} \qquad (114)$$

называется коэффициентом проводимости тепла излучением.

Уравнение переноса тепла излучением через плоскую рассеивающую среду большой оптической плотности принимает вид

$$q_{изл} = \frac{\lambda_{изл}}{\delta} (T_1 - T_2). \qquad (115)$$

Для цилиндрического и сферического слоев чисто рассеивающей среды при тех же условиях (абсолютно черные граничные поверхности, большая оптическая плотность) можно применять уравнения, аналогичные уравнениям переноса тепла теплопроводностью [33, 97]

$$q_{изл} = \frac{\sigma_s \left(T_1^4 - T_2^4\right) 2\pi}{\sigma \ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{2\pi\lambda_{изл}}{\ln \frac{r_2}{r_1}} (T_1 - T_2) \qquad (116)$$

и

$$q_{изл} = \frac{\sigma_s \left(T_1^4 - T_2^4\right) 4\pi}{\sigma\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)} = \frac{4\pi\lambda_{изл}}{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)} (T_1 - T_2). \qquad (117)$$

Применимость формул (115), (116) и (117) к рассеивающим средам была экспериментально изучена на световых моделях [33]. Изучалось прохождение света через коллоидные растворы серы, размеры частиц которой были значительно меньше длины световой волны, что практически исключало явления поглощения лучистой энергии. Оптическая плотность изменялась в пределах от 0,3 до 33. Согласно результатам опытов для плоского, цилиндрического и сферического слоев таких сред с достаточной для практических расчетов точностью могут применяться формулы (115), (116) и (117).

Обратимся теперь ко второму крайнему случаю чисто поглощающей среды, примером которой может служить газ, через который проходит тепловое (инфракрасное) излучение. В этом случае ослабление излучения следует экспоненциальному закону Бугера, выражаемому уравнением (107). Степень ослабления лучей в результате поглощения определяется длиной пути луча, зависящей от направления. Например, в бесконечном плоском слое длина пути изменяется от минимального значения, равного толщине слоя, до бесконечности.

При практических расчетах обычно пользуются величиной эффективной длины пути луча $l_{эфф}$, определяемой по методу, разработанному Хоттелем. Поглощательная способность вычисляется по уравнению

$$A = 1 - e^{-a l_{эфф}}. \qquad (118)$$

Значения $l_{эфф}$ вычислены для слоев различной конфигурации.

ГЛАВА III

Теплоизоляционные материалы и их свойства

Теплоизоляционные материалы разделяются на волокнистые, зернистые и ячеистые (пеноматериалы). В теплотехнике получили широкое распространение также изделия в виде матов, плит, скорлуп и другой формы, изготовленные из волокнистых и зернистых материалов с добавлением связующих материалов. В технике низких температур такие изделия используют редко, так как они имеют сравнительно высокий коэффициент теплопроводности. Характеристика теплоизоляционных материалов дана в ряде монографий и справочников, например [55] и др.

На теплообмен в низкотемпературной изоляции большое влияние оказывают конвективные токи воздуха. Теплообмен при естественной конвекции тем интенсивнее, чем больше комплекс $\frac{\beta}{\nu a}$, где β — коэффициент объемного расширения, ν — кинематическая вязкость и a — температуропроводность. Величина этого комплекса для воздуха при понижении температуры с 273 до 173° К возрастает в 6 раз, а при дальнейшем снижении до 90° К — в 70 раз. Уменьшения конвективного теплообмена в низкотемпературной теплоизоляции достигают уменьшением размеров пустот (пор) в ней. С этой целью, в частности, зернистые материалы применяют обычно в виде порошков с размером зерен менее 1 *мм*. Ниже приведена краткая характеристика материалов, применяемых в технике низких температур, с указанием особенностей их использования.

Характеристики и область применения

Волокнистые материалы. Волокнистые материалы используются в технике низких температур большей частью для теплоизоляции аппаратуры установок сжижения и разделения газов.

Минеральная вата является одним из самых дешевых и доступных материалов. Она состоит из стекловидных волокон, получаемых из расплавов горных пород (гранита, глины, доломита, кварцита) или шлаков металлургических печей. Сырье расплавляется в вагранке и вытягивается в нити расплава путем раздува струей пара или воздуха. Образуемая вата состоит из волокон диаметром 6—10 *мкм* и длиной от 3 до 20 *мм* и содержит некоторое количество шариков — «корольков», так как капли расплава при раздуве не успевают полностью вытянуться в нити.

Согласно ГОСТу 4640—61 минеральная вата выпускается двух марок: «100» и «150» (цифры обозначают плотность в *кг/м*³ под удельной нагрузкой 1961 *н/м*² (0,02 *кГ/см*²), содержащих соответственно до 7 и до 10% «корольков».

Коэффициент теплопроводности минеральной ваты зависит от диаметра волокон, содержания «корольков» и степени уплотнения.

При средней температуре 180—190° К он составляет 0,03—0,04 *вт/(м · град)*. Для уменьшения конвективных токов в изоляции вату следует набивать в изоляционное пространство низкотемпературных установок до максимально возможной плотности (300—400 *кг/м*³). Опыт показывает, что плотность набивки ваты в изоляционное пространство приблизительно в 1,5 раза выше плотности ее в лабораторном цилиндре под нагрузкой 9807 *н/м*² (0,1 *кГ/см*²). Это соотношение дает возможность заранее определить потребное для изоляции количество минеральной ваты и оценить коэффициент теплопроводности изоляции изделия.

Волокна минеральной ваты при монтажных работах поражают кожу и дыхательные пути. Этот недостаток в значительной мере устранен в гранулированной минеральной вате, которая состоит из комочков размером 10—15 *мм*, образованных из волокон механическим путем. Гранулированная вата не имеет «корольков», ее вес и теплопроводность меньше, чем у обычной ваты.

Минеральная вата представляет собой неорганический и, следовательно, негорючий материал. Однако она обычно содержит до 1% масла, добавляемого при изготовлении для уменьшения пыления. При таком содержании масла вата горит в среде кислорода, а при 1,5% масла становится взрывоопасной при контакте с жидким кислородом. Для изоляции кислородных установок применяют специально изготовленную вату, не содержащую масла.

В технике низких температур используют иногда войлок и маты, изготовленные из минеральной ваты с использованием битума или синтетических смол в качестве связующего вещества. Минеральные маты марок 75 и 100 на фенольной связке,

изготовляемые по ГОСТ 9573—60, имеют плотность 75 и 100 *кг/м*³ и коэффициент теплопроводности не более 0,054 *вт/(м* × × *град)* при 298° К. Минеральный войлок на битумной связке (ГОСТ 6125—61) и минераловатные маты на синтетических смолах (ВТУ 104-53 Министерства строительства) имеют при плотности 100 *кг/м*³ еще более низкий коэффициент теплопроводности, не превышающий 0,047 *вт/(м · град)* при 303° К. Теплоизоляционные свойства матов выше, чем у минеральной ваты вследствие меньшей плотности и расположения волокна преимущественно в направлениях, перпендикулярных тепловому потоку.

Стеклянная вата изготовляется двумя способами: дутьевым и способом непрерывного вытягивания. Первый способ более прост и дешев, волокна получаются диаметром от 3 до 30 *мкм* и длиной до 100 *мм*. По второму способу нити вытягиваются при помощи быстро вращающегося барабана из струек расплава стекольной шихты, вытекающих через фильеры в специальной пластине. При этом получаются волокна такого же диаметра, но большей длины. Раздув полученных таким образом непрерывных стеклянных волокон потоком горячих газов позволяет изготовить вату с диаметром волокон до 0,5 *мкм*.

В соответствии с ГОСТ 5174—49 стеклянная вата из непрерывного волокна имеет плотность 130 *кг/м*³ при нагрузке 1961 *н/м*² (0,02 *кГ/см*²) и диаметр волокна не более 21 *мкм*. Ее коэффициент теплопроводности при 293° К равен 0,047 *вт/(м* × × *град)*. Волокно диаметром менее 15 *мкм* не ломается, вата из тонкого волокна имеет более низкую теплопроводность.

Маты и полосы из стекловолокна (ГОСТ 2245—43) изготовляются путем наложения друг на друга и скрепления прошивкой тонких слоев стеклянных волокон, пересекающихся под прямым углом. Маты марки АСИМ изготовляются по ТУ 182-53 МПСМ из волокна диаметром 11—13 *мкм*, покрытого с двух сторон стеклянной тканью и простеганного стеклянными нитками. Они имеют плотность 100—110 *кг/м*³ и коэффициент теплопроводности 0,043 *вт/(м · град)*. Маты марки АТИМС изготовляются по ВТУ С-1-57 аналогичным способом, но из бесщелочного и более тонкого штапельного волокна диаметром 5—7 *мкм* и длиной 45—55 *мм*. Маты АТИМС имеют длину 1050 *мм*, ширину 840 *мм* и толщину 5—15 *см*. Коэффициент теплопроводности матов не превышает 0,048 *вт/(м · град)* при плотности 75—85 *кг/м*³. В матах АТИМСС по ТУ МЛП 1520-57 применяют такое же волокно. В процессе производства волокно послойно обрызгивают спиртовым раствором бакелитового лака, который в дальнейшем подвергается полимеризации. Размер этих матов 130 × 95 × 15 *см*, плотность 25 *кг/м*³ и коэффициент теплопроводности 0,041 *вт/(м · град)* при 293° К. Маты АТИМССК (ВТУ МО 2-57) отличаются тем, что в качестве связующего применяется толуольный раствор кремнийорганической смолы. Это позволяет применять их при температурах до 620° К.

Высокими теплоизоляционными свойствами обладает вата из ультратонкого волокна (УТВ), получаемого способом раздува непрерывных волокон горячими газами. Основные показатели ваты: средний диаметр волокна 0,7—1,5 *мкм*, плотность (без нагрузки) 5—6 *кг/м*³, коэффициент теплопроводности 0,030—0,032 *вт/(м · град)* при 273° К. Под нагрузкой 0,002—0,004 *Мн/м*² (0,02—0,04 *кГ/см*²) вата уплотняется до 50—60 *кг/м*³. С такой плотностью ее и следует набивать в изоляционное пространство низкотемпературного оборудования. Коэффициент теплопроводности стекловаты из УТВ при плотности 60 *кг/м*³ и средней температуре 190° К составляет 0,023 *вт/(м* × × *град)*. Этот материал целесообразно применять для изоляции транспортируемого низкотемпературного оборудования, где важно наравне с низкой теплопроводностью обеспечить и малый вес изоляции.

Маты из УТВ представляют собой рыхлый слой волокон, скрепленных между собой естественным сцеплением или связующим из синтетических смол. Основные требования к матам: плотность (без нагрузки) 6—7 *кг/м*³ без подложки и 10—12 *кг/м*³ с подложкой (подложкой служит алюминиевая фольга толщиной 20—25 *мкм* или органическая пленка толщиной 20 *мкм*), содержание связующего 15%, коэффициент теплопроводности 0,035 *вт/(м · град)* при 273° К.

Стекловолокно из щелочного стекла мало устойчиво по отношению к воде. При длительном хранении оно значительно снижает прочность, а при пребывании во влажной атмосфере со временем совершенно разрушается. Для низкотемпературной изоляции можно применять только волокно из бесщелочных стекол, устойчивых по отношению к воде.

Стекловолокнистые материалы применяют также для вакуумно-многослойной теплоизоляции в качестве теплоизолирующих прокладок между слоями, отражающими тепловое излучение. Применяемые с этой целью материалы описаны в гл. V.

Шелковые очесы представляют собой отходы шелкопрядильной промышленности. По плотности и коэффициенту теплопроводности этот материал близок к лучшим сортам минеральной и стеклянной ваты. Его преимущество — более благоприятные, безопасные условия изоляционных работ. Шелковые очесы применяют иногда для изоляции низкотемпературных установок, в частности установок для разделения природного газа.

Порошкообразные материалы. Порошкообразные материалы применяются в технике низких температур, в основном, для изоляции сосудов со сжиженными газами. В последние годы ими начали изолировать также установки для ожижения и разделения газов.

Углекислая магнезия «альба» образуется при «белой варке» углекислой магнезии. Плотность магнезии «альба» 125—150 *кг/м*³, коэффициент теплопроводности при 190° К — в пределах 0,026—0,030 *вт/(м·град)*. До недавнего времени магнезию широко применяли в сосудах для сжиженных газов. Наряду с магнезией «альба» использовали углекислую магнезию с плотностью 400 *кг/м*³ и коэффициентом теплопроводности 0,052 *вт/(м·град)* при 190° К. Сейчас магнезия вытеснена более эффективными дешевыми изоляционными материалами.

Пробковая крупа (ТУ 965-2299-52) используется в настоящее время для теплоизоляции сравнительно редко.

Диатомит (кизельгур, инфузорная земля) — это легкая пористая порода, образовавшаяся из кремнистых панцирей диатомовых водорослей, состоящая, в основном, из аморфного кремнезема с примесями окислов металлов. Химический состав его изменяется в широких пределах: двуокись кремния 55—95%, окись железа 0,2—10%, окислы кальция и магния 0,2—4%. Плотность диатомита колеблется от 350 до 950 *кг/м*³, достигая для лучших сортов 150—200 *кг/м*³. Коэффициент теплопроводности диатомита 0,05—0,07 *вт/(м·град)* при 293° К и 0,03—0,04 *вт/(м·град)* при 190° К. В СССР имеются многочисленные месторождения диатомита. Он применяется как в виде песка, так и в виде связанных (цементированных) изделий для теплоизоляции аппаратов, работающих при температурах умеренного холода.

Вспученный вермикулит (термовермикулит) [30] получают из минерала вермикулита, представляющего собой сложный высокогидратированный алюмосиликат магния, который образовался из ферромагнезиальных слюд: флогопита и биотита. При нагревании вермикулита до 700—1100° С содержащаяся в нем кристаллизационная вода превращается в пар. В результате частицы вермикулита вспучиваются, увеличиваясь в объеме в 20—25 раз и превращаясь в червеобразные гранулы. Технология изготовления вспученного вермикулита состоит в дроблении породы в молотковой дробилке, рассеве на фракции, обогащении и обжиге в шахтных или других печах.

Плотность термовермикулита составляет 100—200 *кг/м*³, размер зерен 1—12 *мм*. Коэффициент теплопроводности материала, имеющего плотность 140—160 *кг/м*³ и размер зерен менее 3 *мм*, равен 0,052—0,056 *вт/(м·град)* при 293° К. Доступность и низкая стоимость вспученного вермикулита и хорошие теплоизоляционные свойства приводят к все более широкому внедрению этого материала в промышленность.

Вспученный перлит [30, 31] также представляет собой материал, получаемый путем обжига минерала. Перлитом называют изверженные кремнеземистые горные породы, состоящие из вулканического стекла с включением плагиоклазов, полевых

шпатов, кварца и других минералов. Для перлитов характерна особая концентрически скорлуповатая структура. Они раскалываются по концентрическим трещинам. Получающиеся при этом шарики имеют перламутровую поверхность, напоминающую жемчуг (отсюда и произошло название породы). Сырьем для производства вспученных перлитов могут служить и другие силикатные породы вулканического происхождения, к которым относятся обсидианы, плотные пемзы, туфы и др.

Перлит состоит на 70% из двуокиси кремния, кроме того, он содержит 10—15% глинозема и 4—8% окислов калия и натрия. В перлите находится также несколько процентов кристаллизационной воды. При нагреве до 700—1000° С порода размягчается, а содержащаяся в ней вода переходит в пар, вспучивая размягченную массу материала. Технология изготовления вспученного перлита: дробление породы в щековой, а затем в валковой дробилках или шаровой мельнице, рассев на виброситах, предварительная сушка и последующий обжиг во взвешенном состоянии в шахтной или вращающейся печи.

Плотность вспученного перлита, полученного из пород различных месторождений, колеблется от 40 до 300 *кг/м*³, размер зерен не превышает 3 *мм*. Вспученный перлит является высокоэффективным и дешевым теплоизоляционным материалом. Для изоляции аппаратов и машин низкотемпературных установок используется вспученный перлитовый порошок [17], изготовляемый по техническим условиям МРТУ 6 № ЕУ-231-62. Перлитовый порошок имеет плотность при свободной засыпке 100 *кг/м*³, размер зерен не более 1 *мм* и коэффициент теплопроводности 0,031 *вт/(м·град)* при 183° К.

Аэрогель кремниевой кислоты [18] является наиболее эффективным из известных в настоящее время теплоизоляционных материалов. Существует несколько способов получения легкого тонкодисперсного порошка кремнезема, представляющего собой в сущности аэрогель кремниевой кислоты, однако, последнее название получил лишь материал, получаемый путем удаления жидкости из геля кремниевой кислоты без заметного сжатия его скелета.

Способ получения аэрогеля основан на удалении жидкости из геля при температуре и давлении выше критических. В этом случае жидкость переходит в пар непосредственно в порах материала, что исключает сжатие пор за счет сил поверхностного натяжения. С целью снижения рабочей температуры и давления вода в гидрогеле предварительно замещается этиловым или метиловым спиртом. Технологическая схема процесса состоит в следующем. Предварительно приготовленные растворы жидкого стекла плотностью 1150—1170 *кг/м*³ и серной кислоты плотностью 1126—1128 *кг/м*³ поступают в смеситель. Образующийся в течение 6—8 *сек* гидрогель проходит через масло,

коагулирует и приобретает форму шариков. Затем он промывается в чанах водой, после чего вода в гидрогеле замещается этиловым спиртом в 16-ти последовательно соединенных диффузорах. Спирт удаляется из геля в автоклавах при 7—9 *Мн/м²* (70—90 *кгс/см²*) и 540° К. Остатки паров спирта отсасывают вакуумным насосом. Содержащиеся в полученном продукте примеси органических веществ удаляют прокаливанием во взвешенном слое при температуре 570—670° К.

Изготовляемый по этой технологии продукт имеет плотность 90—120 *кг/м³* и коэффициент теплопроводности 0,014—0,016 *вт/(м · град)* при температуре 190° К.

Позднее перешли на новую технологию получения аэрогеля, отличающуюся тем, что спирт удаляется из геля непрерывным способом в теплообменниках. Получаемый по этой технологии аэрогель марки Н (МРТУ 6-02-265-63) имеет плотность 20—40 *кг/м³* и коэффициент теплопроводности 0,019—0,020 *вт/(м* × × *град)* при температуре 190° К.

Недостатком аэрогеля является необратимое изменение структуры и увеличение теплопроводности при попадании в него капельной влаги. Для того чтобы уменьшить способность аэрогеля поглощать влагу и изменять при этом свою структуру, его можно подвергнуть гидрофобизации путем обработки метилхлористыми силанами, фтористыми соединениями, бутиловым спиртом. Наилучшие результаты дает обработка диметилдихлорсиланом.

Возможны и другие способы получения аэрогеля, не связанные с применением автоклава, работающего под давлением. Предложено удалять воду из гидрогеля вакуумированием его. Разработан способ, состоящий в обезвоживании гидрогеля нагреванием его с жидкостью, обладающей малым поверхностным натяжением, с последующим прокаливанием полученного геля. Оба эти способа дают аэрогель с несколько более высокими значениями плотности и теплопроводности.

Существует ряд других способов получения тонкодисперсных порошков двуокиси кремния, близких по свойствам к аэрогелю [3]. Одним из них является разложение летучего или растворимого соединения кремния (например, $SiCl_4$ или Na_2SiO_3). Второй способ состоит в осаждении кремнезема из водного раствора в щелочной среде. Третий способ основан на осаждении кремнезема в присутствии ионов фтора или хлора. Имеется много методов, основанных на этих и других способах. Получаемые этими способами порошки двуокиси кремния имеют, как правило, более крупные поры и больший коэффициент теплопроводности.

Кремнегель представляет собой один из видов тонкодисперсного порошка двуокиси кремния. Он получается, в частности, в производстве суперфосфата при взаимодействии фторапатита с серной кислотой и кремнеземом и последующем гидролизе образующейся двуокиси кремния. Плотность кремнегеля 100—150 *кг/м³*, коэффициент теплопроводности 0,030—0,035 *вт/(м · град)* при 190° К.

Белая сажа также является тонкодисперсным порошком, состоящим, в основном, из двуокиси кремния. Ее получают путем осаждения кремнекислоты из раствора жидкого стекла углекислотой и обработки полученной суспензии соляной или серной кислотой. Плотность сажи составляет 160—240 *кг/м³*, размер частиц для некоторых марок достигает нескольких *мкм*, коэффициент теплопроводности при 190° К равен 0,02—0,03 *вт/(м · град)*. К белой саже близок по свойствам *аэросил*, получаемый сжиганием четыреххлористого кремния в среде водорода при 1100° С.

Ячеистые материалы. Ячеистые теплоизоляционные материалы также широко применяют в технике низких температур.

Пробка представляет собой ячеистый материал естественного происхождения и давно используется в технике умеренного холода. Она вырабатывается из коры пробкового дуба и, отчасти, коры бархатного дерева. В холодильной технике применяются плиты «экспанзит», которые прессуются из пробковой крупы крупных фракций и подвергаются термической обработке при 260—280° С. Свойства экспанзита согласно ВТУ № 190 и ТУ № 174/5-2-41 характеризуются следующими данными: плотность не более 180 *кг/м³*, коэффициент теплопроводности не более 0,058 *вт/(м · град)* при 293° К.

Вспученный эбонит (оназот) относится к числу наиболее эффективных ячеистых теплоизоляционных материалов [81]. При вспучивании эбонит увеличивается в объеме примерно в 15 раз, его плотность снижается до 60—70 *кг/м³*. Оназот имеет 20 000 ячеек в 1 *см³*, средняя толщина стенок ячеек составляет 0,012 *мм*. Он дороже пенополистирола, но превосходит последний по коэффициенту теплопроводности [0,028 *вт/(м* × × *град)* при 288° К], а также по водопоглощению и паропроницаемости.

Мипора имеет наименьшие плотность и коэффициент теплопроводности по сравнению со всеми остальными пенопластами. Она представляет собой отвердевшую пену мочевино-формальдегидной смолы. Мипору выпускают по ТУ МХП 3258-52 в виде блоков плотностью 10—20 *кг/м³*. В изоляционный объем сложной конфигурации ее загружают в виде крошки с плотностью набивки 40—50 *кг/м³*. Коэффициент теплопроводности в обоих случаях одинаков и равен 0,030—0,033 *вт/(м · град)* при 293° К.

Недостаток мипоры — гигроскопичность. Этот материал довольно быстро увлажняется в условиях эксплуатации низкотемпературной теплоизоляции. Мипора не поддерживает горения в атмосфере воздуха. Однако в среде кислорода она огне-

опасна, а при большой плотности набивки взрывоопасна. Поэтому ее нельзя рекомендовать в качестве теплоизоляции установок разделения воздуха и сосудов для жидкого кислорода.

Пенополистирол представляет собой ячеистый материал (поры замкнуты) с очень малым поглощением. Он может быть изготовлен различными способами. Прессовый метод состоит в смешении полимера с газообразователями и другими компонентами, прессовании композиции и вспенивании заготовок. Так получают пенополистирол марок ПС-1 (ТУ МХП 3202-54 и ТУ МХП М-679-56) с плотностью 60—220 *кг/м*³ и ПС-4 (ТУ МХП 678-56) с плотностью 35—80 *кг/м*³. Коэффициент теплопроводности возрастает с увеличением плотности и находится в пределах 0,030—0,050 *вт/(м·град)* при 293° К.

Автоклавный метод основан на насыщении полистирола в автоклаве газами или низкокипящими органическими веществами и последующем вспенивании при снятии давления. В США таким методом получают продукт под названием «стирофом» с плотностью 20—40 *кг/м*³, размером пор 0,5—2 *мм* и коэффициентом теплопроводности около 0,040 *вт/(м·град)* при 293° К.

Метод получения пенополистирола из гранул прост в аппаратурном оформлении и позволяет при соблюдении необходимых условий получать пенопласт непосредственно в изоляционном пространстве. Гранулы полистирола, насыщенные низкокипящими органическими веществами, вспенивают путем нагревания. Приготовленные таким образом пористые гранулы засыпают в форму и вторично подвергают нагреву с помощью острого пара или горячей воды в течение 5—10 *мин*. Под влиянием высокой температуры гранулы еще больше увеличиваются в объеме, размягчаются и склеиваются (спекаются) между собой, образуя сплошной материал. В Советском Союзе такой продукт имеет марку ПС-Б, в ФРГ выпускается под торговым названием «стиропор». Он имеет плотность 20—60 *кг/м*³, размер пор 0,01—0,1 *мм* и коэффициент теплопроводности 0,032—0,045 *вт/(м·град)* при 273° К.

Пенополиуретан получают в результате сложных реакций, протекающих при смешении полиэфира, диизоцианата и воды в присутствии соответствующих катализаторов и эмульгаторов. Смесь заливается в форму, где она вспенивается. Затем вспененный материал прогревается в течение 4—6 *ч* при температуре 50—150° С, в результате чего происходит его отверждение. Изготовляют как жесткие, так и эластичные пенополиуретаны в зависимости от вида полиэфира.

Материал ПУ-101 (ВМТУ 420-57) имеет плотность 100—220 *кг/м*³ и коэффициент теплопроводности 0,047—0,057 *вт/(м × × град)* при 293° К. Эластичный пенополиуретан в соответствии

с ВТУ УХП 164-59 имеет плотность 30—60 *кг/м*³ и коэффициент теплопроводности 0,035 *вт/(м·град)*.

Преимущество этого материала перед другими — возможность заполнения изоляционного пространства композицией в жидком виде, что упрощает технику изоляционных работ, обеспечивает заполнение изоляционного пространства сложной формы без образования пустот, уменьшает накопление влаги в изоляции. В качестве недостатка следует указать на ядовитость одного из компонентов — диизоцианата.

Пеностекло получают путем термической обработки при 700—850° С смеси порошкообразных стекла и газообразователя. Смесь загружают в жаропрочные формы и направляют в печь, в которой происходит размягчение стекломассы и разложение газообразователя. Образующиеся при этом пузырьки газа вспенивают вязкую стекломассу и придают ей ячеистую структуру. Получаемые блоки имеют плотность 100—400 *кг/м*³, диаметр пор 0,1—2 *мм* и коэффициент теплопроводности 0,06—0,10 *вт/(м·град)* при 293° К.

Пеностекло имеет малое водопоглощение, легко поддается механической обработке. Согласно ТУ МСПТИ 159-54 строительные блоки из пеностекла имеют максимальные габариты 450 × × 450 × 130. Выпускаются блоки марок А, Б и В, различающиеся по плотности, сопротивлению сжатию и коэффициенту теплопроводности.

Теппофизические свойства

Коэффициент теплопроводности. Коэффициент теплопроводности является основной величиной, определяющей выбор теплоизоляционного материала для низких температур. В этом случае, как правило, применяют наиболее эффективные материалы с коэффициентом теплопроводности менее 0,05 *вт/(м·град)* при температурах ниже 273° К.

Опытные данные по коэффициенту теплопроводности изоляционных материалов при температурах ниже 273° К сравнительно немногочисленны и в значительной степени противоречивы. Расхождения зависят как от погрешностей эксперимента, так и от неидентичности испытывавшихся материалов. В отобранных в результате анализа (рис. 19—21) имеющихся экспериментальных данных больший вес придавался работам, опубликованным в последние годы [17, 18, 69, 77, 81, 90, 96].

Коэффициент теплопроводности изоляционных материалов зависит от многих факторов, из которых наибольшее влияние оказывают температура, структура материала (объем, размер и форма частиц и пор), его влажность, род газа, заполняющего поры.

Коэффициент теплопроводности всех изоляционных материалов возрастает с температурой, причем скорость возрастания тем выше, чем больше абсолютное значение теплопроводности. Отношение теплопроводностей при 190 и 293° К находится для большей части материалов в пределах 0,65—0,75 и близко в среднем к 0,70. Это соотношение может быть использовано для оценки коэффициента теплопроводности при низких температурах по известному значению его при комнатной температуре. При низких

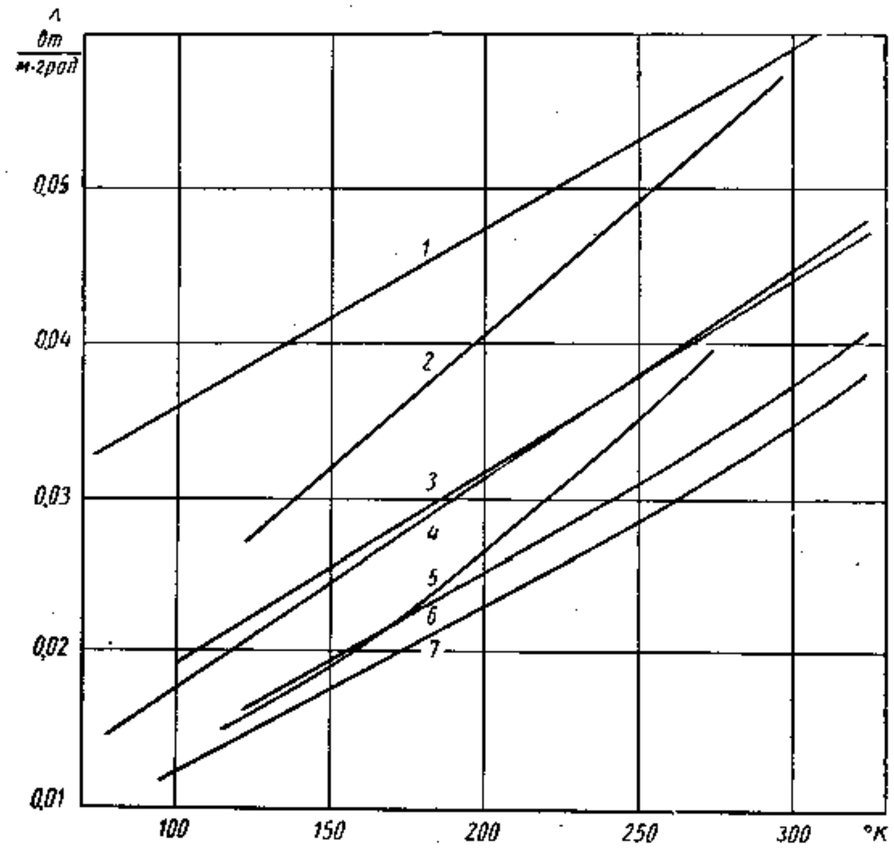


Рис. 19 Температурная зависимость коэффициента теплопроводности волокнистых изоляционных материалов:
1 — хлопковая вата (ρ = 81 *кг/м³*); *2* — минеральная вата (ρ = 400 *кг/м³*); *3* — минеральная вата (ρ = 260 *кг/м³*); *4* — стеклянная вата (ρ = 50 *кг/м³*); *5* — хлопковая вата (ρ = 42 *кг/м³*); *6* — шелковые очесы (ρ = 58 *кг/м³*); *7* — минеральная вата (ρ = 95 *кг/м³*)

температурах значения $d\lambda/dT$ многих материалов и воздуха близки между собой. При повышении температуры величина $d\lambda/dT$ у воздуха уменьшается, тогда как у теплоизоляционных материалов она или остается постоянной или возрастает. Это происходит вследствие заметного влияния проводимости излучением на коэффициент теплопроводности при повышенных температурах. Возрастание $d\lambda/dT$ имеет место у материалов с малой плотностью, в которых сравнительно велик перенос тепла излучением.

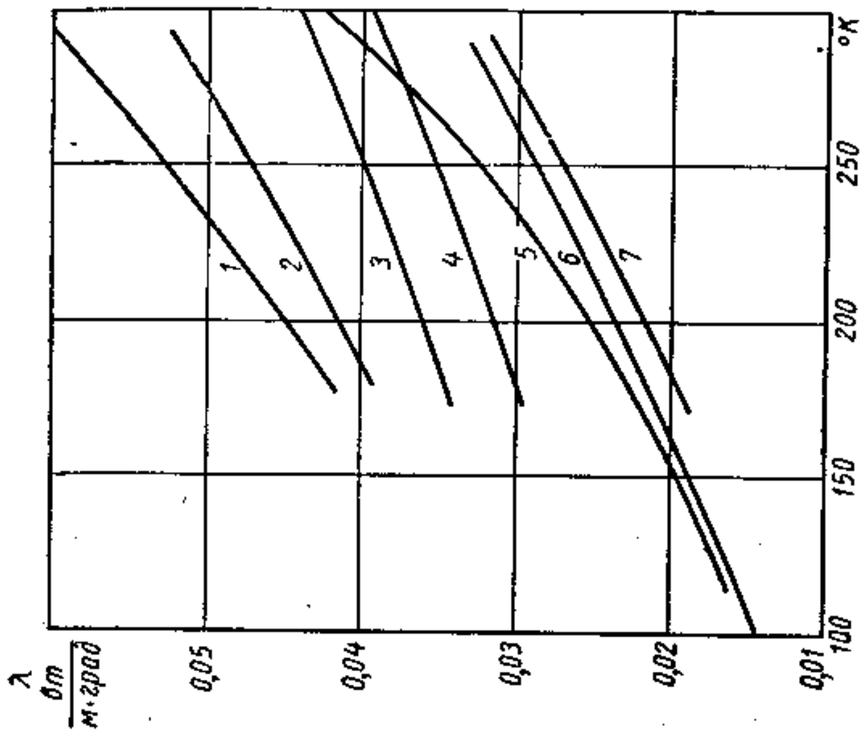


Рис. 21. Температурная зависимость коэффициента теплопроводности ячеистых изоляционных материалов:
1 — пеностекло (ρ = 170—200 *кг/м³*); *2* — пенополивинилхлорид (ρ = 190—200 *кг/м³*); *3* — пробка (ρ = 195 *кг/м³*); *4* — пробка (ρ = 140 *кг/м³*); *5* — пенополистирол (ρ = 30—50 *кг/м³*); *6* — мипора (ρ = 20—50 *кг/м³*); *7* — вспученный эбонит (ρ = = 64 *кг/м³*)

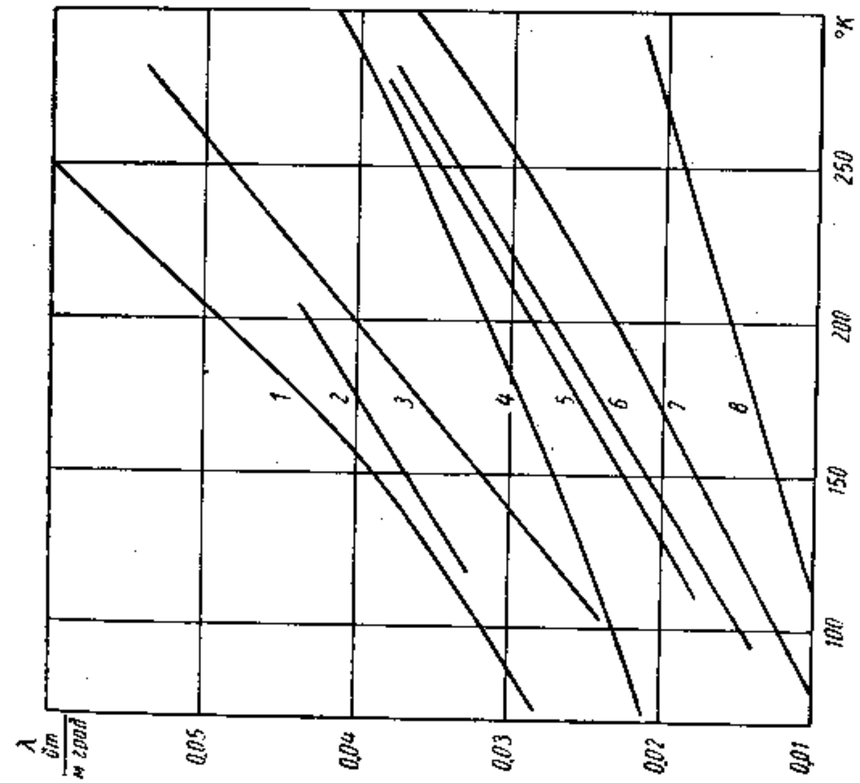


Рис. 20. Температурная зависимость коэффициента теплопроводности порошкообразных изоляционных материалов:
1 — вермикулит (ρ = 216 *кг/м³*); *2* — диатомит (ρ = 272 *кг/м³*); *3* — перлит (ρ = 210 *кг/м³*); *4* — магнезия (ρ = 131 *кг/м³*); *5* — пробка гранулированная (ρ = 101 *кг/м³*); *6* — перлит (ρ = 45 *кг/м³*); *7* — пробка гранулированная (ρ = 7 *кг/м³*); *8* — аэрогель (ρ = 100 *кг/м³*)

Некоторые материалы по теплопроводности приближаются к воздуху, а аэрогель кремниевой кислоты имеет даже более низкий коэффициент теплопроводности в сравнении с воздухом. Аэрогель имеет также меньшую, чем у воздуха и наименьшую для изоляционных материалов величину $d\lambda/dT$, которая равна для него $6{,}3 \cdot 10^{-5}$ *вт/(м·град²)*. Для большинства низкотемпературных изоляционных материалов эта величина находится в пределах $(8 \div 12) \cdot 10^{-5}$ *вт/(м·град²)*, возрастая в отдельных случаях до $(1{,}7 \div 2) \cdot 10^{-4}$ *вт/(м·град²)*.

Коэффициент теплопроводности зависит от объема пор и, следовательно, от плотности материала. Согласно результатам экс-

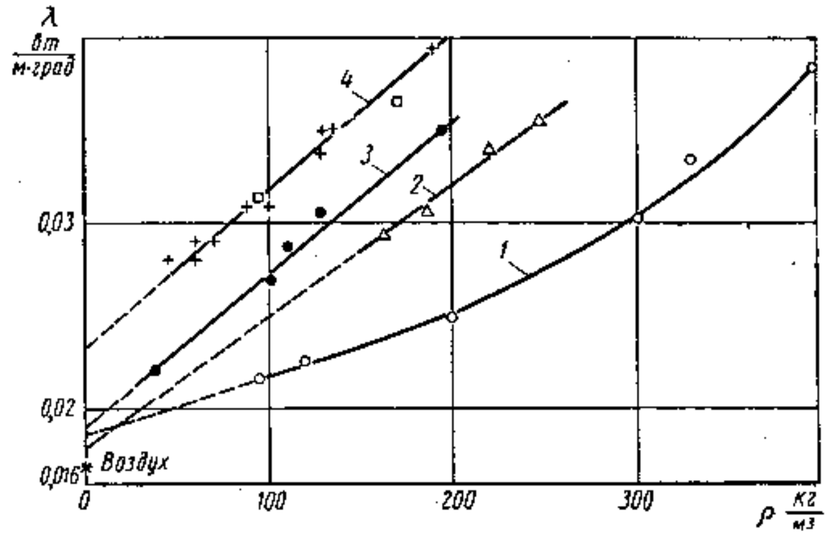


Рис. 22. Зависимость коэффициента теплопроводности изоляционных материалов при средней температуре 190° К от плотности:

1 — минеральная вата; *2* — магнезия; *3* — пробка; *4* — перлит (крестики) и кремнегель (квадратики)

периментов (рис. 22) эта зависимость для ряда материалов также линейна.

Производная $d\lambda/d\rho$ имеет приблизительно одинаковую величину для нескольких материалов и равна $8 \cdot 10^{-5}$ *вт · м²/(град · кг)* при средней температуре 190° К.

Казалось бы, что по мере приближения пористости к 100%, т. е. плотности к нулю, коэффициент теплопроводности пористого материала должен стремиться по величине к теплопроводности воздуха, заполняющего поры. На практике это не выполняется; предельная величина теплопроводности изоляционных материалов в большей или меньшей степени выше, чем у воздуха вследствие дополнительного переноса тепла через пористый материал излучением. Проводимость тепла излучением в первом приближении обратно пропорциональна плотности и начинает быстро возрастать с уменьшением ее ниже 100 *кг/м³*.

Аэрогель кремниевой кислоты и здесь представляет собой аномалию — его коэффициент теплопроводности сравнительно мало зависит от плотности. Исследования показали, что теплопроводность аэрогеля определяется, в основном, размерами его пор. Влияние размеров пор на теплопроводность рассмотрено в гл. IV.

При увлажнении изоляционного материала коэффициент теплопроводности его увеличивается (рис. 23). Сначала теплопроводность возрастает при увеличении влажности сравнительно медленно, а при влажности более 5—10% по объему эта зависимость становится более сильной. Наиболее резко выражена такая закономерность у аэрогеля. Причиной сравнительно медленного возрастания теплопроводности аэрогеля при малой степени увлажнения является его тонкопористая структура, при которой влага распределяется на большой поверхности многочисленных пор, не образуя сплошной пленки с высокой теплопроводностью. При дальнейшем увлажнении начинается смыкание отдельных капелек влаги (кристаллов льда при низких температурах). Образуется пленка с малым термическим сопротивлением, что приводит к более заметному возрастанию коэффициента теплопроводности влажного материала.

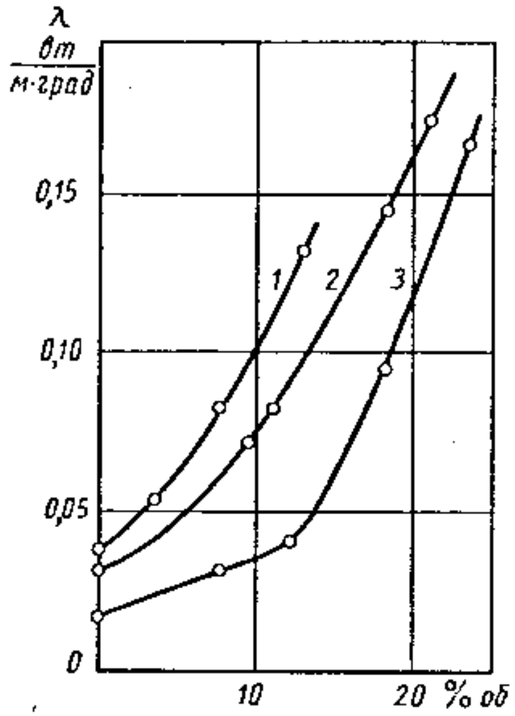


Рис. 23. Зависимость коэффициента теплопроводности изоляционных материалов при средней температуре 223° К от влажности:

1 — шлаковая вата; *2* — перлит; *3* — аэрогель

Значительная часть тепла переносится в изоляционных материалах теплопроводностью заполняющего поры газа; поэтому коэффициент теплопроводности изоляционного материала зависит в большой мере от рода газа. Эта зависимость характеризуется для пористых материалов формулой (29), согласующейся с опытными данными (см. фиг. 4). Взаимосвязь между коэффициентами теплопроводности зернистого изоляционного материала и заполняющего газа описывается аналогичной формулой (36).

Чем больше теплопроводность газа, тем ближе к ней теплопроводность изоляционного материала (табл. 5). Коэффициент теплопроводности многих изоляционных материалов, применяемых в технике низких температур, в среде гелия и водорода

можно принимать в первом приближении равным коэффициенту теплопроводности этих газов.

Таблица 5

Коэффициент теплопроводности λ изоляционных материалов в среде различных газов

Изоляционный материал	Плотность в *кг/м³*	Средняя температура в °К	λ в *вт/(м·град)* при заполняющем газе						Источник
			Kr	CO_2	Воздух	N_2	He	H_2	
Перлит	130	188	—	—	—	32,5	126	145	[62]
Аэрогель	100	188	—	—	—	19,6	62	80	[62]
Кремнегель	93	190	—	—	29,9	—	116	—	[20]
Мипора	56	190	10,2	—	21,5	—	122	—	[20]
Минеральная вата	150	190	14,2	—	31,3	—	136	—	[20]
Стеклянная вата ($d_{вол}$=2,58 *мкм*) . . .	74	338	—	25,5	35,6	—	181	—	[123]
Стеклянная вата ($d_{вол}$=0,69 *мкм*) . . .	174	338	—	25,9	35,5	—	126	198	[127]

Теплоемкость. Данные по теплоемкости изоляционных материалов необходимы при расчете нестационарных режимов охлаждения или нагревания изоляции. При низких температурах теплоемкость всех твердых веществ резко изменяется, стремясь к нулю при 0° К. Зависимость теплоемкости от температуры для изотропных одноатомных кристаллических твердых тел хорошо описывается уравнением Дебая

$$c_v = 9R\left(\frac{T}{\theta_D}\right)^3 \int_0^{\theta_D/T} \frac{x^4 e^x}{(e^x-1)^2}\,dx = 3RD\left(\frac{\theta_D}{T}\right), \qquad (119)$$

где θ_D — постоянная для данного материала, которая имеет размерность температуры и называется «характеристической» температурой Дебая;

$D\left(\frac{\theta_D}{T}\right)$ — функция Дебая;

R — газовая постоянная;

x — переменная интегрирования, являющаяся функцией частоты колебаний единицы объема твердого тела.

Согласно уравнению (119) при температурах, близких к абсолютному нулю, теплоемкость пропорциональна кубу температуры.

Сложнее обстоит дело с химическими соединениями. При низких температурах теплоемкость определяется расположением и

связями решетки, которые для соединения не зависят от характерных особенностей структуры решеток составляющих элементов. Все же для многих веществ с сильным взаимодействием элементов структурной решетки можно пользоваться уравнением (119) с постоянной θ_D, величина которой не зависит от значений θ_D составляющих элементов.

Одной из групп твердых тел, которые не следуют уравнению (119), являются вещества со «стеклянной» структурой. Общим для этих веществ является непрерывное увеличение теплоемкости с повышением температуры. К таким веществам, помимо стекол, относятся многие полимерные материалы.

Теплоизоляционные материалы представляют собой пористые среды с мелкодисперсной структурой и большим объемом пор, заполненных воздухом. При расчетах изоляции с использованием вакуума необходимы данные по теплоемкости одного только твердого скелета изоляционного материала. Масса воздуха при температурах выше 273° К обычно не превышает 5% от массы изоляционного материала, тогда как при температуре 80° К доля массы воздуха может достигать 25%. Это следует учитывать при расчетах низкотемпературной теплоизоляции, работающей при атмосферном давлении.

Материалы, применяемые для низкотемпературной теплоизоляции, имеют большей частью тонкодисперсную структуру и могут адсорбировать при низких температурах заметные количества воздуха. Выделяемая при адсорбции теплота $q_{ад}$ увеличивает кажущееся значение теплоемкости материала на величину

$$c_{ад} = q_{ад}\left(\frac{da}{dT}\right)_p, \qquad (120)$$

где a — адсорбированное количество газа в *кг/кг материала*.

Теплота адсорбции азота, являющегося основным компонентом воздуха, при низких температурах приблизительно равна 530 *кдж/кг*. Величина производной $\left(\frac{da}{dT}\right)_p$ зависит от структуры материала и давления газа. В случае адсорбции азота на аэрогеле при атмосферном давлении она может быть оценена приблизительно в 0,0003 *1/град* при 130° К и 0,0015 *1/град* при 100° К. Вычисленные по формуле (120) значения $c_{ад}$ соответственно равны 0,16 и 0,8 *дж/(г·град)*. В результате разность между кажущейся теплоемкостью аэрогеля и других тонкодисперсных материалов и теплоемкостью монолитных материалов такого же химического состава должна резко возрастать за счет адсорбции воздуха в области низких температур. Это подтверждается опытными данными В. М. Костылева и В. Г. Набатова для кремнегеля (рис. 24).

Диспергирование материала приводит к некоторому увеличению теплоемкости. Согласно опытным данным, полученным для двуокиси титана, это увеличение мало и составляет 1—3% в ин-

тервале температур 80—270° К. Следовательно, для вакуумированных изоляционных материалов могут быть использованы с достаточной при технических расчетах точностью опытные данные по теплоемкости монолитных материалов такого же химического состава.

Теплоемкость ряда теплоизоляционных материалов при атмосферном давлении и низких температурах измерена в работах Вилкиса и Голянда. Г. Б. Вилкис определял теплоемкость прессованных образцов, охлаждая их в криостате и помещая затем в калориметр, имеющий комнатную температуру. В результате были получены значения средней теплоемкости, каждое из которых относится к широкому интервалу температур. Частичный нагрев образца при переносе его из криостата в калориметр мог приводить к получению заниженных результатов.

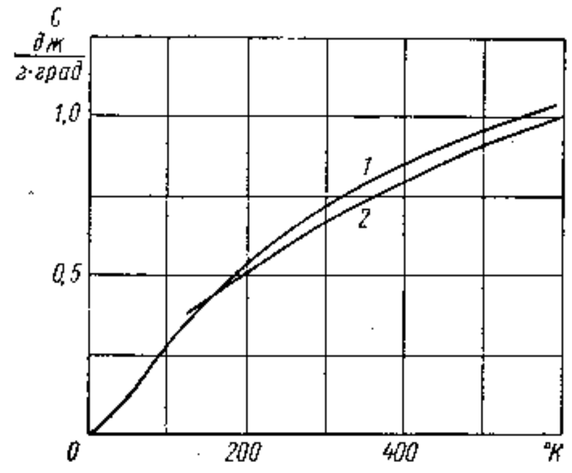


Рис. 24. Температурная зависимость удельной теплоемкости двуокиси кремния:
1 — кремнезем; *2* — тонкодисперсный кремнегель

М. М. Голянд [9] измерял теплопроводность и температуропроводность методом регулярного режима с помощью бикалориметра и затем вычислял теплоемкость. Он проводил измерения при температурах 323, 293, 273, 240 и 77° К. Опытные данные при последней температуре являются, по-видимому, неточными вследствие конденсации воздуха, заполняющего изоляционный материал. Это должно было приводить к получению завышенных данных, что подтверждается, в частности, сравнением приведенных в этой работе значений теплоемкости стеклянной ваты с данными для стекла.

Опытные данные по теплоемкости вспученного перлитового песка приведены в работе [52].

В интервале температур от 190 до 320° К теплоемкость изоляционных материалов изменяется в 1,5—2 раза (рис. 25). При температуре 195° К данные Вилкиса и Голянда значительно расходятся между собой. Нанесенные на рис. 25 значения теплоемкости стекла «пирекс» [50] располагаются между данными указанных авторов для стеклянной ваты. Учитывая, что данные Голянда несколько выше значений для стекла, как и следует из теории, следует считать данные Голянда при температурах выше 195° К более надежными.

Температурный коэффициент линейного расширения. Коэффициент линейного расширения α твердых веществ связан с другими термодинамическими параметрами уравнением Грюнайзена

$$\gamma = \frac{\alpha v}{\beta_T c_v} = \frac{\alpha v}{\beta_S c_p}, \qquad (121)$$

где γ — безразмерная постоянная;
v — удельный объем;
β_T и β_s — изотермическая и адиабатическая сжимаемость.

Постоянная γ находится для многих веществ в пределах $1 \div 3$, среднее значение ее близко к 2.

Значения γ, удельного объема и сжимаемости почти не зависят от температуры. Поэтому из уравнения (121) можно сделать вывод, что коэффициент теплового расширения для данного вещества пропорционален теплоемкости, т. е. характер зависимости α и c_v от температуры для определенного вещества одинаков. Это соотношение удовлетворительно выполняется на практике, к сожалению, лишь для твердых веществ, следующих уравнению (119).

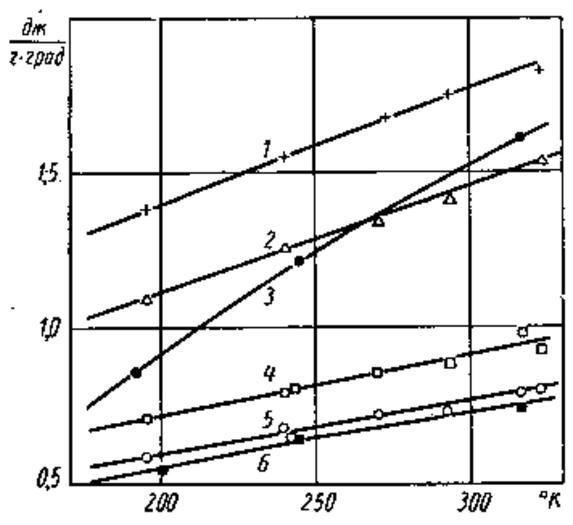


Рис. 25. Температурная зависимость удельной теплоемкости изоляционных материалов:
1 — хлопковая вата; *2* — мипора; *3* — пробка; *4* — стеклянная вата; *5* — минеральная вата; *6* — пеностекло

Опытные данные по тепловому расширению изоляционных материалов при низких температурах необходимы для оценки прочности теплоизолирующих конструкций. Чем ниже коэффициент теплового расширения, тем меньше усадка и растрескивание изоляционных материалов при охлаждении.

Значения α изоляционных материалов при низких температурах приведены в табл. 6. Коэффициент α заметно уменьшается у большинства материалов с понижением температуры.

При охлаждении пористого материала твердый скелет и заполняющий поры газ сжимаются. Коэффициент объемного расширения газов равен приблизительно 1/273 и значительно больше коэффициента объемного расширения твердых тел. Следовательно, температурный коэффициент линейного расширения пористого материала должен быть несколько больше, чем у монолитного материала из того же вещества. Сопоставление приведенных в табл. 6 значений с данными для монолитных материалов (стекло, полистирол) при низких температурах [50] подтверждает спра-

ведливость высказанного предположения. При отсутствии данных по тепловому расширению изоляционных материалов можно пользоваться соответствующими значениями для монолитных материалов.

Таблица 6

Температурный коэффициент линейного расширения теплоизоляционных материалов при низких температурах

Материал	Плотность кг/м³	Температура в °К (средняя или интервал)	Коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$ в 1/град	Источник
Пробковая плита	110	317	81	Г. Б. Вилкис
То же	110	247	59	То же
»	110	194	47	»
Мат из минеральной ваты	229	319	15,5	»
То же	229	247	8,8	»
»		192	4,0	»
Мат из стекловолокна	176	245	6,5	»
То же	176	191	7,7	»
Пеностекло	170	315	10,8	»
То же	170	247	7,6	»
»	170	193	6,5	»
Вспученная резина	78	247	48,6	»
То же	78	193	43,2	»
Вспученный эбонит	64	323—148	59,8	[81]
Пенополивинилхлорид:				
жесткий	40—88	293—80	45	[71]
эластичный	75—150	293—80	81	То же
Пенополистирол	12—20	293—80	79	»
То же	24,3	288—193	70	[121]
»	24,3	193—123	76	То же
»	37,5	288—193	57	»
»	37,5	193—123	57	»
Пенополиуретан эластичный	34—58	293—80	77	[71]
Пенополиуретан	80	300	123	[107]
То же	80	77	50	То же
»	80	300—77	71	»

Влажностные свойства

Способность изоляционного материала противостоять увлажнению является в технике низких температур часто более важным качеством, чем низкий коэффициент теплопроводности. Действительно, при влажности перлита 10% по объему коэффициент теплопроводности возрастает более чем в 2 раза по сравнению с сухим материалом (см. рис. 23). Таким образом, наилучший изоляционный материал с плохими влажностными свойствами может стать после небольшого срока эксплуатации хуже материала с более высоким коэффициентом теплопроводности в сухом состоянии, но с хорошими влажностными свойствами.

Основными свойствами материала, характеризующими статику и кинетику его увлажнения, являются гигроскопичность (адсорбционная способность к водяному пару), водопоглощение (способность поглощать воду в жидком состоянии), коэффициент диффузии водяного пара. Последнюю величину в строительной теплотехнике обычно называют «коэффициент паропроницаемости» и измеряют в $г/(м \cdot ч \cdot мм\ рт.\ ст.)$. Если количество диффундирующего пара относить не к разности парциальных давлений пара, а к разности его влагосодержаний по обе стороны слоя изоляции, измеренной в $г/м^3$, то коэффициент паропроницаемости будет иметь обычную размерность коэффициента диффузии $м^2/ч$. Ввиду того, что численные значения парциального давления водяного пара в *мм. рт. ст.* и влагосодержания в $г/м^3$ близки между собой при температурах 273—293° К, численные значения коэффициента паропроницаемости в $г/(м \cdot ч \cdot мм\ рт.\ ст.)$ и в $м^2/ч$ можно считать приблизительно равными.

Движущей силой диффузии водяного пара из окружающего воздуха в изоляционный слой является разность парциальных давлений пара. При температуре воздуха 288° К и относительной влажности 80% парциальное давление водяного пара равно 1360 $н/м^2$ (10,2 *мм рт. ст.*), тогда как в изоляции, работающей при температурах ниже 200° К, его практически можно считать равным нулю. Следовательно, разность давлений в этом случае составляет 1360 $н/м^2$ или $\sim$140 *мм вод. ст.* Если учесть, что нормальный вентилятор имеет напор около 300 $н/м^2$, становится ясным, почему трудно защитить от проникновения влаги даже изоляционные материалы с очень малыми порами.

Давление водяного пара над гигроскопичным материалом понижается, что приводит к увеличению градиента давления в зоне изоляции, прилегающей к теплой стенке и, следовательно, ускорению диффузии водяного пара в изоляцию.

Гигроскопичность изоляционных материалов при относительной влажности 50—70%, т. е. обычных атмосферных условиях, не превышает 10% (рис. 26). При низких температурах относительная влажность воздуха, заполняющего поры изоляционного материала, достигает 100%.

В этих условиях многие изоляционные материалы имеют высокую гигроскопичность. Так, например, мипора, магнезия, аэрогель могут адсорбировать воду в количестве 30—50% по массе. Малой гигроскопичностью обладают минеральная и стеклянная вата, перлит. Опубликованные в литературе [11] и полученные во ВНИИКИМАШе данные по влажностным свойствам теплоизоляционных материалов, применяемых в технике низких температур, приведены в табл. 7. Наиболее стойкими материалами против увлажнения являются пеностекло и пенополистирол. Несколько

Таблица 7

Влажностные свойства теплоизоляционных материалов

Материал	Гигроскопичность в % масс. при относительной влажности воздуха 100%	Водопоглощение в % об.	Коэффициент диффузии водяного пара $\mu \cdot 10^6$ в $м^2/сек$
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

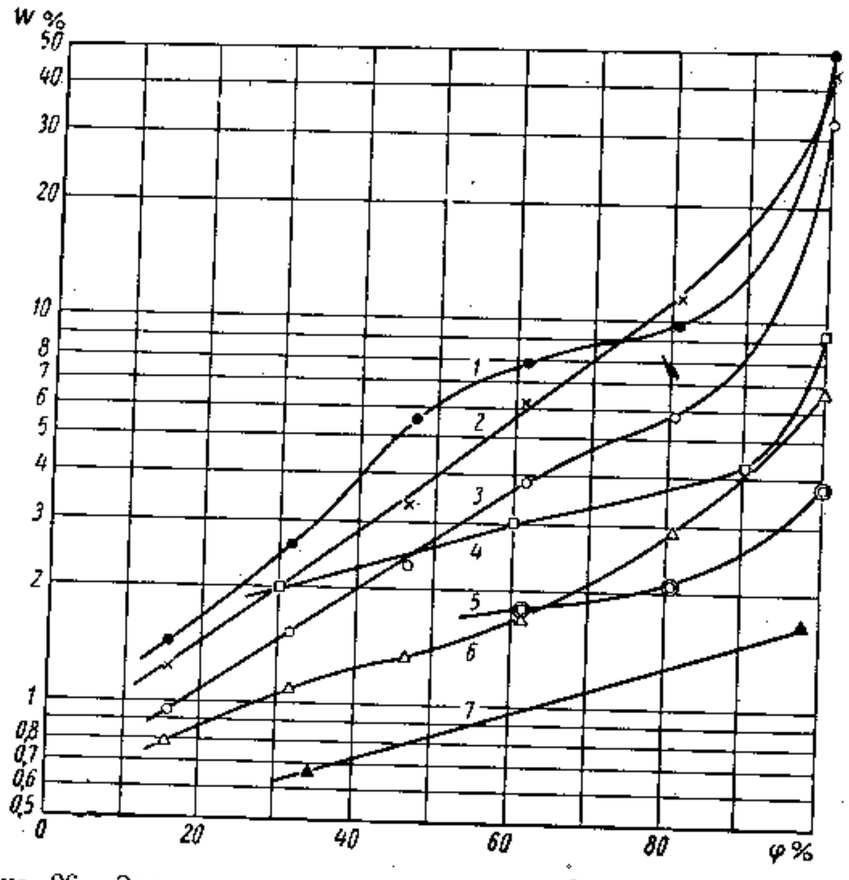


Рис. 26. Зависимость влагосодержания (w) изоляционных материалов от относительной влажности воздуха (φ):
1 — аэрогель; *2* — мипора; *3* — магнезия; *4* — пробковая плита; *5* — аэрогель, гидрофобизированный диметилдихлорсиланом; *6* — кремнегель; *7* — пенополистирол

уступают им пробка и пенополиуретан. Неудовлетворительные влажностные свойства имеет минеральная вата. Ее коэффициент паропроницаемости близок к коэффициенту для воздуха, равному $28 \cdot 10^{-6}$ $м^2/сек$, т. е. вата практически не оказывает никакого сопротивления диффузии водяного пара в объеме, заполненном ею. Величина водопоглощения у минеральной ваты также велика.

Механические свойства

Из механических свойств порошкообразных материалов интерес представляют текучесть и уплотняемость. Чем больше текучесть порошка, тем легче он загружается в изоляционное пространство. Текучесть порошков может быть охарактеризована углом естественного откоса, т. е. углом, образуемым между горизонтальной плоскостью и поверхностью конуса из порошка, насыпанного на эту плоскость. Чем меньше угол естественного откоса, тем больше текучесть порошка. Величина этого угла равна у перлитового песка 28°, кремнегеля 27°, аэрогеля 19°.

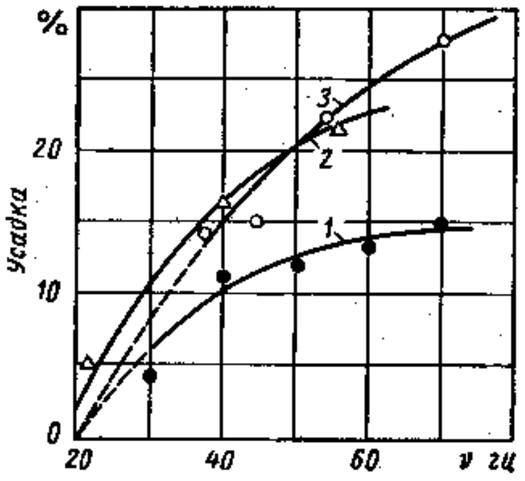


Рис. 27. Зависимость усадки изоляционных порошков от частоты вибрации с амплитудой 0,2—0,5 *мм*:
1 — аэрогель; *2* — перлит; *3* — кремнегель

Текучесть определяют также по скорости вытекания порошка из воронки через трубку определенного диаметра. Текучесть перлитового песка характеризуется соотношением

$$v = 13D^{2,5},$$

где v — скорость истечения в $см^3/сек$;
D — диаметр трубы в *см*.

Изоляционные порошки, засыпанные свободно в какую-либо емкость, дают со временем некоторую усадку. Скорость и величина усадки возрастают при транспортировании емкости и связанных с ним сотрясениях. При уплотнении порошка в изоляционном пространстве образуются пустоты, что приводит к увеличению теплового потока.

При вибрации с частотой в несколько десятков герц усадка заканчивается в течение 1—1,5 *ч*. При повышении частоты величина усадки возрастает (рис. 27), стремясь к некоторому предельному значению. У более текучего порошка предельная величина усадки достигается при меньшей частоте. Экстраполируя кривые на рис. 27 до оси абсцисс, находим, что уплотнение по-

рошков начинается лишь при определенной частоте колебаний, близкой к 20—24 *гц*. Максимальное ускорение, действующее на частицы порошка при гармонических колебаниях с амплитудой A и частотой ν, равно

$$a = 4\pi^2\nu^2 A. \qquad (122)$$

Подставляя в формулу (122) значения амплитуды и частоты, находим, что порошок начинает уплотняться, когда он подвергается колебаниям с ускорением, составляющим от 50 до 100% от ускорения силы тяжести.

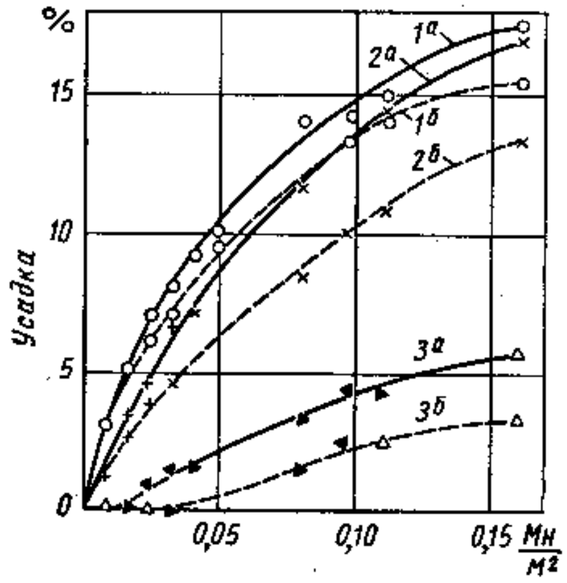


Рис. 28. Зависимость усадки изоляционых порошков от нагрузки (*а* — нагружение; *б* — разгружение):

1 — аэрогель, изготовленный автоклавным способом; *2* — аэрогель, изготовленный безавтоклавным способом; *3* — кремнегель

Указанные на рис. 27 величины усадки порошка достигаются после 1—3 *ч* вибрации. Тряска, при которой на частицы действует ускорение только вниз, более эффективна для уплотнения, чем вибрация с синусоидальной характеристикой. Ускорение и увеличение усадки может быть достигнуто и при синусоидальной вибрации путем создания небольшой нагрузки на материал. Уплотнение происходит в этом случае практически мгновенно даже в сосуде сложной формы. Усадка составляет в случае аэрогеля 27,5% уже при нагрузке в 0,004 *Мн/м²* (0,04 *кГ/см²*) и остается неизменной при увеличении нагрузки до 0,025 *Мн/м²*.

Нагрузка на порошок вызывает дополнительное уплотнение его даже после тряски. Как видно из рис. 28, уплотнение порошков двуокиси кремния с увеличением нагрузки замедляется, но все же не прекращается при давлении в 0,15 *Мн/м²*. Величина усадки порошка с большей плотностью значительно меньше. Аналогичные результаты получены для перлитового песка [30]. При давлении в 0,5 *Мн/м²* перлит с плотностью 100 *кг/м³* дает усадку в 40%, а с плотностью 200 *кг/м³* — 20%. При обжатии под вакуумом [89] нагрузкой в 0,1 *Мн/м²* крупный перлитовый песок дает усадку 10%. При нагрузке в 0,05 *Мн/м²* он сжимается на 4%, тогда как мелкий песок дает усадку 10%. Аэрогель уплотняется под вакуумом в еще большей степени. Более подробно уплотнение изоляционных порошков под вакуумом рассмотрено в следующей главе.

Механические свойства ячеистых изоляционных материалов при низких температурах исследованы в ряде работ, например [81, 107] и др. Большинство пенопластов при температуре 293° К имеет предел прочности при сжатии менее 5 *Мн/м²* (50 *кГ/см²*), модуль упругости при сжатии до 100 *Мн/м²* (1000 *кГ/см²*) и удельную ударную вязкость порядка 10—20 *Мн · м/м²* (1—2 *кГ* × × *см/см²*). При понижении температуры предел прочности и модуль упругости возрастают, а ударная вязкость и величина сжатия под нагрузкой уменьшаются.

Структура

Перенос тепла в изоляционных материалах мало зависит от их химического состава и определяется их структурой, т. е. формой частиц (волокна, зерна), объемом пор между частицами и внутри их, распределением пор по размерам.

Материалы, применяемые для низкотемпературной теплоизоляции, имеют мелкодисперсную структуру. Наиболее тонкой структурой обладают порошкообразные материалы, основой которых является двуокись кремния.

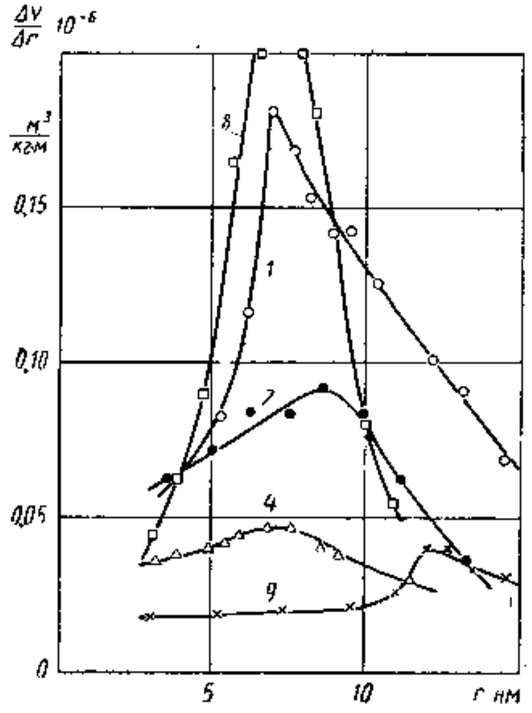


Рис. 29. Дифференциальные структурные кривые образцов аэрогеля кремниевой кислоты (цифры на кривых соответствуют номерам образцов в табл. 8)

Распределение пор по размерам характеризуется дифференциальными и интегральными структурными кривыми. На рис. 29 приведены дифференциальные структурные кривые образцов аэрогеля кремниевой кислоты. Кривые рассчитаны на основе теории капиллярной конденсации по изотермам адсорбции метилового спирта. Величина наиболее вероятного радиуса пор, соответствующего максимуму на кривых, находится в пределах 7—9 *нм* (70—90 Å). У аэросила, получаемого сжиганием четыреххлористого кремния в среде водорода, максимум приходится на поры радиусом 12—13 *нм*.

Объем микропор аэрогеля, имеющих радиус менее 0,1 *мкм*, сравнительно невелик и составляет 15—25% от общего объема пор. Однако именно эти поры определяют свойства аэрогеля как

наиболее эффективного теплоизоляционного материала и образуют развитую поверхность, составляющую несколько сотен квадратных метров в 1 *г* материала. Данные, характеризующие структуру аэрогеля, приведены в табл. 8.

Таблица 8

Характеристика структуры аэрогеля кремниевой кислоты

№ образца	Плотность в *кг/м³*	Поверхность пор в *м²/г*		Объем пор в *см³/г*		Доля микропор по объему	Радиус микропор в *нм*	
		по адсорбции азота	по адсорбции метилового спирта	общий	микропор		наиболее вероятный	средний
1	94	302	330	10,2	2,05	0,20	85	125
2	117	—	187	8,1	1,55	0,19	85	165
3	105	—	146	9,0	0,7	0,08	70	95
4	105	188	144	9,0	0,7	0,08	70	95
5	136	—	138	6,9	0,9	0,13	80	130
6	116	131	123	8,2	1,2	0,15	180	200
7	136	—	94	6,9	0,9	0,13	75	190

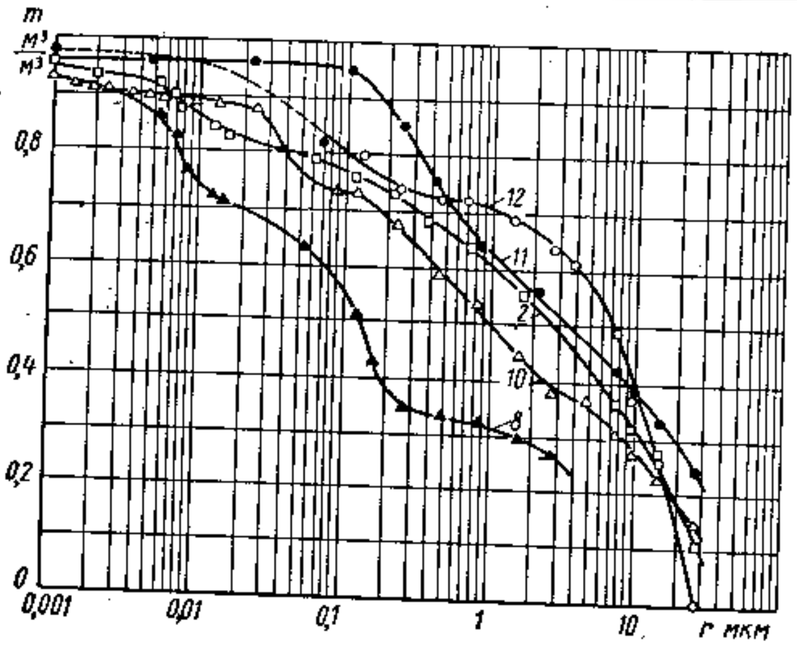


Рис. 30. Интегральные структурные кривые образцов мелкодисперсной двуокиси кремния (цифры на кривых соответствуют рис. 29 и табл. 8)

Значения среднего радиуса микропор вычислены по формуле

$$r = \frac{2V}{S}, \qquad (123)$$

где V — объем микропор;
S — поверхность всех пор.

Вычисленный таким образом средний радиус лишь в 1,5—2 раза больше наиболее вероятного радиуса пор. Это показывает, что почти вся измеренная поверхность образована микропорами.

На рис. 30 нанесены интегральные структурные кривые нескольких образцов мелкодисперсных высокопористых порошков двуокиси кремния. Измерения выполнены методом вдавливания ртути. Порошки, полученные разными способами, имеют резко различающуюся структуру. При этом все они содержат 30—50% по объему пор радиусом менее 1 *мкм*.

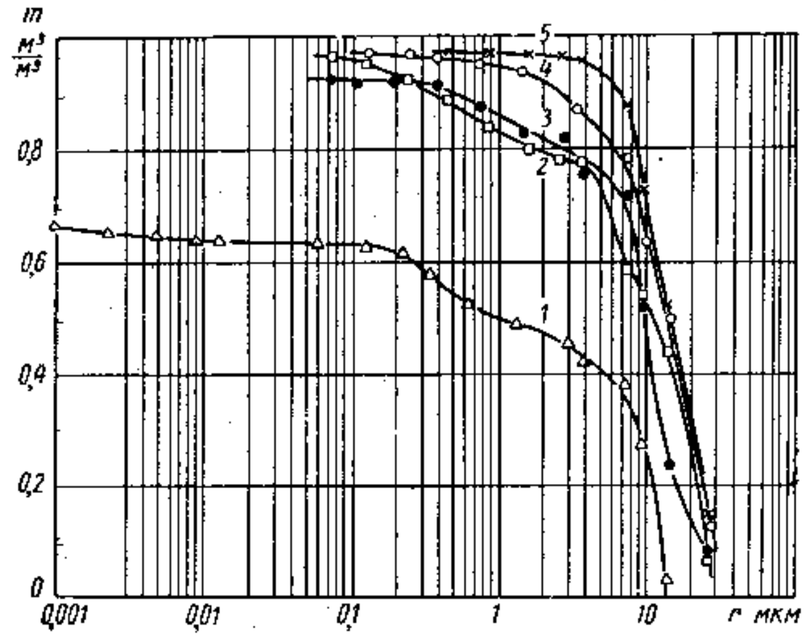


Рис. 31. Интегральные структурные кривые изоляционных порошков:
1 — магнезия; *2* — аэрогель окиси алюминия; *3* — перлит K_4; *4* — перлит K_8; *5* — мипора

Удельная поверхность большинства этих порошков превышает 100 *м²/г*. К ним относится также белая сажа, имеющая удельную поверхность 150—300 *м²/г*.

Вспученный перлит является более крупнопористым материалом. Он содержит не более 5—7% по объему пор радиусом менее 1 *мкм* (рис. 31). Удельная поверхность пор вспученного перлитового песка, как правило, не превышает 20 *м²/г*. Другие изоляционные материалы также являются более крупнопористыми, чем порошки двуокиси кремния. Они обычно не содержат пор размером менее 0,1 *мкм* и имеют удельную поверхность менее 40 *м²/г*.

ГЛАВА IV

Вакуумно-порошковая и вакуумно-волокнистая теплоизоляция

Тепло в изоляционных материалах переносится, в основном, газом, заполняющим пустоты между частицами материала. Перенос тепла газом можно значительно уменьшить и даже практически полностью исключить, откачав газ из изоляционной полости, т. е. создав вакуум в пустотах между частицами. В зависимости от вида изоляционного материала получают в результате вакуумно-порошковую или вакуумно-волокнистую теплоизоляцию. Коэффициент теплопроводности такой изоляции в несколько десятков раз ниже коэффициента теплопроводности обычной (насыпной) изоляции. Благодаря высокой эффективности вакуумно-порошковая теплоизоляция нашла широкое применение в технике низких температур.

Значительная часть теплового потока через вакуумно-порошковую изоляцию передается излучением, которое подчиняется другим законам, чем перенос тепла теплопроводностью, описываемый уравнением (1). Все же это уравнение привлекает своей простотой, и им пользуются обычно при рассмотрении сложного теплообмена в дисперсных средах, понимая под названием «коэффициент теплопроводности» просто коэффициент пропорциональности между тепловым потоком и градиентом температуры и учитывая зависимость теплового потока от других факторов в виде зависимости от этих факторов коэффициента теплопроводности. При этом часто пользуются термином «кажущийся коэффициент теплопроводности» или «эффективный коэффициент теплопроводности». В дальнейшем изложении будем для краткости пользоваться термином «коэффициент теплопроводности», подразумевая под ним коэффициент пропорциональности в уравнении (1) для случая одновременного переноса тепла теплопроводностью твердого тела, теплопроводностью газа и излучением.

Перенос тепла газом

Основное уравнение (13), характеризующее перенос тепла газом в пористом материале, связывает коэффициент теплопроводности газа, заполняющего поры материала, с критерием Кнудсена. В работах Кистлера и [123] были получены аналогичные уравнения, в которых коэффициент при Кп вместо 2β равен соответственно $\frac{2-\alpha}{\alpha}$ и 1. В результате эти уравнения дают при низких давлениях, примерно, в 4 раза большие значения, чем уравнение (13). В. М. Костылев [35] предложил для волокнистых материалов уравнение, в знаменателе которого вместо 2β Кп стоит величина $\frac{FL}{4m}$ (где F — удельная поверхность в $м^2/м^3$). Поскольку для этих материалов $F=\frac{\pi}{d}$, коэффициент при Кп в указанном уравнении равен $\frac{\pi}{4m}=0{,}785\div0{,}87$ $(m=0{,}9\div1)$.

Сопоставление экспериментальных данных для зернистого слоя с вычисленными по формуле (30), полученной на основе формулы (13), (см. рис. 6) подтверждает правильность последней формулы и ее применимость к пористым материалам.

Коэффициент теплопроводности теплоизоляционных материалов возрастает с увеличением давления в большинстве случаев быстрее [19, 20, 123], чем это следует из уравнения (13). Авторы работы [123] пытаются объяснить это влиянием конвекции. Действительная причина заключается в сложной структуре изоляционных материалов, не дающей возможности описать перенос тепла в них газом при использовании лишь одного характеристического размера — среднего диаметра пор. Коэффициент теплопроводности зернистых теплоизоляционных материалов, зерна которых имеют пористую структуру, может быть вычислен по уравнению (30) с использованием уравнений (33) — (35). Более простую формулу, применимую к любым теплоизоляционным материалам, можно получить на основе следующих соображений.

Теплоизоляционный материал можно рассматривать как дисперсную среду, которая пронизана порами различных размеров, соединенными между собой как последовательно, так и параллельно. Допустим, что отдельные поры имеют форму капилляров и последовательно соединяются в параллельные каналы, не сообщающиеся между собой и проходящие через весь слой материала.

Проводимость одного канала $C_к$ связана с проводимостью образующих его n пор C_i соотношением

$$\frac{1}{C_к}=\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{C_i}.$$

Общая проводимость теплоизоляционного материала равна сумме проводимостей m параллельных каналов

$$C_м = \sum_{k=1}^{m} C_к = \sum_{k=1}^{m} \frac{1}{\sum_{i=1}^{m} \frac{1}{C_i}}.$$

Проводимость отдельной поры в соответствии с уравнением (13) равна

$$C_i = \frac{\lambda_i F_i}{l_i} = \frac{F_i}{l_i} \frac{\lambda_0}{1 + 2\beta \mathrm{K}n_i} = \frac{F_i}{l_i} \frac{\lambda_0}{1 + \frac{k_i}{p}}.$$

Отсюда находим

$$\frac{1}{C_к} = \sum_{1}^{n} \frac{l_i}{F_i} \frac{1 + \frac{k_i}{p}}{\lambda_0} = A_к + \frac{B_к}{p},$$

$$C_ж = \sum_{1}^{m} \frac{1}{A_к + \frac{B_к}{p}} = \frac{1}{A_1 + \frac{B_1}{p}} + \frac{1}{A_2 + \frac{B_2}{p}} + \ldots \qquad (124)$$

где A и B — постоянные.

Нетрудно показать, что достаточно общая форма уравнения (124) не изменяется и в случае, если каналы сообщаются между собой и поры имеют произвольную форму. Изоляционные порошки имеют сложную структуру, некоторые из них содержат поры с размерами, различающимися на несколько порядков. Все же в первом приближении можно допустить, что они содержат поры двух размеров, соответствующих средним размерам пустот между зернами и микропор в зернах. В этом случае уравнение (124) должно быть ограничено двумя членами.

Уравнение для определения кажущегося коэффициента теплопроводности изоляционных порошков при различных давлениях газа принимает следующий вид:

$$\lambda = \lambda_0 + \frac{\lambda_1}{1 + \frac{2\beta L_1}{p d_1}} + \frac{\lambda_2}{1 + \frac{2\beta L_1}{p d_2}}, \qquad (125)$$

где λ_0 — коэффициент теплопроводности при высоком вакууме, равный сумме проводимостей излучением и по твердому телу;

λ_1 и λ_2 — постоянные;

L_1 — длина свободного пробега молекул газа при давлении 1 $н/м^2$, равная 5,28 $мм$ для воздуха при 190° К;

2β — постоянная, равная для двухатомных газов 1,6 при коэффициенте аккомодации $\alpha = 1$.

d_1 — средний диаметр микропор в зернах;

d_2 — средний диаметр пустот между зернами.

На рис. 32 и 33 приведены * зависимости коэффициента теплопроводности от давления воздуха для материалов, структур-

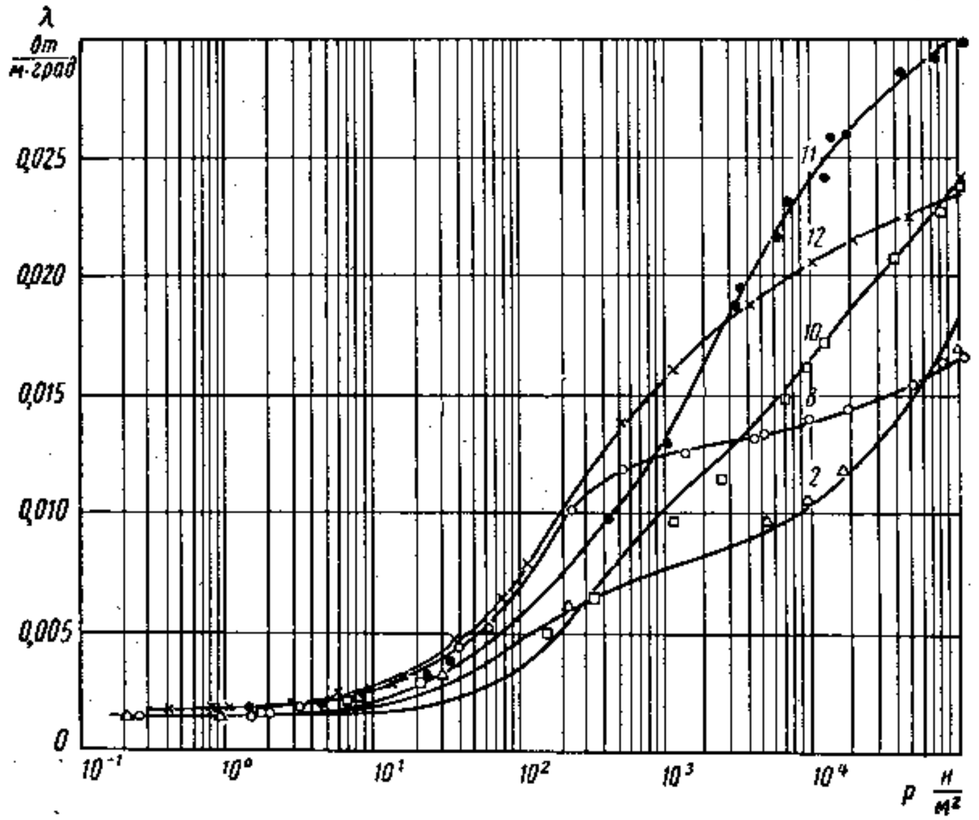


Рис. 32. Зависимость коэффициента теплопроводности образцов мелкодисперсной двуокиси кремния от давления воздуха (граничные температуры 293 и 90° К, цифры на кривых соответствуют рис. 30)

ные характеристики которых даны на рис. 30 и 31. Кривые на графиках построены по уравнению (125) с постоянными, значения которых приведены в табл. 9.

Объем пустот между частицами зернистых материалов составляет обычно 40—50% от объема материала. Объем пор в теплоизоляционных материалах составляет большей частью 90—95% от общего объема. Следовательно, на долю объема пор в зернах приходится 40—55% от объема материала, т. е. объемы пор и пустот приблизительно равны.

В этом случае объем пор в зернах, имеющих диаметр меньше среднего, должен составлять приблизительно 25% от общего объема пор материала.

* Приведенные здесь и ниже результаты исследований изоляции без указания источника получены во ВНИИКИМАШе под руководством автора.

Если на диаграмме интегральной структурной кривой изоляционного порошка провести горизонталь, соответствующую 75%

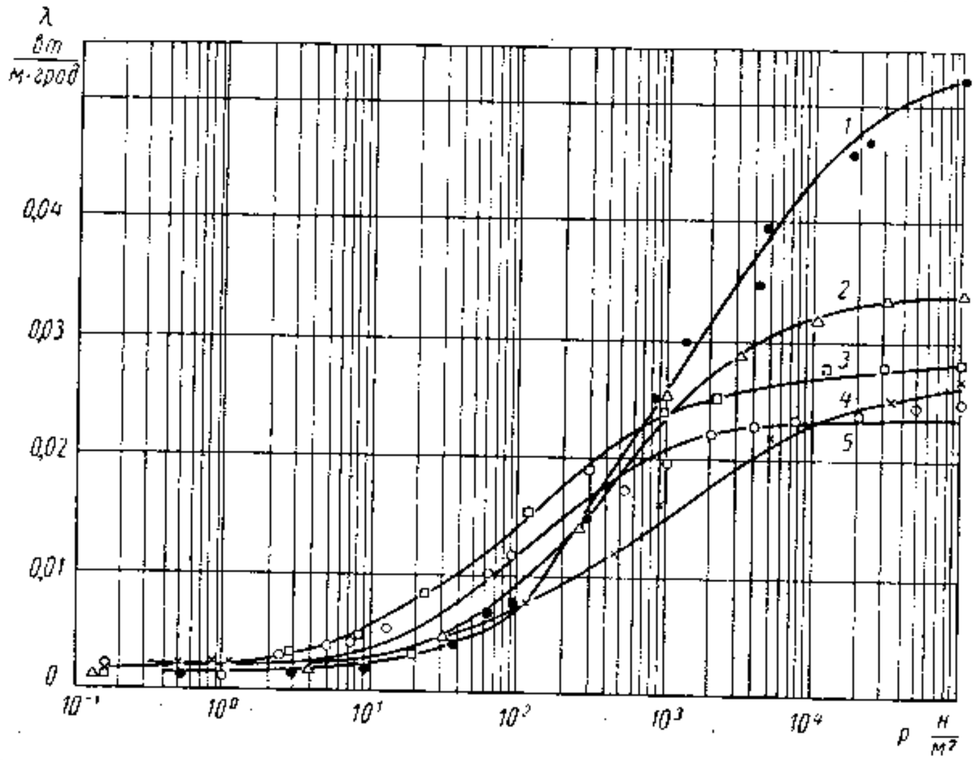


Рис. 33. Зависимость коэффициента теплопроводности изоляционных порошков от давления воздуха (граничные температуры 293 и 90° К, цифры на кривых соответствуют рис. 31)

Таблица 9

Константы уравнения (125) для различных изоляционных порошков

Материал	Плотность в кг/м³	λ_0 в вт/(м·град)	λ_1 в вт/(м·град)	λ_2 в вт/(м·град)	d_1 в мкм	d_2 в мкм
Образцы мелкодисперсной двуокиси кремния:						
2	117	0,0014	0,0175	0,0070	0,22	130
8	169	0,0014	0,0163	0,0122	0,04	160
10	100	0,0014	0,0128	0,0140	0,43	26
11	165	0,0015	0,0186	0,0116	2,6	85
12	54	0,0016	0,0058	0,0170	1,3	85
Магнезия углекислая	400	0,0012	0,0245	0,0270	4,0	43
Перлит (образец $К_4$)	110	0,0012	0,0140	0,0128	13	86
Перлит (образец $К_8$)	60	0,0014	0,0116	0,0210	34	730
Аэрогель окиси алюминия	50	0,0018	0,0122	0,0128	4,3	130
Мипора	35	0,0020	0,0210	—	137	—
Аэрогель кремниевой кислоты:						
зерна 1—2 мм	160	0,0012	0,014	0,014	9	430
зерна 0,25 мм	190	0,0012	0,014	0,014	9	65

пористости данного материала, то она пересечет кривую в точке, абсцисса которой может быть оценена как средний диаметр пор.

Значения d_1 для большинства испытанных материалов хорошо удовлетворяют этому условию. Согласно уравнению (31) величина d_2 должна равняться $^1/_3$ диаметра зерен. Это условие также удовлетворительно выполняется для большинства материалов. Мипора представляет собой не зернистый, а ячеистый материал и зависимость ее коэффициента теплопроводности от давления хорошо описывается уравнением (125) без последнего члена.

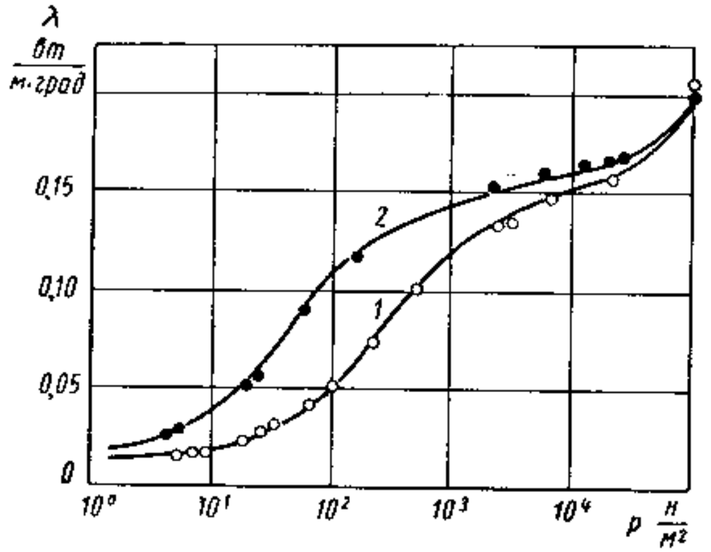


Рис. 34. Зависимость коэффициента теплопроводности аэрогеля от давления воздуха (граничные температуры 293 и 90° К):

1 — размер зерен 1—2 *мм*; *2* — размер зерен менее 0,25 *мм*

Значения постоянных λ_1 и λ_2 должны быть равны проводимости пор и пустот при $p \to \infty$. На практике они большей частью близки между собой.

Таким образом, зная средние размеры частиц и пор в частицах изоляционного порошка, коэффициент теплопроводности при высоком вакууме и атмосферном давлении и принимая $\lambda_1 \approx \lambda_2$, можно найти приближенно зависимость коэффициента теплопроводности от давления.

Если диаметр микропор в зернах материала не превышает 10 *мкм*, то второй член в уравнении (125) становится меньше λ_0 при давлениях ниже 100 *н/м²* (0,75 *мм рт. ст.*). В этой области давлений решающее влияние на величину коэффициента теплопроводности оказывает диаметр пустот между зернами. Снижение диаметра зерен с 1—2 *мм* до 0,25 *мм* значительно уменьшает λ при низких давлениях (рис. 34). При этом λ допол-

нительно уменьшается, если порошок наряду с относительно крупными зернами содержит много мелких. Например, перлит с размерами зерен 0,05—0,10 *мм* имеет больший коэффициент теплопроводности при давлениях 1—100 *н/м²* по сравнению с перлитом, содержащим зерна размером от 0,01 до 0,15 *мм*. Это явление объясняется заполнением мелкими частицами пустот между крупными зернами, т. е. уменьшением среднего диаметра пустот между зернами.

Аэрогель кремниевой кислоты имеет столь малые поры, что для него даже при атмосферном давлении критерий Кнудсена сохраняет заметную величину, близкую к 1. В результате коэффициент теплопроводности аэрогеля при атмосферном давлении меньше коэффициента теплопроводности воздуха, заполняющего его поры. Уравнение (125) при атмосферном давлении принимает вид

$$\lambda = \lambda_0 + \lambda_2 + \frac{\lambda_1}{1 + \frac{0{,}17}{d_1}}. \qquad (126)$$

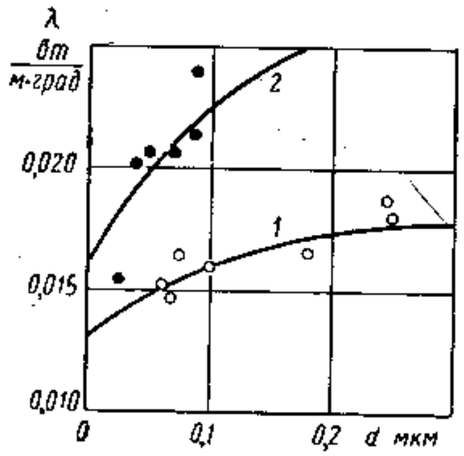


Рис. 35. Зависимость коэффициента теплопроводности аэрогеля при 190° К и атмосферном давлении от диаметра пор в зернах: *1* — при $\rho_{ср} = 80$ *кг/м³*; *2* — при $\rho_{ср} = 160$ *кг/м³*

На рис. 35 нанесены зависимости коэффициента теплопроводности образцов аэрогеля кремниевой кислоты при атмосферном давлении от размеров пор. Средний диаметр пор в зернах определен по формуле (123) на основании измерений адсорбции азота и метилового спирта. Кривые нанесены по уравнению (126), в котором $\lambda_0 + \lambda_2 = 0{,}013$ и $\lambda_1 = 0{,}0080$ *вт/(м·град)* для образцов аэрогеля со средней плотностью 80 *кг/м³*, $\lambda_0 + \lambda_2 = 0{,}016$ и $\lambda_1 = 0{,}0175$ *вт/(м·град)* для образцов плотностью 160 *кг/м³*. При увеличении диаметра пор теплопроводность аэрогеля приближается к теплопроводности других теплоизоляционных материалов с такой же плотностью (см. рис. 22).

Минимальная величина коэффициента теплопроводности аэрогеля (или другого тонкопористого материала) с плотностью около 80 *кг/м³* при атмосферном давлении и 190° К, составляющая приблизительно 0,013 *вт/(м·град)*, определяется переносом тепла через пустоты между зернами и не может быть существенно уменьшена.

Зависимость коэффициента теплопроводности волокнистых материалов от давления заполняющего газа также описывается уравнением (124). В отличие от изоляционных порошков в волокнистых материалах имеются поры только одного типа, представляющие собой пустоты между волокнами. Поэтому зависимость можно выразить уравнением

$$\lambda = \lambda_0 + \frac{\lambda_1}{1 + \frac{2\beta L_1}{pd}}. \qquad (127)$$

Средний эффективный диаметр пустот между волокнами может быть определен на основе модели волокнистого материала, изображенной на рис. 9. Он равен $2l$ и может быть найден по формуле (53)

$$d = \frac{\pi D}{4(1-m)}. \qquad (128)$$

Зависимости коэффициента теплопроводности от давления для стекловолокна (кривые *1*—*7*) и минеральной ваты (кривая *8*)

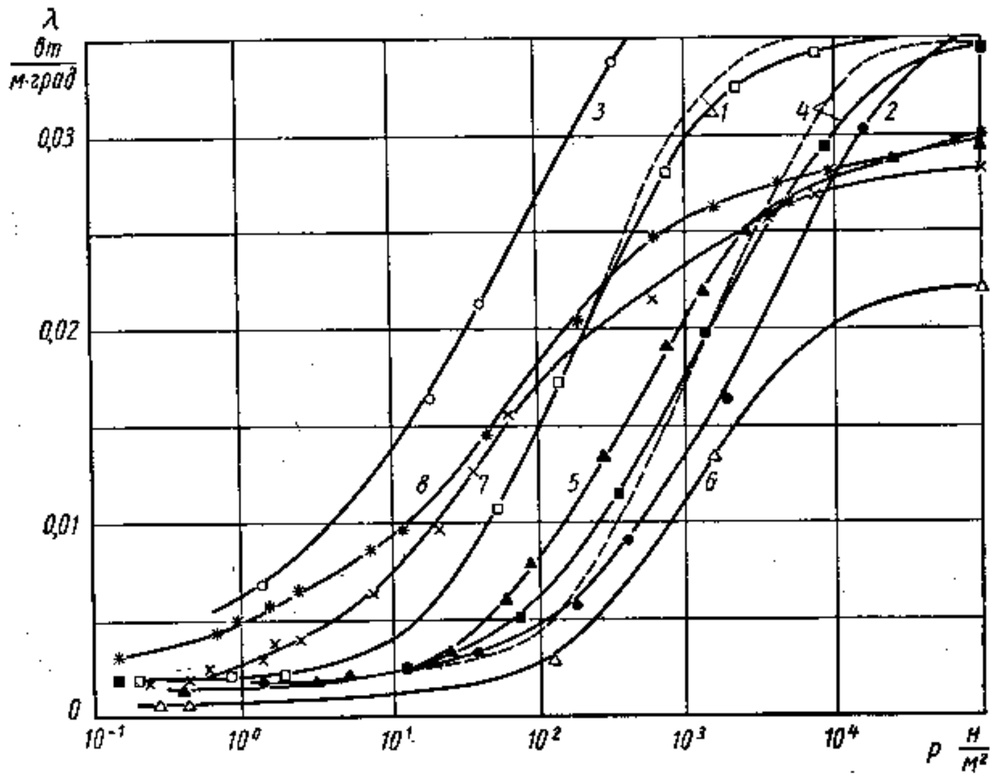


Рис. 36. Зависимость коэффициента теплопроводности волокнистых материалов от давления воздуха [цифры на кривых соответствуют номерам образцов в табл. 10, пунктирные кривые нанесены по уравнению (127)]

приведены на рис. 36. Они большей частью удовлетворительно аппроксимируются уравнением (127) с постоянными, приведенными в табл. 10. Экспериментальные кривые располагаются более полого, что может быть объяснено наличием в материале волокон различного диаметра и неоднородностью материала.

Таблица 10

Константы уравнения (127) для волокнистых материалов

№ образца	Средняя температура в °К	Средний диаметр волокон в *мкм*	Плотность в *кг/м³*	Диаметр пор в *мкм*		λ_0 в *вт/(м·град)*	λ_1 в *вт/(м·град)*	Источник
				по уравнению (128)	по опытным данным			
1	338	2,58	74	55	125	0,0019	0,034	[123]
2	338	0,69	174	7,8	8,8	0,0017	0,036	[127]
3	338	15,2	155	190	340	0,0040	0,040	[127]
4	338	3,6	250	28	17	0,0020	0,035	[54]
5	297	1,15	64	35	38	0,0015	0,029	[78]
6	192	1,15	240	9,4	16	0,0006	0,022	[79]
7	192	8,5	160	105	210	0,0017	0,024	[21]
8	192	10	150	130	470	0,0025	0,027	[19]

Опытные данные значения диаметра пор превышают иногда в 1,5—2 раза вычисленные по формуле (128). Причина расхождения заключается, по-видимому, в отличии реальных волокнистых материалов с хаотически расположенными волокнами от модели, положенной в основу расчета. Действительно, у образца № 4 (рис. 36) с волокнами, расположенными в соответствии с принятой моделью перпендикулярно тепловому потоку, диаметр пор, по опытным данным, не больше, а меньше значения, вычисленного по формуле (128).

Влияние рода заполняющего газа на перенос тепла в изоляционных материалах в условиях вакуума проявляется двояким образом. Чем больше средняя длина свободного пробега молекул L, тем выше (при одинаковом числе атомов в молекуле газа) коэффициент теплопроводности газа $\lambda_г$. Увеличение L при замене одного газа другим приводит к возрастанию критерия Кп (при одинаковом давлении газа) и снижению отношения $\frac{\lambda}{\lambda_г}$, что частично компенсирует повышенную величину $\lambda_г$. В результате коэффициент теплопроводности изоляционного материала в условиях вакуума изменяется при замене заполняющего газа в меньшей степени, чем при атмосферном давлении [20]. Влияние рода газа в этих условиях тем меньше, чем более мелкодисперсным является материал. Так, например, значения коэффициента теплопроводности кремнегеля в среде воздуха и гелия при давлениях до 100 *н/м²* различаются не более чем на 10—15%.

Перенос тепла излучением

В условиях высокого вакуума основным способом переноса тепла в изоляционных материалах является тепловое излучение. При небольших разностях температур граничных стенок общий поток тепла, переносимый излучением и проводимостью, определяется уравнением (110).

Опытные данные для кремнегеля и минеральной ваты (рис. 37), полученные при разности температур 20° К, удовлетворительно следуют этому уравнению.

При больших разностях граничных температур второй член правой части уравнения (110) должен быть заменен членом, выраженным уравнением (114). В этом случае экспериментальные значения коэффициента теплопроводности должны ложиться на прямые линии в координатах $\lambda - (T_1 + T_2)(T_1^2 + T_2^2)$.

По полученным во ВНИИКИМАШе опытным данным для изоляционных порошков нескольких типов были построены зависимости, приведенные на рис. 38, 39 и 40. На эти же графики нанесены данные для аэрогеля и перлита, полученные в Национальном бюро стандартов США [62, 117]. Опытные точки для образцов аэрогеля и перлита удовлетворительно ложатся в указанных координатах на прямые линии, пересекающие ось ординат в большинстве случаев при $\lambda < 0{,}2$ *мвт/(м·град)*. Эти значения соответствуют проводимости по твердому телу при 0° К. Величина коэффициента теплопроводности большинства изоляционных материалов в условиях высокого вакуума при

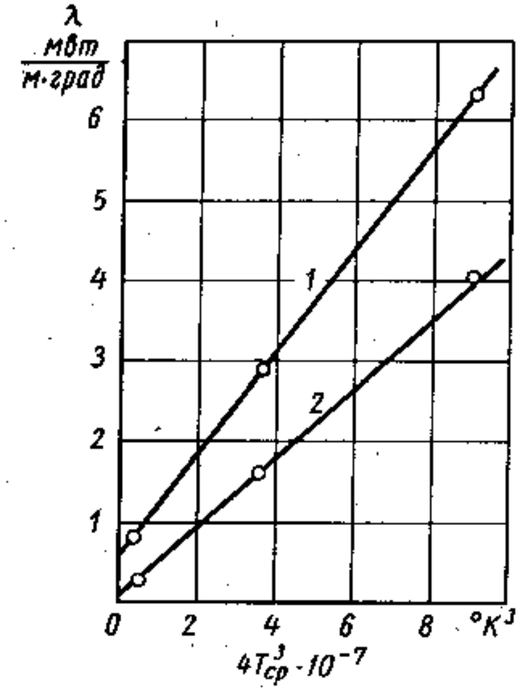


Рис. 37. Температурная зависимость коэффициента теплопроводности изоляционных материалов в вакууме:
1 — минеральная вата; *2* — кремнегель

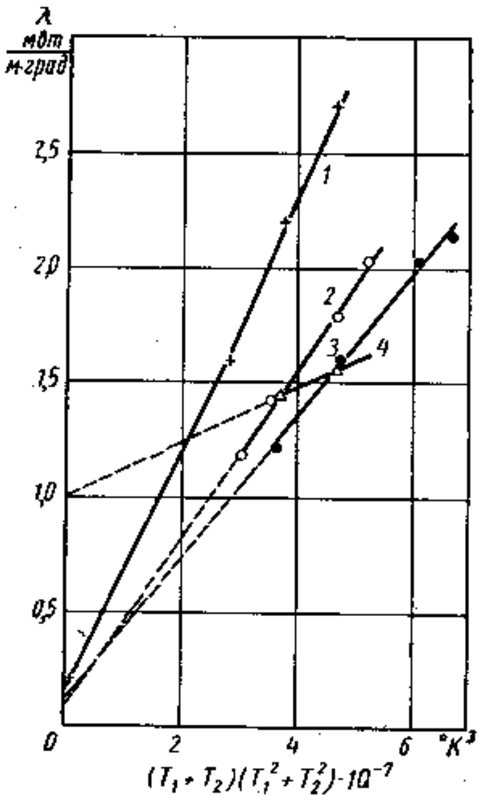


Рис. 38. Температурная зависимость коэффициента теплопроводности образцов аэрогеля кремниевой кислоты в вакууме:
1 — при $\rho = 70$ *кг/м³*; *2* — при $\rho = 105$ *кг/м³*; *3* — при $\rho = 125$ *кг/м³*; *4* — при $\rho = 457$ *кг/м³* (силикагель)

граничных температурах 290—300° и 77—90° К превышает 1 *мвт/(м·град)*. Следовательно, излучением в вакуумированных изоляционных материалах переносится обычно более 80% от общего теплового потока.

Результаты, полученные для белой сажи (рис. 40), существенно отличаются от данных для других материалов. Характер экспериментальных кривых указывает на изменение коэффициента ослабления излучения в зависимости от температуры.

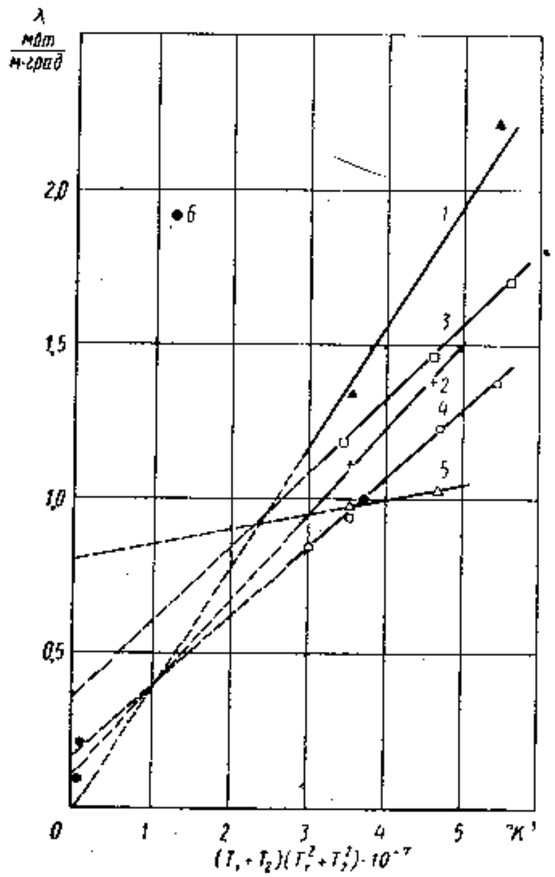


Рис. 39. Температурная зависимость коэффициента теплопроводности образцов перлита в вакууме:
1 — при ρ = 60 *кг/м³*; *2* — при ρ = 100 *кг/м³*; *3* — при ρ = 140 *кг/м³*; *4* — при ρ = 150 *кг/м³*; *5* — при ρ = 360 *кг/м³*; *6* — при ρ = 140 *кг/м³* (по данным работы [62])

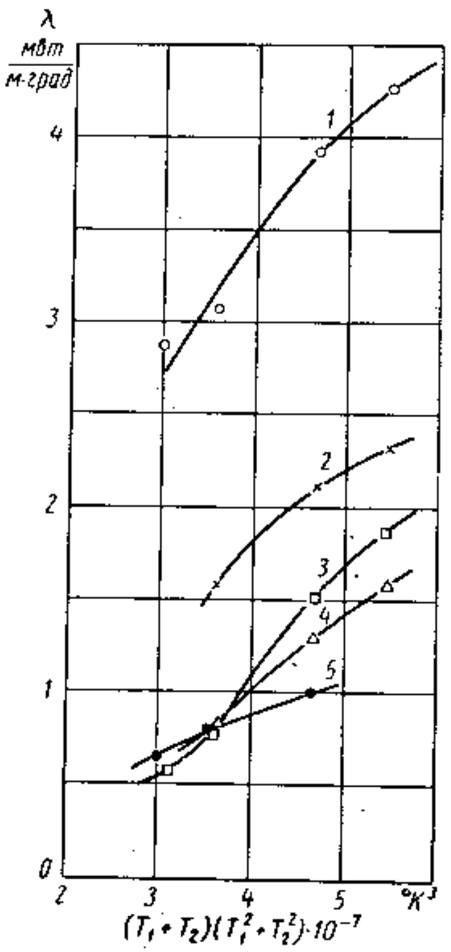


Рис. 40. Температурная зависимость коэффициента теплопроводности образцов белой сажи в вакууме:
1 — при $d_э$ = 1,5 *мкм*; *2* — при $d_э$ = 5,3 *мкм*; *3* — при $d_э$ = 13 *мкм*; *4* — при $d_э$ = 8,5 *мкм*; *5* — при $d_э$ = 11,7 *мкм*

Тепловое излучение ослабляется дисперсными средами путем поглощения и рассеяния. Если излучение ослабляется только из-за поглощения, то тепловой поток связан с толщиной дисперсной среды экспоненциальным законом [уравнения (107) и (118)]. В рассеивающей, непоглощающей среде тепловой поток при достаточно больших толщинах изменяется обратно пропорционально толщине среды [уравнения (108) и (111)].

Изоляционные материалы на основе стекла (стеклянная вата, пеностекло) ослабляют инфракрасное излучение, в основном, из-за рассеяния [103]. Коэффициент поглощения составляет 10—200 $\frac{1}{м}$, тогда как коэффициент рассеяния достигает 2500 $\frac{1}{м}$. При преобладающей роли рассеяния опытные данные по переносу тепла в изоляционных материалах должны удовлетворять уравнениям, полученным для чисто рассеивающих сред.

Применимость к изоляционным порошкам уравнения (111) может быть проверена с помощью данных по переносу тепла при различной степени черноты граничных поверхностей. Такая проверка произведена автором с использованием результатов измерений коэффициента теплопроводности различных изоляционных порошков при зачерненных и полированных граничных поверхностях и толщине слоя 25,4 *мм* [93].

Таблица 11

Коэффициенты λ и σ изоляционных порошков при различной степени черноты граничных поверхностей

Порошок	λ в *мвт/(м·град)* (граничные температуры 300 и 77° К) при		Коэффициент рассеяния σ в 1/*м*	$\varepsilon_{пр}$	$\delta_{10\%}$ в *см*
	полированных поверхностях	ε=0,86			
Кэбосил (40 *кг/м³*)	1,34	2,98	640	0,044	42
Кэбосил (56 *кг/м³*)	1,21	2,71	710	0,040	38
Силойд (72 *кг/м³*)	0,77	1,28	1560	0,035	17
Микросел Т-5 (120 *кг/м³*)	0,61	0,95	2120	0,031	13
Кэбосил + 20% масс. алюминиевой пудры	0,44	0,58	3500	0,033	7,7

Как следует из данных табл. 11, значения приведенной степени черноты $\varepsilon_{пр}$ полированных граничных поверхностей, вычисленные из опытов с различными порошками, близки между собой. Это указывает на допустимость применения уравнения (111) к изоляционным порошкам. В последнем столбце таблицы даны значения толщины слоя изоляции, при которой уменьшение теплового потока за счет полировки граничных проверхностей составляет 10%. Результаты подсчетов показывают, что степень черноты граничных стенок может оказывать большое влияние на измерения коэффициента теплопроводности лабораторными приборами с толщиной образца 1—2 *см*. В промышленных изделиях с вакуумно-порошковой изоляцией, в которых толщина слоя изоляции достигает 15—30 *см*, полирование стенок не дает возможности существенно снизить величину теплового потока.

При выполнении условия

$$\delta \gg \frac{1}{\varepsilon_{пр}\sigma}$$

замеренная величина коэффициента теплопроводности для непоглощающих излучение порошков не должна зависеть от толщины слоя. Результаты измерений (табл. 12) коэффициента теплопроводности на шаровых приборах с различной толщиной слоя, показывают, что для технических расчетов теплопереноса через изоляционные порошки с достаточной точностью может применяться обычное уравнение переноса тепла теплопроводностью.

Таблица 12

Коэффициент теплопроводности изоляционных порошков при различной толщине слоя (температуры граничных стенок 293 и 90° К, давление 0,2—0,5 н/м²

Толщина слоя в *мм*	Коэффициент теплопроводности в *мвт/(м·град)*				
	Магнезия ($\varepsilon \approx 0,15$)	Кремнегель ($\varepsilon \approx 0,15$)	Аэрогель ($\varepsilon \approx 0,15$)	Аэрогель ($\varepsilon \approx 0,8$)	Перлит ($\varepsilon \approx 0,8$)
9	1,36	—	1,55	1,45	1,20
20	—	1,60	1,48	1,47	1,04
48	1,37	1,75	—	—	—
75	1,42	—	1,69	1,66	1,03

В отличие от данных табл. 12 в работе [117] указывается на значительное возрастание коэффициента теплопроводности аэрогеля при увеличении толщины цилиндрического слоя от 12,7 до 45,7 *мм*. Анализ опытных данных работы [117] показывает, что там имеется ошибка (примерно 30%) в вычислении коэффициента теплопроводности при толщине слоя 45,7 *мм*. В табл. 13

Таблица 13

Коэффициент теплопроводности аэрогеля «сантосел» при различной толщине слоя (температура холодной стенки 76° К, давление меньше 0,27 н/м², $\varepsilon \geqslant 0,65$)

Толщина слоя в *мм*	Коэффициент теплопроводности в *мвт/(м·град)*							
	Сантосел S*		Сантосел АО*		Сантосел S**		Сантосел АО**	
12,7	1,4	(1,32)	1,2	(1,19)	2,3	(2,23)	1,9	(1,82)
25,4	1,6	(1,58)	—	—	2,7	(2,73)	—	—
45,8	2,1	(1,54)	1,7	(1,25)	3,6	(2,66)	2,3	(1,79)

* При температуре теплой стенки 273° К.
** При температуре теплой стенки 329° К.
Без скобок даны значения по работе [117], в скобках — исправленные значения.

приведены значения λ из работы [117], а также вычисленные вновь с использованием приведенных в указанной работе геометрических размеров прибора и значений теплового потока.

Исправленные опытные данные подтверждают независимость λ от толщины слоя при величинах ее более 25 *мм* даже для весьма прозрачного по отношению к тепловому излучению аэрогеля марки «сантосел».

Коэффициент рассеяния изоляционных порошков, который может быть вычислен по уравнению (114) из опытных данных по

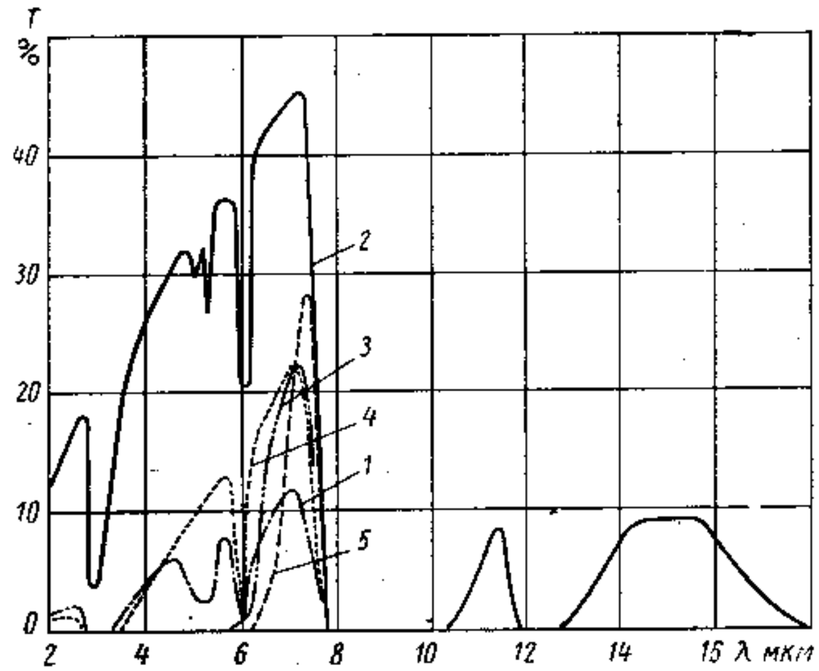


Рис. 41. Зависимость пропускательной способности изоляционных порошков (толщина слоя 0,3 *мм*) от длины волны инфракрасного излучения:

1 — аэрогель (толщина слоя 1 *мм*); *2* — аэрогель; *3* — диатомит; *4* — белая сажа; *5* — перлит

коэффициенту теплопроводности, достигает 2000—2500 $\frac{1}{м}$. Пропускная способность порошков при толщине слоя 1 *мм* составляет в соответствии с уравнением (108) около 30%. Для получения надежных данных по пропусканию изоляционными материалами инфракрасного излучения измерения проводят спектрофотометрическим способом при толщине слоя менее 1 *мм* [115, 119].

На рис. 41 приведены спектры пропускания изоляционных порошков, снятые в Ленинградском государственном университете. Спектры сняты на двухлучевом спектрофотометре в диапазоне волн от 2 до 25 *мкм*. Аналогичные результаты получены в работе [119]. Изоляционные материалы, за исключением аэрогеля, практически не пропускают излучение в диапазоне 8—25 *мкм*. Про-

пускательная способность материала тем ниже, чем меньше его коэффициент теплопроводности. При увеличении толщины аэрогеля с 0,3 до 1 *мм*, т. е. в 3,3 раза, пропускание излучения увеличилось приблизительно в 4 раза. Такое отклонение от пропорциональности может быть объяснено влиянием поглощения излучения.

Перейдем теперь к рассмотрению влияния физических свойств изоляционных материалов на перенос тепла в них излучением. Рассмотрим прежде всего влияние плотности. Увеличение плотности пористого материала может быть вызвано двумя причинами: во-первых, увеличением толщины частиц или стенок пор материала и, во-вторых, увеличением числа частиц или пор в единице объема при одновременном уменьшении размеров пор.

Перенос тепла излучением при увеличении плотности в обоих случаях будет уменьшаться, но причины этого увеличения различны. В первом случае основной причиной является поглощение излучения, тогда как во втором случае перенос излучением будет снижаться преимущественно за счет возрастающего эффекта рассеяния. Второй случай имеет место, в частности, при уплотнении пористых, например, волокнистых материалов путем обжатия. Увеличение плотности порошков может быть вызвано обеими причинами.

На рис. 42 приведены кривые, построенные по опытным данным. Величина λ уменьшается с увеличением плотности, но это уменьшение происходит не обратно пропорционально плотности, как можно было ожидать, а заметно медленнее. При плотности около 200 *кг/м*^{3} коэффициент теплопроводности достигает минимального значения, после чего начинает возрастать. Коэффициент теплопроводности измельченного силикагеля (размер зерен менее 0,25 *мм*) приблизительно равен теплопроводности аэрогеля, несмотря на то, что плотность силикагеля в 4—5 раз больше. Оба материала представляют собой разновидности геля кремниевой кислоты. Коэффициент теплопроводности стеклянной ваты [79] и минеральной ваты также достигает минимального значения при плотности около 200 *кг/м*^{3}.

Из рассмотрения опытных данных по зависимости коэффициента теплопроводности вакуумно-порошковой и вакуумно-волокнистой изоляции от плотности материала можно сделать практически важный вывод: оптимальная плотность такой изоляции составляет 150—200 *кг/м*^{3}. Поэтому имеющееся иногда стремление снизить объемную массу материалов, применяемых для вакуумно-порошковой изоляции, не является оправданным. Уменьшение объемной массы от оптимальной величины до 50 *кг/м*^{3}, т. е. в 3—4 раза приводит к увеличению коэффициента теплопроводности в 1,5—2 раза. Следовательно, при одинаковом тепловом сопротивлении слой изоляции с плотностью 50 *кг/м*^{3} будет приблизительно в 2 раза легче слоя изоляции с плотностью 150—

200 *кг/м*^{3}. Однако одновременно в 1,5—2 раза увеличивается толщина слоя, а следовательно и габариты изделия. Таким образом, в большинстве случаев целесообразно применять для вакуумно-порошковой изоляции материалы с объемной массой 150—200 *кг/м*^{3}. Следует подчеркнуть, что здесь речь идет о чистых изоляционных порошках без экранирующих излучение добавок.

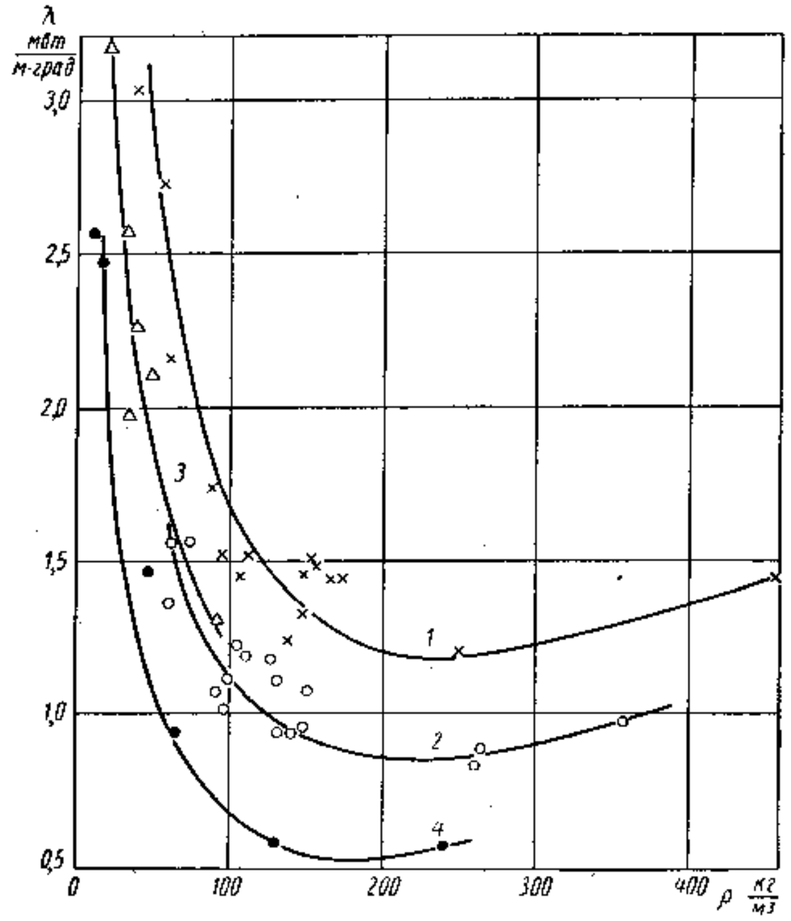


Рис. 42. Зависимость коэффициента теплопроводности изоляционных материалов в вакууме (граничные температуры 293 и 90° К от плотности:

1 — аэрогель; *2* — перлит; *3* — минора; *4* — стеклянная вата (диаметр волокон 1,15 *мкм*)

Естественно предположить, что причиной отклонения коэффициента теплопроводности от пропорциональности величине $\frac{1}{\rho}$ является повышение проводимости по твердому телу с увеличением плотности материала. Принимая в первом приближении, что проводимость по твердому телу в условиях высокого вакуума пропорциональна плотности, можно представить зависимость

коэффициента теплопроводности вакуумированного изоляционного материала в виде

$$\lambda = \frac{k_1}{\rho} + k_2\rho. \qquad (129)$$

Если λ выражено в *мвт/м · град* и ρ в *кг/м*^{3}, то постоянная k_1 равна 140 для аэрогеля, 91 для перлита и 45 для стеклянной ваты с диаметром волокон 1,15 *мкм*. На рис. 43 прямые линии проведены по формуле

$$\lambda_{изл} = \frac{k_1}{\rho},$$

а обозначенные точками значения найдены по разности при граничных температурах 293 и 90° К и при 0° К.

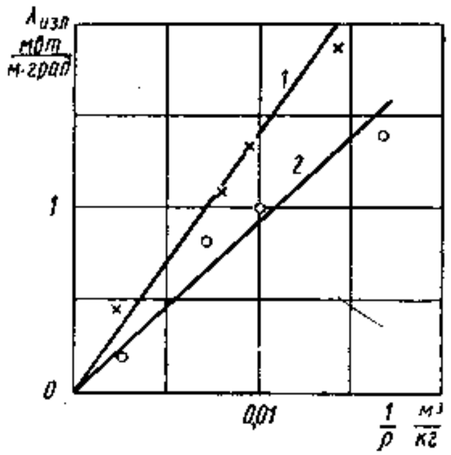


Рис. 43. Зависимость проводимости тепла излучением изоляционными материалами (граничные температуры 293 и 90° К) от плотности:
1 — аэрогель; *2* — перлит

Значения $\lambda_{изл}$, полученные обоими способами — по зависимостям коэффициента теплопроводности от плотности и от температуры — хорошо согласуются.

Вторым параметром изоляционного материала, оказывающим существенное влияние на перенос тепла излучением, является диаметр частиц. Как было показано в гл. II, коэффициент рассеяния излучения одной частицей и средой, состоящей из многих частиц, принимает максимальное значение при определенном диаметре частиц, близком по величине к длине волны падающего излучения. В соответствии с этим следует ожидать, что коэффициент теплопроводности изоляционного материала в вакууме будет проходить через минимум при указанном диаметре частиц.

Опытные данные, характеризующие влияние размера частиц на теплопроводность изоляционных материалов, приведены на рис. 44. Коэффициент теплопроводности стеклянной ваты принимает минимальное значение при диаметре волокон около 1,5 *мкм*. Следовательно, коэффициент ослабления излучения проходит здесь через максимум. Эффективная длина волны падающего излучения, определенная по формуле (62), равна в данном случае 13,2 *мкм*. Коэффициент преломления материала волокон при этой длине волны по формуле (92) равен 5,2, что выходит за пределы применимости формулы.

Коэффициент ослабления излучения изоляционным материалом может быть определен из данных по теплопроводности по уравнению (110). Коэффициент лучевого давления для элементарного волокна связан с коэффициентом ослабления излучения волокнистым материалом уравнением, аналогичным (90),

$$\gamma = \frac{4}{\pi}\,\frac{\rho}{\rho_{тв}}\,\frac{k_\vartheta}{d}. \qquad (130)$$

Для стеклянного волокна (рис. 45), коэффициент приближается к 1 при больших диаметрах волокна. Это хорошо согласуется с теоретическим значением k_ϑ (см. рис. 14) для материалов с большим показателем преломления.

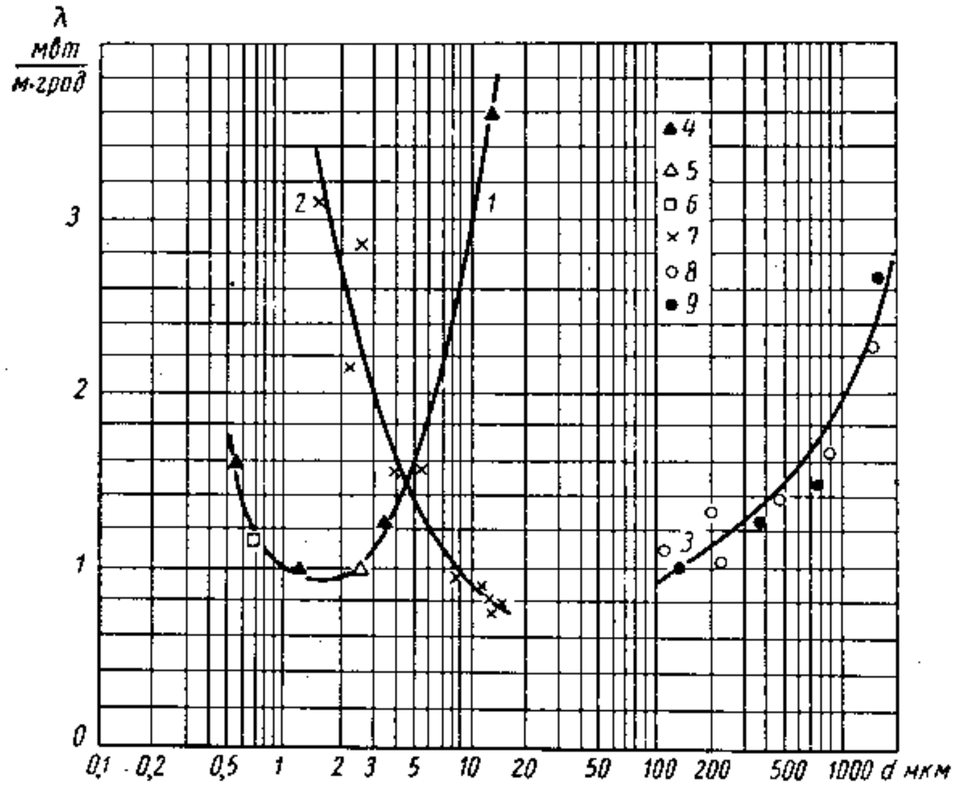


Рис. 44. Зависимость коэффициента теплопроводности изоляционных материалов в вакууме от диаметра частиц:
1 — стеклянная вата (средняя температура 297° К); *2* — белая сажа (граничные температуры 293 и 90° К); *3* — перлит (граничные температуры 293—300° и 77—90° К); *4* — по данным работы [78]; *5* — по данным работы [123]; *6* — по данным работы [127]; *7* — по данным ВНИИКИМАШа; *8* — по данным работы [102]; *9* — по данным работы [17]

Сложнее обстоит дело с изоляционными порошками вследствие их сложной структуры. Излучение рассеивается как зернами порошков, так и в порах внутри зерен. Поэтому ослабление излучения порошками зависит от размеров как зерен, так и пор в них. Оптимальный размер зерен белой сажи и перлита находится, как можно заключить из рассмотрения рис. 44, между 10 и 100 *мкм*, что соответствует коэффициенту преломления, лежащему в пределах 1,07—1,67.

Число зерен в единице объема изоляционного порошка может быть определено по формуле

$$N = \frac{6(1-m')}{\pi d^3},$$

где m' — доля объема пустот между зернами, равная в среднем 0,45.

Подставляя это выражение в формулу (89), находим коэффициент ослабления излучения зернами изоляционного порошка

$$\gamma = 0{,}825\,\frac{k_\partial}{d_э}. \qquad (131)$$

Зерно изоляционного порошка ослабляет излучение в меньшей степени, чем частица в виде монолитного тела такого же диа-

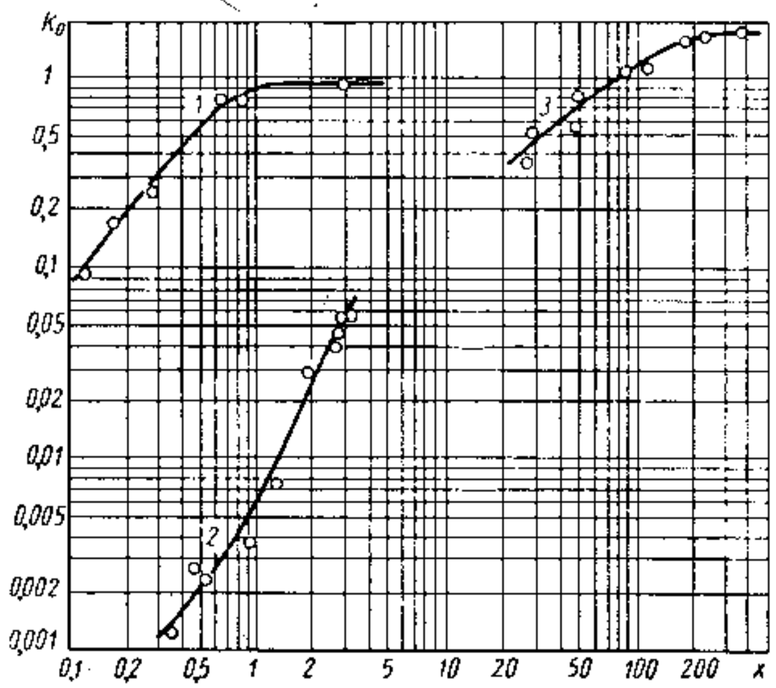


Рис. 45. Зависимость коэффициента лучевого давления для частиц изоляционных материалов от параметра x (цифры на кривых соответствуют рис. 44)

метра. При этом прозрачность зерна тем больше, чем меньше диаметр пор в нем. Поры в аэрогеле кремниевой кислоты и белой саже имеют средний диаметр менее 0,1 *мкм* и удельную поверхность более 200 $м^2/г$. Подсчет по формулам (85) и (94) дает значения $k_p \approx 6 \cdot 10^{-8}$ и $\sigma \approx 0{,}5$ $1/м$, что в несколько тысяч раз меньше измеренного коэффициента ослабления для изоляционных порошков. Следовательно, излучение в указанных материалах ослабляется, в основном, за счет рассеяния его на границах зерен порошка.

Зерна перлита содержат более крупные поры диаметром в несколько микрон, сравнительно сильно рассеивающие инфракрасное излучение. В результате коэффициент теплопроводности перлита в 1,5 раза ниже, чем у аэрогеля при одинаковых плотности и размерах зерен.

Коэффициент лучевого давления для больших частиц согласно теории не должен превышать 1, тогда как для перлита он с увеличением диаметра зерен приближается к 1,8. Расхождение можно объяснить эффектом многократного рассеяния, который в порошкообразных материалах должен быть значительно больше, чем в волокнистых ввиду сравнительно малого отношения диаметра пустот между частицами к диаметру частиц.

Вследствие малых размеров частиц белой сажи рассеяние излучения в ней сильно зависит от параметра x. Изменение этого параметра может быть вызвано не только изменением диаметра частиц, но и длины волны падающего излучения, которая в свою очередь изменяется с температурой тепловой граничной поверхности материала. Это и является причиной аномалий в температурной зависимости коэффициента теплопроводности белой сажи.

Перенос тепла по твердому телу

Поток тепла вдоль частиц и волокон изоляционных материалов, довольно большой в обычных условиях, сводится к минимуму в условиях высокого вакуума. Теоретически он ставится равным нулю при наличии лишь точечных контактов между отдельными частицами. В действительности контакт всегда происходит не в точке, а на площадке конечных размеров, определяющихся прежде всего нагрузкой на материал, в частности его силой тяжести и уплотнением при загрузке. Величина контактных площадок имеет решающее значение в переносе тепла по твердому телу в изоляционных материалах. Величина теплового потока может быть вычислена по формуле (48) для зернистых материалов и по формуле (58) для волокнистых материалов.

На практике изоляционные материалы большей частью не подвергаются воздействию внешней нагрузки, а определить количественно контактные напряжения, возникающие при уплотнении изоляции, не представляется возможным. Поэтому представляет существенный интерес экспериментальное определение по твердому телу.

Экспериментальные значения могут быть найдены двумя способами: по зависимости коэффициента теплопроводности вакуумированного изоляционного материала от плотности и от температуры. В первом случае определение основано на нахождении из опытных данных постоянных формулы (129). Во втором случае контактная теплопроводность $\lambda_к$ определяется по точке пере-

сечения экспериментальной прямой в координатах $\lambda - (T_1 + T_2)(T_1^2 + T_2^2)$ с осью ординат.

Найденные первым способом значения постоянной k_2 в формуле (129) при граничных температурах 293 и 90° К равны 0,0022 для аэрогеля и перлита и 0,0017 для стеклянной ваты с диаметром волокон 1,15 *мкм*. Значения $\lambda_к$ для аэрогеля и перлита, определенные опытным путем вторым способом, нанесены на рис. 46. Тангенс угла наклона прямой линии на графике равен k_2. Найденные обоими способами значения $\lambda_к$ удовлетворительно согласуются при больших плотностях.

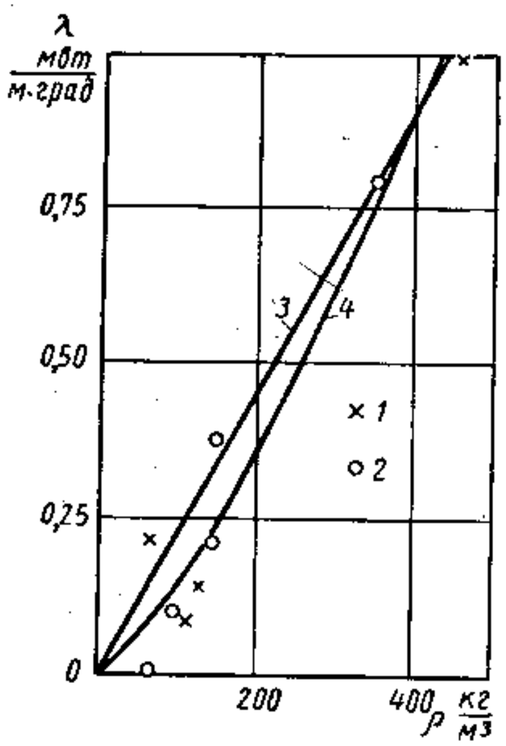


Рис. 46. Зависимость контактной теплопроводности изоляционных материалов (граничные температуры 293 и 90° К) от плотности:

1 — аэрогель; *2* — перлит; *3* — по уравнению (129); *4* — по уравнению (48)

Контактная теплопроводность зернистых материалов может быть вычислена по уравнению (48). Принимая, что $\lambda_к$ для аэрогеля равна 0,90 *мвт/(м × × град)* при плотности 400 *кг/м³*, находим по этому уравнению удельную силу сжатия при уплотнении: $p = 480$ *н/м²* (0,0049 *кГ/см²*). Если зернистый материал уплотняется всегда аналогичным образом, то удельная сила сжатия должна быть приблизительно постоянной. В этом случае контактная теплопроводность будет зависеть только от плотности материала. Кривая *4* на рис. 46 построена по уравнению (48) при найденной выше удельной силе сжатия порошка. Расчетная кривая довольно хорошо аппроксимирует опытные данные, что подтверждает правильность уравнения (48). Выпадение некоторых точек можно объяснить изменением удельной силы сжатия ввиду трудности воспроизведения одинаковых условий уплотнения материала.

Применяемые материалы и их свойства

Опытные данные по теплопроводности ряда зернистых и волокнистых материалов, полученные во ВНИИКИМАШе, представлены в табл. 14. Данные для некоторых других материалов [62] приведены в табл. 15.

Таблица 14

Коэффициент теплопроводности λ вакуумированных зернистых и волокнистых материалов при температурах граничных поверхностей 293 и 90° К

Материал	Средний размер частиц в *мм*	Удельная поверхность в *м²/г*	Плотность в *кг/м³*	Коэффициент теплопроводности λ в *мвт/(м·град)* при давлении $0{,}133$ *н/м²* $(1 \cdot 10^{-3}$ *мм. рт. ст.)*	Коэффициент теплопроводности λ в *мвт/(м·град)* при давлении $13{,}3$ *н/м²* $(0{,}1$ *мм. рт. ст.)*
Аэрогель кремниевой кислоты, полученный:					
по автоклавному способу	<0,25	200	120	1,5	2,3
по безавтоклавному способу	<0,25	200	140	1,4	2,7
по непрерывному способу	<0,25	200	110	1,4	2,1
Аэросил БС-380	—	380	70	2,0	5,0
Белая сажа У-333	0,0015	50	360	3,1	—
То же БС-50	0,002	50	250	2,1	—
» » БС-280	0,005	280	180	1,5	1,7
» » БС-280	0,011	280	170	0,9	—
» » БС-280	0,014	230	200	0,8	1,6
Кремнегель	<0,05	30	100	1,5	2,7
Силикагель КСМ	<0,2	600	460	1,4	—
То же	3,5	600	480	6,9	—
Диатомит	<0,25	40	250	1,7	3,5
»	<0,25	—	500	2,3	—
Перлит вспученный	1—2	10—20	50	2,7	10,0
То же	0,5—1	10—20	50	2,1	8,1
»	0,25—0,5	10—20	100	1,5	5,6
Перлит вспученный	<0,25	10—20	100	1,1	3,2
То же	<0,25	10—20	250	0,9	—
Вермикулит вспученный	0,1—0,5	10	280	3,8	—
Магнезия углекислая	0,05—0,08	14	400	1,4	2,9
Аэрогель окиси алюминия	0,025—0,1	—	50	1,9	3,5
Мипора	—	19	50	2,1	4,2
Стеклянная вата	0,018	—	160	5,0	16,0
То же	0,008	—	150	1,7	8,5
Минеральная вата	0,01	4	150	3,0	10,5
Асбестовый порошок	—	—	620	6,3	—
Черная сажа	—	100	400	1,3	—
Уголь активированный	1—3	1550	400	5,9	—
Цеолит СаА	2—4	570	650	6,5	—
Кремний	0,005	—	950	4,7	—
Бронзовая пудра БПФ	<0,045	—	1900	4,5	—

Таблица 15

Коэффициент теплопроводности λ вакуумированных порошков (температура граничных стенок 300 и 77° К давление менее 10^{-2} *н/м²*)

Наименование порошка	Размеры частиц в *мкм*	Плотность в *кг/м³*	λ в *мвт/м·град*
Глинозем плавленый чешуйчатый	150—300	2000	1,8
То же	0,1—10	70	2,3
Слюда вспученная	600—850 (30%)	150	1,8
	100—600 (70%)		
Тальк	—	1200	1,6
Фенольные шарики	25—100	200	1,3
Кальций кремнекислый (синтетический)	0,02	170	0,75
Двуокись титана	0,11 (размер пор)	350	1,6
Окись железа (Fe_2O_3)	0,02 (размер пор)	190	1,4

Из таблиц видно, что для многих порошкообразных материалов кажущийся коэффициент теплопроводности при температурах граничных стенок 293—300° К и 77—90° К и давлении менее 0,1 *н/м²* составляет 1—2 *мвт/(м·град)*, т. е. в 10—20 раз меньше, чем у наилучших изоляционных материалов при атмосферном давлении. К материалам для вакуумно-порошковой теплоизоляции предъявляется ряд дополнительных требований, вследствие чего на практике нашли применение лишь немногие материалы. К этим требованиям, помимо низкого коэффициента теплопроводности относятся малая объемная масса, отсутствие легколетучих примесей, доступность и дешевизна, негорючесть, медленное возрастание теплопроводности при ухудшении вакуума.

В настоящее время для вакуумно-порошковой теплоизоляции применяются, в основном, аэрогель кремниевой кислоты и перлит. Показатели сортов этих материалов, используемых для вакуумно-порошковой изоляции, приведены в табл. 16. Достоинство аэрогеля — низкий коэффициент теплопроводности, сравнительно медленно возрастающий при увеличении давления. Благодаря чрезвычайно малому диаметру пор аэрогель довольно прозрачен для теплового излучения.

Аэрогель имеет сравнительно малую плотность, равную для промышленной марки 40—60 *кг/м³*. Испытания показали, что при вакуумировании он даст значительную усадку. Результаты опытов по уплотнению аэрогеля в сосуде емкостью 3 *дм³* характери-

Таблица 16

Характеристика порошков, применяемых для вакуумно-порошковой теплоизоляции

Показатель	Аэрогель кремниевой кислоты, марка В по МРТУ 6-02-265-63	Перлитовая пудра по МРТУ6 № ЕУ-232-62
Плотность при утряске в *кг/м³*, не более	40—60	150
Плотность при уплотнении под вакуумом в *кг/м³*, не более	140	—
Содержание частиц в % при их размерах в *мм*:		
до 0,25	—	90
» 0,315	80	—
» 0,6	100	—
» 1,0	—	100
Коэффициент теплопроводности при граничных температурах 293 и 90° К и давлении 1,3 *н/м²* (0,01 *мм. рт. ст.*) в *мвт/(м·град)*, не более	1,6	1,4
Содержание влаги в % масс., не более	0,8	0,5
Содержание углерода в % масс., не более	0,5	2

зуются кривыми рис. 47. Сосуд откачивали до требуемого давления, после чего сообщали его с воронкой, заполненной порошком. Аэрогель загружали в 2—3 приема. При этом порошок засасывался в сосуд и уплотнялся под воздействием атмосферного давления.

При разрежении 26,6 *кн/м²* (200 *мм рт. ст.*) аэрогель уплотняется в 1,7—2,5 раза. Увеличение разрежения с 26,6 до 53,2 *кн/м²* (с 200 до 400 *мм рт. ст.*) повышает коэффициент усадки на 10—15%, а дальнейшее увеличение с 53,2 до 79,8 *кн/м²* (с 400 до 600 *мм рт. ст.*) повышает коэффициент усадки лишь на 5%. С уменьшением исходной плотности степень усадки возрастает, причем особенно резко у образцов с плотностью ниже 40 *кг/м³*. Уменьшение плотности аэрогеля ниже 40 *кг/м³* не позволяет заметно

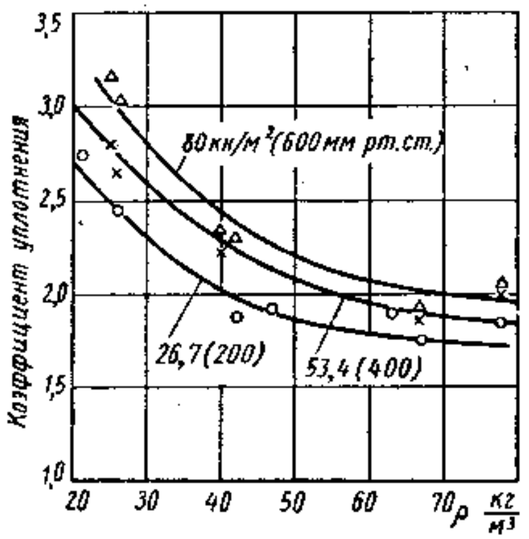


Рис. 47. Зависимость усадки аэрогеля при уплотнении под вакуумом от плотности аэрогеля (на кривых указано разрежение при засыпке)

уменьшить массу аэрогеля, загружаемого в изоляционное пространство, увеличивая лишь затруднения, связанные с большой степенью усадки.

Для промышленных резервуаров достаточной степени усадки удается достигнуть при разрежении, равном приблизительно 13,3—20 *кн/м²* (100—150 *мм. рт. ст.*).

Изучение усадки аэрогеля при вибрации с частотой 50 *гц* и амплитудой 0,4 *мм* в течение 100 *ч* дало следующие результаты. Аэрогель, вакуумированный после засыпки в сосуд с утряской до 58 *кг/м³*, уплотнился при вибрации до 91 *кг/м³* т. е. в 1,6 раза, тогда как при отсутствии вакуума вибрация не изменила плотности аэрогеля. В результате засыпки с уплотнением под вакуумом (разрежение 200 *мм. рт. ст.*) плотность образцов аэрогеля той же партии возросла до 100 *кг/м³*, последующая вибрация не вызвала дополнительной усадки материала. Таким образом, аэрогель следует засыпать в изоляционное пространство сосудов с вакуумно-порошковой изоляцией с уплотнением под вакуумом, что приводит к увеличению объемной массы материала примерно в 2 раза и исключает последующую усадку аэрогеля при транспортировке сосуда, а также при потере вакуума вследствие нарушения герметичности сосуда.

Перлитовая пудра имеет в условиях высокого вакуума более низкий по сравнению с аэрогелем коэффициент теплопроводности возрастающий, однако, довольно быстро при ухудшении вакуума. Перлит является более крупнопористым материалом, чем аэрогель, поэтому он адсорбирует меньше газов и паров, обладает меньшей гигроскопичностью, легко вакуумируется. Он сравнительно дешев. Учитывая все это, можно считать, что в сосудах с вакуумно-порошковой изоляцией целесообразно преимущественно применять перлит.

Особенностью перлита является удерживание им гелия при попадании последнего в изоляцию. Гелий не только адсорбируется поверхностью частиц перлита, но и диффундирует в его структуру. Поэтому нельзя допускать попадания сколько-нибудь значительных количеств гелия в перлит при проверке герметичности сосуда гелиевым течеискателем. Присутствие гелия в изоляции особенно опасно тем, что он плохо поглощается адсорбентом при заливке сосуда сжиженным газом, что может воспрепятствовать снижению давления остаточных газов до требуемой величины.

При использовании перлита для изоляции транспортируемых сосудов следует учитывать один его существенный недостаток — усадку при вибрации. В отличие от аэрогеля засыпка перлита с уплотнением под вакуумом не предотвращает последующей усадки. Объемная масса перлита при таком методе засыпки не отличается от массы при засыпке с утряской. Последующая вибрация уплотняет перлит приблизительно на 25%. Величина усадки

постепенно возрастает при увеличении частоты и амплитуды. Предельная величина усадки (20—25%) достигается при частоте 50 *гц* и амплитуде 0,4 *мм*.

На практике перлит загружают обычно следующим образом. После засасывания перлита под разрежением около 0,05 *Мн/м²* (400 *мм рт. ст.*) изолируемый сосуд вибрируют на виброплощадке в течение 1—2 часов (частота 50 *гц*). Затем в изоляционное пространство под вакуумом засыпают еще перлит, после чего описанная процедура повторяется снова. Такой метод засыпки исключает усадку перлита в процессе эксплуатации изделия.

Перспективным материалом для вакуумно-порошковой изоляции является белая сажа, имеющая хорошие теплоизоляционные свойства и невысокую, по сравнению с аэрогелем, стоимость. Еще более низкий коэффициент теплопроводности в условиях вакуума [0,55 *мвт/(м·град)*] имеет тонкодисперсный порошок кремнекислого кальция, выпускаемый в США под названием «микросел».

Из ячеистых материалов практическое применение получила мипора [60]. Она используется, в частности, в серийно-выпускаемых лабораторных ожижителях водорода, коэффициент теплопроводности ее в условиях эксплуатации составляет 0,0029—0,0036 *вт/(м·град)*. Другие ячеистые материалы мало изменяют свой коэффициент теплопроводности при вакуумировании. Его величина в условиях вакуума при граничных температурах 300 и 77° К составляет 0,025 *вт/(м·град)* для пенополистирола и 0,0120 *вт/(м·град)* для пенополиуретана [36]. Столь большая теплопроводность вызвана повышенной проводимостью по твердому скелету материала, образующему стенки ячеек. Вследствие малой газопроницаемости твердого скелета достижение указанных значений коэффициента теплопроводности требует вакуумирования лабораторного образца в течение 10—18 дней.

Высокую эффективность имеет также вакуумно-волокнистая теплоизоляция. Наилучшие результаты дает применение стеклянного волокна диаметром 1,0—1,5 *мкм*. Изоляция из такого волокна плотностью 150—200 *кг/м³* имеет при граничных температурах 300 и 77° К коэффициент теплопроводности 0,5—0,6 *мвт/(м·град)*. Возрастание теплопроводности с давлением происходит в этом случае не быстрее, чем у аэрогеля, благодаря малому диаметру пор между тонкими волокнами при достаточно плотной набивке.

Волокнистая изоляция используется в теплоизоляционных конструкциях с гибкими оболочками, воспринимая внешнюю нагрузку от атмосферного давления. Стекловолокно сжимается под атмосферным давлением до 250—300 *кг/м³*. Наибольшую эффективность в этих условиях обеспечивает укладка волокон в направлениях, перпендикулярных тепловому потоку. Коэффициент теплопроводности, составляющий 1,5—3,0 *мвт/(м·град)* при гра-

личных температурах 383 и 293° К, мало изменяется при нагружении изоляции. Хорошие механические свойства стекловолокнистой изоляции придает скрепление ее спеканием при температуре размягчения стекла.

Вакуумно-порошковая теплоизоляция с экранированием излучения

Тепловое излучение является преобладающим при переносе тепла через вакуумно-порошковую изоляцию. Поэтому естественно, что повышение эффективности этого вида изоляции должно идти по пути уменьшения переноса тепла излучением. С этой целью было предложено [113, 130] добавлять к изоляционным порошкам металлические порошки. Реализация этой идеи привела к значительному прогрессу в теплоизоляционной технике.

Коэффициент лучевого давления k_∂ (см. рис. 13) для полностью отражающих шаров начинает быстро уменьшаться при значениях $x < 1{,}1$. При эффективной длине волн теплового излучения 14 *мкм* (температура теплой стенки 293° К) это соответствует диаметру шаров 4,9 *мкм*. Следовательно, диаметр металлических частиц не должен быть меньше 5 *мкм*. При $x > 1{,}3$ коэффициент k_∂ также постепенно уменьшается. Из формулы (90) следует, что коэффициент ослабления облака сферических частиц при постоянном коэффициенте лучевого давления одной частицы изменяется обратно пропорционально диаметру частиц, что приводит к дополнительному снижению γ с увеличением диаметра. Таким образом, коэффициент ослабления облака металлических частиц достигает максимального значения при диаметре около 5 *мкм* и быстро уменьшается при изменении диаметра в любую сторону.

Лучших результатов можно достичь при использовании дискообразных частиц (чешуек). Зависимость коэффициента ослабления частицы от ее диаметра имеет в этом случае приблизительно такой же вид, как и для шаров.

Коэффициент ослабления облака дискообразных частиц с толщиной δ, значительно меньшей диаметра d, может быть определен следующим образом. При хаотическом расположении частиц среднее эффективное поперечное сечение одной частицы в плоскости, перпендикулярной лучистому потоку, равно

$$F = \frac{1}{3}\,\frac{\pi d^2}{4}.$$

Число частиц в единице объема, имеющих плотность ρ, связано с их концентрацией a соотношением

$$N = \frac{4}{\pi d^2 \delta}\,\frac{a}{\rho}.$$

Отсюда находим коэффициент ослабления

$$\gamma = NFk_\partial = \frac{1}{3}\,\frac{a}{\rho}\,\frac{k_\partial}{\delta}. \qquad (132)$$

Следовательно, при достаточно больших диаметрах чешуек, при которых k_∂ становится постоянной величиной, γ не зависит от диаметра и определяется только толщиной чешуек.

Уменьшая δ до 1 *мкм* и менее, можно при неизменном диаметре чешуек значительно увеличить γ по сравнению со сферическими частицами такого же и даже меньшего диаметра.

Определение доли теплового потока, переносимой излучением, может быть произведено здесь, как и в других случаях, по температурной зависимости коэффициента теплопроводности. Экспериментальные точки хорошо ложатся (рис. 48) на прямые линии в координатах $\lambda - (T_1 + T_2)\,(T_1^2 + T_2^2)$. По мере повышения содержания металлического порошка наклон прямых уменьшается, а отрезок, отсекаемый на оси ординат, возрастает. Он возрастает также при увеличении степени уплотнения смеси (линии *5* и *9* на рис. 48). Точки, соответствующие вычисленным по температурной зависимости значениям коэффициента ослабления излучения, нанесены на рис. 49. Опытные данные удовлетворительно могут быть представлены прямыми линиями, начинающимися на оси ординат в точке, соответствующей коэффициенту ослабления излучения для аэрогеля. Наклон прямой тем меньше, чем больше размер частиц порошка (рис. 49).

Коэффициент лучевого давления для одной частицы может быть найден по наклону этих прямых. Толщину чешуек металлической пудры можно вычислить по величине их удельной поверхности, определяемой по площади покрытия воды пудрой (см. гл. VII).

Площадь покрытия воды, составила 197 *м²/кг* для образца бронзовой пудры со средним диаметром частиц 10—15 *мкм*. Отсюда находим, что толщина частиц равна 0,60 *мкм*. Подставляя соответствующие значения для этой пудры в формулу (132), получим значение коэффициента лучевого давления $k_\partial = 1{,}47$. Среднее значение параметра x составляет 2,8, соответствующая (см. рис. 13) величина $k_\partial = 1{,}35$ хорошо согласуется с вычисленной из опытных данных.

Как видно из рис. 50 [93], диаметр металлических чешуек в области меньше 100 *мкм* оказывает более существенное влияние на коэффициент теплопроводности смеси изоляционного и металлического порошков, чем это следует из формулы (132) и рис. 13. Это кажущееся противоречие можно объяснить уменьшением толщины частиц с уменьшением их диаметра, так как при помоле одновременно уменьшаются оба геометрических размера лепесткообразных частиц.

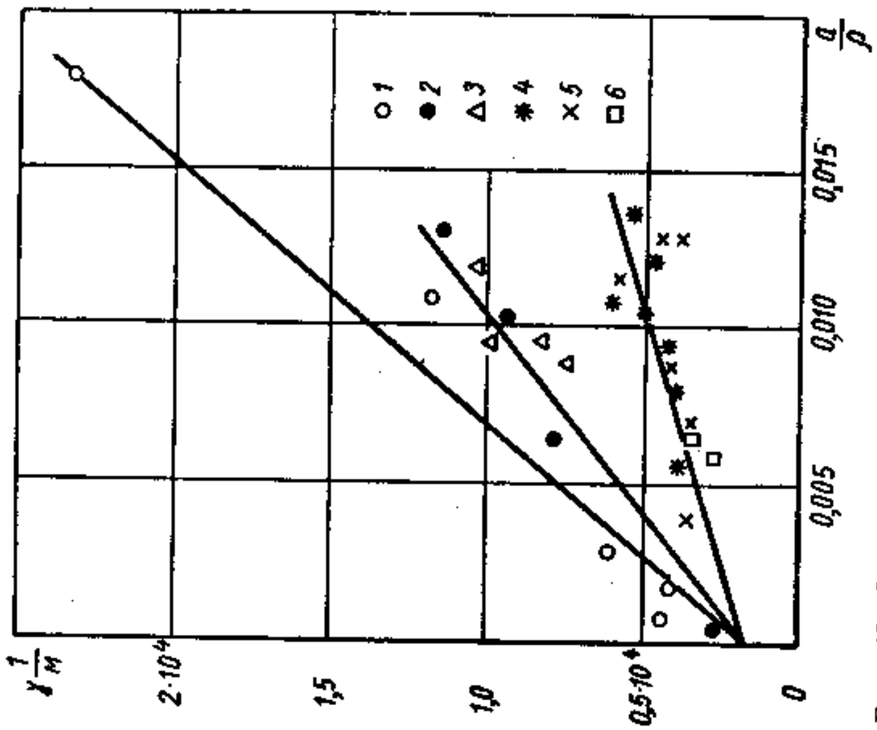


Рис. 49. Зависимость коэффициента ослабления теплового излучения металлическими порошками от их объемной концентрации в смесях с аэрогелем:

1 — алюминиевая пудра [130]; *2* — медная пудра [130]; *3* — среднедисперсная бронзовая пудра; *4* — крупнодисперсная бронзовая пудра; *5* — то же, с белой сажей; *6* — медный порошок

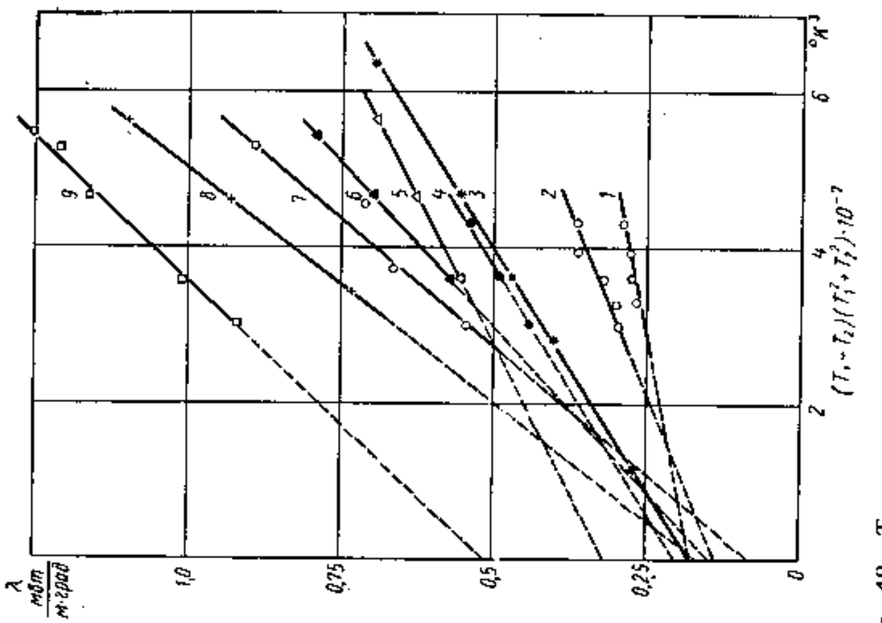


Рис. 48. Температурная зависимость коэффициента теплопроводности смесей аэрогеля с металлическими порошками в вакууме:

1 — алюминиевая пудра 40% [130]; *2* — алюминиевая пудра 28,6% [130]; *3* — алюминиевый порошок 50% [72]; *4* — медная пудра 62% [130]; *5* — среднедисперсная бронзовая пудра 84 *г/л*; *6* — крупнодисперсная бронзовая пудра 90 *г/л*; *7* — алюминиевая пудра [130]; *8* — медный порошок 61 *г/л*; *9* — крупнодисперсная бронзовая пудра 105 *г/л*

Коэффициент ослабления смеси равен сумме коэффициентов ослабления изоляционного и металлического порошков. При небольших концентрациях металлического порошка проводимости по твердому телу $\lambda_т$ в изоляционном порошке и в смеси близки по величине. Вычитая $\lambda_т$ из значений коэффициента теплопроводности смеси и изоляционного порошка и определяя по формуле (114) соответствующие коэффициенты ослабления, нетрудно найти коэффициент ослабления излучения металлическим порошком и затем по формуле (132) — толщину частиц. Принимая коэффициент давления для отдельной частицы диаметром более 30 *мкм* ($x > 6{,}7$) равным 1, находим что толщина чешуек алюминиевой пудры (см. рис. 50) приблизительно в 50 раз меньше

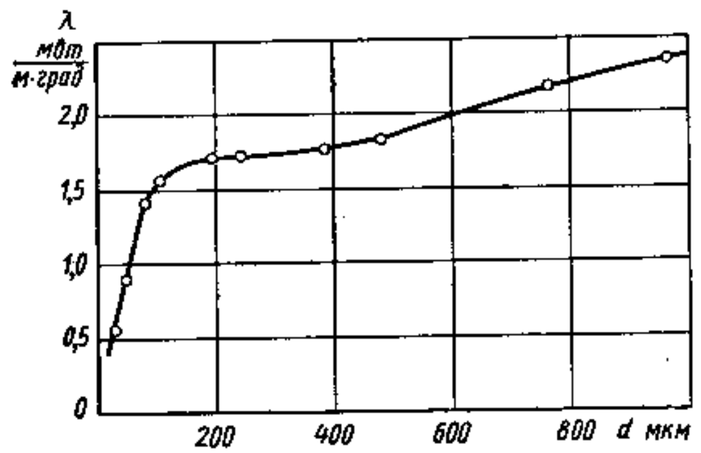


Рис. 50. Зависимость коэффициента теплопроводности смесей аэрогеля с алюминиевой пудрой в вакууме (граничные температуры 300 и 77° K) от диаметра чешуек пудры

их диаметра и равна, в частности, 0,5 *мкм* у частиц диаметром 30 *мкм*.

Помимо малого размера и чешуйчатой формы частиц, металлические порошки должны иметь малую степень черноты и неокисленную поверхность. Существует много способов изготовления металлических порошков: восстановление окислов, электролиз, разложение карбонилов, механическое измельчение, распыление жидких металлов [59]. Частицы достаточно малых размеров можно получить любым из этих способов. Сложнее обеспечить требуемую форму. Порошки, полученные карбонильным способом, распылением и восстановлением, имеют большей частью сферическую или каплеобразную форму. Электролитические порошки имеют обычно дендритную форму. Наиболее благоприятная для экранирования излучения чешуйчатая, лепестковидная форма получается при механическом измельчении, в частности при помоле на шаровых мельницах. Такие порошки часто называют пудрами. С целью обеспечения наибольшей отража-

тельной способности порошки изготовляют из алюминия или меди и ее сплавов.

Влияние размеров на коэффициент теплопроводности чешуек для порошков, полученных помолом на шаровой мельнице, видно из табл. 17.

Таблица 17

Коэффициент теплопроводности λ смесей аэрогеля (50%) и металлических порошков, полученных помолом на шаровой мельнице (давление воздуха ниже 0,4 н/м², температура граничных стенок 293 и 90° К)

Порошок	Диаметр чешуек в *мкм*	λ в *мвт/(м·град)*
Бронзовая пудра БПЛ	<75	0,58
Бронзовая пудра БПП	<60	0,44
Бронзовая пудра БПФ	10—20	0,50
То же	5—10	0,40
Алюминиевая пудра ПАК-3	<75	0,64
Алюминиевая пудра для радиоламп	1—10	0,31

Смесь аэрогеля с бронзовой пудрой БПФ применяется при изготовлении резервуаров для сжиженных газов и по сравнению с чистым аэрогелем и перлитом дает возможность снизить в 3—4 раза величину потока тепла через слой изоляции одинаковой толщины. Недавно разработана технология изготовления пудры БПИ, позволяющей дополнительно уменьшить теплопроводность смеси с аэрогелем на 15—25%.

Наименьшие опубликованные значения коэффициента теплопроводности, полученные для смесей аэрогеля кремниевой кислоты и металлических порошков, составляют 0,2 *мвт/(м·град)* для смеси с 50% по весу ультратонкой алюминиевой пудры [93], 0,152 *мвт/(м·град)* для смеси с 60% по массе алюминиевой пудры (размер частиц от 5 до 10 *мкм*) и 0,182 *мвт/(м·град)* для смеси с 70% по весу медной пудры (размер частиц от 5 до 10 *мкм*) [130]. Фирма Линде (США) применяет в своих изделиях материал CS-5, представляющий собой смесь аэрогеля с 50% по весу медной пудры и имеющий коэффициент теплопроводности 0,31 *мвт/(м·град)*.

Порошки, полученные другими способами, имеют частицы округлой формы. Как видно, из табл. 18, применение этих порошков для экранирования излучения дает меньший эффект, несмотря на мелкие размеры частиц. Это происходит в результате неэкономичного использования металла в частицах округленной формы, представляющих собой экраны сравнительно большой толщины с мало развитой поверхностью.

Коэффициент лучевого давления для таких порошков следует вычислять по формуле (90). В качестве примера приведем результаты расчетов для смеси аэрогеля и медного порошка с размером частиц 2—3 *мкм* (см. рис. 49).

Таблица 18

Коэффициент теплопроводности λ смесей аэрогеля (50%) с металлическими порошками, полученными на ударно-вихревой мельнице (давление воздуха ниже 0,4 н/м², температура граничных стенок 293 и 90° К)

Металл	Размер частиц: содержание частиц <10 *мкм* в % по массе	Размер частиц: средний размер в *мкм*	λ в *мвт/(м·град)*
Медь М1	48	8—20	1,04
Медь фосфористая . . .	85	6—12	0,77
Бронза Оф-5-0,7	—	7—10	0,43
Латунь ЛС59-1	55	—	0,66
Латунь ЛК80-3	—	5—10	0,44
Сталь Х18Н10Т	70	5—15	0,60

Коэффициент теплопроводности смеси аэрогеля с 45% по массе этого порошка, полученного электролитическим способом, равен 0,55 *мвт/(м·град)* при давлении воздуха ниже 0,4 *н/м²* и температуре граничных стенок 293 и 90° К.

Вычисленное значение коэффициента давления $k_\partial = 0{,}43$ соответствует (см. рис. 13) параметру $x = 0{,}54$, т. е. размеру частиц 2,4 *мкм*, что хорошо согласуется с результатами непосредственного измерения с помощью микроскопа.

Увеличение концентрации металлического порошка уменьшает перенос тепла излучением и одновременно увеличивает перенос тепла проводимостью. Поэтому смесь изоляционного и металлического порошков должна иметь оптимальную концентрацию, при которой достигается минимальное значение коэффициента теплопроводности.

Зависимости коэффициента теплопроводности от содержания порошка для смесей аэрогеля с металлическими пудрами приведены на рис. 51 и 52. Оптимальная концентрация металлического порошка обычно не превышает 120 *кг/м³* или 60% по массе.

При повышенных концентрациях металлического порошка тепло переносится практически только проводимостью частиц металла. В этом случае коэффициент теплопроводности смеси должен быть приблизительно пропорциональным объемному содержанию металлического порошка. Указанное условие довольно хорошо выполняется на практике (рис. 51 и 52).

Зная величину $\lambda_т$ для чистого изоляционного порошка и для смесей с большим содержанием металлического порошка, можно оценить ее значения для смесей любой концентрации.

Точки, соответствующие вычисленным значениям $\lambda_{изл} = \lambda - \lambda_т$ для смесей аэрогеля с различными металлическими

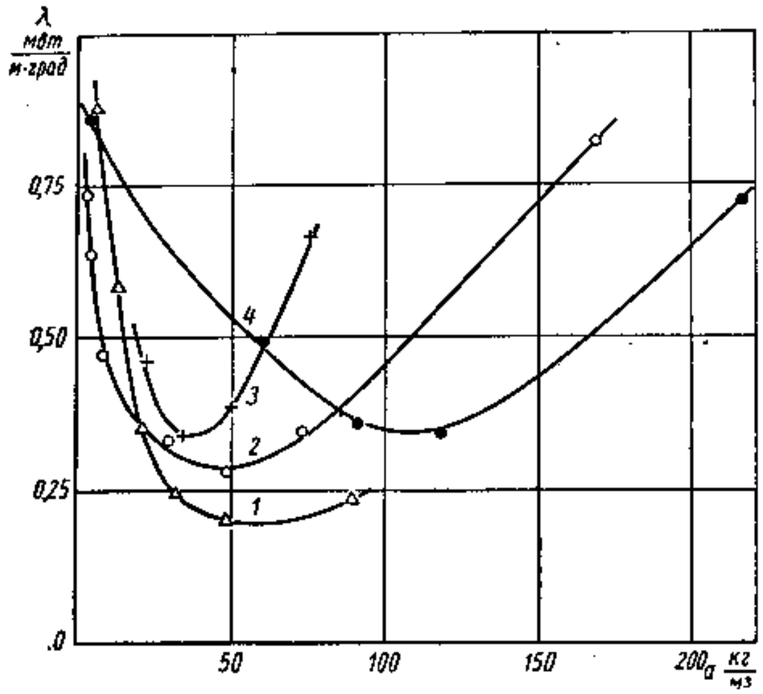


Рис. 51. Зависимость коэффициента теплопроводности смесей аэрогеля с металлическими порошками в вакууме от содержания порошка (граничные температуры 300 и 77° К):

1, 2, 3 — алюминиевая пудра по источникам [93], [130], [80] соответственно; *4* — медная пудра [130]

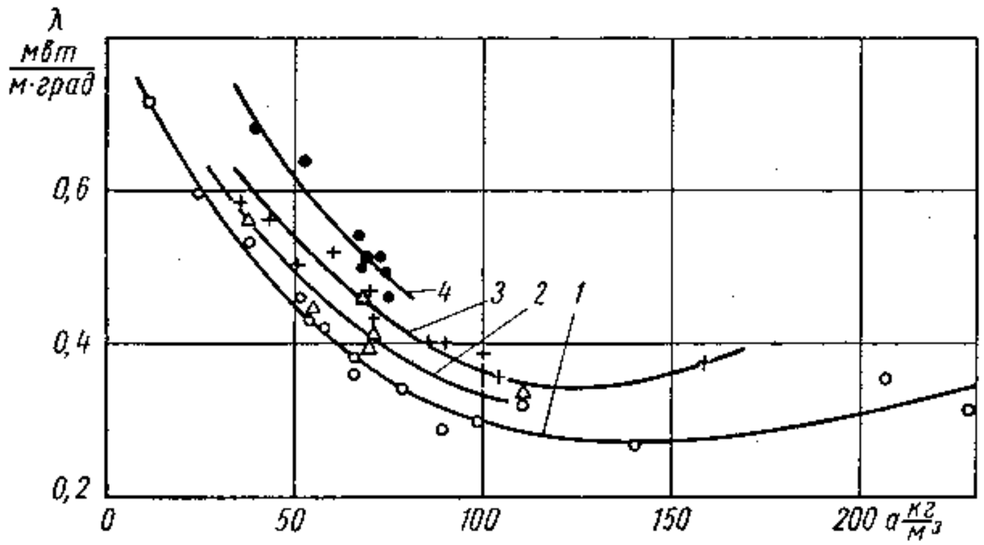


Рис. 52. Зависимость коэффициента теплопроводности смесей аэрогеля с бронзовыми пудрами в вакууме от содержания пудры (граничные температуры 293 и 90° К):

1 — пудра БПИ; *2* — пудра БПФ (средний диаметр чешуек $d = 7$ *мкм*, толщина чешуек $\delta \approx 0{,}7$ *мкм*); *3* — пудра БПФ ($d = 10$ *мкм*, $\delta \approx 0{,}7$ *мкм*); *4* — пудра ПБрБ ($d = 9$ *мкм*, $\delta = 2$ *мкм*).

порошками, нанесены на рис. 53 в полулогарифмических координатах в зависимости от концентрации металлического порошка.

Линии *2* и *5* построены на основе данных по температурной зависимости коэффициента теплопроводности. При концентрациях более 10—20 *кг/м*³ точки довольно хорошо ложатся на прямые линии. Этот результат может быть объяснен на основе теории распространения излучения в дисперсных средах. Проводимость излучения является величиной, пропорциональной

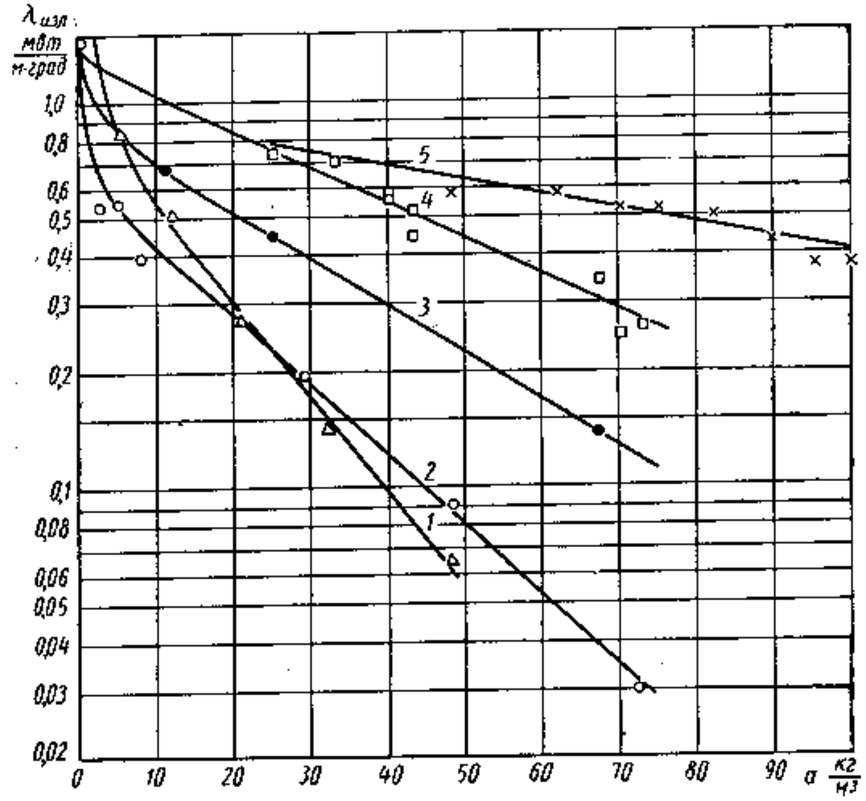


Рис. 53. Зависимость проводимости тепла излучением в смесях аэрогеля с металлическими порошками от содержания металлического порошка:

1, 2, 3 — алюминиевая пудра по данным работ [93], [130] и ВНИИКИМАШ; *4* — среднедисперсная бронзовая пудра; *5* — крупнодисперсная бронзовая пудра

пропускательной способности среды. Согласно уравнению (105) при больших толщинах слоя зависимость логарифма пропускательной способности от толщины выражается прямой линией.

Из законов Бугера и Бера следует, что толщина слоя и концентрация поглощающего вещества в слое сказывают одинаковое влияние на поглощательную способность среды. Обширные исследования [6], проведенные с угольной пылью, подтвердили это положение. Таким образом, полученный для смесей изоляционных и металлических порошков результат находится в соответствии с теорией лучистого переноса в дисперсных средах.

Зависимость пропускательной способности смеси от толщины слоя должна быть аналогична зависимости пропускательной способности от концентрации металлического порошка и следовать уравнению (105). В результате коэффициент теплопроводности смеси должен изменяться с толщиной слоя. Однако следует иметь в виду два обстоятельства:

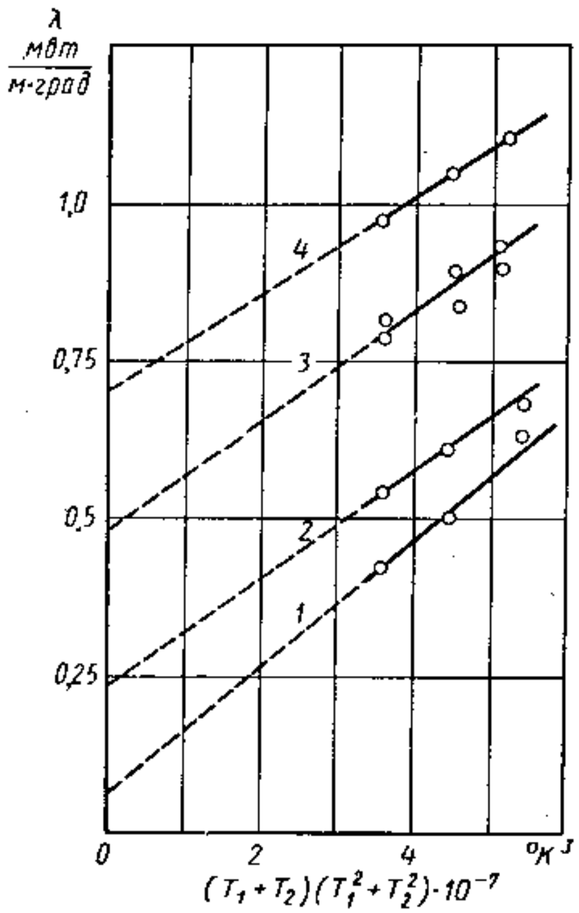


Рис. 54. Температурная зависимость коэффициента теплопроводности смеси аэрогеля с 45% масс бронзовой пудры БПИ при различной степени уплотнения смеси:

1 — плотность аэрогеля ρ = 66 *кг/м*³; *2* — ρ = 87; *3* — ρ = 105; *4* — ρ = 112

1) поглощение излучения металлическими порошками обычно невелико, зависимость коэффициента ослабления излучения от концентрации смеси удовлетворительно выражается прямой линией (см. рис. 49);

2) в применяемых на практике смесях оптимальной концентрации перенос тепла излучением относительно мал и тепло передается, в основном, теплопроводностью твердого тела. Поэтому кажущийся коэффициент теплопроводности смесей практически не зависит от толщины слоя, и для тепловых расчетов промышленных изделий можно пользоваться обычными формулами для случая переноса тепла теплопроводностью.

Приведенные данные получены для смесей металлических порошков с аэрогелем кремниевой кислоты. Аналогичные результаты дает добавление металлических порошков к другим тонкодисперсным порошкам двуокиси кремния, например к кремнегелю, аэросилу, белой саже. Следует отметить, что у смесей на основе белой сажи коэффициент теплопроводности ниже, чем у аналогичных смесей на основе аэрогеля.

При нагружении порошка (механическое сжатие) перенос тепла через контакты между частицами существенно увеличивается. Влияние обжатия на коэффициент теплопроводности смеси аэрогеля с пудрой БПИ при уплотнении ее под вакуумом видно из рис. 54. Засыпка с уплотнением при разрежении

0,053 *Мн/м*² (400 *мм рт. ст.*) (линия *4* на рис. 54) приводит к увеличению коэффициента теплопроводности примерно в 2 раза по сравнению с засыпкой путем утряски (линия *1*). При этом наклон температурных прямых, характеризующий проводимость тепла излучением, уменьшается, теплопроводность возрастает из-за резкого увеличения контактного теплообмена.

Добавление металлических порошков к перлиту дает большей частью малый эффект. По данным работы [102] коэффициент теплопроводности в лучшем случае достигает 0,7 *мвт/(м·град)*.

При повышении давления воздуха коэффициент теплопроводности смесей возрастает (рис. 55), приближаясь к теплопроводности соответствующего изоляционного порошка при давлении в несколько сот *н/м*² и превышая ее при атмосферном давлении. Для обеспечения максимальной эффективности вакуумно-порошковой изоляции с экранированием излучения давление газов в изоляционном пространстве не должно превышать 0,5—1 *н/м*².

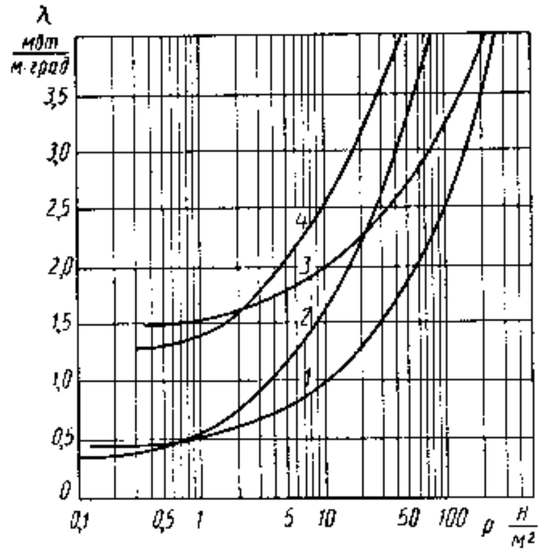


Рис. 55. Зависимость коэффициента теплопроводности смесей аэрогеля с бронзовой пудрой (граничные температуры 293 и 90° К) от давления воздуха:

1 — аэрогель А, полученный автоклавным способом, +65% бронзовой пудры БПФ; *2* — аэрогель В, полученный непрерывным способом, +50% бронзовой пудры БПФ; *3* — аэрогель В; *4* — аэрогель А

Окисление металлического порошка, облегчаемое сравнительно большой удельной поверхностью, приводит к уменьшению отражательной способности частиц и к увеличению коэффициента теплопроводности смеси. Для предохранения металлических порошков от окисления их хранят и перевозят в герметичной металлической таре.

Металлические пудры, изготовляемые путем помола в шаровых мельницах, частично защищаются от окисления стеарином, добавляемым в процессе помола в количестве 0,5% от массы для медных пудр и 3% для алюминиевых пудр. Нагрев бронзовой пудры на воздухе до 100° С вызывает сначала лишь уменьшение ее массы вследствие улетучивания пленки стеарина, и лишь через несколько часов начинается заметный рост массы. С той же целью для металлических порошков используются и другие ингибиторы. Хорошие результаты дает, в частности, обычное хозяйственное мыло. Добавка его к медному порошку

в количестве 0,05—0,1% по массе снижает рост массы при коррозионных испытаниях с 1,45 до 0,02%.

Склонность металлических порошков к окислению является причиной их огнеопасности. Смеси аэрогеля и перлита с бронзовой пудрой горят в газообразном кислороде при концентрации бронзовой пудры более 15% по массе, в жидком кислороде — при концентрации выше 45—50%. Бронзовая пудра в чистом виде и в смеси не взрывается в среде жидкого кислорода при подрыве детонатором. Смесь аэрогеля с алюминиевой пудрой горит как на воздухе, так и в кислороде, причем в последнем случае — при содержании алюминия более 10% по массе. В жидком кислороде смесь при содержании пудры свыше 20% загорается, а при содержании более 25% взрывается. Поэтому применение алюминиевой пудры в изоляции сосудов жидкого кислорода недопустимо, а в других случаях — нежелательно.

Еще одним недостатком смесей изоляционных и металлических порошков является возможность их расслоения. Испытывались смеси аэрогеля и бронзовой пудры при вибрации с частотой 50 *гц* и амплитудой до 0,5 *мм* в течение 100 *ч*. Смеси, свободно насыпанные в сосуд, давали заметное расслоение при вибрации, определявшееся как визуально, так и по химическому анализу проб из разных слоев по высоте сосуда. Уменьшение содержания бронзовой пудры в верхнем слое составляло 8—15% при номинальной концентрации 40—50%. При засыпке смесей с утряской расслоение заметно уменьшилось, разница в концентрациях в нижнем и верхнем слоях после вибрации в течение 100 *ч* была равна 2—4%. Наконец, при засыпке смесей с уплотнением под вакуумом (разрежение 100 *мм рт. ст.* и более) заметной усадки и расслоения при вибрации не наблюдалось. Разность концентраций бронзовой пудры в нижнем и верхнем слоях не превышала 1—2%. Аналогичные результаты получены и при испытаниях по транспортировке опытного сосуда. Таким образом, засыпка смеси аэрогеля и металлической пудры с уплотнением под вакуумом обеспечивает стабильность изоляции и устраняет ее расслоение при вибрациях изделия.

Учитывая, что обжатие смеси приводит к резкому возрастанию ее теплопроводности, следует производить засыпку при минимально допустимом разрежении, равном 13,3 *кн/м²* (100 *мм рт. ст.*). Увеличение теплопроводности в этом случае не превышает 20%.

Для уменьшения переноса тепла излучением через изоляционные порошки наряду с металлическими порошками могут быть использованы и неметаллические. Они в этом отношении менее эффективны, так как комплексный показатель преломления у них меньше, и индикатриса рассеяния неметаллической частицы более вытянута вперед. Однако неметаллы имеют меньшую теплопроводность, а также ряд других преимуществ: не окисляются и

не горят в среде кислорода, имеют меньшую плотность, более дешевы и менее дефицитны.

Неметалл рассеивает излучение с определенной длиной волны тем более эффективно, чем больше его показатель преломления при этой длине волны. К сожалению соответствующие опытные данные в области инфракрасного излучения весьма ограничены. При $\lambda = 10$ *мкм* показатель преломления кристаллического кварца равен 3,60, кремния — 3,42 и германия — 4,20. Дополнительные сведения дают инфракрасные спектры пропускания, полученные для многих материалов.

Зависимость для некоторых смесей изоляционных порошков с порошками неметаллов приведена (опытные данные) на рис. 56. Черная сажа имела удельную поверхность 100 *м²/г*. Другие порошки были получены путем измельчения соответствую-

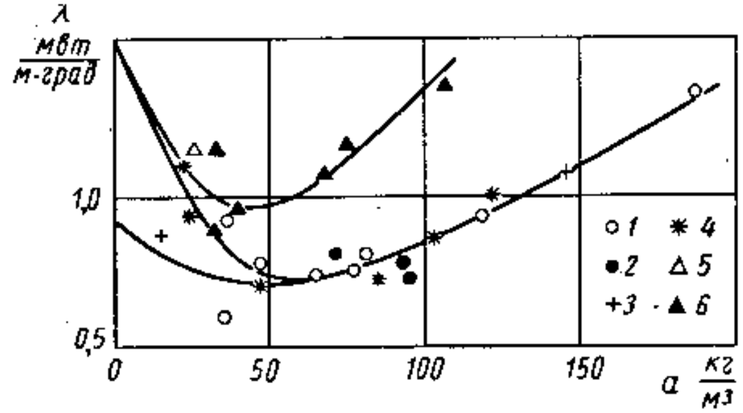


Рис. 56. Зависимость коэффициента теплопроводности смесей аэрогеля или белой сажи в вакууме с неметаллическими порошками (граничные температуры 293 и 90° К) от содержания порошка:

1 — белая сажа + кремний; *2* — аэрогель + кремний; *3* — белая сажа + черная сажа; *4* — аэрогель + черная сажа (углерод); *5* — аэрогель + стекло; *6* — аэрогель + + окись железа (Fe_2O_3)

щих материалов в шаровой мельнице до размеров частиц 3—7 *мкм*. Наилучшие, практически совпадающие результаты получены для смесей с черной сажей и кремнием. Минимальное значение достигается при содержании добавки около 60 *кг/м³* (30—40% по массе) и составляет 0,7 *мвт/(м·град)*, т. е. примерно в 2 раза меньше, чем у чистого аэрогеля и в 1,5 раза меньше, чем у перлита.

Нанесенные на график значения теплопроводности для смесей аэрогеля с сажей получены при использовании аэрогеля, изготовленного автоклавным способом. Добавление черной сажи к аэрогелю, изготовленному непрерывным способом, дало значительно меньший эффект. Смеси с этим аэрогелем, выгруженные из прибора после вакуумирования и проведения опыта, приобретали более интенсивную темную окраску.

Можно предполагать, что при вакуумировании мелкие частицы сажи проникают в сравнительно крупные поры аэрогеля этого вида. В результате смесь приобретает такой темный цвет и увеличивается перенос тепла в ней по твердому телу.

Фирма Артур Д. Литтл (США) применяет для теплоизоляции смеси изоляционных порошков с сажей [87, 88]. Смесь кэбосила (тонкодисперсная двуокись кремния) с сажей имеет оптимальную концентрацию 25% по массе сажи (марка ADL-B), коэффициент теплопроводности этой смеси 0,66—0,72 *мвт/(м·град)*. Фирме удалось создать материал ADL-E, представляющий собой смесь перлита с 40% по массе сажи и имеющий теплопроводность 0,43—0,47 *мвт/(м·град)*.

Для изоляции сосудов жидкого кислорода смеси аэрогеля и перлита с сажей применять не следует, так как они горят в среде газообразного кислорода, горят и взрываются в жидком кислороде при концентрациях сажи более 15—20% по массе.

Уменьшить перенос тепла излучением можно также путем изготовления изоляционных порошков из материалов с повышенным коэффициентом преломления, в частности из окислов металлов [131]. Разработана технология изготовления порошков, аналогичная технологии изготовления аэрогеля двуокиси кремния. Полученный по этой технологии аэрогель двуокиси титана имеет плотность 160 *кг/м³* и коэффициент теплопроводности при граничных температурах 303 и 77° К и высоком вакууме 0,63 *мвт/(м·град)*. Аэрогель, приготовленный из смеси окиси железа и двуокиси титана, имеет еще меньшую теплопроводность, равную 0,54 *мвт/(м·град)* при плотности 200 *кг/м³*.

ГЛАВА V

Высоковакуумная и вакуумно-многослойная теплоизоляция

Высоковакуумная теплоизоляция

Вакуумная теплоизоляция в чистом виде или, как ее называют иначе, высоковакуумная изоляция представляет собой в сущности вакуумированное пространство между теплой и холодной граничными стенками. Тепло в этом пространстве переносится двумя путями: теплопроводностью остаточных газов и тепловым излучением.

Перенос тепла остаточными газами в сосуде с вакуумной изоляцией может быть вычислен по уравнению (6). Наибольшая эффективность высоковакуумной изоляции достигается при давлениях ниже $1 \cdot 10^{-3}$ *н/м²* ($0{,}75 \cdot 10^{-5}$ *мм рт. ст.*). При таком давлении приток тепла не превышает 0,25 *вт/м²*, что соответствует скорости испарения из сосуда на 5 *дм³* жидкого кислорода около 0,25% в сутки. Из этого примера видно, что высокий вакуум является превосходным теплоизолятором. Тем не менее на практике потери кислорода из такого сосуда составляют обычно 8—10% в сутки. Основной причиной этого является перенос тепла излучением.

Теплообмен излучением через лучепрозрачную среду описывается уравнением (72), которое в случае сосуда для жидкого кислорода с температурами граничных стенок 293 и 90° К принимает простой вид

$$q_{изл} = 421 \varepsilon_{пр} \text{ вт/м}^2.$$

Металлические сосуды с вакуумной изоляцией изготовляют из меди, имеющей наименьшую степень черноты среди промышленных металлов. Значение $\varepsilon_{пр}$ для медных сосудов находится в пределах 0,015—0,018. Принимая верхнее значение, находим, что тепловой поток, переносимый излучением, в рассматриваемом случае $q_{изл} = 7{,}6$ *вт/м²*.

Эта величина соответствует скорости испарения жидкого кислорода из сосуда емкостью 5 $дм^3$ примерно 8% в сутки. В резервуаре емкостью 1 $м^3$, имеющем поверхность стенок около 6 $м^2$, потери от испарения за счет притока тепла излучением составили бы 1,6% в сутки. Эти потери довольно велики и во многих случаях недопустимы. Следует также иметь в виду дополнительный приток тепла по опорам, подвескам и трубам. Кроме того, стенки резервуара должны быть выполнены из меди и отполированы; в межстенном пространстве должен быть создан и сохранен высокий вакуум. Отсюда ясно, почему высоковакуумная изоляция не нашла применения в крупных резервуарах для жидкого кислорода и других сжиженных газов.

Теплопередача излучением может быть снижена двумя способами. Первый способ, состоящий в понижении температуры теплой граничной стенки, используется в сосудах для жидкого водорода и гелия. Оболочку, окружающую сосуд с водородом или гелием, охлаждают жидким азотом. Понижение температуры оболочки с 293 до 77° К приводит к уменьшению количества излучаемого тепла примерно в 200 раз. В результате удается уменьшить потери жидкого гелия от испарения до величины, более низкой по сравнению с потерями жидкого кислорода. Например, потери гелия от испарения в сосуде емкостью 10 $дм^3$ с экраном, охлаждаемым жидким азотом, составляют около 1% в сутки.

Температуру оболочки, окружающей сосуд с сжиженным газом, можно понизить также путем использования холода выходящего из сосуда пара. Отношение тепла, необходимого для нагрева пара от температуры кипения до температуры окружающей среды, к теплоте парообразования больше для газов, имеющих более низкую температуру кипения. Это отношение для кислорода равно 0,87, для азота — 1,13, для водорода — 8,2 и для гелия — 74. Следовательно, использование холода испаряющегося водорода и, особенно, гелия может дать очень большой эффект.

Эффективность охлаждения экрана от излучения паром может быть определена из условий теплового баланса. При расчетах примем следующие обозначения:

q_c — тепловой поток от наружного кожуха к экрану;
$q_э$ — тепловой поток от экрана к сосуду с жидкостью;
T_c — температура окружающей среды;
$T_э$ — температура экрана;
$T_{ж}$ — температура жидкости;
r — теплота парообразования жидкости;
c_p — изобарная теплоемкость пара.

Из теплового баланса

$$q_c = q_э + \frac{q_э}{r} c_p (T_э - T_{ж}).$$

Для упрощения расчета допустим, что значения степени черноты и площади поверхности кожуха, экрана и сосуда одинаковы.

В этом случае:

$$q_c = K (T_c^4 - T_э^4);$$
$$q_э = K (T_э^4 - T_{ж}^4).$$

Мы имеем систему из трех уравнений с тремя неизвестными, которая легко может быть решена. При преобразовании получим

$$\frac{c_p}{r} (T_э - T_{ж}) + 1 = \frac{T_c^4 - T_э^4}{T_э^4 - T_{ж}^4}. \qquad (133)$$

Из этого уравнения находим, что температура экрана при $T_c = 293°$ К и охлаждении его парами водорода будет равна 180° К, а парами гелия — 122° К. Приток тепла излучением к сосуду с жидкостью уменьшается в первом случае в 7,0 раз и во втором случае в 33,3 раза.

Если пространство между экраном и граничными стенками заполнено изоляционным материалом, то существует некоторое оптимальное расстояние экрана от стенок. Оно может быть определено, если известна температурная зависимость коэффициента теплопроводности изоляции. Скотт [50] выполнил соответствующие расчеты для перлита, приняв приблизительно линейную зависимость. Согласно опытным данным кажущийся коэффициент теплопроводности многих изоляционных материалов в вакууме, в том числе аэрогеля и перлита (см. рис. 38 и 39), приблизительно равен $k(T_1 + T_2)(T_1^2 + T_2^2)$, т. е. тепловой поток пропорционален $(T_1^4 - T_2^4)$. Следовательно, для сферического сосуда с вакуумно-порошковой изоляцией:

$$q_c = \frac{4\pi k r_э r_c (T_c^4 - T_э^4)}{r_c - r_э};$$
$$q_э = \frac{4\pi k r_{ж} r_э (T_э^4 - T_{ж}^4)}{r_э - r_{ж}};$$

где r_c, $r_э$ и $r_{ж}$ — радиусы наружного сосуда, экрана и внутреннего сосуда соответственно.

Предположим, что $r_c = a r_{ж}$ и $r_э = b r_{ж}$. Разделив первое уравнение на второе, находим с использованием уравнения теплового баланса

$$1 + \frac{c_p}{r} (T_э - T_{ж}) = \frac{a(b-1)(T_c^4 - T_э^4)}{(a-b)(T_э^4 - T_{ж}^4)}. \qquad (134)$$

Задавшись величиной a, можно вычислить $T_э$ при различных значениях b.

Эффективность экрана характеризуется отношением притоков тепла к жидкости при наличии экрана $q_э$ и без него q_0

$$\frac{q_э}{q_0} = \frac{b(a-1)\left(T_э^4 - T_{эк}^4\right)}{a(b-1)\left(T_c^4 - T_{эк}^4\right)}. \qquad (135)$$

На рис. 57 представлены зависимости, полученные автором в результате расчетов для сосуда с жидким водородом при $a = 1{,}2$ (сплошные линии). Здесь же нанесены расчетные кривые Скотта (штриховые линии). При использовании уточненной тем-

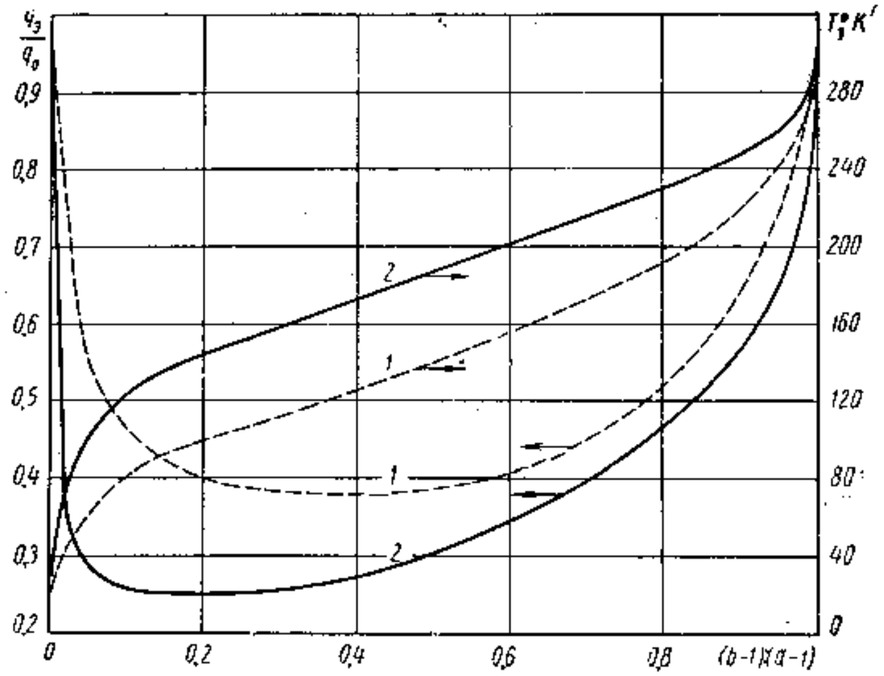


Рис. 57. Зависимость температуры и эффективности экрана, охлаждаемого парами, от $\frac{b-1}{a-1}$:

1 — по работе [50]; *2* — расчеты автора

пературной зависимости коэффициента теплопроводности изоляции вычисленные значения температуры экрана выше, а притока тепла ниже. Оптимальное положение экрана смещается к холодной стенке и находится от нее на расстоянии приблизительно 0,2 от толщины слоя изоляции. Температура экрана при оптимальном расположении выше температуры жидкого азота, поэтому эффективность экрана при охлаждении его выходящим паром несколько меньше, чем при охлаждении жидким азотом. При высоковакуумной изоляции температура экрана получается более высокой чем при вакуумно-порошковой изоляции, эффективность экрана также выше. Еще большего снижения притока тепла излучением к сжиженному газу можно достигнуть, оставляя между внутренним сосудом и экраном высоковакуумную изоля-

цию и помещая между экраном и кожухом вакуумно-порошковую или вакуумно-многослойную изоляцию. Все конструктивные элементы, пересекающие изоляционное пространство, должны иметь хороший тепловой контакт с экраном. Тепловой расчет несколько усложняется в результате добавления в расчетные уравнения членов, учитывающих тепловой поток по конструктивным элементам. Пример такого расчета приведен в работе [109]. Экран охлаждают холодным паром, пропуская его через змеевик, припаянный к экрану. В небольших сосудах экран может быть припаян к горловине, через которую выходит пар. Установка двух таких экранов [61] позволила снизить потери жидкого гелия до такой же величины, как и при экране, охлаждаемом жидким азотом.

Второй способ уменьшения теплопередачи излучением заключается в установке отражающих излучение экранов. В соответствии с формулой (80) установка N экранов позволяет уменьшить перенос тепла излучением в $N + 1$ раз. На практике установка нескольких экранов в вакуумном пространстве очень сложна. Нужно обеспечить с помощью специальных проставок отсутствие непосредственных контактов между экранами, поэтому расстояние между двумя экранами не должно быть менее 5 *мм*. Было создано несколько конструкций сосудов для сжиженных газов с использованием экранов, но они не получили распространения ввиду сложности и дороговизны. Способ уменьшения теплового потока путем установки ряда экранов получил принципиально новое решение в результате создания вакуумно-многослойной изоляции, в которой экраны выполняются из металлической фольги и разделяются теплоизолирующими прокладками из листовых волокнистых материалов.

Перенос тепла в многослойной изоляции

Тепло через многослойную изоляцию передается излучением, теплопроводностью изолирующих прокладок и остаточных газов. Все же здесь, как и в случае вакуумно-порошковой изоляции, пользуются из соображений практического удобства формулами переноса тепла теплопроводностью и характеризуют эффективность изоляции термином «кажущийся коэффициент теплопроводности», который будем называть для краткости просто «коэффициент теплопроводности».

Если пренебречь ослаблением излучения теплоизолирующими прокладками, то перенос тепла излучением в многослойной изоляции может быть определен уравнением

$$Q = \eta E_0 \sigma_s \cdot 10^8 H_{1,2} \left[\left(\frac{T_2}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_1}{100}\right)^4\right], \qquad (136)$$

обозначения в котором соответствуют обозначениям уравнений (72) и (75).

Коэффициент эффективности экранирования η определяется в общем случае уравнением (75).

В простейшем случае бесконечного плоского слоя с числом экранов $N \gg 1$ и абсолютно черными граничными стенками

$$\eta = \frac{\varepsilon_э}{N(2-\varepsilon_э)},$$

где $\varepsilon_э$ — степень черноты экрана.

Если плотность укладки экранов постоянна $\left(\frac{N}{\delta} = n = \text{const}\right.$, где δ — толщина изоляции), то можно пользоваться для расчетов величиной проводимости тепла излучением

$$\lambda_{изл} = \frac{Q\delta}{F(T_2-T_1)} = \frac{\varepsilon_э \sigma_s}{n(2-\varepsilon_э)}(T_1+T_2)(T_1^2+T_2^2). \qquad (137)$$

При температурах граничных стенок 293 и 90° К и $\varepsilon_э \ll 1$

$$\lambda_{изл} = 10{,}7\,\frac{\varepsilon_э}{n}\ \textit{мвт/(м·град)}, \qquad (138)$$

где n — выражено в $1/см$.

Степень черноты алюминиевой фольги обычно равна 0,03—0,06, а плотность укладки большей частью находится в пределах от 5 до 50 $1/см$. Следовательно, проводимость тепла излучением через многослойную теплоизоляцию составляет 0,01—0,1 *мвт/(м·град)*.

В действительности многослойная изоляция помещается между двумя замкнутыми оболочками. Поэтому точные расчеты в общем случае следует вести по уравнению (76), а для цилиндрического или сферического слоев — по полученным нами формулам (77) и (78).

Определим в качестве примера тепловой поток через изоляцию трубопровода для жидкого кислорода, имеющего диаметр $d_1 = 40$ *мм*. Наружный диаметр изоляции $d_2 = 60$ *мм*, плотность намотки изоляции 10 $1/см$ (общее число экранов $n = 9$), степени черноты граничных стенок и экранов $\varepsilon_0 = 1$ и $\varepsilon_э = 0{,}05$, температура теплой стенки $T_2 = 293°$ К.

$$\sum_{m=1}^{n} \frac{1}{r_1 + \frac{m}{n+1}(r_2-r_1)} = \sum_{m=1}^{n} \frac{1}{2+m} = 3{,}636;$$

$$\eta = \left(1 + \frac{E_0}{E_э} r_1 \sum_{m=1}^{n} \frac{1}{r_1 + \frac{m}{n+1}(r_2-r_1)}\right)^{-1} =$$

$$= \frac{1}{1 + \frac{1}{0{,}0256} \cdot 2 \cdot 3{,}636} = 0{,}00351.$$

Отсюда находим тепловой поток на 1 *м* погонный трубопровода

$$q = \eta E_0 \sigma_s \cdot 10^8 \pi d_1 \left[\left(\frac{T_2}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_1}{100}\right)^4\right] = 0{,}183\ \textit{вт/м}.$$

Определим величину теплового потока по формуле переноса тепла теплопроводностью через цилиндрический слой

$$q = \frac{2\pi\lambda_{изл}(T_2-T_1)}{\ln\frac{d_2}{d_1}}.$$

С учетом соотношения (137) получаем

$$q = \frac{2\pi}{\ln\frac{d_2}{d_1}} \frac{E_э}{n} \sigma_s \cdot 10^8 \left[\left(\frac{T_2}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_1}{100}\right)^4\right] = 0{,}165\ \textit{вт/м}.$$

Расхождение между значениями, вычисленными по точной и приближенной формуле, составляет 11%. В приведенном примере отношение $d_2/d_1 = 1{,}5$, тогда как на практике оно, как правило, меньше. В результате расхождение также будет меньше.

На основании изложенного можно заключить, что тепловой поток через многослойную теплоизоляцию можно с достаточной для технических расчетов точностью вычислять по формулам переноса тепла теплопроводностью.

Возможность применения уравнений переноса тепла теплопроводностью была экспериментально проверена [22] путем определения величины кажущегося коэффициента теплопроводности на плоских и цилиндрических слоях изоляции различной толщины. Согласно результатам измерения (табл. 19) вычисленный коэффициент теплопроводности практически не зависит от толщины как в плоском, так и в цилиндрическом слое.

Перенос тепла излучением дополнительно уменьшается вследствие рассеяния и поглощения лучистой энергии теплоизолирующими прокладками. Это уменьшение сравнительно невелико ввиду малой плотности изоляции. Количество стекловолокна в смонтированной изоляции обычно соответствует плотности 30—100 *кг/м³*. Для оценки влияния прокладок воспользуемся опытными данными для стеклянной ваты с диаметром волокна 1,15 *мкм*. Принимая плотность равной 60 *кг/м³* по формуле (129) находим $\gamma_{изл}^{прокл} = 0{,}75$ *мвт/(м·град)*.

Полная проводимость тепла излучением может быть найдена в первом приближении с помощью формулы

$$\lambda = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_{изл}^{экр}} + \frac{1}{\lambda_{изл}^{прокл}}}.$$

Таблица 19

Коэффициент теплопроводности многослойной изоляции при различной толщине изоляции (температура граничных стенок 293 и 90° К, давление ниже 10^{-2} н/м²)

Изоляция	Толщина слоя в *мм*	Коэффициент теплопроводности в *мвт/(м·град)*
Алюминиевая фольга+стеклобумага СБР-М толщиной 0,05 *мм*:		
с плотностью укладки 25 экранов на 1 *см* (плоский слой)	4	0,027
то же	10	0,037
»	18	0,027
»	18	0,030
с плотностью укладки 43 экрана на 1 *см* (цилиндрический слой)	10	0,089
то же	20	0,090
»	40	0,090
Алюминиевая фольга+стеклохолст ЭВТИ толщиной 0,2 *мм*:		
с плотностью укладки 15 экранов на 1 *см* (плоский слой)	12	0,086
то же	22	0,081
»	32	0,102
»	42	0,102
с плотностью укладки 15 экранов на 1 *см* (цилиндрический слой)	10	0,105
то же	28,5	0,105
»	50	0,104

Подсчет показывает, что теплоизолирующие прокладки уменьшают перенос тепла излучением не более чем на 10%.

Количество тепла, переносимое излучением, можно определить опытным путем, исследовав зависимость теплового потока (или кажущегося коэффициента теплопроводности) от температуры изоляции. Исследование может быть проведено несколькими методами. При использовании стационарного метода определяют тепловой поток при различной температуре теплой и холодной граничных стенок или находят распределение температур по толщине изоляции, измеряя температуру отдельных экранов. При использовании последнего метода вычисляют значения коэффициента теплопроводности на отдельных участках слоя изоляции, имеющих различные граничные температуры, находя таким образом зависимость коэффициента теплопроводности от температуры.

Применяя нестационарные методы, в частности метод монотонного нагрева, можно также получить температурную зависимость коэффициента теплопроводности.

Некоторые результаты измерений [22], выполненных первым вариантом стационарного метода, приведены в виде зависимостей на рис. 58. Опытные точки ложатся на прямые линии в координатах $\lambda - (T_1 + T_2)(T_1^2 + T_2^2)$.

Наклон прямых уменьшается по мере увеличения числа экранов в 1 *см* толщины изоляции. По наклону можно вычислить с помощью уравнения (137) степень черноты экранов. Вычисленные значения степени черноты находятся в пределах 0,06—0,09. Такие сравнительно высокие значения могут быть объяснены следующим. Во-первых, использованная в опытах фольга имела лишь 9-ый класс чистоты поверхности. Во-вторых, при выводе уравнения (137) сделаны допущения о постоянстве коэффициента теплопроводности теплоизолирующих прокладок и степени черноты экранов. В действительности эти величины возрастают с увеличением температуры, что приводит к увеличению наклона экспериментальных прямых.

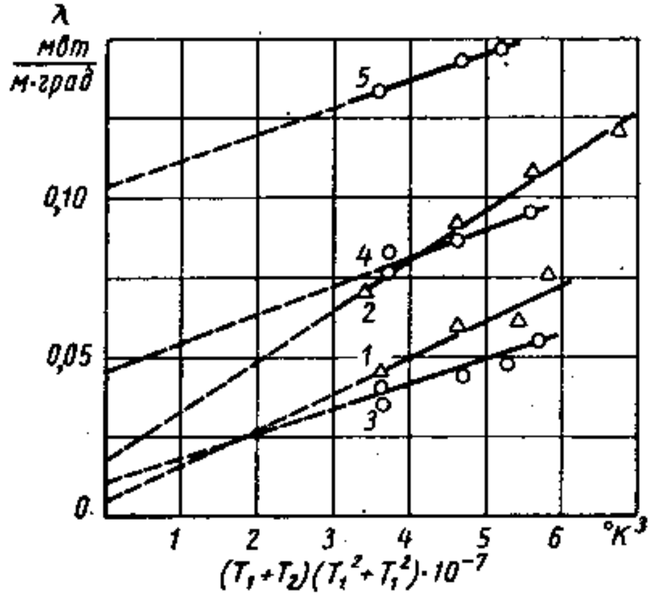


Рис. 58. Температурная зависимость коэффициента теплопроводности вакуумно-многослойной изоляции с экранами из алюминиевой фольги:

1, 2 — прокладки из ЭВТИ ($n = 15$); *3, 4* — прокладки из СБР ($n = 25$); *5* — прокладки из СБР ($n = 45$)

На рис. 59 нанесены точки, соответствующие приведенным в работе [80] и рассчитанные по данным работы [75]. Они также хорошо ложатся на прямые линии, за исключением одного значения при температуре граничных стенок 383 и 243° К. По-видимому, в этой области температур степень черноты алюминиевой фольги заметно возрастает. Это подтверждается результатами испытаний многослойной изоляции при температурах до 1200° К [105]. Вычисленное по уравнению (137) значение степени черноты 0,21 для алюминированной полиэфирной пленки хорошо согласуется с непосредственным измерением степени черноты (см. табл. 3).

Удовлетворительное согласование опытных данных по теплопроводности многослойной изоляции с уравнением (137) позволяет оценивать эффективность изоляции при различных температурах граничных стенок. В частности, можно заключить, что температура холодной стенки оказывает малое влияние на коэффициент теплопроводности изоляции. Тепловой поток через многослойную изоляцию должен оставаться практически постоянным при уменьшении температуры холодной стенки с 90° К (жидкий кислород) до 4° К (жидкий гелий). При возрастании температуры теплой стенки с 293 до 373° К теплопроводность увеличивается почти в 2 раза.

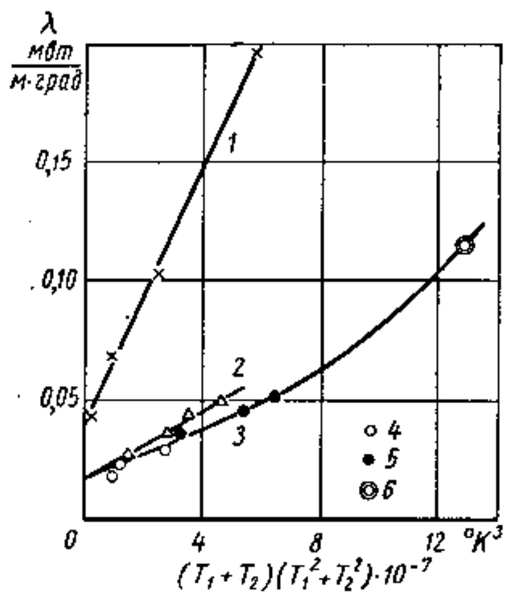


Рис. 59. Температурная зависимость коэффициента теплопроводности вакуумно-многослойной изоляции:

1 — рифленая полиэфирная пленка [75]; *2, 3* — алюминиевая фольга + стеклосетка [80] и [75]; *4, 5, 6* — точки на кривой *3* при температуре холодной стенки 20,4; 77 и 243° К соответственно

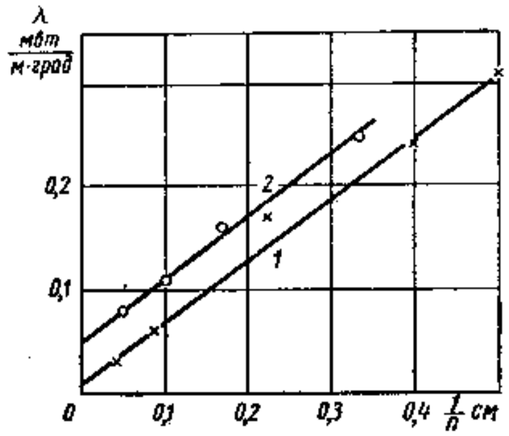


Рис. 60. Зависимость коэффициента теплопроводности вакуумно-многослойной изоляции (граничные температуры 293 и 90° К) от расстояния между экранами из алюминиевой фольги:

1 — прокладки из стеклобумаги СБР; *2* — прокладки из стеклохолста ЭВТИ

Проводимость тепла излучением можно также определить, измеряя коэффициент теплопроводности пакета изоляции при различном числе экранов в пакете, т. е. различном расстоянии между экранами, удаляя из образца часть экранов. Результаты таких опытов иллюстрируются рис. 60. Наклон прямых, характеризующий проводимость излучением, приблизительно одинаков для обеих текстур изоляции. Вычисленное по наклону прямых значение степени черноты экранов из алюминиевой фольги равно 0,056.

Из рассмотрения рис. 58—60 следует, что тепло через вакуумно-многослойную изоляцию передается, в основном, путем излучения, тогда как перенос тепла теплопроводностью сравнительно мал. Более полные сведения о переносе тепла изолирующими прокладками дает изучение зависимости коэффициента

теплопроводности изоляции от плотности ее укладки и от механического давления на изоляцию.

При увеличении числа слоев на единицу толщины изоляции перенос тепла излучением уменьшается, а перенос тепла теплопроводностью возрастает. Следовательно, кажущийся коэффициент теплопроводности должен достигать минимального значения при некоторой оптимальной величине плотности укладки. Как видно из рис. 61, оптимальная плотность для ряда текстур

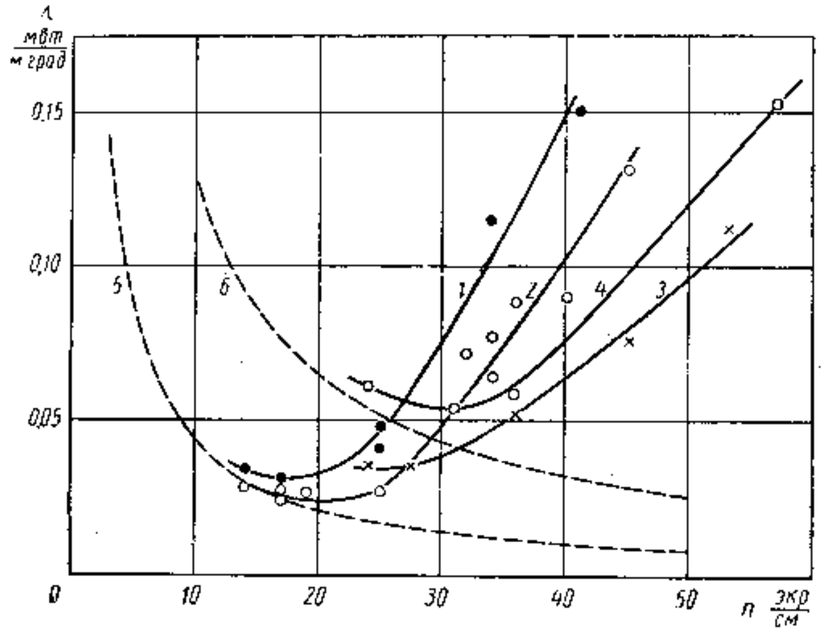


Рис. 61. Зависимость коэффициента теплопроводности вакуумно-многослойной изоляции (граничные температуры 293 и 90° К) от плотности укладки слоев:

1 — алюминиевая фольга + СБР-0,1; *2* — алюминиевая фольга + СБР-0,05; *3* — изоляция S1-62 [112, 84]; *4* — алюминированная лавсановая пленка + ЭВТИ-0,08; *5, 6* — по уравнению (138) при $\varepsilon_э = 0{,}04$ и 0,12

находится в пределах $n = 15 \div 30$ *1/см*. Пунктирные кривые характеризуют проводимость излучением в текстурах с экранами из алюминиевой фольги и из алюминированной пленки. Благодаря малой степени черноты фольги коэффициент теплопроводности текстур многослойной изоляции с экранами из фольги достигает меньших значений при меньшем числе слоев по сравнению с текстурами, в которых экраны выполнены из металлизированной пленки.

Плотность стопки листов стекловолокнистой бумаги довольно быстро возрастает с увеличением механического давления (рис. 62). В широкой области давлений плотность увеличивается приблизительно пропорционально $p^{0,2}$ при граничных температурах 293—300 и 77—90° К. Если весь материал имеет температуру 293° К, плотность возрастает быстрее (линия *3* на рис. 62). Таким

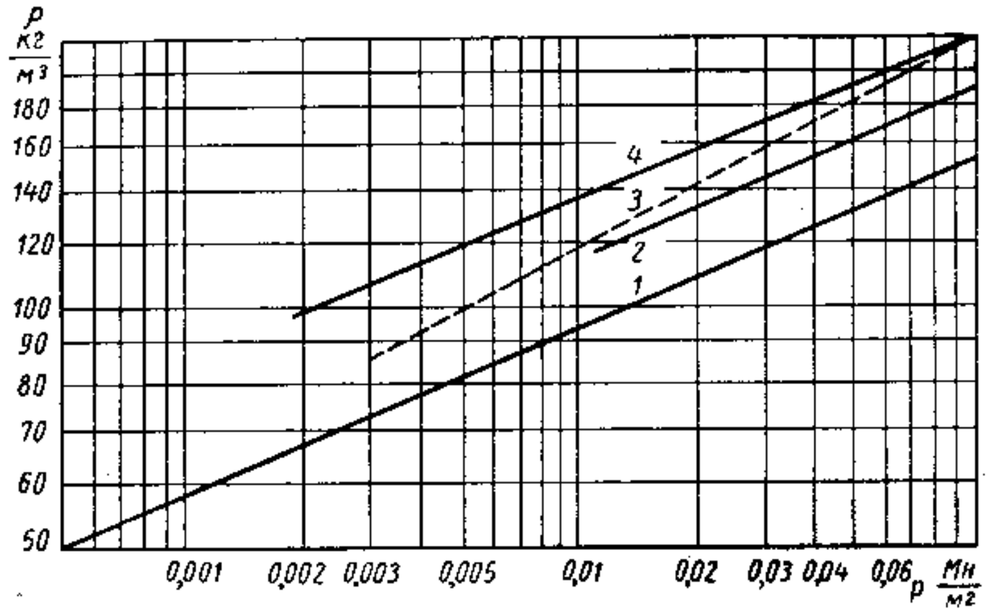


Рис. 62. Зависимость плотности многослойной изоляции от механической нагрузки:

1 — прокладки из ЭВТИ (T = 190° К); *2* — прокладки из СБР (T = 190° К); *3* — прокладки из СБР (T = 293° К); *4* — изоляция SI-62 (T = 190° К)

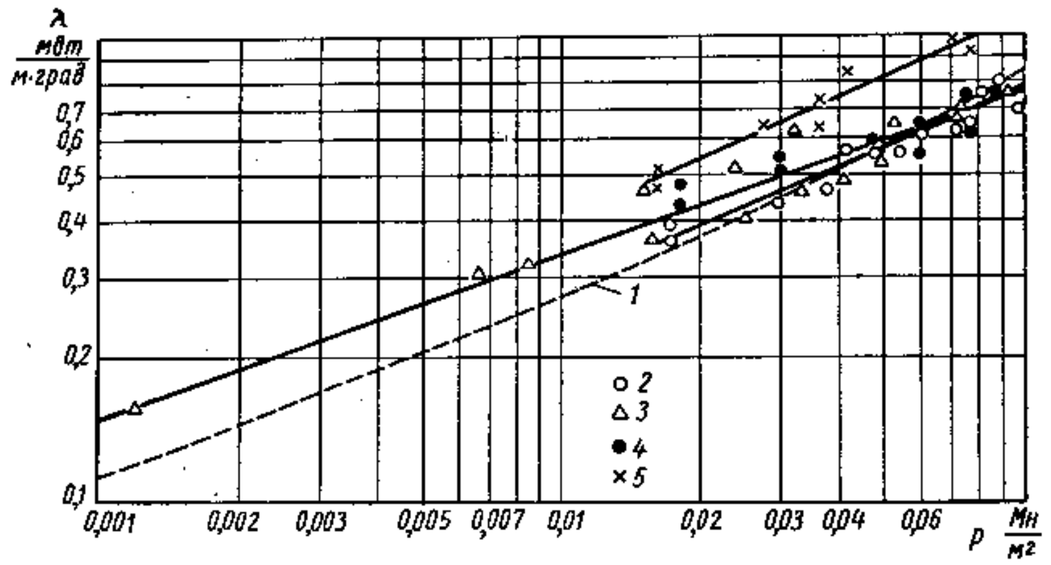


Рис. 63. Зависимость коэффициента теплопроводности вакуумно-многослойной изоляции с экранами из алюминиевой фольги от механического давления на нее (граничные температуры 293 и 90° К):

1 — изоляция SI-62 [112]; *2* — прокладки из СБР-0,1; *3* — прокладки из ЭВТИ-02; *4* — прокладки из ВВ-03; *5* — перфорированный стекловолокнистый мат [75]

образом, теплопроводность многослойной изоляции под нагрузкой должна возрастать как за счет увеличения размеров контактных пятен, так и в результате увеличения количества волокон в единице объема.

Точки на рис. 63—65 нанесены по полученным во ВНИИКИМАШе опытным значениям теплопроводности некото-

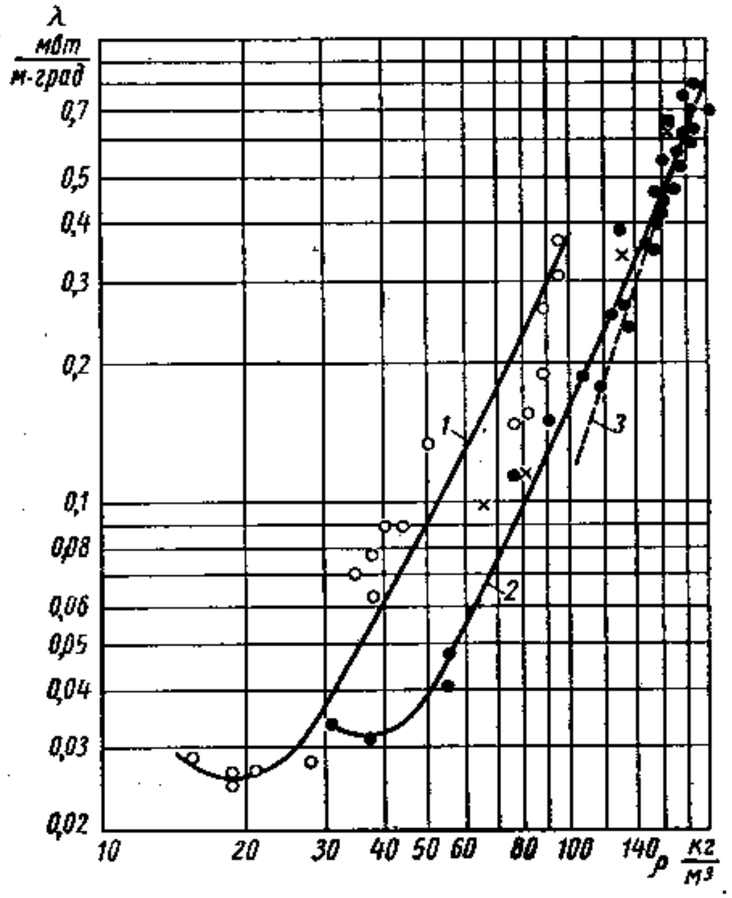


Рис. 64. Зависимость коэффициента теплопроводности вакуумно-многослойной изоляции с экранами из алюминиевой фольги и прокладками из стеклобумаги СБР от средней плотности материала изолирующих прокладок:

1 — толщина бумаги 0,05 *мм*; *2* — толщина бумаги 0,1 *мм* (черные кружки) и 0,3 *мм* (крестики); *3* — по уравнению (58)

рых текстур многослойной изоляции при их обжатии и опубликованным данным [75, 84, 112] для текстур многослойной изоляции, разработанных американскими фирмами Линде и Артур Д. Литтл.

Зависимость теплопроводности волокнистого материала с волокнами, уложенными перпендикулярно направлению теплового потока, описывается уравнением (58). Текстура многослойной изоляции заметно отличается от модели, положенной в основу

при выводе этого уравнения. Листы волокнистого материала, служащие теплоизолирующими прокладками в многослойной изоляции, предварительно обжимаются и в ряде случаев проклеиваются при изготовлении. В результате плотность волокнистого материала в листах обычно соответствует плотности при обжатии под давлением около 0,1 *Мн/м²* (1 *кГ/см²*).

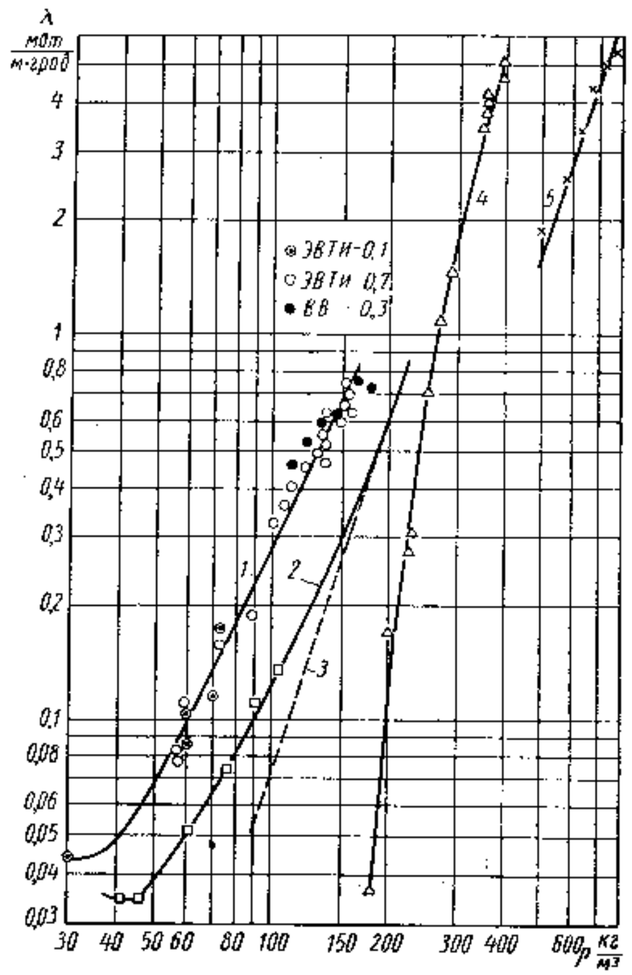


Рис. 65. Зависимость коэффициента теплопроводности вакуумно-многослойной изоляции с экранами из алюминиевой фольги от средней плотности материала изолирующих прокладок:

1 — прокладки из ЭВТИ-0,1; ЭВТИ-0,2 и ВВ-0,3; *2* — изоляция SI-62 [112,84]; *3* — то же, по уравнению (58); *4* — прокладки из ЭСТБ-40; *5* — прокладки из ССА (в 2 слоя)

При небольших нагрузках средняя плотность волокнистого материала, отнесенная к полному объему многослойной изоляции, сравнительно мала, и тепловое сопротивление контактов между слоями значительно больше теплового сопротивления самих слоев. С увеличением нагрузки слои сближаются, многослойная изоляция становится более однородной по объему и ее структура все лучше удовлетворяет модели, положенной в основу при выводе уравнения (58). Следовательно, это уравнение должно хорошо описывать зависимость теплопроводности многослойной изоляции от нагрузки на нее при повышенных давлениях.

Как видно из рис. 64 и 65, экспериментальные значения теплопроводности изоляции с прокладками из стекловолокнистых материалов хорошо согласуются с вычисленными по уравнению (58) при плотности более 150 *кг/м³*, т. е. при давлении выше 0,01 *Мн/м²* (0,1 *кГ/см²*).

Такое согласование имеет место не во всех случаях. Экспериментальные значения теплопроводности изоляции с прокладками из стеклохолста, изготовленного из волокон сравнительно

большого диаметра, выше вычисленных по уравнению (58). Возможная причина расхождений — зависимость теплопроводности от диаметра волокон, не учитываемая указанным уравнением. Расхождение экспериментальных и теоретических значений имеет место и для изоляции с прокладками из стеклобумаги СБР толщиной 0,05 *мм*. В этом случае причиной отклонений является, по-видимому, малая толщина прокладок, вследствие чего становится более существенной доля переноса тепла теплопроводностью, вносимая экранами толщиной 0,01 *мм*. При обжатии изоляции с тонкой стеклобумагой, имеющей разреженную структуру, более вероятными становятся непосредственные контакты между экранами в отдельных точках.

Структура тканей в еще большей степени отличается от модели, представленной на рис. 9. Элементарные волокна в тканях соединены в нити, которые переплетаются между собой, переходя при этом периодически с одной стороны полотна на другую и обратно. Оказалось, однако, что и в этом случае уравнение (58) может давать не только качественное, но и количественное согласие с экспериментальными данными. В частности, опытные значения теплопроводности изоляции с прокладками из стеклосетки ССА хорошо ложатся на линию *5*, построенную по уравнению (58) (рис. 65).

Опытные данные по теплопроводности многослойной изоляции в зависимости от механического давления и от плотности могут быть представлены в широком диапазоне прямыми линиями в логарифмических координатах. Это позволяет легко получить эмпирические уравнения для описания указанных зависимостей.

Для зависимости теплопроводности, точнее, проводимости по твердому телу, от давления находим

$$\lambda_т = k_p p^{0,45}, \tag{139}$$

где k_p — постоянная, зависящая от текстуры изоляции.

Для ряда текстур значения постоянной k_p приблизительно одинаковы и равны 2,3, если p выражено в *Мн/м²* и λ в *мвт/(м × × град)*.

Зависимость теплопроводности от плотности ρ волокнистого материала в изоляции имеет вид

$$\lambda_т = k_\rho \rho^{2,2}. \tag{140}$$

Постоянная k_ρ зависит от текстуры изоляции и для исследованных текстур находится в пределах $(0,5—1,2) \cdot 10^{-5}$.

Уравнения (139) и (140) могут быть объединены в общее уравнение, выражающее зависимость теплопроводности от механического давления и плотности. В работе [132] предложено сле-

дующее эмпирическое уравнение для волокнистых стеклоподобных материалов:

$$\lambda_т = 0{,}12 \cdot 10^{-2} \lambda_м [D(1-m)p]^{1/2} \; мвт/(м \cdot град),$$

где $\lambda_м$ — теплопроводность материала волокон в *мвт/(м · град)*;
D — диаметр волокон в *мкм*;
p — давление в *Мн/м²*;
m — пористость.

Анализ опытных данных, представленных на рис. 62—65, приводит к уравнению аналогичного вида с другими значениями постоянной и показателя степени

$$\lambda_т = 0{,}22 \cdot 10^{-3} \lambda_м [D(1-m)p]^{0{,}37}. \qquad (141)$$

В частности, для стекловолокнистых материалов

$$\lambda_т = 0.11 (D\rho p)^{0{,}37}.$$

Для снижения до минимума переноса тепла по твердому телу следует применять прокладочные материалы, изготовленные из волокна возможно меньшего диаметра с малой плотностью. Материалы должны быть возможно тоньше, что позволяет при одинаковой проводимости по твердому телу уменьшить проводимость тепла излучением и в результате снизить кажущийся коэффициент теплопроводности изоляции. Наконец, нельзя допускать какого-либо обжатия при монтаже изоляции.

Минимальная величина теплопроводности достигается при оптимальном значении плотности, которое соответствует числу экранов 10—40 на *см* и тем меньше, чем ниже степень черноты экранов. Оптимальная плотность достигается, как правило, при свободной укладке слоев. При уплотнении изоляции даже весьма малыми нагрузками коэффициент теплопроводности начинает возрастать.

Перенос тепла проводимостью остаточных газов в случае многослойной изоляции играет весьма существенную роль даже при довольно высоком вакууме. Молекулы газа переносят тепловую энергию от экрана через зазор к прокладке, затем через поры в прокладочном материале и снова через зазор к следующему экрану. Уравнение переноса тепла проводимостью газа между двумя экранами может быть записано в следующем виде:

$$\lambda_г = \frac{\delta_п + 2\delta_з}{\frac{\delta_п}{\lambda_п} + \frac{2\delta_з}{\lambda_з}},$$

где индексы $п$ и $з$ обозначают прокладку и зазор.

Проводимость газа в условиях вакуума описывается уравнением (13).

Подставляя вместо $\lambda_п$ и $\lambda_з$ соответствующие выражения, получаем

$$\lambda_г = \frac{\lambda_г^0 (\delta_п + 2\delta_з)}{(\delta_п + 2\delta_з) + \frac{2\beta L_1}{p}\left(\frac{\delta_п}{L_п} + \frac{2\delta_з}{L_з}\right)}, \qquad (142)$$

где $\lambda_г^0$ — коэффициент теплопроводности газа;
L — средняя длина свободного пробега молекул газа между столкновениями с поверхностью твердого тела;
L_1 — средняя длина свободного пробега молекул газа между столкновениями друг с другом при давлении 1 *н/м²*.

Длина свободного пробега в прокладочном материале $L_п$ определяется уравнением (128).

Для большинства прокладочных материалов доля объема, занимаемого волокнами $(1-m) \leqslant 0{,}1$ и диаметр волокон $D \geqslant 5$ *мкм*, т. е. $L_п \geqslant 40$ *мкм*. Толщина прокладок обычно близка к этой величине и увеличивается при возрастании D, а следовательно и $L_п$. Таким образом, можно принять приближенно, что молекулы газа свободно пролетают через прокладку, не сталкиваясь с отдельными волокнами. В этом случае

$$L_п = L_з = \delta_п + 2\delta_з.$$

Подставляя в уравнение (142) это соотношение, находим

$$\lambda_г = \frac{\lambda_г^0}{1 + \frac{2\beta L_1}{p(\delta_п + 2\delta_з)}} = \frac{\lambda_г^0}{1 + \frac{2\beta L_1 n}{p}}. \qquad (143)$$

Если остаточным газом является воздух и температуры граничных стенок 293 и 90° К, то уравнение для определения коэффициента теплопроводности многослойной изоляции может быть записано в виде

$$\lambda = \lambda_0 + \lambda_г = \lambda_0 + \frac{17{,}5}{1 + 1{,}70 \frac{2-\alpha}{\alpha} \frac{n}{p}} \; мвт/(м \cdot град), \qquad (144)$$

где n в *1/см* и p в *н/м²*.

На рис. 66 и 67 приведены [22] зависимости коэффициента теплопроводности от давления воздуха (опытные данные) ряда образцов многослойной изоляции. Кривые построены по уравнению (144). Константы этого уравнения определены из опытных данных. Как видно из рис. 68, величина $2\beta L_1 = 0{,}017 \frac{2-\alpha}{\alpha}$ *н/м* изменяется в пределах 0,0171—0,0356, что соответствует коэффициенту аккомодации $\alpha = 0{,}65 \div 1{,}0$. Среднее значение $2\beta L_1 = 0{,}0268$, откуда $\alpha_{ср} = 0{,}78$.

Значение λ_e^0 для текстур изоляции с прокладками из стекловолокнистых бумаг равно коэффициенту теплопроводности воздуха при атмосферном давлении 17,5 *мвт/(м·град)*, как это и следует из изложенной приближенной теории. Для текстур изоляции с прокладками из стеклоткани, имеющей сравнительно высокую плотность, значение этой постоянной больше и для испытанных образцов составляет 19—22 *мвт/(м·град)*.

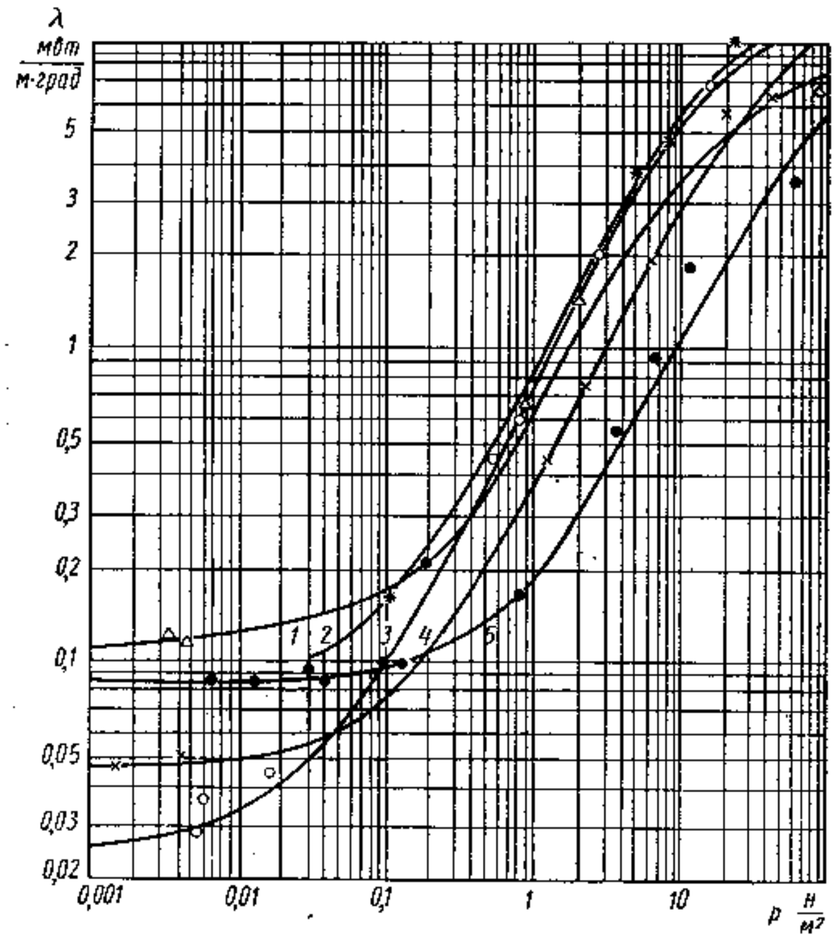


Рис. 66. Зависимость коэффициента теплопроводности многослойной изоляции с экранами из алюминиевой фольги и прокладками из стеклобумаг от давления воздуха (граничные температуры 293 и 90° К):

1 — бумага из волокна диаметром 1—2 *мкм* (n = 6); *2* — ЭВТИ-0,15; (*n* = 10); *3* — СБР-0,05 (*n* = 14); *4* — ЭВТИ-0,15 (*n* = 15); *5* — СБР-0,05 (*n* = 50).

На рис. 69 приведены зависимости по результатам измерений для некоторых текстур, опубликованным в литературе [75, 84, 91]. Экспериментальные значения для материала SI-62, имеющего плотность около 30 1/*см*, хорошо согласуются с вычисленными по уравнению (144). Данные для материала NRC-2 также могут быть описаны этим уравнением с постоянной $2\beta L_1 n = 30$. Принимая $\alpha = 1$, находим $n = 18$ 1/*см*. Для материала SI-12

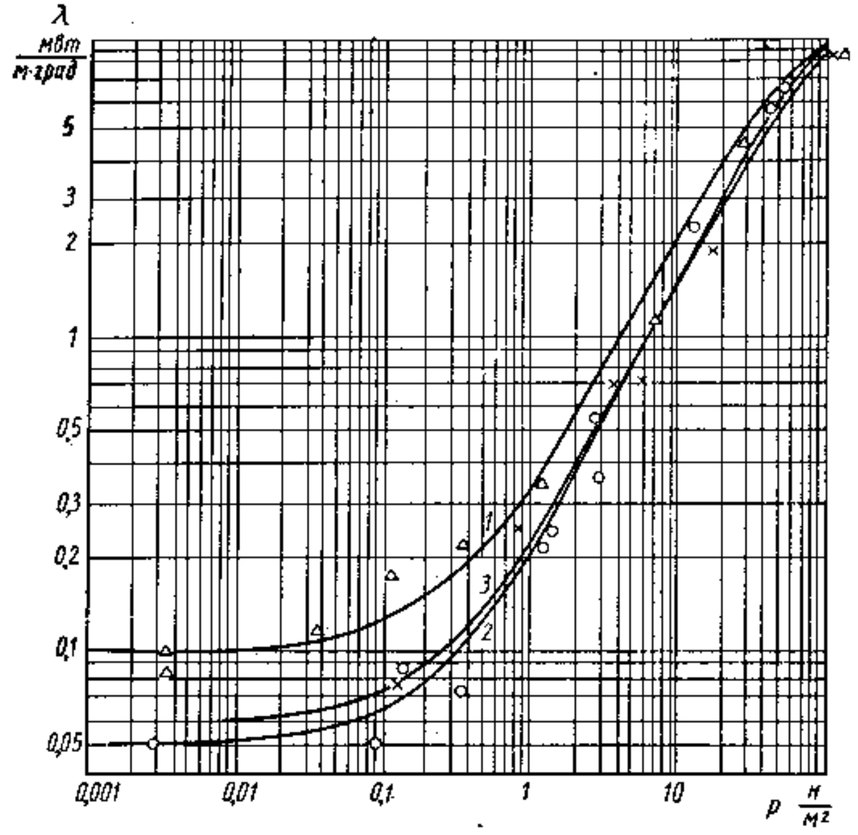


Рис. 67. Зависимость коэффициента теплопроводности многослойной изоляции с экранами из алюминисвой фольги и прокладками из стеклотканей от давления воздуха (граничные температуры 293 и 90° К):

1 — ЭСТБ-40 (*n* = 26); *2* — ССА (*n* = 40); *3* — ССА (*n* = 51)

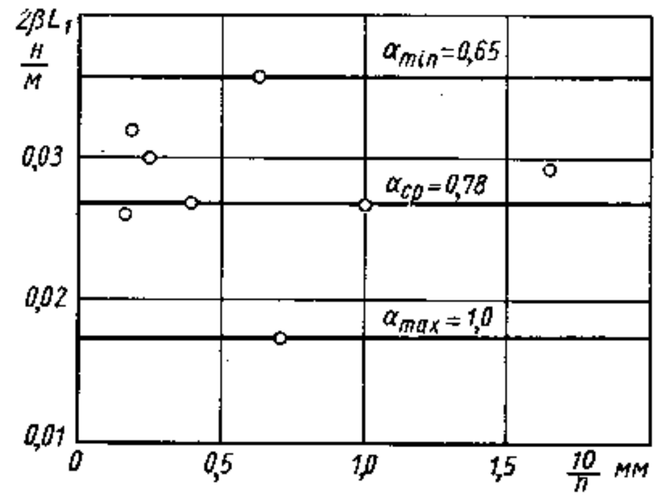


Рис. 68. График опытных значений $2\beta L_1$ для вакуумно-многослойной изоляции

согласование с уравнением (144) несколько хуже, а для текстуры, об испытании которой сказано в работе [75], имеют место большие расхождения. По-видимому, в этих случаях прокладочные материалы имеют сравнительно плотную и топковолокни-

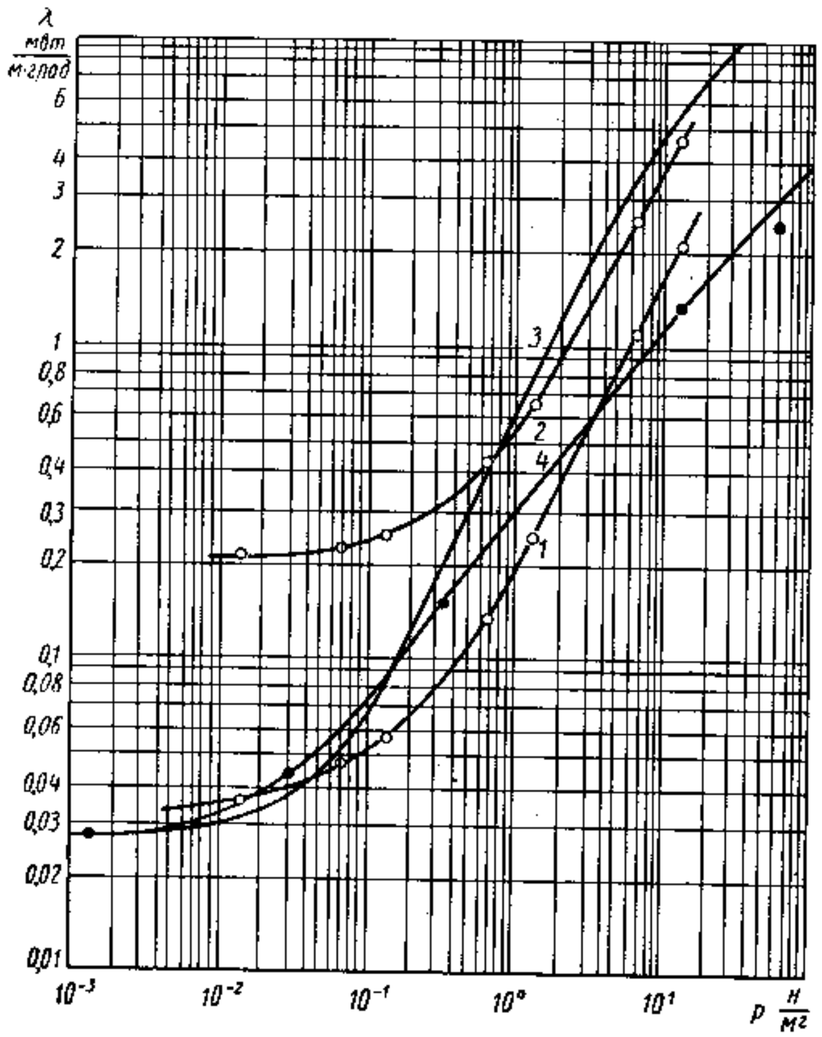


Рис. 69. Зависимость коэффициента теплопроводности многослойной изоляции от давления воздуха (граничные температуры 300 и 77° K):

1 — изоляция SI-62 [84]; *2* — изоляция SI-12 [84]; *3* — изоляция NRC-2 [91]; *4* — алюминиевая фольга + стеклосетка (гелий) [75]

стую структуру; рассчитывать их следует по полной формуле (142). Сделать этого не удалось, так как в указанных работах отсутствуют данные по структуре прокладочных материалов.

Таким образом, уравнения (143) и (144) описывают с достаточной для технических расчетов точностью зависимость коэффициента теплопроводности от давления газа. При давлениях менее 1 *н/м²* (7,5·10⁻³ *мм рт. ст.*) уравнение (144) может быть

упрощено (среднее значение коэффициента аккомодации принято равным 0,78).

$$\lambda = \lambda_0 + 6{,}5\,\frac{p}{n}. \qquad (145)$$

Плотность укладки вакуумно-многослойной изоляции находится обычно в пределах $n = 10 \div 30$ *1/см*. Следовательно, проводимость тепла воздухом при давлении 0,1 *н/м²* (7,5·10⁻⁴ *мм рт. ст.*) составляет 0,02—0,06 *мвт/(м·град)*, что приводит к увеличению коэффициента теплопроводности примерно в 2 раза. При давлении воздуха 0,01 *н/м²* (7,5·10⁻⁵ *мм рт. ст.*) проводимость тепла газом не превышает 0,006 *мвт/(м·град)*. Поэтому для эффективной работы многослойной изоляции необходимо поддерживать в изоляционном пространстве давление не более 0,01 *н/м²*, причем чем меньше плотность укладки изоляции, тем выше должны быть требования в отношении вакуума.

Материалы для вакуумно-многослойной изоляции и их свойства

Опытные данные по теплопроводности некоторых текстур [22] многослойной изоляции представлены в табл. 20.

Как видно из приведенных данных, коэффициент теплопроводности большинства испытанных и применяемых на практике текстур многослойной изоляции не превышает 0,1 *мвт/(м·град)*, а для лучших образцов — достигает 0,02—0,03 *мвт/(м·град)*. Коэффициент теплопроводности понижается с уменьшением толщины прокладок. Наилучшие результаты для текстур с экранами из алюминиевой фольги получаются при толщине прокладок менее 0,1 *мм* и $n = 15 \div 30$ *1/см*. Эффективность текстур с алюминированной пленкой несколько ниже, чем с алюминиевой фольгой, минимальный коэффициент теплопроводности достигается при большей плотности, ввиду повышенной степени черноты пленки.

В качестве материала для экранов может быть использована фольга из различных металлов (алюминия, меди, латуни, никеля, нержавеющей стали, олова). На практике в изоляции, работающей при температурах ниже 400—450° С, как правило, применяют алюминиевую фольгу, имеющую малый вес, низкую стоимость и высокую отражательную способность. Как было указано в гл. II, степень черноты металлических поверхностей уменьшается при снятии внутренних напряжений в металле и достигает минимального значения при высоте неровностей меньше 0,04 *мкм*. В соответствии с этим для изготовления экранов рекомендуется мягкая фольга, отожженная при температуре 400—450° С и имеющая чистоту поверхности не ниже 12-го класса.

Таблица 20

Коэффициент теплопроводности текстур многослойной изоляции (температуры граничных стенок 293 и 90° К, давление ниже 10^{-2} н/м²)

Материал теплоизолирующих прокладок	Толщина прокладок в *мм*	Плотность изоляции в *кг/м³*	Количество экранов в 1 *см*	Коэффициент теплопроводности в *мвт/(м·град)*
Экраны из алюминиевой фольги толщиной 10 мкм				
Стеклохолст ЭВТИ	0,1	70	15	0,045
То же	0,1	140	30	0,10
» »	0,2	100	15	0,08
Стеклобумага СБР	0,05	55	15	0,027
То же	0,05	75	20	0,025
» »	0,05	95	25	0,030
» »	0,1	75	15	0,032
» »	0,1	125	25	0,045
» »	0,3	95	10	0,10
Стеклоткань ЭСТБ-40	0,04	290	40	0,035
Стеклоткань Э	0,06	190	20	0,025
Стеклосетка ССА	0,05	400	60	0,05
Экраны из алюминированной полиэтилентерефталатной пленки				
Без прокладок	—	38	25	0,032
Стеклосетка ССА	0,05	330	60	0,025
Стеклохолст ЭВТИ	0,08	75	30	0,055
Стеклобумага СБР	0,2	120	20	0,07

Наличие примесей в металле уменьшает его отражательную способность. Поэтому для изготовления экранов желательно применение возможно более чистого алюминия. Согласно ГОСТу 618—62 алюминий с содержанием примесей менее 0,07% применяется только для изготовления фольги толще 0,05 *мм*. Для многослойной изоляции используют фольгу толщиной 0,005—0,02 *мм*. Эта фольга должна быть изготовлена из алюминия марки не ниже Al чистотой 99,5% и иметь чистоту поверхности не менее 12-го класса. В остальном фольга должна удовлетворять требования ГОСТа 618—62. Фольгу толщиной 0,005 *мм*, имеющую малую монтажную прочность, следует использовать в тех случаях, где предъявляются особые требования в отношении снижения веса изоляции.

При рабочих температурах от 450 до 1000° С экраны изготовляют из медной фольги, а при температурах до 1200° С — из никелевой фольги [108].

Применяют также экраны из полимерной пленки, покрытой с одной или двух сторон напыленным слоем металла [91, 120, 134]. Для изготовления пленки применяют полиэфирные смолы, в частности полиэтилентерефталат. Они имеют малое газовыделение в вакууме при температурах ниже 100° С. К достоинствам пленки

Таблица 21

Коэффициент теплопроводности текстур многослойной изоляции (температура теплой граничной стенки 290—300° К, давление ниже 10^{-2} н/м²)

Материал теплоизолирующих прокладок	Плотность в *кг/м³*	Количество экранов в 1 *см*	Температура холодной стенки в °К	Коэффициент теплопроводности в *мвт/(м××град)*	Источник
Экраны из алюминиевой фольги толщиной 6,3—13,7 мкм					
Стеклобумага толщиной 0,2 *мм* из волокна 0,5 *мкм*	140	20	77	0,06	[101]
То же	140	20	20	0,05	[101]
Стеклобумага толщиной 0,2 *мм*	110	9	77	0,084	[100]
из волокна 3 *мкм*	110	15	77	0,074	[100]
То же	110	15	20	0,052	[100]
» »	120	19	77	0,11	[100]
» »	—	21	77	0,13	[100]
Стекломат толщиной 0,2 *мм* из волокна 18 *мкм*, связанного полистиролом	110	11	77	0,071	[100]
	110	11	20	0,051	[100]
То же	120	26	77	0,07	[101]
» »	120	26	20	0,05	[101]
Стеклобумага толщиной 0,12 *мм*	60	14	77	0,07	[101]
из волокна 0,5 *мкм*	130	30	77	0,10	[101]
Стеклобумага толщиной 0,12 *мкм*	112	20	77	0,052	[101]
из волокна 3 *мкм*	112	20	20	0,042	[101]
Стеклобумага плотностью 16 *г/м²* из волокна 0,5 *мкм*	—	21	77	0,042	[132]
То же	—	24	77	0,075	[132]
Стеклобумага из волокна 1 *мкм*	64	17	77	0,086	[79]
Стеклобумага	—	21	77	0,069	[119]
Стеклобумага (SI-12)	40	4—8	77	0,155	[105]
То же (SI-10)	32	6—12	77	0,112	[105]
» » (SI-44)	75	14—27	77	0,034	[105]
» » (SI-62)	88	20—40	77	0,031	[105]
» » (SI-91)	120	30—60	77	0,017	[105]
Стеклоткань плотностью 28 *г/м²* из волокна 5—6 *мкм*	370	—	77	0,13	[133]
Стеклосетка толщиной 0,5 *мм* с ячейками 3,2×3,2 *мм*	—	13	77	0,036	[75]
Стеклоткань толщиной 0,1 *мм*	760	76	77	0,52	[101]
Нейлоновая сетка толщиной 0,15 *мм*, 90% пустот	90	24	77	0,23	[101]
Асбестовая бумага	—	42	77	0,178	[101]
Экраны из алюминированной полиэтилентерефталатной пленки					
Без прокладок	—	25	20	0,102	[75]
То же	45	24	77	0,085	[101]
» »	90	47	77	0,18	[101]
» » (NRC-2)	40	—	77	0,03	[91]
Стеклобумага толщиной 0,12 *мм* из волокна 0,5 *мкм*	30	9	77	0,20	[101]
Стекломат из волокна 1 *мкм*	60	14	77	0,24	[101]
Стеклобумага толщиной 0,2 *мм* из волокна 3 *мкм*	61	—	77	0,32	[100]
	61	—	20	0,24	[100]
Стеклобумага	—	26	77	0,153	[119]

относятся высокая прочность и малый вес. Для изоляции применяют полиэтилентерефталатную (лавсановую) пленку толщиной 0,006—0,012 *мм*. На пленку напыляют методом испарения в вакууме слой алюминия или другого металла толщиной 0,01—0,02 *мкм*. Напыленный слой металла слегка прозрачен для видимого света. Несколько бо́льшая степень черноты алюминиевого покрытия по сравнению с алюминиевой фольгой компенсируется увеличенным числом слоев пленки.

Особенно важное достоинство пленки — низкий коэффициент теплопроводности самого материала, что позволяет использовать ее без установки прокладок между экранами [134]. В этом случае пленка покрывается слоем алюминия только с одной стороны и поверхность ее делается рифленой для уменьшения площади контактов между слоями. Малый коэффициент теплопроводности уменьшает также теплообмен в продольном направлении, что приводит к увеличению эффективности изоляции в промышленных изделиях. Сравнительная характеристика экранов из алюминиевой фольги и алюминированной пленки дана в табл. 22. Продольная проводимость тепла квадратом определяется количеством тепла, проходящего в единицу времени при разности температур в 1° между двумя противоположными концами квадратного листа материала. Продольная проводимость алюминированной пленки в несколько сот раз меньше проводимости фольги.

Таблица 22

Продольная проводимость тепла экранами из различных материалов

Материал	Продольная проводимость тепла квадратом в *мквт/град* при температуре в °К		
	300	77	20
Алюминиевая фольга толщиной 6,3 *мкм* . .	1910	2540	25400
Полиэтилентерефталатная пленка толщиной 6,3 *мкм*	0,9	0,858	0,533
Напыленный слой алюминия толщиной 0,0127 *мкм*	3,83	5,1	51,0
Алюминированная пленка	4,75	5,98	51,53

Наилучшими прокладочными материалами для многослойной изоляции в настоящее время считаются стекловолокнистые. Стеклянное волокно можно изготовить диаметром до 0,5 *мкм*; оно прочно, не горит и не выделяет больших количеств газов в вакууме. Стекловолокнистые листовые материалы изготовляют в виде бумаги или ткани. Волокна в стеклобумаге могут склеиваться связующим или соединяться другим способом.

Из стекловолокнистых материалов типа бумаги для многослойной изоляции используется стеклохолст марки ЭВТИ, по

МРТУ 6 М-864-62. Его толщина 0,10—0,15 *мм*, плотность 20—30 *г/м²* (масса 1 *м²*). Более низкий коэффициент теплопроводности позволяет получить стеклобумага СБР, разработанная ВЭИ им. Ленина для целей электроизоляции и предложенная ВНИИКИМАШем для использования в качестве теплоизолирующего прокладочного материала. Она изготовляется по техническим условиям ВТУ ОАИ.503.058, имеет толщину 0,04—0,12 *мм* и плотность 10—30 *г/м²*.

В качестве прокладочного материала для многослойной теплоизоляции используются также листы из стеклянных волокон диаметром 0,5—3,8 *мк*, формируемых в маты без склеивания [133]. Прокладочный материал получается рыхлым и легко сжимаемым. Он имеет плотность около 50 *г/м²* и при монтаже изоляции сжимается примерно в 2 раза. Эти маты фирма Линде (США) применяет в качестве прокладок при изготовлении многослойной изоляции типа SI-12 с числом экранов $n = 4 \div 12$ 1/*см*.

Эффективным материалом для многослойной теплоизоляции является бумага, прессованная из несклеенных волокон диаметром 0,2—0,5 *мкм* и 0,5—0,75 *мкм* и длиной менее 13 *мм* [132]. Листы бумаги могут изготовляться очень тонкими, толщиной порядка 0,05 *мм*. Это позволяет делать изоляцию с числом слоев в несколько десятков (до 100) на 1 *см*. Плотность бумаги может быть снижена до 17 *г/м²*. Эта бумага используется фирмой Линде (США) при изготовлении многослойной изоляции типа SI-62.

Стеклоткани, используемые для многослойной изоляции, должны иметь разреженную структуру для уменьшения контактов с экранами.

Хорошие результаты дает применение стеклосетки ССА, выпускаемой по ТУ № М-812-59. Эту сетку получают гарнитуровым переплетением нитей из непрерывного стеклянного волокна диаметром 6 *мкм*. Толщина сетки 0,05 *мм*, число нитей на 1 *см* в основе 14 и в утке 10. Сетка имеет плотность около 40 *г/м²*. Ткани ЭСТБ-25 (ВТУ 11-58) и ЭСТБ-40 (ВТУ 215-53) сочетают более высокую прочность с высокими теплоизоляционными свойствами. Они имеют толщину 0,025 и 0,04 *мм*, их плотность не превышает соответственно 30 и 65 *г/м²*. Несколько большие значения толщины (0,06—0,1 *мм*) и плотности (68—105 *г/м²*) имеют электроизоляционные ткани марки Э (ГОСТ 8481—61). Все эти материалы вырабатываются из стеклянного волокна бесщелочного алюмоборосиликатного состава. Фирма Артур Д. Литтл (США) применяет стеклосетку толщиной 0,5 *мм* с ячейками 3,2 × 3,2 *мм* [74, 75]. Плотность изоляции с такими прокладками составляет 16 экранов на 1 *см*.

Изоляция с экранами из гофрированной алюминиевой фольги и прокладками из двух слоев стеклосетки с плотностью 70—140 экранов на 1 *см* имеет очень низкую теплопроводность, равную 0,015 *мвт/(м·град)* [135]. Сетка сплетена из нитей, со-

стоящих из 40 волокон диаметром 3 *мкм*, сторона ячейки равна 0,25 *мм*, толщина сетки 0,025 *мм*.

Преимущества стеклобумаг по сравнению с тканями — низкая стоимость и малая масса. Недостатком бумаг является содержание значительного количества связующего вещества — органического соединения, выделяющего много газов в вакууме и делающего бумагу горючей и взрывоопасной в среде кислорода.

Стеклоткани содержат 2—3% замасливателя, добавляемого для облегчения изготовления нитей из волокна. В случае необходимости замасливатель может быть удален из ткани без нарушения структуры материала путем термической обработки. Стеклоткань можно рекомендовать для применения в тех случаях, где стеклобумага не может быть использована по условиям огне- и взрывоопасности.

Экраны из алюминиевой фольги и из полиэтилентерефталатной пленки горят и взрываются в среде кислорода. Огне- и взрывоопасность пакетов многослойной изоляции с экранами из алюминиевой фольги и прокладками из стекловолокнистых материалов снижается по мере уменьшения содержания органических добавок в прокладках. Пакеты с прокладками из стеклотканей в кислороде не горят. Поэтому в сосудах для жидкого кислорода желательно применять стекловолокнистые прокладочные материалы с возможно меньшим содержанием органических добавок. Изоляцию на основе полимерной пленки в сосудах для жидкого кислорода применять не рекомендуется.

Технология монтажа многослойной изоляции

Существует несколько способов монтажа многослойной изоляции.

Все они должны обеспечивать, с одной стороны, закрепление изоляции на месте и, с другой стороны, сохранение ее высокой эффективности. Эти два требования создают сложную проблему, так как улучшение крепления изоляции приводит к ее сжатию и, как следствие, к увеличению ее проводимости. Приходится искать компромиссное решение, закрепляя изоляцию с минимально возможным уплотнением. Например, фирма Линде (США) разработала способ крепления изоляции на цилиндрическом сосуде, позволяющий изоляции из материала SI-62 толщиной 25 *мм* выдерживать ускорение $4g$ в осевом направлении при увеличении общего теплового потока только на 27%.

Один из лучших способов монтажа многослойной изоляции на цилиндрических поверхностях — спиральная намотка экранов и прокладок между ними одновременно с двух рулонов. Принимая, что шаг спиральной намотки t мал по сравнению с радиусом r изолируемого цилиндра и пренебрегая проводимостью

прокладочного материала, можно составить следующее уравнение для теплового потока по спиральной намотке экранного материала, имеющего теплопроводность $\lambda_{экр}$ и толщину $\delta_{экр}$:

$$Q_{спир} = \frac{\lambda_{спир}}{t} 2\pi r \Delta T = \frac{\lambda_{экр}}{2\pi r} \delta_{экр} \Delta T,$$

откуда находим величину кажущегося коэффициента проводимости спиральной намотки [105]

$$\lambda_{спир} = \lambda_{экр} \frac{t\delta_{экр}}{4\pi^2 r^2} = \lambda_{экр} \frac{\delta_{экр}}{4\pi^2 r^2 n}. \qquad (146)$$

При намотке экранов из алюминиевой фольги толщиной 0,01 *мм* с шагом 0,5 *мм* (плотность намотки 20 экранов на 1 *см*) на цилиндр диаметром 100 *мм* $\lambda_{спир}$ достигает 0,01 *вт/(м·град)*, т. е. 30—40% от величины теплопроводности лучших образцов многослойной изоляции. Если тепловой поток по спирали становится недопустимо большим, его можно исключить, разрезая фольгу после каждого витка.

Многослойная изоляция монтируется способом спиральной намотки, в частности, на трубопроводах [95]. Изоляция наматывается на специальных станках, аналогично армированным волокнистыми материалами пластикам.

Испытания сосуда емкостью 570 *дм*^{3}, цилиндрическая часть которого была изолирована намоткой 70 слоев алюминиевой фольги и стеклобумаги на толщину 25 *мм* (изоляция SI-62 фирмы Линде), а на днища сосуда было уложено такое же число слоев, дали следующие результаты [112]. Расчетная величина теплопритока по данным лабораторных испытаний изоляции составила 0,82 *вт/м*^{2}, тогда как фактический теплоприток оказался равным 2,7 *вт/м*^{2}, т. е. в 3,3 раза больше.

Другой способ монтажа многослойной изоляции состоит в приготовлении пакетов, состоящих из набора чередующихся экранов и прокладок и креплении их на сосуде встык друг к другу. Пакеты укладывают в несколько рядов, причем зазоры в стыках между пакетами одного ряда должны перекрываться пакетами другого ряда. Отдельные слои в пакетах скрепляют между собой, например прошивкой или склеиванием. Прокладочный материал выпускается за края экранов из алюминиевой фольги для исключения короткого замыкания экранов.

Применение такого способа монтажа на опытном сосуде емкостью 35 *дм*^{3} [74] привело к увеличению коэффициента теплопроводности примерно на 0,06 *вт/(м·град)*. Такие же результаты дало и испытание на этом сосуде способа спиральной намотки. Другой опытный сосуд емкостью 60 *дм*^{3} [101] был изолирован матами толщиной 0,64 *см*. Общая толщина изоляции составила 4,5 *см*, количество стыков между матами было равно 9. Коэффициент теплопроводности смонтированной изоляции

оказался равным 0,3 *мвт/(м·град)*, т. е. в 4 раза больше, чем теплопроводность лабораторного образца.

Примером применения этого способа монтажа изоляции на крупных сосудах может служить изоляция сосуда на 400 $м^3$ жидкого водорода [94]. Отдельные маты имеют длину 18,2 *м*, ширину 1,52 *м* и толщину 51 *мм*. Они покрываются с двух сторон полимерной пленкой и крепятся к внутреннему сосуду специальными прижимами. Весь сосуд изолируется 14 матами указанных размеров. Маты сшиваются друг с другом и обвязываются стеклолентой для исключения зазоров между ними.

Наличие зазоров в стыках между соседними изоляционными пакетами в одном ряду приводит к дополнительному увеличению теплового потока через изоляцию. Это увеличение может быть в первом приближении оценено с помощью следующего соотношения (степень черноты экранов и граничных стенок принимается одинаковой)

$$\frac{q_{заз}}{q_{из}} = \frac{F_{заз}}{F_{из}}(N+1), \qquad (147)$$

где $q_{заз}$ и $q_{из}$ — величины тепловых потоков через зазор и через изоляцию;

$F_{заз}$ и $F_{из}$ — площади зазора и изоляции;

N — число экранов в пакете.

При площади зазоров 1% от общей площади поверхности изоляции и пакетах из 20 экранов тепловой поток через зазоры составит приблизительно 20% от общего теплового потока. Уменьшение числа экранов в пакете улучшает перекрытие зазоров и позволяет практически исключить перенос тепла через зазоры. По той же причине перфорация отдельных экранов не вызывает заметного увеличения теплового потока при условии несовпадения отверстий в соседних экранах. Для облегчения вакуумирования изоляции в экранах пробивают отверстия диаметром 1,6 *мм* с расстоянием между центрами 3,8 *см* [133]. Согласно уравнению (147) тепловой поток через изоляцию увеличится вследствие этого лишь на 0,3%.

Сравнительно просто монтируют многослойную изоляцию на плоских и цилиндрических поверхностях. При изолировании поверхностей другой формы, в частности, эллиптических днищ цилиндрических сосудов для сжиженных газов возникают существенные трудности. Для улучшения прилегания слоев изоляции к поверхности днищ предложено [136] делать в круглых дисках из экранных и прокладочных материалов вырезы в виде секторов. Днище изолируют дисками, укладывая их с перекрытием вырезов в соседних слоях.

Другой способ состоит в следующем. Намотку цилиндрической части выполняют с припусками, достаточными для покрытия поверхности днищ. В припусках вырезают клинья таким образом, что оставшийся материал образует секторы, которыми покрывают днища без просветов и складок. В результате слои изоляции образуют изотермические поверхности, охватывающие полностью как цилиндрическую обечайку, так и эллиптические днища сосуда.

Еще труднее смонтировать многослойную изоляцию на шаровых сосудах так, чтобы обеспечить эффективную работу ее. Один из способов состоит в бинтовании шара достаточно узкой лентой, состоящей из чередующихся полос металлической фольги и прокладочного материала. Направление бинтования изменяется после каждого витка на небольшой угол, пока изоляция не охватит всю поверхность шара.

Монтаж многослойной изоляции на промышленных изделиях, имеющих сложную форму и конструктивные элементы, пересекающие изоляционное пространство, затруднителен. Монтажные зазоры, местные обжатия, нарушения изотермичности отдельных слоев по всей поверхности и другие недостатки монтажа приводят к увеличению теплового потока через изоляцию. В результате кажущийся коэффициент теплопроводности многослойной изоляции, смонтированной на промышленном изделии, часто превышает 0,1 *мвт/(м·град)*, достигая иногда 0,3—0,5 *мвт/(м × × град)*. Поэтому при проектировании изолируемых изделий следует обращать особое внимание на обеспечение правильного монтажа изоляции, учитывая, что эффективность многослойной изоляции зависит в первую очередь от качества ее выполнения.

ГЛАВА VI

Вакуумная многослойно-порошковая теплоизоляция

Один из основных недостатков вакуумно-многослойной теплоизоляции состоит в необходимости создания высокого вакуума. Давление газа в случае многослойной изоляции должно быть приблизительно в 100 раз ниже, чем при вакуумно-порошковой изоляции. Причиной являются сравнительно большие размеры пустот в многослойной изоляции, представляющих собой зазоры между соседними слоями. Уменьшение этих зазоров путем более плотной укладки изоляции приводит к возрастанию коэффициента теплопроводности за счет увеличения контактного теплообмена между экранами и прокладками.

Проблема может быть решена, если заполнить зазоры между экранами тонкодисперсным теплоизоляционным порошком. При таком сочетании перенос тепла излучением будет задерживаться экранами, а перенос тепла газом резко снизится уже при низком вакууме благодаря наличию тонкодисперсного порошка. Проводимость по твердому телу для таких порошков, как аэрогель и перлитовая пудра, также очень мала. На практике такой вариант изоляции в чистом виде не может быть реализован. Если бы даже и удалось первоначально смонтировать экраны, не допуская контактов между ними путем засыпки порошка, то при вакуумировании и перевозке изделия невозможно было бы избежать частичного перемещения порошка и появления контактов между экранами. Поэтому экраны сначала нужно монтировать с прослойками между ними, т. е. изготовить обычную многослойную изоляцию, после чего заполнить зазоры между слоями порошком.

Во ВНИИКИМАШе проведены исследования такого вида изоляции. После определения зависимости коэффициента теплопроводности от давления воздуха для многослойной изоляции (кривая *2* на рис. 70) пространство между слоями заполнялось порошком и вновь находилась зависимость теплопроводности от давления (кривая *3* на рис. 70).

Коэффициент теплопроводности при засыпке перлитовой пудры снизился примерно в 3 раза в области давлений 0,1—10 *н/м²* (10^{-3}—10^{-1} *мм рт. ст.*). Он достиг 0,1 *мвт/(м·град)* при давлении 0,5 *н/м²*, тогда как при чисто многослойной изоляции такую величину удается получить, как правило, при давлениях ниже 0,05 *н/м²*. Таким образом, применение комбинированной многослойно-порошковой изоляции целесообразно в тех случаях, когда трудно поддерживать в течение длительного времени высокий вакуум, например, в сосудах для сжиженных газов с относительно высокой температурой кипения, в частности, для жидкого кислорода.

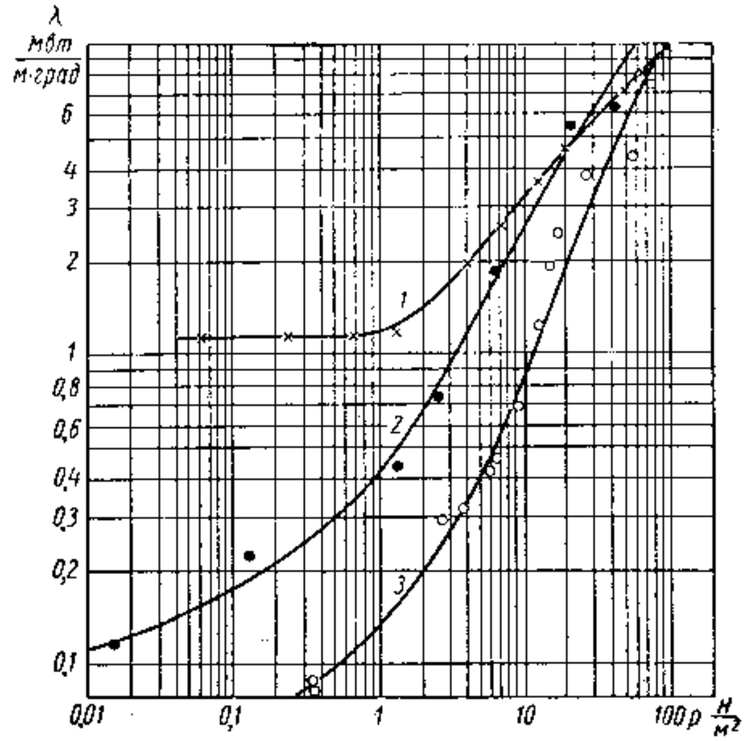


Рис. 70. Зависимость коэффициента теплопроводности различных типов изоляции (граничные температуры 293 и 90° К) от давления воздуха:
1 — порошковая (перлит); *2* — многослойная (алюминиевая фольга + стеклохолст ЭВТИ); *3* — многослойно-порошковая (алюминиевая фольга + ЭВТИ + перлит)

Многослойно-порошковая изоляция имеет и дополнительные преимущества, проявляющиеся при использовании ее в промышленных сосудах. Во-первых, засыпка порошка уменьшает приток тепла через зазоры в стыках между отдельными пакетами (матами) многослойной изоляции и приток тепла через торцы пакетов. Во-вторых, тепловой поток дополнительно уменьшается вследствие заполнения порошком свободного пространства, не занятого многослойной изоляцией. Этот эффект может быть весь-

ма существенным, так как свободное пространство имеет часто по конструктивным соображениям (размещение опор, труб, удобства монтажа) даже больший объем, чем объем, занятый многослойной изоляцией. В-третьих, имеет место дополнительное уменьшение теплового потока вследствие эффективного изолирования порошком опор, подвесок и труб, размещаемых в изоляционном пространстве.

Сравнительные испытания многослойной и многослойно-порошковой изоляции были проведены на сосуде емкостью 320 *дм*³.

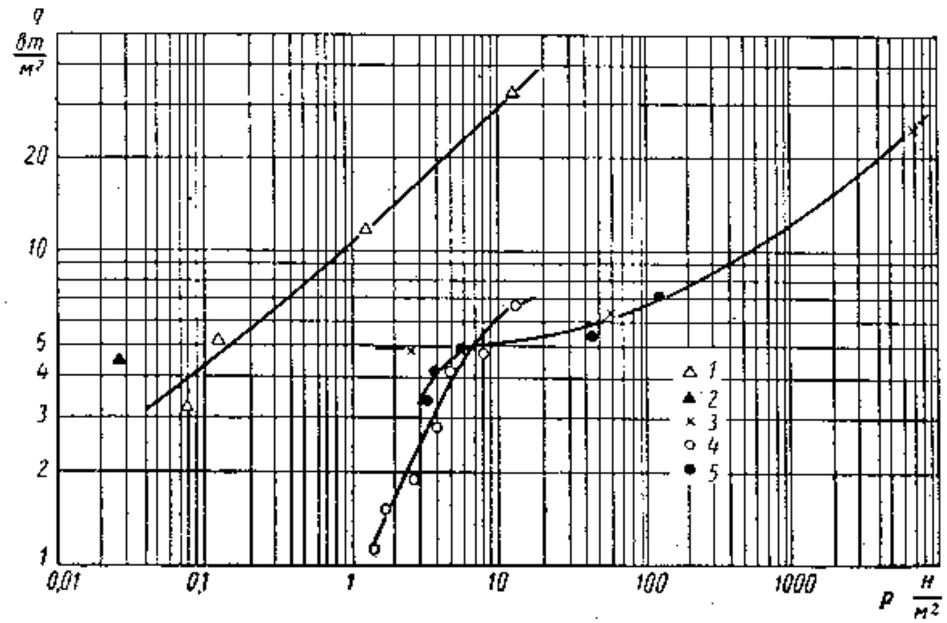


Рис. 71. Зависимость удельного теплового потока через вакуумированную изоляцию сосуда на 320 *дм*³ жидкого кислорода от давления воздуха:

1 — алюминиевая фольга + стеклохолст ЭВТИ (30 экранов); *2* — то же (20 экранов); *3* — аэрогель; *4* — алюминиевая фольга + стеклохолст ЭВТИ (20 экранов) + перлит; *5* — алюминиевая фольга + стеклохолст ЭВТИ (20 экранов) + аэрогель

Сосуд представляет собой вертикальный круговой цилиндр диаметром 800 *мм* и высотой 750 *мм* с эллиптическими днищами. Расстояние между стенками цилиндрической части кожуха и сосуда составляет 93 *мм*. Сосуд закреплен в кожухе на двух опорах из текстолита.

Приток тепла по опорам и трубам был найден путем определения потерь от испарения в сосуде с изоляцией из аэрогеля при различных давлениях в изоляционном пространстве. В этих и последующих испытаниях в сосуд заливали жидкий кислород или жидкий азот. Экспериментально полученная величина 7,1 *вт* близка к вычисленной.

Сосуд изолировали размещенными в два ряда матами из 10 экранов алюминиевой фольги с прокладками из стеклохолста

ЭВТИ. После испытаний сосуда с многослойной изоляцией в межстенное пространство засыпали аэрогель и вновь определяли потери от испарения при различных давлениях воздуха в межстенном пространстве. Аналогичные испытания были проведены при засыпке перлита в межстенное пространство с многослойной изоляцией.

Потери кислорода от испарения в сосуде с многослойной изоляцией при давлении 0,027 *н/м²* ($2 \cdot 10^{-4}$ *мм рт. ст.*) составили 0,305 *кг/ч* или 2,0% в сутки, а при изоляции из аэрогеля 0,312 *кг/ч* или 2,05% в сутки. Отсутствие заметной разницы в величине потерь объясняется сравнительно малой толщиной многослойной изоляции (20 экранов при ширине межстенного пространства 93 *мм*). Применение многослойно-порошковой изоляции с засыпкой перлита позволило снизить потери кислорода от испарения до 0,165 *кг/ч* или 1,08% в сутки при давлении 1,46 *н/м²* ($1{,}1 \cdot 10^{-2}$ *мм рт. ст.*). Удельный тепловой поток через изоляцию уменьшился в 3 раза (рис. 71) даже при давлении на порядок выше по сравнению с многослойной изоляцией.

Таким образом, многослойно-порошковая изоляция сочетает достоинства порошковой и многослойной изоляций и позволяет достичь эффективности многослойной изоляции при сравнительно высоких давлениях, соответствующих рабочей области давлений вакуумно-порошковой изоляции. В некоторых случаях эта комбинированная изоляция дает возможность снизить тепловой поток по сравнению с многослойной изоляцией.

ГЛАВА VII

Методы исследования низкотемпературной теплоизоляции

Методы определения теплопроводности и температуропроводности

Основными теплофизическими свойствами теплоизоляционных материалов являются коэффициент теплопроводности λ и удельная массовая теплоемкость c. Для нестационарных процессов переноса тепла важное значение имеет коэффициент температуропроводности

$$a = \frac{\lambda}{c\rho}.$$

Методы определения теплофизических свойств можно разделить на две группы: основанные на стационарном тепловом режиме и на нестационарном тепловом режиме.

Стационарные методы. В этих методах измеряется постоянный тепловой поток, устанавливающийся при определенной разности температур граничных поверхностей образца материала. Величину теплового потока определяют обычно по электрической мощности нагревателя или теплоте, выделяемой (или поглощаемой) в процессе фазового перехода вещества. Нагреватель или вещество находятся в контакте с одной из граничных поверхностей образца. Для получения надежных результатов необходимо устранить побочные тепловые потоки, что достигается с помощью различных охранных устройств. Длительность эксперимента в случае теплоизоляционных материалов довольно велика.

Все стационарные методы разделяются на три типа в соответствии с плоской, шаровой и цилиндрической формой образца. Приборы для измерений при температурах выше 273° К и атмосферном давлении описаны в литературе [10, 45]. Для испытаний теплоизоляционных материалов при низких температурах в условиях вакуума применяют приборы со всеми тремя типами

образцов. Тепловой поток может быть измерен различными способами. Определение его по мощности электронагрева [45] предпочтительно при исследовании температурной зависимости теплопроводности. Измерение его по излучению холодной поверхности образца позволяет с высокой надежностью исключить побочные тепловые потоки. Большей частью тепловой поток измеряют по количеству испаряющейся жидкости (жидкого кислорода, азота, водорода, гелия), находящейся в контакте с одной из граничных поверхностей.

По методу шара измеряют коэффициент теплопроводности порошкообразных и волокнистых материалов. Побочные притоки тепла через торцы образца в шаровом приборе отсутствуют.

Прибор (рис. 72) состоит из двух концентричных шаров *1* и *2*. Внутренний шар *1* подвешен на горловине *3*, снабженной охранной камерой *4* для устранения побочного притока тепла по горловине. Внутренний шар и охранная камера заполняются одним и тем же сжиженным газом, например жидким кислородом или азотом.

Определение величины теплового потока таким методом связано с тремя основными допущениями: 1) тепло, притекающее к жидкости, расходуется только на ее испарение, а нагрева пара при этом не происходит; 2) отсутствует механический унос жидкости; 3) приток тепла по горловине прибора пренебрежимо мал.

Справедливость этих допущений проверена экспериментально [19]. Во внутренний шар прибора был помещен электронагреватель. После первоначального определения количества испаряющегося кислорода провели серию опытов, подводя к жидкости нагревателем различные количества тепла и замеряя соответствующие скорости испарения кислорода. Для изучения возможного влияния на унос жидкости величины удельного теплового потока опыты были проведены с тремя нагревателями, с различной площадью поверхности, один из которых имел форму шара, второй — диска и третий — полого цилиндра. Количество испарившейся жидкости определяли в этих опытах, помимо замеров расхода пара по мокрому газовому счетчику, также непосредственным взвешиванием прибора. Количество подводимого электронагревателем тепла, изменявшееся от 0,5 до 60 *вт*, соответствовало во всех опытах количеству испарившегося кислорода с погрешностями в пределах 1—2%, что подтверждает справедливость указанных допущений. Методика определения теплового потока по скорости испарения сжиженного газа описана в гл. IX.

В плоском приборе (рис. 73) для определения коэффициента теплопроводности многослойной изоляции основная (измерительная) камера *1* заполняется жидким кислородом или другим сжиженным газом. Ее боковая поверхность и верхнее днище защищены от притока тепла из окружающей среды охранной камерой *2*, заполняемой той же жидкостью. Между охранной и

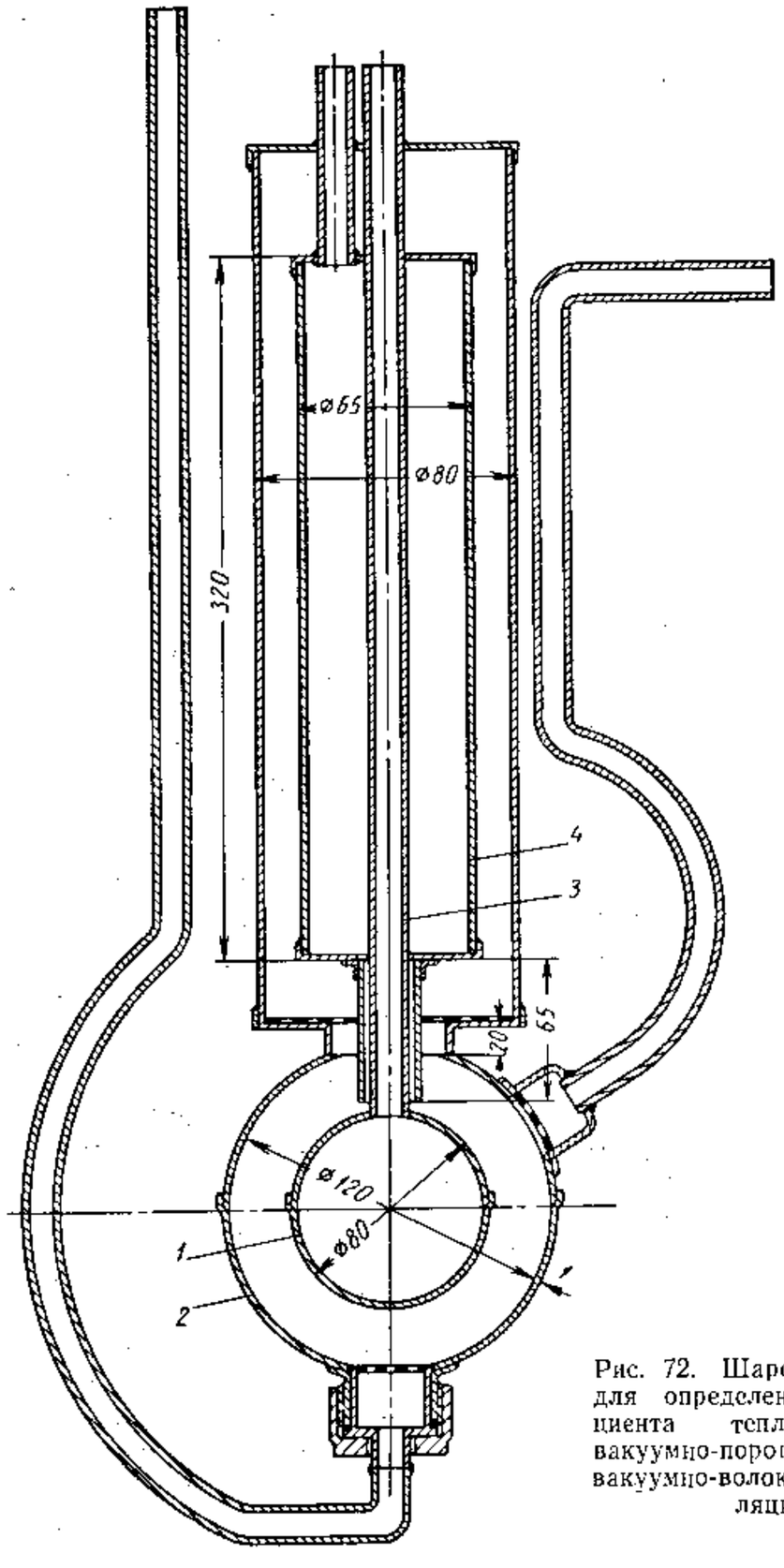


Рис. 72. Шаровой прибор для определения коэффициента теплопроводности вакуумно-порошковой и вакуумно-волокнистой изоляции

основной камерами имеется зазор. В случае отсутствия зазора разность температур между жидкостями в обеих камерах в 0,01° К может вызвать побочный тепловой поток, превышающий по величине измеряемый тепловой поток. Испытываемый образец *4* помещается между камерами и кожухом *3*, как показано на рисунке. Для уменьшения побочного теплового потока через торцы образца он имеет кольцевой разрез по диаметру, несколько большему диаметра основной камеры. С этой же целью торцы образца дополнительно изолированы и защищены холодным охранным кольцом *5*.

Побочный приток тепла к основной камере описанного прибора определяли, закрывая ее со стороны испытываемого образца медным диском, припаиваемым к охранному кольцу. Измеренная величина побочного притока тепла составляла около 0,007 *вт*.

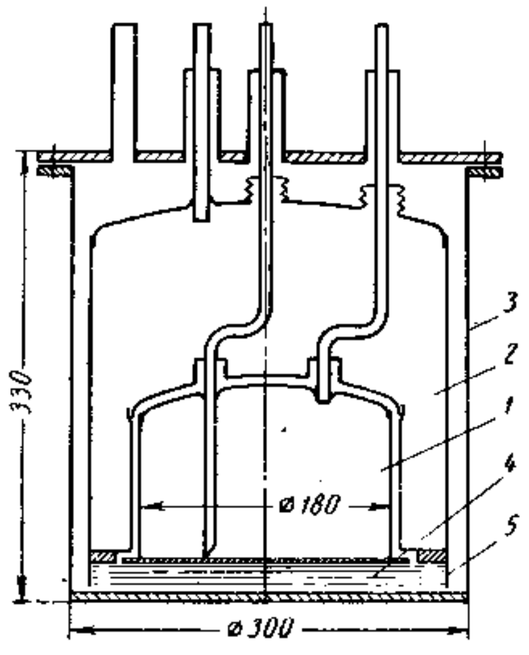


Рис. 73. Плоский прибор для определения коэффициента теплопроводности вакуумно-многослойной изоляции

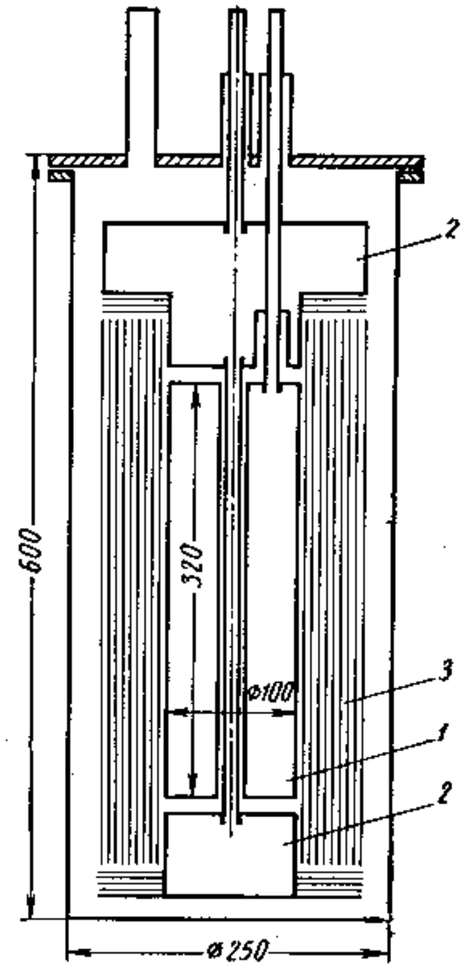


Рис. 74. Цилиндрический прибор для определения коэффициента теплопроводности вакуумно-многослойной изоляции

Цилиндрический прибор применяется, как и плоский, преимущественно в тех случаях, когда испытываемый материал имеет соответствующую форму и не может быть загружен в шаровой прибор. На рис. 74 изображен цилиндрический прибор для ис-

следования многослойной теплоизоляции. Его преимущество состоит в большой площади поверхности образца и меньшей площади его торцов при близких с плоским прибором габаритах. Это облегчает борьбу с побочными тепловыми потоками и получение надежных опытных данных.

Основная камера *1* имеет форму цилиндра, она защищена с торцов охранными камерами *2*. Испытываемая изоляция *3* наматывается на камеры. Ее торцы дополнительно изолируются и также защищаются. Схема установки для исследования теплоизоляции в условиях вакуума и низких температур приведена на рис. 75.

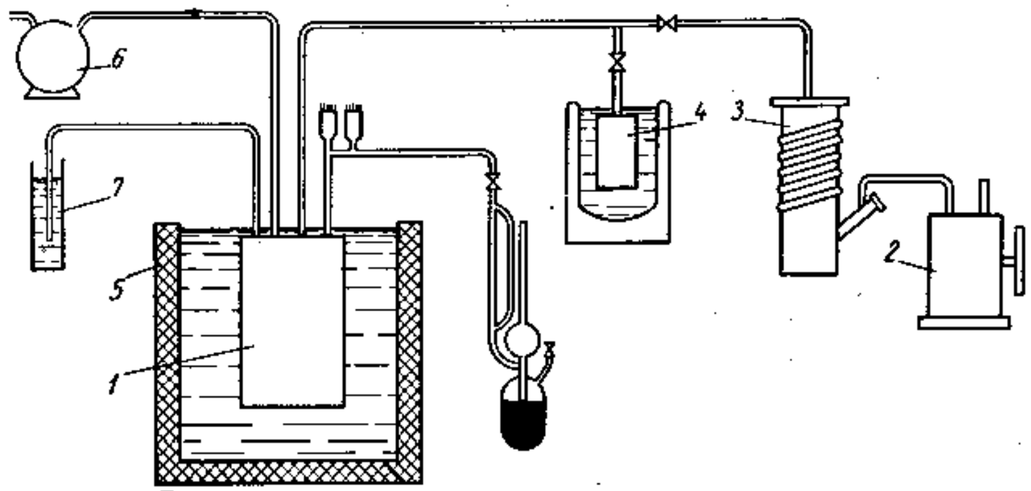


Рис. 75. Экспериментальная установка для определения коэффициента теплопроводности вакуумных видов изоляции стационарным методом

Полость прибора *1*, в которой помещен образец, откачивают насосами *2* и *3* до 10—20 *н/м²* при испытаниях порошков и ниже 1 *н/м²* при испытаниях многослойной изоляции. Затем прибор заполняют сжиженным газом и сообщают с адсорбером *4*, содержащим цеолит CaA и охлажденным жидким азотом. При этом давление снижается до 0,1—0,3 *н/м²* в первом случае и до 0,001—0,005 *н/м²* во втором случае.

Прибор помещается в термостат *5* для поддержания заданной постоянной температуры теплой граничной поверхности образца. Температура в термостате поддерживается большей частью равной 293—300° К. Количество испаряющейся жидкости определяют по показаниям мокрого газового счетчика *6* или реометра. Газ, выходящий из охранной камеры прибора, направляется в барботер *7* и проходит через столб воды. В результате в охранной камере создается небольшое избыточное давление, что исключает возможность конденсации в горловине пара, выходящего из основной камеры.

Нестационарные методы. В последние годы все большее распространение получают нестационарные методы.

Нестационарные методы [10, 45] можно разделить на три группы:

а) основанные на регулярном режиме, т. е. стадии упорядоченного нестационарного режима, характеризующейся экспоненциальной зависимостью температуры от времени для всех точек тела;

б) основанные на линейном или периодическом изменении температуры поверхности тела;

в) основанные на определении параметров нестационарного температурного поля в первой стадии его развития.

Основным достоинством нестационарных методов является быстрота проведения эксперимента. Это достоинство, к сожалению, не может быть использовано при исследовании вакуумных видов теплоизоляции для низких температур. Время, необходимое для создания требуемого вакуума в изоляции и охлаждения ее до температуры опыта, обычно столь велико, что применение нестационарных методов не дает существенной экономии времени, если учесть к тому же усложнение вычисления измеряемой величины из опытных данных. В практических расчетах теплопередачи через изоляцию низкотемпературного оборудования необходимо применять величину кажущегося коэффициента теплопроводности при условии, что одна граничная температура равна температуре окружающей среды, а другая — температуре изолируемого аппарата. Указанная величина непосредственно определяется при измерениях по методам стационарного режима, тогда как нестационарными методами определяют теплофизические свойства при сравнительно небольших перепадах температур в испытываемом образце.

Для измерений в условиях вакуума и низких температур могут быть использованы многие нестационарные методы, но ввиду изложенного, они не нашли пока широкого применения при испытаниях теплоизоляции для низких температур. Один из квазистационарных методов, основанных на линейном или периодическом изменении температуры поверхности тела — метод монотонного нагрева — позволяет определить за один опыт температурную зависимость измеряемого теплофизического параметра. Благодаря этому дополнительному достоинству он может быть с успехом использован в рассматриваемых условиях.

А. В. Лыков еще в 1935 г. предложил метод определения теплофизических свойств, основанный на нагреве тела с постоянной скоростью. В этом случае, начиная с определенного значения критерия Фурье $\mathrm{Fo} > \mathrm{Fo}_1$, температура любой точки тела становится линейной функцией времени, а распределение температуры в одномерных задачах описывается законом параболы

$$\frac{t(\xi, \tau)}{t_0} = 1 + \frac{\beta R_0}{a t_0}\left[\mathrm{Fo} - \frac{1}{\Gamma}\left(1 + \frac{2}{\mathrm{Bi}} - \frac{\xi^2}{R_0^2}\right)\right], \qquad (148)$$

где $t(\xi, \tau)$ — температура любой точки в некоторый момент времени;

t_o — температура окружающей среды в начальный момент времени;

β — скорость нагрева;

R_o — определяющий размер;

ξ — координата выбранной точки;

Bi — критерий Био;

Г — числовой множитель, величина которого равна 3 для неограниченной пластины, 4 — для неограниченного цилиндра и 6 — для шара.

Из уравнения (148) можно найти величину коэффициента температуропроводности

$$a = \frac{\beta R_o^2}{\Gamma} \frac{\left(1 - \frac{\xi^2}{R_o^2}\right)}{t_n - t(\xi, \tau)}, \qquad (149)$$

где t_n — температура поверхности тела.

В частности, для цилиндра при измерении температуры в точке на его оси

$$a = \frac{3R^2}{4\Delta t}. \qquad (150)$$

Недостатком метода в таком виде является трудность поддержания постоянной скорости нагрева. О. А. Краев разработал, исходя из тех же общих принципов, метод определения температуропроводности при нагреве материала с переменной, монотонно изменяющейся скоростью. Он получил для случая бесконечно длинного цилиндра уравнение в виде ряда, который часто может быть ограничен двумя членами:

$$a = \frac{R^2}{4\Delta t} \frac{d}{d\tau}\left(t_0 + \frac{1}{4}\Delta t\right) - \frac{5}{2304} \frac{R^4}{a\,\Delta t} \frac{d^2 \Delta t}{d\tau^2}, \qquad (151)$$

где t_o — температура в центре.

При выводе уравнения (151) было принято, что зависимостью теплофизических свойств от температуры в пределах Δt можно пренебречь. Согласно данным О. А. Краева такое упрощение допустимо для большинства теплоизоляционных материалов при $\Delta t \leqslant 20 \div 30°$ С.

Сразу же после начала нагрева Δt быстро растет по величине, достигая максимума, а затем медленно уменьшается. Измерения в начале опыта, когда $\frac{dt_0}{d\tau} < \frac{d\Delta t}{d\tau}$, следует отбросить, так как для вычисления в этом интервале пришлось бы пользоваться более сложной формулой. При медленном изменении Δt во времени можно определять температуропроводность по более простой формуле с одним лишь первым членом в правой части

$$a = \frac{R^2}{4\Delta t} \frac{d}{d\tau}\left(t_0 + \frac{1}{4}\Delta t\right). \qquad (152)$$

При необходимости вычислений по формуле (151) следует сначала найти приближенное значение a по формуле (152) и подставить его во второй член правой части формулы (151).

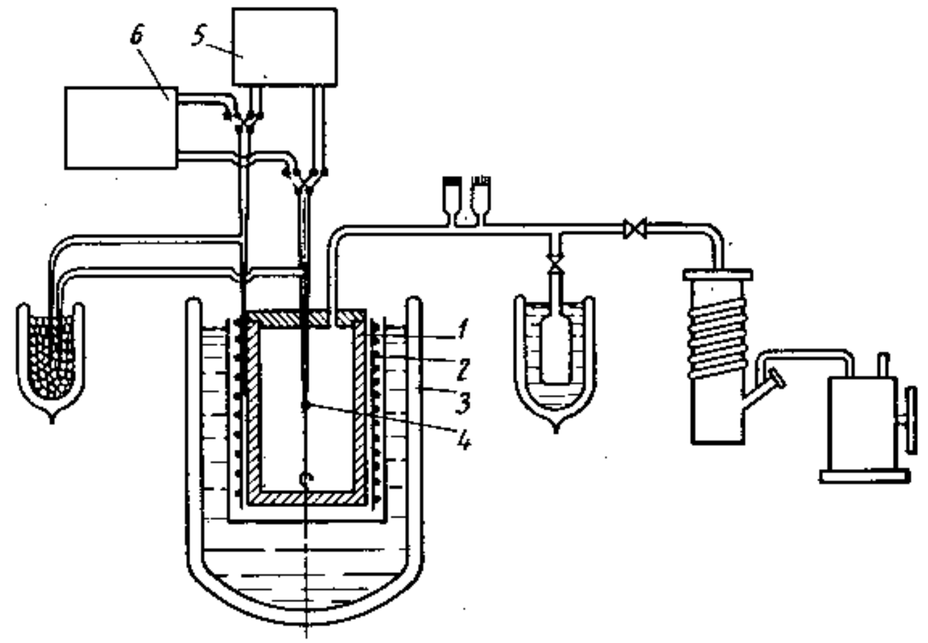


Рис. 76. Экспериментальная установка для определения коэффициента температуропроводности вакуумных видов изоляции методом монотонного нагрева

При необходимости учета зависимости температуропроводности от температуры можно принять с удовлетворительной в большинстве случаев точностью, что a в интервале Δt является линейной функцией температуры. В этом случае

$$a = \frac{R^2}{4\Delta t} \frac{d}{d\tau}\left(t_0 + \frac{1}{4}\Delta t\right) - \frac{1}{2} \frac{da}{dt} \Delta t. \qquad (153)$$

Формула (151) получена для бесконечно длинного цилиндра. Для цилиндра длиной $2L$ ошибка в определении a по этой формуле приблизительно равна $\frac{R^2}{2L^2}$ и не превышает 2% при $\frac{R}{L} \leqslant \frac{1}{5}$.

Схема установки для измерения температуропроводности по описанному методу показана на рис. 76. Калориметр *1* изготов-

лен из меди для обеспечения постоянства температур вдоль образующей цилиндра. На наружной поверхности калориметра намотан нагреватель *2*. Калориметр помещается в цилиндрический сосуд Дьюара *3* с жидким азотом. Манганин — константановая термопара *4*, устанавливаемая в центре, изготовляется из проволок диаметром 0,1 *мм* (манганин вместо меди применяется для уменьшения побочного притока тепла по термопаре).

Перед началом опыта для ускорения охлаждения испытуемого образца калориметр может быть заполнен сухим газообразным азотом. После выравнивания температур азот откачивают и включают нагреватель. Показания термопар записывают на диаграмму с помощью автоматического потенциометра *5* типа ЭПП-09.

При необходимости получения более точных данных э. д. с. термопар измеряют потенциометром *6* типа ППТН-1 или используют его для измерений в комбинации с ЭПП-09.

Для создания, сохранения и измерения вакуума здесь применяется такое же оборудование, как и в установке для определения коэффициента теплопроводности стационарным методом.

Метод монотонного нагрева может быть использован и для определения коэффициента теплопроводности, если установить в центре прибора металлическое ядро, вокруг которого помещается испытываемый материал. Для этого случая Е. С. Платунов [46] вывел следующую формулу:

$$\lambda_0 = \frac{\delta}{S_0}\,\frac{\beta_я}{\Delta t_\delta}\,C_я\Phi, \qquad (154)$$

где

$$\Phi = 1 + \frac{C}{2C_я}\left(1{,}5 - 1{,}5\,\frac{\Delta\lambda_\delta}{2\lambda_0} - \frac{\Delta S_\delta}{2S_0}\right) - \frac{\Delta\lambda_\delta}{2\lambda_0}\,\frac{\Delta S_\delta}{2S_0},$$

S — площадь поверхности в $м^2$;

C — теплоемкость системы в *дж/град*,

индексы 0, *я* и δ относятся к средней поверхности испытываемого образца, ядру и толщине образца.

Формула (154) справедлива при соблюдении условий

$$\frac{\Delta\lambda_\delta}{2\lambda_0} < 0{,}2 \quad \text{и} \quad \frac{\Delta S_\delta}{2S_0} < 0{,}1.$$

На практике длительность опытов по определению теплопроводности значительно больше, чем длительность опытов по определению температуропроводности. Это имеет существенное значение при исследованиях вакуумных видов низкотемпературной изоляции, имеющих очень малую теплопроводность. Поэтому в тех случаях, когда теплоемкость исследуемого материала известна, целесообразно определить его температуропроводность и затем вычислить теплопроводность.

Методы определения излучательной, поглощательной и пропускательной способностей

Для определения излучательной и поглощательной способностей металлов при низких температурах широко применяется калориметрический метод, аналогичный стационарному методу определения коэффициента теплопроводности. Калориметр представляет собой шаровой или цилиндрический сосуд из стекла или металла, подвешенный на горловине в кожухе такой же формы. Внутренний сосуд заполняется сжиженным газом, например жидким азотом; количество тепла, притекающее к внутреннему сосуду, определяется по скорости испарения жидкости. Побочный приток тепла по горловине должен быть сравнительно небольшим, что обеспечивают соответствующим выбором ее размеров и материала или установкой на горловине охранной камеры. В межстенном пространстве поддерживают высокий вакуум. Калориметр помещают в термостат, в котором поддерживается температура 293—300° К.

Исследуемую металлическую поверхность создают, изготовляя внутренний сосуд из соответствующего металла, нанося на сосуд металлическое покрытие или обертывая сосуд металлической фольгой. Внутреннюю поверхность кожуха покрывают краской со степенью черноты $\varepsilon_{нар} > 0{,}8$. Из опытных данных вычисляют по формуле (72) приведенную степень черноты, равную

$$\varepsilon_{пр} = \frac{1}{\frac{1}{a_{вн}} + \frac{F_{вн}}{F_{нар}}\left(\frac{1}{\varepsilon_{нар}} - 1\right)},$$

где $a_{вн}$ — поглощательная способность поверхности внутреннего сосуда.

Описанным методом обычно определяют полусферическую поглощательную способность поверхности при температуре сжиженного газа относительно излучения зачерненной или металлической поверхности при комнатной температуре. Зная $a_{вн}$ какой-либо поверхности, можно измерять излучательную способность различных поверхностей при температуре кожуха калориметра.

Для измерений при низких температурах используют также радиационный метод, основанный на измерении повышения температуры поверхности при ее облучении. При измерениях в области средних и высоких температур источником излучения обычно служит исследуемая поверхность, а приемником излучения — зачерненная поверхность с чувствительным элементом. При низких температурах приемником излучения является исследуемый образец, источником излучения — зачерненная поверхность (черное тело) или какой-либо источник инфракрас-

ного излучения. В последнем случае выделяют с помощью фильтров определенные участки инфракрасного спектра. Радиационным методом определяют нормальную поглощательную способность при низкой температуре относительно излучения черного тела при комнатной температуре или излучения с определенной длиной волны.

Пропускательную способность теплоизоляционных материалов измеряют с помощью инфракрасных спектрофотометров обычных типов. Для низкотемпературной теплоизоляции применяют тонкодисперсные материалы, сильно рассеивающие излучение. Толщина испытываемых образцов должна быть не более 0,5 *мм*, чтобы уловить и с достаточной точностью измерить проходящее излучение. Измеряют обычно в диапазоне волн от 1 до 15 *мкм*.

Если нужно определить пропускание излучения образцами большой толщины (например, при изучении зависимости пропускания от толщины), то определяют интегральную пропускательную способность по отношению к излучению абсолютно черного тела. Это позволяет значительно увеличить интенсивность излучения, падающего на приемник, и исследовать образцы толщиной до 50—100 *мм*.

Методы исследования структуры

Эффективность теплоизоляции зависит в значительной мере от структуры применяемых материалов. Это относится в первую очередь к изоляции для низких температур, в частности вакуумно-порошковой и вакуумно-многослойной теплоизоляции. В этом случае применяются тонкодисперсные материалы с малыми размерами частиц, пор, волокон, для исследования которых приходится использовать разнообразные, иногда довольно сложные методы.

Определение объемной массы (плотности) позволяет определить объем пор изоляционного материала, если известна истинная плотность вещества, из которого он состоит. Величина объемной массы порошкообразных материалов зависит от способа загрузки порошка. Объемную массу при свободной засыпке определяют, насыпая порошок в мерный цилиндр объемом от 25 $см^3$ до 1 $дм^3$. Избыток порошка в виде конуса над верхом цилиндра снимается пластинкой, и проба взвешивается.

Объемная масса при утряске на 20—50% выше вследствие лучшей укладки частиц при встряхивании. Тряска сосуда с порошком осуществляется либо вручную постукиванием, либо с помощью специальных вибраторов.

Волокнистые материалы сильно изменяют объемную массу в зависимости от условий загрузки. Поэтому определение их объемной массы строго регламентируется. Объемную массу минеральной ваты определяют согласно ГОСТ 4640—61 в цилиндрическом сосуде специальной формы под нагрузкой 1960 $н/м^2$ (0,02 $кГ/см^2$).

Размеры частиц материалов, применяемых для теплоизоляции, колеблются в широких пределах от 1 *мм* до долей микрона. Поэтому для определения размеров частиц приходится применять различные методы. Наиболее простым и надежным способом является ситовой анализ. К сожалению, область применения этого метода ограничена предельным размером 40—45 *мкм*, что соответствует минимальному размеру ячеек изготовляемых сит.

Некоторые изоляционные порошки имеют размер частиц менее 40 *мкм*. В этом случае применяют микроскопический и седиментационный методы, подробно описанные в литературе [59]. Весьма удобными являются оптические методы седиментационного анализа, основанные на законе Бугера-Бера. Нами предложен вариант оптического метода, основанный на использовании фотоэлектрического колориметра-нефелометра типа ФЭК-Н-57. Измерения этим прибором основаны на сравнении лучистых потоков, проходящих через эталонную и испытуемую жидкость. Замеряя мутность суспензии металлического порошка в этиловом спирте через определенные интервалы времени, можно оценить скорость оседания порошка, а следовательно и его дисперсность. В кювету нефелометра помещается проба порошка в 0,03 *г*, содержащая десятки миллионов частиц. Продолжительность измерений составляет 30 *мин*. При использовании микроскопического метода необходимо затратить несколько часов для замеров нескольких сотен частиц.

Чешуйки пудр, применяемых для вакуумно-порошковой теплоизоляции, имеют одинаковую форму и одинаковую удельную массу. Поэтому в данном случае достаточно иметь эталонную кривую и, сравнивая полученную кривую с эталонной, контролировать, имеет ли пудра требуемую дисперсность.

Для экранирования теплового излучения обычно применяют металлические порошки, частицы которых имеют форму чешуек. Толщину чешуек определяют по величине площади покрытия ими воды. Поверхность чешуек покрыта, как правило, стеарином, поэтому они не смачиваются водой и плавают на ее поверхности. Среднюю толщину частиц в *мкм* вычисляют по формуле

$$\delta = \frac{10^7 g}{\rho S}, \qquad (155)$$

где g — навеска в *г*;
ρ — плотность металла в $кг/м^3$;
S — площадь покрытия воды в $см^2$.

Между частицами имеются пустоты, площадь которых может быть оценена в 40—50% от площади пленки. Однако, учитывая,

что до 50% навески тонет вследствие недостаточно хорошего покрытия поверхности частиц стеарином, можно определять толщину частиц с достаточным приближением по формуле (155) без поправочных коэффициентов.

Частицы изоляционных порошков пронизаны многочисленными порами, имеющими размеры от десятков *мкм* до тысячных долей *мкм*. Диаметр таких пор определяют различными методами, из которых наиболее пригодны в данном случае методы, основанные на капиллярных эффектах.

Метод капиллярной конденсации дает возможность определять диаметр пор от 0,002 до 0,05 *мкм*. Он основан на взаимосвязи между радиусом кривизны вогнутого сферического мениска жидкости r и равновесным давлением пара над ним p (уравнение Томсона)

$$r = \frac{2\sigma v}{RT \ln \frac{p_s}{p}}, \qquad (156)$$

где σ — поверхностное натяжение жидкости;
v — ее молярный объем;
p_s — давление насыщенного пара при температуре опыта;
R — газовая постоянная.

Для расчетов по формуле (156) используют изотерму адсорбции пара какого-либо вещества (обычно воды или метилового спирта) на исследуемом материале.

Более точные результаты (см. рис. 29) получаются при расчетах с использованием десорбционной ветви изотермы. В этом случае множитель 2 в правой части уравнения (156) следует исключить.

Метод вдавливания ртути основан на явлении капиллярной депрессии и позволяет исследовать структуру материалов с размерами пор от тысячных долей *мкм* до десятков *мкм*. Не смачивающая твердое тело жидкость, в частности ртуть, может быть введена в его поры только под давлением, величина которого зависит от радиуса пор

$$p = -\frac{2\sigma \cos\theta}{r}, \qquad (157)$$

где θ — угол смачивания твердого тела жидкостью (для ртути в большинстве практических случаев $\theta = 140°$).

Приборы, применяемые для исследования структуры методом вдавливания ртути (ртутные поромеры), имеют довольно сложную конструкцию. Для исследования изоляционных материалов разработан упрощенный (рис. 77) прибор [23].

Прибор изготовлен из стали Х18Н9Т, все швы сварены аргоно-дуговой сваркой. Клапаны вентилей и ниппели разъемных соединений выполнены из стали 3Х13 и закалены.

Для загрузки образца и заливки в прибор ртути вентиль *1* отсоединяют от сосудов *2* и *3*. Сосуд *2* полностью загружают образцом, а сосуд *3* на $^2/_3$ заливают ртутью. Затем вентиль вновь соединяют с сосудами и прибор устанавливают в таком положении, чтобы сосуд *2* располагался горизонтально, а сосуд *3* вертикально. Вентили *1* и *4* открывают и оба сосуда откачивают в течение 15—20 *мин* до давления ниже 100 *н/м²*.

После откачки прибор устанавливают в положение, изображенное на рис. 77, затем постепенно впускают азот до заданного давления и выдерживают 15 *мин*.

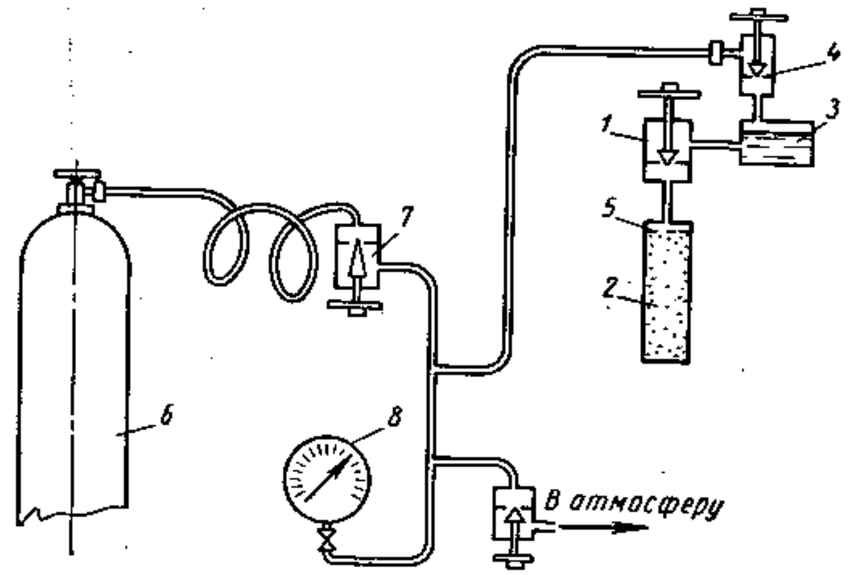


Рис. 77. Схема прибора для исследования структуры изоляционных материалов методом вдавливания ртути:
1, 4, 7 — вентили; *2* — сосуд с образцом; *3* — сосуд со ртутью; *5* — фильтр; *6* — баллон с азотом; *8* — манометр

Отсоединив вентилем *1* сосуд *2*, взвешивают его с вентилем на технических весах с точностью до 0,05 *г*. Для получения второй и следующих экспериментальных точек сосуд вновь присоединяют к системе и откачивают прибор при закрытом вентиле *1*, затем создают при помощи азота давление, большее, чем при предыдущем измерении, после чего открывают вентиль *1*. После 15 *мин* запирают вентиль *1*, отсоединяют от прибора сосуд *2* с вентилем и вновь взвешивают его.

Отдельными опытами определяют количество ртути, заполняющее соединительную трубку между сосудом *2* и вентилем *1*, и зазоры в резьбе корпуса вентиля до сальника, и вычитают это количество из общего количества ртути.

Метод определения объема пор взвешиванием более чувствительный, чем метод измерения уровня ртути по сопротивлению проволоки. Объем сосуда *2* равен 5,26 *см³*. Погрешности при

взвешивании вносят ошибку не более 0,07% от объема образца. Ошибка, связанная с неточностью определения количества ртути в соединительной трубке и вентиле *1*, может достигать 0,7—1,0%. Другие возможные погрешности в определении величины радиуса пор, присущие методу вдавливания ртути, не зависят от типа применяемого прибора и подробно рассмотрены в литературе.

Описанный прибор позволяет исследовать структуру пористых материалов с погрешностью не более 1—2%. Полученные с помощью этого прибора структурные кривые приведены на рис. 30 и 31.

Весьма важной характеристикой теплоизоляционных материалов является удельная поверхность. Она характеризует количество наиболее тонких пор, содержащихся в частицах изоляционного порошка и определяющих его эффективность. Экранирующая способность металлических порошков зависит, в первую очередь, от их удельной поверхности.

Наибольшее применение в практике нашли две группы методов: методы фильтрации газа и адсорбционные методы. Первая группа включает методы стационарной фильтрации газа при атмосферном давлении и разреженного газа, а также нестационарной фильтрации разреженного газа. Стационарная фильтрация позволяет исследовать лишь порошки, имеющие округлые частицы без тупиковых пор. Этих ограничений нет при нестационарной фильтрации, для которой приходится применять более сложное оборудование и большие порции порошка.

Адсорбционные методы позволяют точно измерять поверхность любых пористых материалов. Они основаны на определении количества a_m адсорбируемого вещества, необходимого для покрытия поверхности твердого тела мономолекулярным слоем. Обычно измеряют адсорбцию газов, в частности азота, при низких температурах. Широко распространен метод Брунауэра, Эммета и Теллера (БЭТ), в основе которого лежит предложенное авторами уравнение изотермы адсорбции в полимолекулярной области

$$\frac{p/p_s}{a\left(1-\frac{p}{p_s}\right)} = \frac{1}{a_m c} + \frac{(c-1)\,p/p_s}{a_m c}, \qquad (158)$$

где a — количество адсорбированного пара;

c — постоянная.

С помощью этого уравнения определяют из экспериментальных данных графически или аналитически величину a_m. Площадь поверхности вычисляют, умножая эту величину на известное значение площади, занимаемой 1 *см*³ газа в виде мономолекулярного слоя при температуре опыта. Молекулы азота, чаще всего использующегося при измерении удельной поверхно-

сти, имеют большой квадрупольный момент и поэтому располагаются на поверхностях, содержащих диполи и ионы, плотнее, чем на неполярных поверхностях [24]. 1 *см*³ азота занимает при 90° К площадь в 4,58 *м*² на полярных поверхностях (например, силикагель) и 3,87 *м*² — на неполярных поверхностях (например, уголь). Этого недостатка лишен ряд других газов с неполярными молекулами, из которых для измерения удельной поверхности рекомендуются аргон и криптон.

Одним из недостатков метода БЭТ, существенных при исследовании теплоизоляционных материалов, является трудность измерения малых площадей поверхности. Новый метод определения удельной поверхности [25], лишенный этого недостатка и использованный для исследования структуры теплоизоляционных материалов, основан на измерении адсорбции в мономолекулярной области. М. М. Дубинин и Л. В. Радушкевич предложили для изотермы адсорбции уравнение

$$\lg a = C - D\left(\lg \frac{p}{p_s}\right)^2, \qquad (159)$$

где C и D — постоянные.

В основу уравнения (159) положена функция типа Гаусса для распределения объема адсорбционного пространства W по адсорбционным потенциалам ε

$$W = W_0 e^{-k\varepsilon^2}, \qquad (160)$$

где W_0 — полный объем адсорбционного пространства.

В области мономолекулярной адсорбции уравнение (160) должно быть заменено на

$$\theta = \frac{a}{a_m} = e^{-k\varepsilon^2}, \qquad (161)$$

откуда можно найти

$$\lg\theta = \lg\frac{a}{a_m} = -D\left(\lg\frac{p}{p_s}\right)^2. \qquad (162)$$

Метод определения удельной поверхности, основанный на уравнении (162), состоит в измерении адсорбции в трех-четырех точках при $p/p_s = 10^{-4} \div 10^{-2}$ (для азота давление от 0,3 до 30 *мм рт. ст.* при 90° К), нанесении опытных точек в координатах $\lg a - \left(\lg\frac{p}{p_s}\right)^2$ и экстраполировании полученной прямой линии к оси ординат. Ордината точки пересечения прямой с осью дает значение объема газа a_m, адсорбированного к мономолекулярном слое.

Значения поверхности, полученные описанным методом, согласуются с величинами, найденными по методу БЭТ, со средней точностью ±2%. Определение удельной поверхности по уравнению (162) с использованием других газов, помимо N_2,

в частности, Ar, Kr, Xe и O_2, дает согласующиеся результаты [24].

Описанным методом [57] определена удельная поверхность силикагеля по измерениям в интервале давлений 10^{-6} — 1 *н/м*^{2} со следующими газами: CO, N_2, O_2, CH_4, H_2, Kr, Xe. Согласование полученных значений тем хуже, чем ниже верхний предел относительного давления, достигнутого в опытах. Значения поверхности по данным для Kr и Xe (верхний предел $p/p_s \approx 10^{-3}$) согласуются с точностью 5%, значения для O_2, CH_4 и H_2 (верхний предел $p/p_s \approx 10^{-5}$) дают расхождения около 30% и, наконец, значения по данным для CO и N_2 (верхний предел $p/p_s \approx 10^{-6}$) превышают остальные в 3—4 раза. Авторы указанной работы пришли к ошибочному заключению, что метод дает ненадежные результаты. В действительности, новый метод дал хорошие результаты при использовании его в указанных выше пределах его применимости ($p/p_s \approx 10^{-4} \div 10^{-2}$) и привел, как и следовало ожидать, к ошибочным значениям при использовании его вне этих пределов.

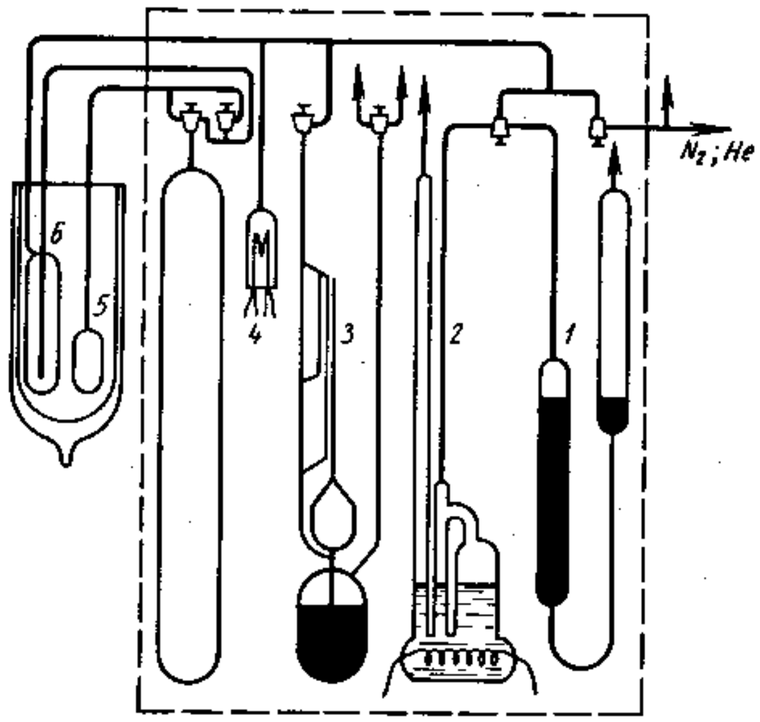


Рис. 78. Схема установки для определения удельной поверхности пористых материалов методом адсорбции газов.

Схема адсорбционной установки для измерения удельной поверхности описанным методом приведена на рис. 78. Установка состоит, в основном, из калиброванных объемов, манометров *1* — *4* и ампулы *5* с испытываемым образцом материала. Измерение заключается в заготовке порции азота в калиброванном объеме, впуске ее в ампулу с образцом и измерении равновесного давления после адсорбции азота образцом. Зная начальное и конечное давление и объемы частей установки, можно вычислить количество азота, адсорбированного испытываемым материалом. Порции азота заготовляют большей частью в объеме, включающем манометры *1* и *2* и ловушку *6*. Обведенная пунктиром часть установки заключена в воздушный термостат, что обеспечивает требуемую точность определения количества азота.

Важное преимущество нового метода перед методом БЭТ заключается в упрощении экспериментальной методики. Измерения при сравнительно низких давлениях дают возможность использовать трубки большего диаметра. «Мертвый» объем становится в большинстве случаев пренебрежимо малой величиной вследствие небольшого количества газа, остающегося в системе при равновесном давлении адсорбции. Это позволяет легко определять сравнительно небольшие величины поверхности материалов, применяемых для теплоизоляции.

Новый метод применим в широких пределах давлений; отношение верхнего и нижнего пределов превышает 100, достигая в большинстве случаев нескольких тысяч, тогда как при методе БЭТ это отношение составляет приблизительно 7. Поэтому в первом случае значительно легче подобрать условия эксперимента для получения точек изотермы в требуемой области относительных движений.

ГЛАВА VIII

«Тепловые мосты» в изоляционных устройствах

Изоляционное пространство пересекается, как правило, конструктивными элементами, по которым дополнительно передается тепло от теплой граничной поверхности к холодной. К этим элементам, получившим название «тепловых мостов», относятся опоры и подвески, крепящие внутреннюю оболочку относительно наружной, и трубопроводы, сообщающие аппаратуру с окружающей средой.

По мере повышения эффективности изоляции доля теплопритока по тепловым мостам возрастает, достигая в сосудах для сжиженных газов 50% и более от полного теплопритока. Поэтому в настоящее время создание эффективных изоляционных устройств невозможно без разработки конструкций и способов, уменьшающих теплоприток по «тепловым мостам». Поскольку высокоэффективные виды изоляции используются, в основном, в сосудах для сжиженных газов, то ниже рассмотрены «тепловые мосты», применяемые в этих сосудах.

Подвески

Подвески сосудов для сжиженных газов выполняются в виде стержней, тросов или цепей. Они крепятся к кожуху и внутреннему сосуду шарнирно и работают на растяжение. Основными путями увеличения теплового сопротивления подвесок являются применение материалов с меньшим коэффициентом теплопроводности, уменьшение площади поперечного сечения и увеличение длины.

Подвески изготовляют большей частью из стали Х18Н10Т, имеющей сравнительно низкий коэффициент теплопроводности, равный 12 *вт/(м·град)* при 190° К, и высокую прочность. Резкое уменьшение теплопроводности может быть достигнуто при переходе на применение подвесок из неметаллических материалов. Наилучшими в данном случае будут материалы с максимальным отношением $k = \sigma/\lambda$, где σ — допускаемое напряжение и λ — коэффициент теплопроводности при 190° К.

Если принять величину k_0 для стали Х18Н10Т за единицу, то для неметаллических материалов $k' = k/k_0$ будет больше единицы. Эта величина равна 2,5 у фторопласта-4, близка к 5 у текстолита и достигает 10—20 для стекловолокнита АГ-4С.

Уменьшение площади поперечного сечения подвески может быть достигнуто за счет повышения прочности стали Х18Н10Т путем специальной обработки. Конструкция с использованием такого способа предложена в работе [137]. Внутренний сосуд подвешивается на большом количестве стержней малого диаметра, закрепленных на концах гайками с предварительным натягом. Предварительное натяжение обеспечивает высокую жесткость системы, которая обычно достигается применением массивных подвесок. Стержни подвертаются упрочнению (прокатке или протяжке). Такая система подвески позволяет уменьшить потери от испарения за счет притока тепла по подвескам до 0,007% в сутки.

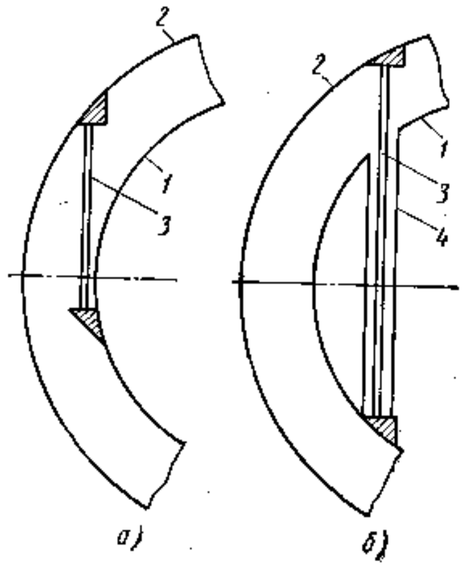


Рис. 79. Схемы крепления обычных (*а*) и удлиненных (*б*) вертикальных подвесок сосудов для сжиженных газов:
1 — внутренний сосуд; *2* — кожух; *3* — подвеска; *4* — изолирующая труба

Подвески делают возможно более длинными, желательно не менее 1 *м* в крупных резервуарах. Увеличение длины не представляет проблемы для продольных подвесок в цилиндрических сосудах для сжиженных газов. Труднее размещать радиальные подвески, служащие для поддержания концентричности оболочек. Для увеличения длины их обычно располагают в направлении касательной к стенке внутреннего сосуда (рис. 79, *а*). Эффективный способ размещения подвесок состоит в удлинении их внутрь сосуда (рис. 79, *б*). Подвеска заключена в трубу, образующую вакуумный зазор между подвеской и внутренним сосудом. Применение такой конструкции в горизонтальных цилиндрических сосудах большой емкости позволяет увеличить длину вертикальных подвесок, воспринимающих нагрузку, в 2—3 раза. Одновременно исключается приток тепла к подвескам излучением от наружного кожуха. Описанная конструкция использована, в частности, в железнодорожной цистерне для жидкого водорода [92].

Другой способ уменьшения притока тепла по подвеске состоит в охлаждении ее выходящим из сосуда паром. Примером может служить горловина небольшого сосуда.

В некоторых конструкциях сосудов для сжиженных газов используют подвески в виде цепей. Для вычисления теплового потока по цепной подвеске необходимо знать тепловое сопротивление контакта между звеньями цепи. В области контакта звенья могут рассматриваться как перекрещивающиеся цилиндры. Радиус a контактной площадки в этом случае определяется по формуле (49). Для цепей из нержавеющей стали находим

$$a = 0{,}0177 d p^{1/3}, \qquad (163)$$

где d — диаметр прутка, из которого изготовлена цепь;

p — удельная нагрузка на цепь в $Мн/м^2$.

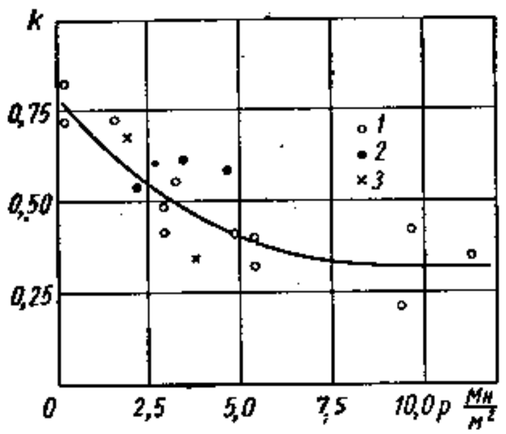


Рис. 80. Зависимость теплового сопротивления контакта между звеньями цепной подвески от удельной силы растяжения:
1 — сталь Х18Н9Т, пруток $d = 8$ *мм*; *2* — сталь Х18Н9Т, $d = 12$ *мм*; *3* — латунь Л62, $d = 7{,}2$ *мм*

Тепловое сопротивление области контакта между двумя полуограниченными телами определяется формулой (45). Тепловое сопротивление контакта между телами ограниченных размеров может быть определено по формуле

$$R_к = \frac{k}{2a\lambda},$$

где k — коэффициент, зависящий от формы контактирующих тел и отношения их размеров к радиусу контактного пятна. Величина k в частном случае полуограниченного тела с короткой областью стягивания в соответствии с формулой (43) равна $\frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{b}{a}$.

Полное тепловое сопротивление цепной подвески $R_ц$ равно сумме тепловых сопротивлений звеньев цепи $R_{зв}$ и контактов между ними $R_к$

$$R_ц = nR_{зв} + (n+1) R_к \approx \frac{n}{\lambda d}\left(\frac{l_т}{1{,}57d} + \frac{28{,}2k}{p^{1/3}}\right), \qquad (164)$$

где n — число звеньев;

$l_т$ — тепловая длина звена (развернутая длина половины звена).

Коэффициент k может быть найден из опытных данных по тепловому сопротивлению цепных подвесок. Он должен зависеть от отношения d/a или в соответствии с (163) должен быть функцией удельной нагрузки на цепь. На рис. 80 приведены значения k, вычисленные на основе опытных данных по тепловому сопротивлению цепных подвесок. В случае контактов между звеньями цепи величина k меньше 1 и уменьшается по мере увеличения p, соответствующего уменьшению d/a.

При нагрузках до 10 $Мн/м^2$ тепловое сопротивление контактов составляет значительную часть (до 50% и более) от полного сопротивления цепи.

Расчет может производиться по формуле (164) с использованием рис. 80. На практике нагрузки на подвески из стали Х18Н10Т достигают 100—200 $Мн/м^2$ (1000—2000 $кГ/см^2$). При таких нагрузках сопротивление контактов не должно превышать 30% от общего сопротивления цепи. В результате $R_ц$ может оказаться даже меньше, чем сопротивление равнопрочного стержня, который имеет меньшую площадь поперечного сечения. Поэтому для подвесок, предназначенных воспринимать большие постоянные нагрузки, применение цепей нецелесообразно.

Опоры

В транспортных сосудах для сжиженных газов наряду с подвесками применяют опоры, работающие на сжатие. Это позволяет сравнительно просто закрепить внутренний сосуд в кожухе, исключив возможность перемещений при транспортировке. Опоры имеют меньшую длину и большее поперечное сечение. Для обеспечения малой величины теплового потока их выполняют, как правило, из неметаллических материалов, например из текстолита.

Лучшими материалами являются стекловолокнистые пластики. Наилучшие результаты получены для материала СВАМ, обладающего высокой прочностью и низким коэффициентом теплопроводности.

Дальнейшее усовершенствование опор может быть достигнуто путем увеличения контактного теплового сопротивления. Тепловое сопротивление контакта между двумя поверхностями обычно мало, однако, многократные последовательно расположенные контакты могут создать большое тепловое сопротивление. Это дало основание предложить [39] в качестве опор для сосудов сжиженных газов стопки пластин из нержавеющей стали.

Фактическая площадь контакта $S_ф$ между поверхностями двух тел, образующаяся в результате смятия выступов микронеровностей поверхностей, составляет незначительную часть номинальной площади $S_н$.

Относительная площадь контакта $\eta = \frac{S_ф}{S_н}$ определяется в значительной степени микрогеометрией контактирующих поверхностей.

Формула для определения площади касания имеет следующий вид:

$$\eta = \frac{p}{c\sigma_т} + Kp^n, \qquad (165)$$

где p — удельная нагрузка;
$\sigma_т$ — предел текучести;
c — постоянная ($c \approx 3$);
K и n — постоянные, характеризующие материал и состояние поверхности.

Большей частью $n = 0{,}7 \div 0{,}8$.

Первый член правой части уравнения (165) характеризует пластически деформированные контакты, а второй член — контакты с упругой деформацией.

Тепло между соприкасающимися поверхностями переносится проводимостью по твердому телу в контактных пятнах и проводимостью газовой прослойки на остальной площади поверхности. Вторым видом переноса тепла в условиях вакуума можно пренебречь. Тепловое сопротивление одного контактного пятна определяется формулой (45). Предположив, что контактные пятна представляют собой круглые площадки, которые достаточно удалены друг от друга и действуют, как параллельно включенные сопротивления, Ю. П. Шлыков и Е. А. Ганин [68] получили на основе формулы [45] следующее выражение для теплового сопротивления контакта между двумя поверхностями:

$$R_м = \frac{\pi a}{2\eta\lambda}.$$

Для поверхностей не выше 8—9-го классов чистоты контакт в первом приближении можно считать пластическим и принять, что η определяется первым членом в уравнении (165). При этом авторы приняли, что предел текучести предельно наклепанного металла равен пределу прочности $\sigma_в$, а радиус контактного пятна равен 30 *мкм* независимо от класса чистоты поверхности и нагрузки. В результате

$$R_м = \frac{3\sigma_в}{2{,}1p\lambda} \cdot 10^{-4}. \qquad (166)$$

На практике тепловое сопротивление контакта между двумя поверхностями обратно пропорционально удельной нагрузке в степени около 0,7 и зависит от шероховатости (понижается с повышением класса чистоты).

Полное тепловое сопротивление контакта складывается из тепловых сопротивлений твердого тела в контактных пятнах и газа в зазоре

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_м} + \frac{1}{R_г}.$$

Тепловое сопротивление слоя газа равно

$$R_г = \frac{\delta_{экв}}{\lambda_г},$$

где $\delta_{экв}$ — эквивалентная толщина слоя.

Величина $\delta_{экв}$ может быть вычислена из данных по микрогеометрии поверхности. Ее можно также определить по разности тепловых сопротивлений контакта при высоком вакууме и

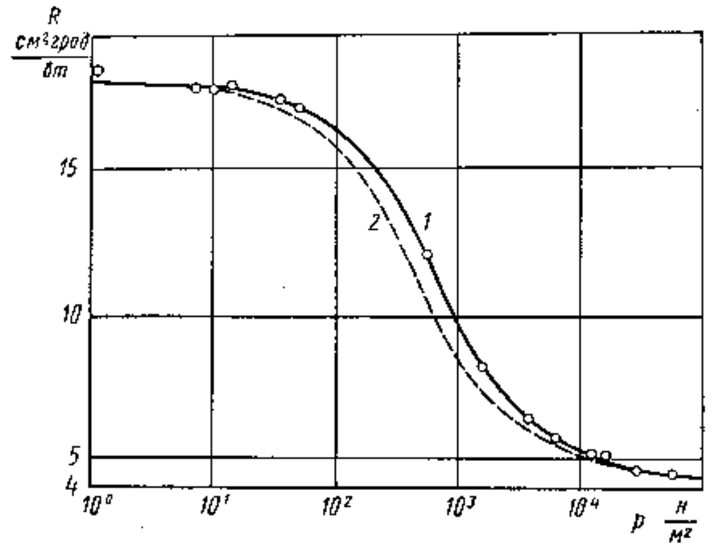


Рис. 81. Зависимость теплового сопротивления контакта между двумя поверхностями (сталь Х18Н9Т) от давления воздуха:
1 — опытные данные [68]; *2* — по уравнению [167]

атмосферном давлении. Для зависимости $R_г$ от степени вакуума можно с помощью уравнения (13) получить следующее выражение:

$$R_г = \frac{\delta_{экв} + 2\beta L}{\lambda_г}. \qquad (167)$$

На рис. 81 экспериментальные данные [68] сопоставлены с вычисленными по формуле (167). Коэффициент аккомодации принят равным 0,8. Величина $\delta_{экв} = 21$ *мкм*, вычисленная по разности значений R при 1 и $1 \cdot 10^5$ *н/м²*, близка к удвоенному значению средней высоты микронеровностей, равному 23,4 *мкм*. Согласование экспериментальных данных с формулой (167)

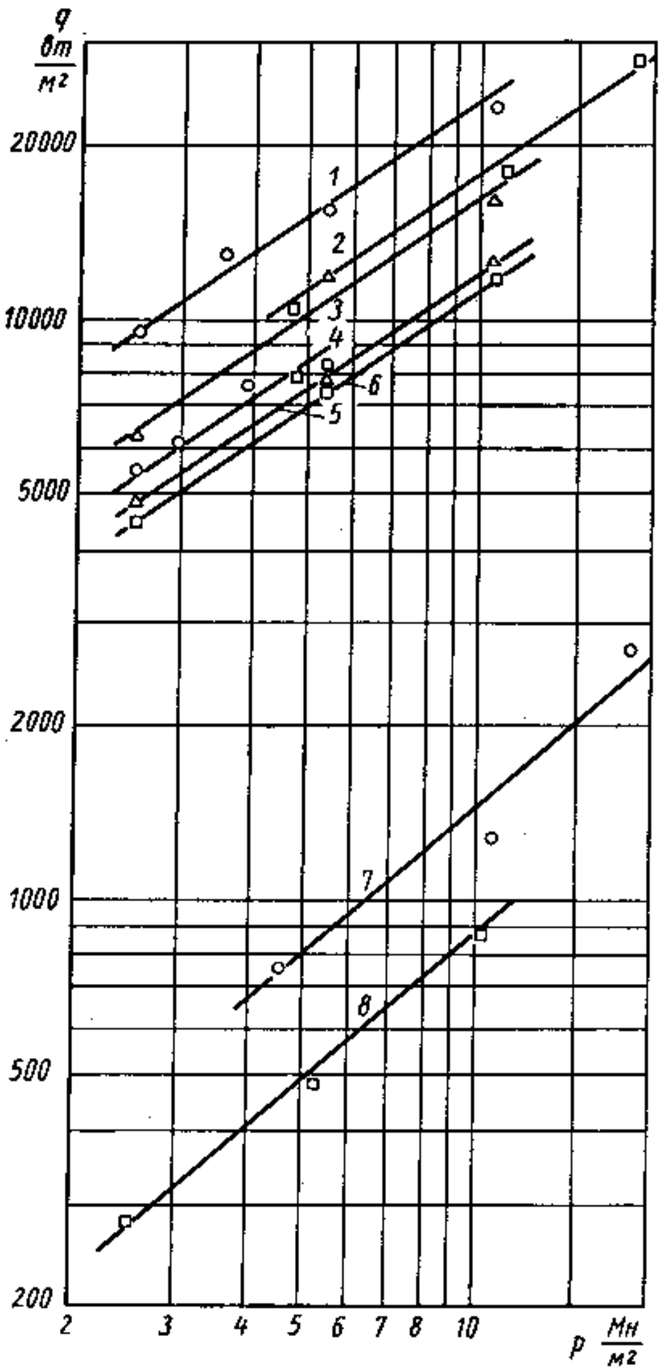


Рис. 82. Зависимость удельного теплового потока через опоры в виде стопок пластин из нержавеющей стали от давления на опору:

Параметр	Кривые							
	1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*
Количество пластин	148	92	209	52	49	313	92	315
Толщина пластины в *мм*	0,02	0,10	0,02	0,43	0,50	0,02	0,10	0,02
Граничные температуры в °К	296 и 76	296 и 76	296 и 76	296 и 76	296 и 76	296 и 76	76 и 20	76 и 20

вполне удовлетворительное. Благодаря малым величинам зазоров между контактными поверхностями перенос тепла проводимостью газа практически не влияет на тепловое сопротивление контакта уже при давлениях ниже 10 *н/м²*.

В работе [39] исследован перенос тепла через стопки пластин из нержавеющей стали типа Х18Н10Т. Согласно опытным данным (рис. 82) кажущийся коэффициент теплопроводности стопки из пластин толщиной 0,10 *мм* при нагрузке 10 *Мн/м²* приблизительно в 30 раз меньше теплопроводности сплошного металла. Тепловой поток через стопку пластин пропорционален

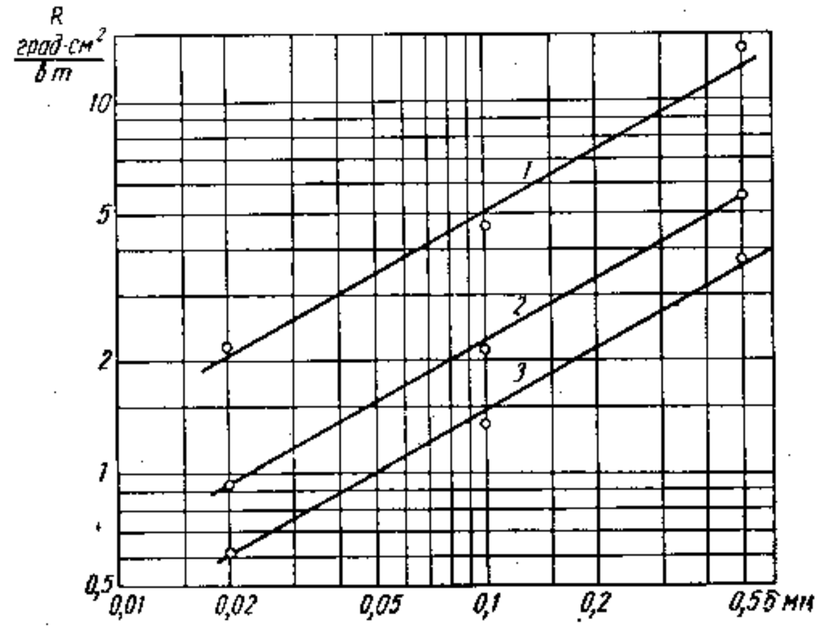


Рис. 83. Зависимость теплового сопротивления контакта между пластинами от их толщины (граничные температуры 296 и 76° К):

1 — при нагрузке 1,4 *Мн/м²*; *2* — при 5,2 *Мн/м²*; *3* — при 9,1 *Мн/м²*

нагрузке в степени 0,67 при граничных температурах 296 и 76° К и в степени 0,86 при граничных температурах 76 и 20° К. Эти значения показателя степени хорошо согласуются с данными для единичных контактов.

Тепловое сопротивление контакта между двумя пластинами снижается [39] по мере уменьшения их толщины (рис. 83). Причиной этого снижения является, по-видимому, повышение степени чистоты поверхности, получаемой при изготовлении листового материала, по мере уменьшения его толщины.

Тепловое сопротивление может быть дополнительно повышено в несколько раз путем покрытия поверхности пластин слоем порошкообразного материала, например порошка двуокиси марганца. Тем не менее опоры в виде стопок пластин из

нержавеющей стали не имеют существенных преимуществ перед сплошными опорами из полимерных материалов, коэффициент теплопроводности которых примерно в 50 раз ниже, чем у стали. Дальнейшее уменьшение теплового потока может быть достигнуто применением стопок пластин из полимерных материалов.

Другой способ увеличения контактного теплового сопротивления состоит в применении опор, имеющих точечный контакт с граничными стенками. В технической и патентной литературе предложено несколько конструкций таких опор. При нагружении опоры в точке

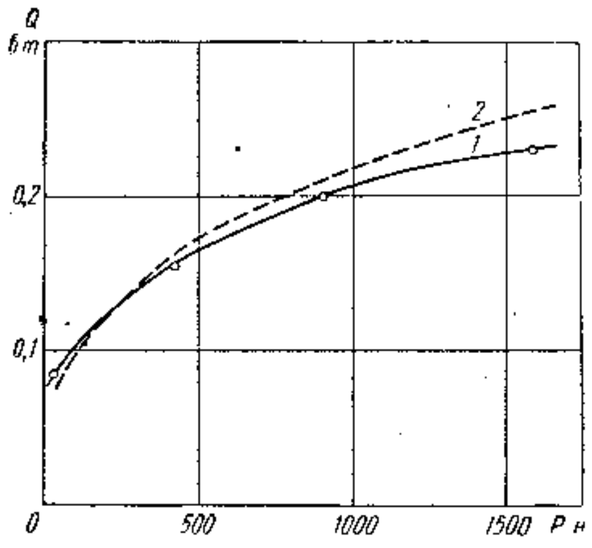


Рис. 84. Зависимость теплового потока через опору в виде шара из стекла пирекс диаметром 9,5 *мм* от силы сжатия опоры (граничные температуры 296 и 76° К):

1 — опытные данные [40]; *2* — по уравнению (45)

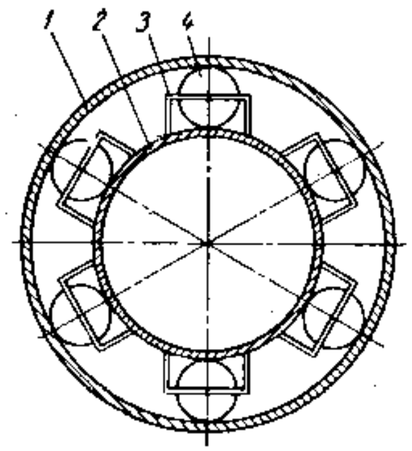


Рис. 85. Схема опоры трубопровода для сжиженного газа:

1 — кожух; *2* — внутренняя труба; *3* — фиксатор шарика; *4* — керамический шарик

касания ее со стенкой образуется контактное пятно. Расчет теплопередачи сводится, в основном, к определению площади контактного пятна и его теплового сопротивления. Размеры контактного пятна могут быть определены приближенно по формулам Герца.

Рассмотрим опору в виде шара. В случае контакта шара с плоскостью радиус контактного пятна равен

$$a = \sqrt[3]{\frac{3}{4}\left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}\right) Pd}. \qquad (168)$$

Индексы 1 и 2 относятся к шару и плоскости.

Как было показано в гл. I, тепловое сопротивление шара с двумя контактными пятнами может быть при $d/a \gg 10$ с удовлетворительным приближением вычислено по формуле (45).

Результаты испытаний опор в виде неметаллических шариков были описаны в работе [39]. Для шарика из стекла пирекс, опирающегося на стальную плиту (рис. 84), вычисленные значения удовлетворительно согласуются с измеренными.

Тепловой поток через опору в виде цилиндрика из стекловолокнистого пластика с диаметром и высотой, равными диаметру шарика (10 *мм*), превышает 0,5 *вт*. Таким образом, применение шаровых опор может дать снижение теплопритока и целесообразно в некоторых случаях. Пример такой опоры [70] показан на рис. 85.

Трубы

Приток тепла по трубам, пересекающим изоляционное пространство, определяют по обычной формуле переноса тепла теплопроводностью. При этом предполагается, что побочный теплообмен между стенками трубы и окружающей средой внутри и снаружи трубы отсутствует.

С целью уменьшения теплопритока трубы в ряде случаев значительно удлиняют, располагая их в изоляционном пространстве параллельно граничным стенкам. При этом в сосудах с обычной и вакуумно-порошковой изоляцией значительный участок трубы с большой разностью температур на концах располагается в области с приблизительно постоянной температурой изоляционного материала. В результате возникает побочный тепловой поток, приводящий к увеличению притока тепла к холодной граничной стенке по сравнению с вычисленным по обычным формулам. Н. В. Крылов решил в общем виде задачу теплообмена изоляции с пересекающим ее конструктивным элементом. Решение довольно сложно и должно использоваться в тех случаях, где приближенные методы приводят к значительным ошибкам в расчетах.

Другим случаем побочного теплообмена является теплообмен в трубе, через которую выходит в атмосферу пар низкотемпературной жидкости. Типичным примером может служить горловина шаровых сосудов Дьюара. Тепловой поток по трубе, через которую выходит пар, был рассчитан при трех допущениях: 1) разность температур между стенкой трубы и газом, проходящим вдоль нее, одинакова в любом сечении по длине трубы; 2) теплообмен между наружной стенкой трубы и окружающей средой отсутствует; 3) коэффициент теплопроводности материала трубы линейно зависит от температуры.

Решение [50] имеет следующий вид:

$$\frac{mc_p l}{F} = a\Delta T + \left(\lambda_0 - q\frac{a}{mc_p}\right)\ln\frac{q + mc_p\Delta T}{q}, \qquad (169)$$

где m — массовый расход пара;

q — количество тепла, притекающего по трубе к жидкости;
λ_0 — коэффициент теплопроводности материала трубы при температуре холодного конца;
a — температурный коэффициент теплопроводности.

Хогг ранее получил более простое уравнение, приняв, что теплопроводность не зависит от температуры

$$q = \frac{mc_p \Delta T}{e^{\frac{mc_p l}{\lambda F}} - 1}. \qquad (170)$$

Экспериментальное исследование [26] показало, что действительный приток тепла по горловине превышает вычисленный

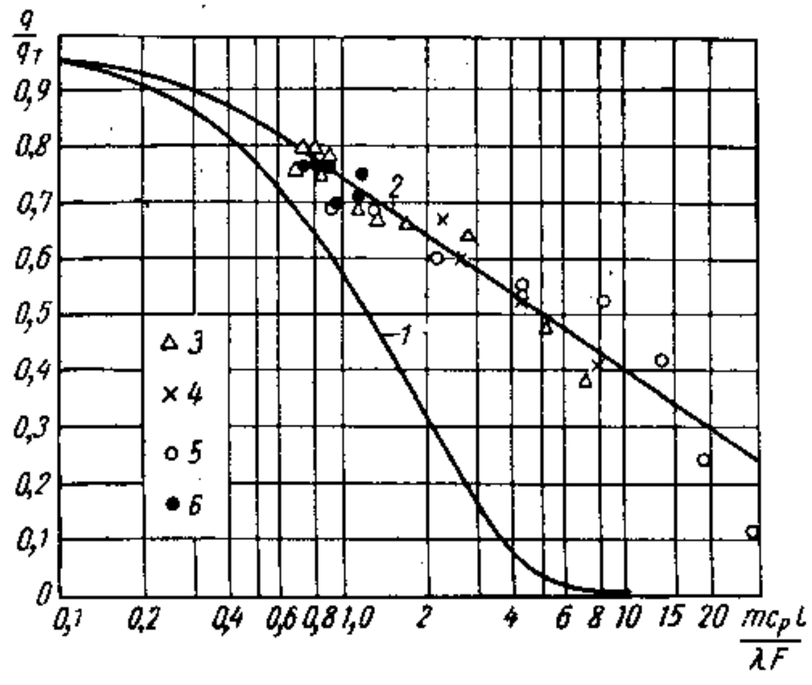


Рис. 86. Зависимость $\frac{q}{q_т}$ от комплекса $\frac{mc_p l}{\lambda F}$ для горловины, омываемой испаряющимся кислородом:
1 — по уравнению (170); *2* — опытные данные [26]; *3* — медь; *4* — мельхиор; *5* — сталь Х18Н9Т; *6* — латунь Л62

по уравнению (170). Опытные данные могут быть представлены в критериальной форме

$$\frac{q}{q_т} = f\left(\frac{mc_p l}{\lambda F}\right),$$

где $q_т$ — величина теплового потока по горловине, вычисленная по уравнению (1).

Точки, соответствующие экспериментальным данным, нанесены на рис. 86. Расхождение между ними и уравнением (170)

составляет 15—30% при величине безразмерного комплекса $\frac{mc_p l}{\lambda F} < 1$, а затем быстро возрастает. Опыты приведены на кислороде при диаметре трубки 14—18 *мм* и ламинарном потоке с коэффициентом теплообмена $\alpha \approx 4$ *вт*/(*м*² · *град*).

При повышении α, например, в случае турбулентного потока по трубе при повышенных потерях от испарения или в случае сосудов с жидким водородом и гелием, будет, по-видимому, иметь место другая зависимость, приближающаяся в большей мере к уравнениям (169) и (170).

При больших значениях комплекса $\frac{mc_p l}{\lambda F}$ величина $\frac{q}{q_т}$ снижается до 0,3 и менее. Следовательно, приток тепла вдоль трубы (или другого конструктивного элемента), охлаждаемой паром, в этом случае будет в несколько раз меньше, чем при неохлаждаемой паром трубе. Холод выходящего газа может быть использован для уменьшения притока тепла по тепловым мостам в сосудах для сжиженных газов. Это можно осуществить, пропуская внутри трубы газосброса другие трубы, выходящие из внутреннего сосуда, или соединяя их с трубой газосброса в средней части медными перемычками. Последний способ пригоден и для отвода части тепла, притекающего по опорам и подвескам сосуда.

Эффект, получаемый при использовании холода выходящего газа, может быть продемонстрирован на примере сосудов Дьюара для жидкого кислорода и гелия. В сосуде СД-15 на 15 *дм*³ жидкого кислорода приблизительно $^1/_3$ общего количества тепла притекает к внутреннему сосуду по горловине. При этом испаряющийся кислород отводит около половины тепла, идущего по горловине, существенно снижая таким образом потери жидкого кислорода.

В сосуде СД-10Г на 10 *дм*³ жидкого гелия испаряется около 0,1 *дм*³ жидкости в сутки. Если принять, что все тепло передается внутреннему сосуду только излучением от экрана, охлаждаемого жидким азотом, то степень черноты поверхностей, обращенных в вакуумное пространство, должна составить 0,02. Эта величина приближается к значениям, полученным для полированной меди (см. табл. 3). Тепловой поток по горловине сосуда при отсутствии теплообмена с паром составил бы примерно 0,05 *вт*, или в 15 раз больше общего теплопритока к жидкому гелию. Действительный теплоприток по горловине должен быть, по крайней мере, меньше общего теплопритока, следовательно, пар должен отводить не менее 93% идущего по горловине тепла. Таким образом, в данном случае, несмотря на наличие экрана, охлаждаемого жидким азотом, невозможно обеспечить низкий уровень потерь без использования холода выходящего пара.

ГЛАВА IX

Расчеты и испытания теплоизоляционных устройств

Расчет теппового потока через изоляцию при стационарном режиме

Поток тепла через изоляцию в теплотехнических устройствах определяется по обычным формулам переноса тепла теплопроводностью. Как было показано в гл. IV и V, тепловой поток через вакуумно-порошковую и вакуумно-многослойную изоляцию также можно с достаточным приближением определять по этим формулам, основанным на законе Фурье для одномерных систем

$$dQ = -\lambda\, dF\, \frac{dT}{dx}, \qquad (171)$$

где dF — элемент поперечного сечения проводника тепла, перпендикулярного к направлению теплового потока;

$\frac{dT}{dx}$ — градиент температуры в направлении теплового потока.

Интегрирование уравнения (171) для плоского слоя дает

$$Q = \frac{\lambda F\, \Delta T}{\delta}. \qquad (172)$$

Вследствие простоты уравнение (172) часто применяют и тогда, когда площадь поперечного сечения слоя изоляции не является постоянной величиной. В этих случаях используют усредненное эффективное значение площади $F_{ср}$.

Для шарового слоя

$$F_{ср} = F_{вн}\sqrt{\frac{F_{нар}}{F_{вн}}} = \sqrt{F_{вн}F_{нар}}, \qquad (173)$$

где $F_{вн}$ и $F_{нар}$ — площади поверхности внутренней и наружной граничных стенок.

Выражение (173) может быть использовано для вычисления в большинстве практических случаев. При $\frac{F_{нар}}{F_{вн}} \leqslant 2$ эта формула дает достаточно надежные для технических расчетов значения, а при условии $\frac{F_{нар}}{F_{вн}} \leqslant 1{,}5$, которое обычно имеет место для низкотемпературной изоляции, формула (173) дает значения, практически совпадающие с найденными из математически точных выражений. В частности, для цилиндрической поверхности формула (172) в сочетании с формулой (173) при $\frac{F_{нар}}{F_{вн}} = \frac{r_{нар}}{r_{вн}} \leqslant 2$ дает ошибку не более 2%, а при $\frac{r_{нар}}{r_{вн}} \leqslant 1{,}5$ погрешность не превышает 1%.

В случаях полого шара и трубы толщина слоя постоянна по всей поверхности. Положение значительно усложняется при переменной толщине изоляции. В литературе иногда определяют среднюю толщину изоляции по формуле

$$\delta_{ср} = \frac{\Sigma\delta F_{ср.\delta}}{\Sigma F_{ср.\delta}} = \frac{\delta_1\sqrt{F_{вн_1}F_{нар_1}} + \delta_2\sqrt{F_{вн_2}F_{нар_2}} + \cdots}{\sqrt{F_{вн_1}F_{нар_1}} + \sqrt{F_{вн_2}F_{нар_2}} + \cdots}. \qquad (174)$$

Числитель в уравнении (174) равен объему изоляции. Вычисленная по этой формуле величина представляет собой среднюю геометрическую толщину изоляции.

Для правильного определения потока тепла и нахождения сравнимых значений коэффициента теплопроводности необходимо вычислять среднюю эффективную толщину изоляции следующим образом. Проводимость участков с различной толщиной слоя равна

$$\frac{Q_1}{\Delta T} = \frac{\lambda F_{ср_1}}{\delta_1},$$

$$\frac{Q_2}{\Delta T} = \frac{\lambda F_{ср_2}}{\delta_2},$$

. . . . . .

. . . . . .

Проводимость тепла через всю изоляцию со средней поверхностью $F_{ср}$ и средней эффективной толщиной $\delta_{ср}$ равна сумме проводимостей участков

$$\frac{Q}{\Delta T} = \frac{\lambda F_{ср}}{\delta_{ср}} = \lambda\sum_{i=1}^{n}\frac{F_{ср_i}}{\delta_i},$$

откуда

$$\delta_{ср} = \frac{F_{ср}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{F_{ср_i}}{\delta_i}}. \qquad (175)$$

Средняя эффективная толщина изоляции, вычисленная по формуле (175), всегда меньше средней геометрической толщины, вычисленной по формуле (174). Ошибка может достигать большой величины, что можно показать на следующем примере. Предположим, что изоляция состоит из двух участков с одинаковой площадью поверхности, один из которых имеет толщину 1 *см*, а второй — 10 *см*. Вычисление по формуле (174) дает значение средней толщины 5,5 *см*, а по формуле (175) — 1,8 *см*, или в 3,3 раза меньше. Отношение двух вычисленных значений характеризует эффективность использования изоляции в данной конструкции. Чем ближе это отношение к 1, тем выше эффективность.

Наружный кожух вакуумируемого изоляционного объема снабжают большей частью ребрами жесткости для обеспечения устойчивости от смятия атмосферным давлением. Наличие ребер в изоляции увеличивает тепловой поток через нее. Кажущийся коэффициент теплопроводности слоя изоляции толщиной δ с пересекающими изоляционное пространство металлическими ребрами толщиной b и высотой h может быть вычислено [10] по формуле

$$\lambda_{каж} = \lambda_{из}\left(\frac{b\delta}{s(\delta - h)} + \frac{4\delta}{\pi s}\ln\frac{\delta}{\delta - h} + \frac{s - b - \frac{4h}{\pi}}{s}\right), \qquad (176)$$

где s — шаг ребер (или длина участка, включающего ребро).

Толщина изоляции часто определяется условиями производственного процесса, например заданным тепловым потоком через нее (потерями тепла или холода), заданной температурой стенки наружного кожуха, заданным падением или повышением температуры газа, транспортируемого по трубопроводу. Если никаких специальных требований к изоляции не предъявляется, то ее толщину обычно определяют на основе технико-экономических расчетов.

Годовые эксплуатационные расходы при данной толщине изоляции слагаются из годовой стоимости тепловых потерь и годовых отчислений от капитальных затрат на изоляцию. Экономически наивыгоднейшей толщине изоляции будет соответствовать минимум годовых эксплуатационных расходов. Формула для ее определения в случае плоского слоя имеет следующий вид:

$$\delta_{из.эк} = \sqrt{\frac{bz\lambda_{из}\Delta T}{pS_{из}}}, \qquad (177)$$

где b — стоимость единицы тепла (или холода);
z — годовое количество часов работы;
p — доля годовых отчислений от капитальных затрат;
$S_{из}$ — стоимость единицы объема изоляции;
ΔT — разность температур.

Более точные результаты дает подстановка в формулу (177) вместо p величины $\left(p + \frac{1}{T'}\right)$, где T' — нормативный срок окупаемости основного оборудования. Согласно методике Теплопроекта $p + \frac{1}{T'} = 0{,}28$.

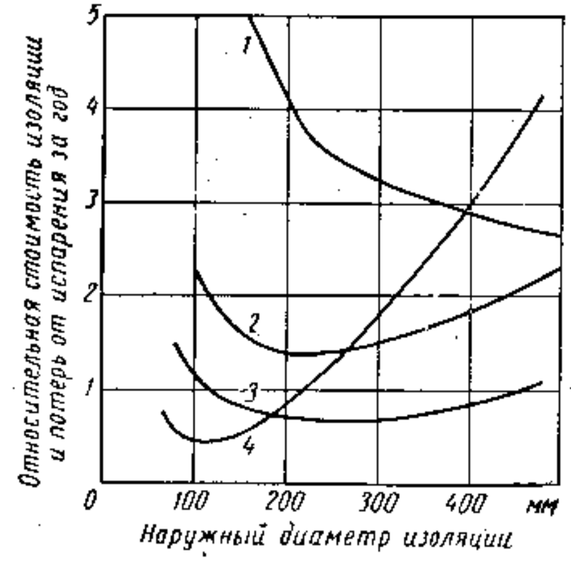


Рис. 87. График для определения оптимальной толщины вакуумированной изоляции трубопроводов жидкого водорода (внутренний диаметр 51 *мм*):
1 — перлит; *2* — изоляция CS-5; *3* — изоляция SI-12; *4* — изоляция SI-4

Расчет по формуле (177) экономически наивыгоднейшей толщины вакуумно-порошковой изоляции из перлита для сосудов с жидким кислородом дает значение примерно 500 *мм*. При этом не учитывается повышение стоимости изоляции из-за увеличения габаритов кожуха.

У тел с большой кривизной поверхности, например труб, одновременно с увеличением толщины изоляции возрастает и средняя площадь поверхности. Тепловой поток через изоляцию в этом случае изменяется с толщиной медленнее, чем при плоском слое, что приводит к уменьшению оптимальной толщины изоляции. В качестве примера на рис. 87 показаны зависимости, полученные при расчетах для трубопроводов жидкого водорода [104].

При конструировании цистерн для сжиженных газов часто выдвигается дополнительное требование уложиться в определенные габариты. Увеличение толщины изоляции приводит наряду с уменьшением притока тепла к снижению вместимости цистерны. При некоторой толщине достигается минимальная величина относительных потерь жидкости от испарения. Эту толщину Я. С. Кан вычислил следующим образом.

В случае длинного цилиндра

$$Q = \Delta M r = \frac{2\pi L \lambda \Delta T}{\ln \frac{D_{нар}}{D_{вн}}},$$

$$M = \frac{\pi D_{вн}^2}{4} L\rho,$$

$$\delta M = \frac{\Delta M}{M} = \frac{A}{D_{вн}^2 \ln \frac{D_{нар}}{D_{вн}}}.$$

В этих уравнениях:

M — масса жидкости в цистерне;

ΔM — потери от испарения;

r — теплота парообразования;

ρ — плотность жидкости;

A — постоянная.

Дифференцируя δM по $D_{вн}$ и приравняв производную нулю, находим, что δM имеет минимальное значение при

$$D_{вн} = \frac{D_{нар}}{\sqrt{e}} = 0{,}6 D_{нар}.$$

Аналогичным образом для шаровой емкости можно найти [48]

$$D_{вн} = 0{,}67 D_{нар}.$$

Соответствующие значения толщины изоляции равны 0,4 $D_{нар}$ и 0,33 $D_{нар}$. Учет стоимости изоляции и эксплуатации цистерны приводит к уменьшению оптимальной величины изоляции по сравнению с вычисленной описанным способом. Обычно толщину изоляции принимают не более 0,15 $D_{нар}$.

Толщину изоляции целесообразно выбирать оптимальной так, чтобы приток тепла через нее составлял 20—70% от общего теплового потока. Уменьшение толщины приводит к неоправданному возрастанию потерь холода; излишнее увеличение толщины изоляции — к удорожанию, увеличению габаритов и массы конструкции без сколько-нибудь существенного снижения потерь. Естественно, что чем эффективнее изоляция, тем меньшей должна быть ее толщина. На практике толщина насыпной изоляции составляет 100—1000 *мм*, вакуумно-порошковой изоляции 20—500 *мм*, вакуумно-многослойной изоляции 10—100 *мм*.

Расчет скорости охлаждения и нагрева изоляции

Изменение температуры изоляции при охлаждении или нагревании теплоизоляционного устройства описывается уравнением (2), которое в случае плоского слоя принимает следующий вид:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \qquad (178)$$

где x — расстояние от наружной граничной поверхности изоляции.

Рассмотрим охлаждение изоляции сосуда для сжиженного газа при заполнении сосуда жидкостью. Слой изоляции можно считать плоским, если толщина его мала по сравнению с радиусом сосуда. Граничные и начальные условия могут быть записаны так:

$T(\tau, x = 0) = 0$ — температура наружной граничной поверхности не изменяется во времени;

$T(\tau, x = \delta) = -T_0$ — температура внутренней граничной поверхности ниже наружной на T_0 и также не изменяется во времени;

$T(0, x) = 0$ в начальный момент (перед заполнением) температура изоляции одинакова по всей толщине и равна температуре наружной поверхности.

В этом случае, в отличие от задачи, решение которой дается во многих учебниках и справочниках, происходит охлаждение только одной граничной стенки.

Решение уравнения (178) при постоянном a и заданных граничных условиях после подстановки начального условия $T(0, x) = 0$ принимает вид [99]

$$T = -T_0 \left[\frac{x}{\delta} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n} \times e^{-(an^2\pi^2\tau/\delta^2)} \sin \frac{n\pi x}{\delta} \right]. \qquad (179)$$

Тепловой поток определяется уравнением

$$\frac{q(\tau)}{q_{стац.сост}} = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-(an^2\pi^2\tau/\delta^2)}. \qquad (180)$$

Для сферического сосуда аналогичным образом можно найти

$$\frac{q(\tau)}{q_{стац.сост}} = 1 + 2 \frac{r_{вн}}{r_{нар}} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-[an^2\pi^2\tau/(r_{нар} - r_{вн})^2]}, \qquad (181)$$

где $r_{вн}$ — радиус внутренней стенки;

$r_{нар}$ — радиус наружной стенки.

Зависимость, описываемая уравнением (180), изображена на рис. 88. Ряд в этом уравнении быстро сходится. При значениях критерия Фурье $\mathrm{Fo} = a\tau/\delta^2 > 0{,}1$ второй член ряда не превышает 5% от первого члена. Поэтому для практических расчетов можно ограничиться первым членом ряда и пользоваться простым уравнением

$$\frac{q(\tau)}{q_{стац.сост}} = 1 + 2e^{-\pi^2 \mathrm{Fo}}. \qquad (182)$$

Уравнения (179) — (182) справедливы при постоянстве коэффициента температуропроводности. Коэффициент теплопроводности и теплоемкость теплоизоляционных материалов уменьшаются с понижением температуры. Однако коэффициент температуропроводности, пропорциональный отношению указанных величин, для многих изоляционных материалов мало изменяется в широком диапазоне температур ниже 300° К. Поэтому приведенные уравнения могут быть использованы для инженерных расчетов с удовлетворительным приближением.

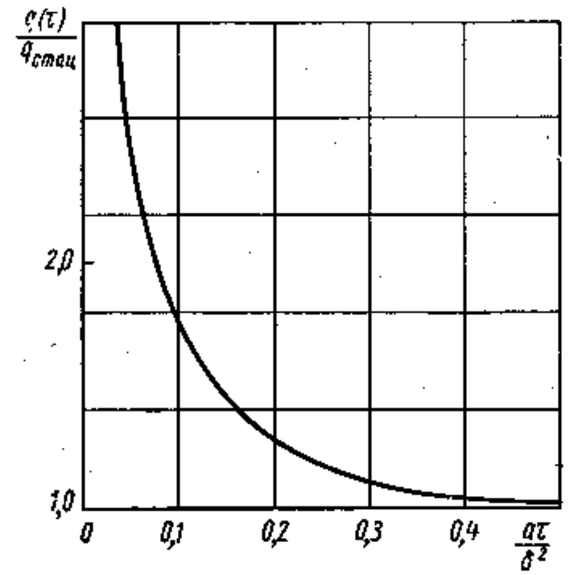


Рис. 88. Зависимость теплового потока через изоляцию в процессе ее охлаждения от критерия Фурье

Тепловой поток можно считать установившимся, если он не превышает более чем на 1% величину $q_{стац\cdot сост}$. Это условие выполняется при $Fo > 0{,}5$. Отсюда находим время стабилизации теплового потока

$$\tau_{стаб} = \frac{\delta^2}{2a}. \qquad (183)$$

В ряде случаев представляет существенный интерес скорость нагрева холодного изоляционного устройства, например сосуда после слива жидкости. Основное уравнение для нагрева то же, что и для охлаждения. Однако решение [99] значительно сложнее. Температура изоляции при нагреве является функцией критерия Фурье и безразмерного комплекса.

$$A = \frac{c_м \rho_м \delta_м}{c_и \rho_и \delta_и},$$

где индексы *м* и *и* относятся к металлу внутренней стенки и к изоляции.

На рис. 89 представлены кривые для $x = \delta$, т. е. для внутренней стенки. На этом графике T_0 и T — температуры стенки внутреннего сосуда, отсчитанные от температуры стенки кожуха, в начальный момент времени и в момент времени τ. Эти значения равны разностям температур стенок кожуха и внутреннего сосуда в соответствующие моменты времени.

В качестве примера определим температуру стенки внутреннего сосуда из стали Х18Н10Т резервуара на 8000 *кг* жидкого кислорода (изоляция аэрогель) через 10 суток после слива жидкости. При этом принимаем приближенно значения теплофизических свойств постоянными и равными их истинным значениям при средней температуре 190° К

$$A = \frac{c_м \rho_м \delta_м}{c_и \rho_и \delta_и} = \frac{0{,}35 \cdot 7800 \cdot 0{,}003}{0{,}50 \cdot 120 \cdot 0{,}15} = 0{,}91.$$

Находим коэффициент температуропроводности аэрогеля и критерий Фурье

$$a = \frac{\lambda}{c\rho} = \frac{1{,}5 \cdot 10^{-6}}{0{,}50 \cdot 120} = 2{,}5 \cdot 10^{-8}\ м^2/сек;$$

$$Fo = \frac{a\tau}{\delta^2} = \frac{2{,}5 \cdot 10^{-8} \cdot 3600 \cdot 240}{0{,}15^2} = 0{,}96.$$

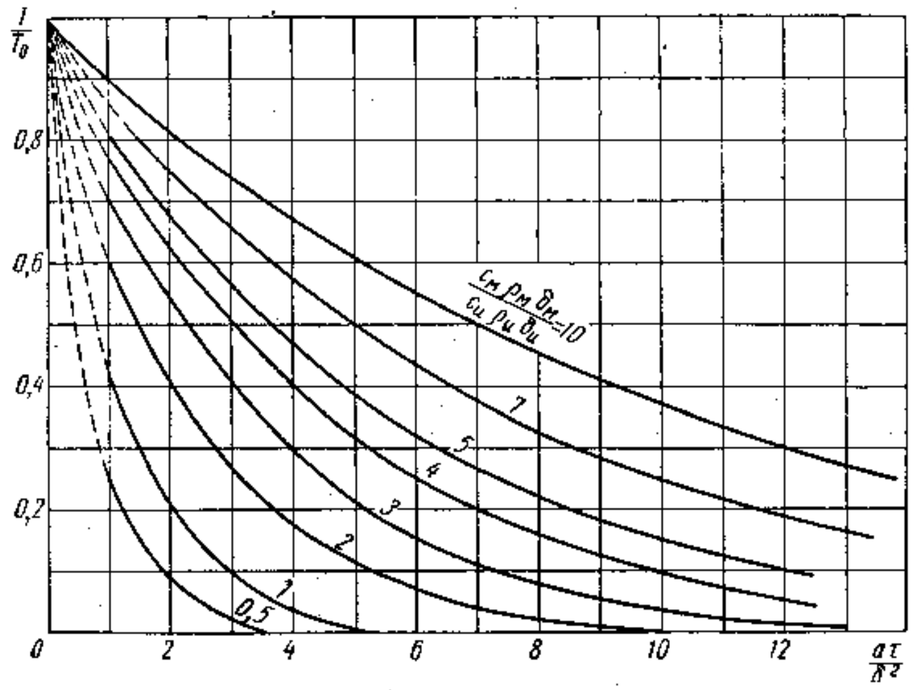


Рис. 89. График для определения скорости нагрева внутреннего сосуда резервуаров сжиженных газов

По графику (рис. 89) при вычисленных значениях A и Fo находим $\frac{T}{T_0} \approx 0{,}40$, откуда $T = 81°$ К. Температура стенки внутреннего сосуда

$$T_{вн} = T_{окр.ср} - T = 293 - 81 = 212° К.$$

Измерение теплового потока при стационарном режиме

Эффективность теплоизоляции низкотемпературного оборудования зависит в значительной мере от качества ее выполнения. Она может изменяться также в процессе эксплуатации в

результате увлажнения изоляционного материала, вибрации транспортируемого оборудования или ухудшения вакуума в изоляционном пространстве.

Поэтому проверка эффективности изоляции промышленного изделия, состоящая в определении притока тепла к нему из окружающей среды, приобретает в технике низких температур особенно важное значение.

Поток тепла через изоляцию промышленного изделия определяют обычно с помощью измерителя тепловых потоков, называемого часто тепломером. Этот метод измерения основан на применении дополнительной стенки. Если к испытуемой изоляции A плотно прикреплена дополнительная стенка $Б$, то при установившемся состоянии и бесконечной протяженности A и $Б$ весь тепловой поток, проходящий через A, проходит и через $Б$. Измерив температуры трех граничных поверхностей и зная толщину изоляции δ_A и дополнительной стенки $\delta_Б$, а также коэффициент теплопроводности последней, можно найти коэффициент теплопроводности изоляции

$$\lambda_A = \frac{\lambda_Б \delta_A (T_2 - T_3)}{\delta_Б (T_1 - T_2)}.$$

Наложение дополнительной стенки уменьшает величину теплового потока, проходящего через испытуемую конструкцию. Чтобы определить истинное значение теплового потока, необходимо измерить температуры граничных поверхностей изоляции T_2 и T_3 вне расположения дополнительной стенки.

На практике измеритель теплового потока представляет собой ленту или диск из резины или прорезиненной ткани. В рабочей части измерителя помещена многослойная термопара, имеющая от 300 до 800 спаев, которые расположены по обе стороны слоя резины. Конструкция измерителей теплового потока описана в работе [10]. Наибольшее распространение получили измерители теплового потока конструкции Ленинградского технологического института холодильной промышленности (ЛТИХП) и института «Теплопроект».

Чувствительность измерителей достигает 0,1 *вт/м²*. Они не могут дать надежных результатов для конструкций с вакуумными видами изоляции, в которых тепловой поток в большинстве случаев меньше 1 *вт/м²*. Испытания необходимо проводить в условиях стационарного теплового режима, при котором величина теплового потока постоянна по всей толщине изоляционной конструкции. Колебания температуры окружающей среды во время измерения могут приводить к значительным погрешностям в результатах.

Разработан тепломер, основанный на принципе моделирования измеряемого теплового потока специальным нагревательным элементом при компенсационном способе уравнивания температур элемента и испытуемой поверхности. Этот прибор позволяет выполнить измерения теплового потока в течение 5—10 *мин* в условиях не только стационарного, но и нестационарного теплового режима.

Тепловой поток можно также определить, измерив температуру окружающей среды T_2 и стенки наружного кожуха изоляционной конструкции T_1. Вычислив предварительно коэффициент теплообмена α между воздухом и стенкой, находят тепловой поток

$$q = \alpha (T_2 - T_1).$$

Этот способ прост по методике, но имеет существенный недостаток, состоящий в невозможности сколько-нибудь точного определения коэффициента теплообмена расчетным путем.

Принципиально иной метод, применяющийся только в технике низких температур, основан на определении потерь от испарения сжиженного газа, заполняющего изолированное изделие. Этим методом испытывают изоляцию сосудов для хранения и транспортирования сжиженных газов, иногда его используют для испытания трубопроводов сжиженных газов и холодных камер. Он более чувствителен, чем первый метод, дает возможность измерять малые тепловые потоки, недоступные для измерения тепломером, и позволяет сразу определять эффективность изоляции всего изделия.

Определение притока тепла к низкотемпературному аппарату по количеству испаряющегося из него сжиженного газа может, несмотря на кажущуюся простоту метода, привести к ошибочным результатам, если не учесть некоторые его особенности. Поэтому остановимся на этом методе более подробно.

Допустим, что испытываемый сосуд полностью залит низкотемпературной жидкостью, находящейся при температуре кипения. Тепло, проникающее через изоляцию и по «тепловым мостам» сосуда, вызывает испарение жидкости. Величина теплового потока определяется простым соотношением

$$Q_и = M_и r \ вт,$$

где $M_и$ — количество испарившейся жидкости в *кг/сек*;
r — теплота парообразования в *дж/кг*.

Количество испаряющейся жидкости в сосудах емкостью до 1 *м³* измеряют путем периодического взвешивания или определяют, измеряя количество выходящего из сосуда пара (рис. 90), в сосудах большей емкости применяют только второй способ. При этом производят пересчет по формуле

$$M_и = V \rho_0 \frac{T_0}{p_0} \cdot \frac{p}{T}, \qquad (184)$$

где $T_0 = 273{,}16°$ К — температура тройной точки воды;
$p_0 = 1{,}0132 \cdot 10^5$ *н/м²*;
ρ_0 — плотность газа при T_0 и p_0 в *кг/м³*;
V — объемный расход газа в *м³/сек*;
p — давление пара над жидкостью в *н/м²*;
T — температура газа в измерителе расхода в °К.

Расход газа измеряют обычно сухим или мокрым газовым счетчиком (газовыми часами), а также расходомером обтекания

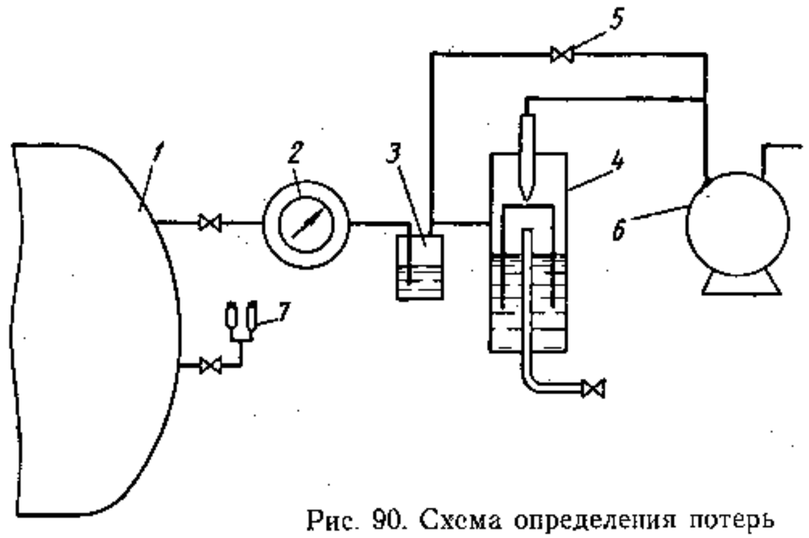


Рис. 90. Схема определения потерь от испарения в резервуаре для сжиженного газа:
1 — резервуар; *2* — барометр; *3* — увлажнитель; *4* — регулятор давления; *5* — байпасный вентиль; *6* — газовый счетчик; *7* — датчик вакуумметра

(ротаметром). В последнем случае необходимо вводить в результаты измерений поправку по формуле

$$V_2 = V_1 \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \sqrt{\frac{(\rho_n - \rho_2)\rho_1}{(\rho_n - \rho_1)\rho_2}},$$

где α — коэффициент расхода.

Индексы 1, 2 и n относятся соответственно к условиям измерения, градуировки и к поплавку.

Для получения надежных данных необходимо обеспечить герметичность трубопроводов, соединяющих внутренний сосуд с окружающей средой. При утечке в жидкостных трубопроводах потери от испарения, определяемые по методу взвешивания, повышаются; при утечке в линиях газа, потери, определяемые по методу измерения расхода газа, понижаются; при утечке через вентиль для подъема давления потери, определяемые обоими методами, повышаются.

Большое влияние на результаты измерения оказывают колебания атмосферного давления, связанные с метеорологическими условиями. Изменение атмосферного давления вызывает соответствующее изменение давления пара над жидкостью в сосуде. При увеличении давления повышается равновесная температура кипения жидкости; сама жидкость оказывается как бы в переохлажденном состоянии. Часть тепла, притекающего к внутреннему сосуду, расходуется на нагрев жидкости до новой температуры кипения, а остальное тепло — на испарение жидкости. В результате скорость испарения уменьшается. Аналогичным образом при понижении давления скорость испарения увеличивается.

Тепловой поток, идущий на нагрев жидкости при повышении давления, равен

$$Q_\partial = (M_ж c_ж + M_c c_c) \frac{dT}{d\tau} \text{ вт},$$

где M — масса в *кг*;
C — массовая теплоемкость в *дж/(кг · град)*;
$\frac{dT}{d\tau}$ — скорость возрастания температуры в *град/сек*;
$c_ж$ — теплоемкость жидкости в состоянии насыщения, с достаточной степенью точности вместо нее можно подставлять изобарную теплоемкость.

Индексы *ж* и *с* относятся к жидкости и внутреннему сосуду.

Приведем формулу к виду, удобному для практического применения

$$Q_\partial = (M_ж c_ж + M_c c_c)\, k \frac{dp}{d\tau},$$

где $k = \frac{dT}{dp}$.

Поскольку атмосферное давление меняется в сравнительно узких пределах, можно принять, что k не зависит от величины давления. Для кислорода $k = 9{,}50 \cdot 10^{-5}$ *град · м²/н*.

При повышении давления для определения теплового потока через изоляцию нужно Q_∂ прибавить к Q_u, а при понижении давления — вычесть из Q_u. Оценим влияние изменения атмосферного давления на результаты измерений

$$\frac{Q_\partial}{Q_u} = \frac{(M_ж c_ж + M_c c_c)\, k \frac{dp}{d\tau}}{M_u r} \approx \frac{M_ж c_ж k \frac{dp}{d\tau}}{M_u r}.$$

Скорость изменения атмосферного давления довольно часто достигает 0,037 *н/(м² · сек)* или (1 *мм рт. ст./ч*). Расчеты по этой формуле для сосудов жидкого кислорода при указанной скорости изменения давления показывают, что при номинальной величине потерь от испарения 2,4% в сутки Q_∂ составляет 10% от Q_u. При потерях 0,2% в сутки и менее Q_∂ превышает Q_u, т. е. в этом случае при повышении атмосферного давления испарение может полностью прекратиться (рис. 91).

Поправку на изменение атмосферного давления можно вводить, если устанавливается постоянная скорость испарения при постоянной скорости изменения давления. Величина M_u стабилизируется обычно не ранее чем через 5—10 *ч* после стабилизации $\frac{dp}{d\tau}$. Поэтому на практике предпочитают не вводить поправку, а поддерживать постоянное давление пара над уровнем жидкости в сосуде. Давление в сосуде поддерживают несколько более высоким, чем максимальное барометрическое давление, наблюдающееся в данной местности. Давление регулируют вручную или автоматически. В первом случае в линию выхода газа

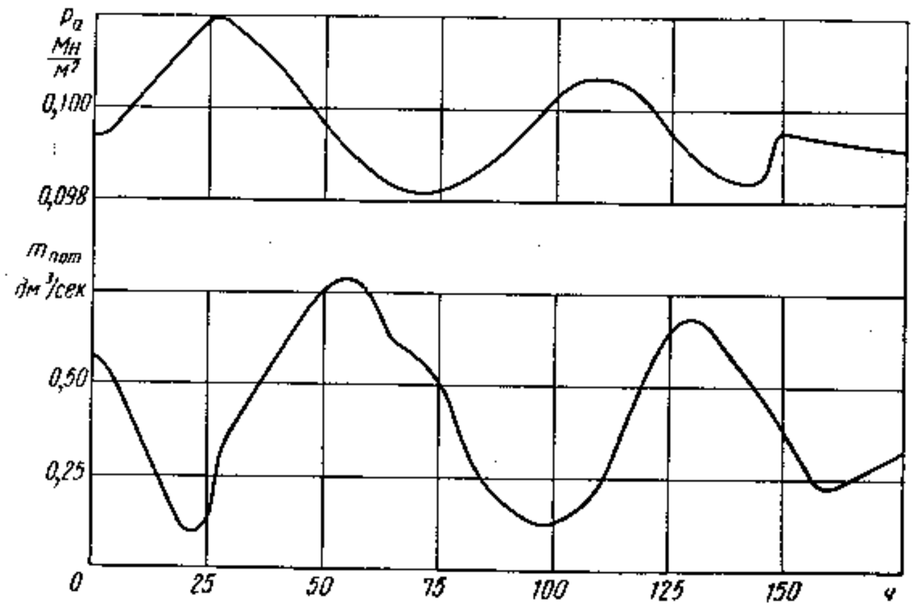


Рис. 91. Кривые изменения по времени атмосферного давления p_a и потерь от испарения жидкого кислорода $m_{пот}$ из резервуара с вакуумно-порошковой изоляцией

включают небольшую емкость с помещенным в ней барометром. Давление регулируют, открывая или прикрывая вентиль на выходе газа и следя за показаниями барометра. Во втором случае хорошие результаты дает установка регулятора давления картезианского типа (см. рис. 90). Поплавок входит с зазором в цилиндр, залитый ртутью или другой жидкостью. В полости под поплавком запирается газ под заданным избыточным давлением. Сверху в цилиндр входит трубка. Поплавок верхним концом запирает выход газу в трубку. При этом давление в испытываемом сосуде начинает возрастать, и поплавок опускается, открывая выход газу. После выхода некоторого количества газа давление снижается, поплавок поднимается и вновь запирает выход для газа. В качестве рабочей жидкости может быть использована вода; при этом перед регулятором необходимо включить

влагонасытитель для исключения уноса воды из регулятора сухим газом.

Давление может также автоматически регулироваться с помощью электромагнитного клапана, управляемого датчиком давления [73]. Датчиком может служить, например, ртутный манометр. При повышении давления сверх заданной величины ртуть в манометре замыкает контакты электрической цепи электромагнитного клапана, который открывается, выпуская избыток газа, и закрывается после соответствующего снижения давления. Для облегчения работы системы регулирования давления параллельно автоматическому клапану устанавливается байпасный вентиль, регулируемый вручную на пропуск среднего количества газа, выходящего из сосуда.

Испытания крупных резервуаров для жидкого кислорода или азота должны для обеспечения надежных результатов продолжаться от 3 до 5 недель (2—3 недели требуется для охлаждения и установления стационарного режима, 1—2 недели необходимы для получения достаточных данных для точного вычисления скорости испарения).

Крупные резервуары испытывают обычно вне помещения при температуре окружающей среды от —50 до +50° С. Для сравнения между собой различных резервуаров и оценки эффективности необходимо результаты испытаний приводить к какой-либо одной температуре окружающей среды. В качестве такой температуры в технике обычно принимают 20° С.

При изменении температуры наружного кожуха резервуара изменяется разность температур между кожухом и внутренним сосудом, а также коэффициент теплопроводности изоляции и конструкционных элементов. Коэффициент теплопроводности конструкционных материалов (сталь Х18Н10, стеклопластики) возрастает на 1—3% при повышении средней температуры на 10° С, т. е. температуры одной из граничных поверхностей на 20° С. Поэтому изменение их коэффициента теплопроводности можно, как правило, не учитывать. То же самое можно сказать относительно теплопроводности изоляционных материалов при атмосферном давлении и вакуумных видов изоляции с экранированием излучения.

В таких видах низкотемпературной изоляции, как высоковакуумная, вакуумно-порошковая с аэрогелем или перлитом, тепло переносится, в основном, излучением. При увеличении температуры теплой стенки с 0 до 50° С коэффициент теплопроводности аэрогеля под вакуумом возрастает в 1,8 раза. Пренебрежение этой зависимостью может привести к ошибочным оценкам эффективности резервуаров и их изоляции. Пересчет следует производить по формуле

$$Q_{общ,\,20} = \frac{\Delta T_{20}}{\Delta T_t}\left(Q_{из,t}\ \frac{\lambda_{20}}{\lambda_t} + Q_{общ,t} - Q_{из,t}\right),$$

где $Q_{общ}$ — общий теплоприток к сжиженному газу;

$Q_{из}$ — теплоприток через изоляцию (расчетное значение).

Индексы 20 и t относятся к температуре окружающей среды, равной 20° С, и температуре испытаний.

При неполностью залитом жидкостью сосуде теплоприток к нему будет меньшим. По мере удаления от уровня жидкости температура стенок внутреннего сосуда повышается. Тепло, притекающее к стенкам, расположенным над уровнем жидкости, отводится по ним к жидкости. Чем меньше тепловое сопротивление изоляции и больше тепловое сопротивление стенок (меньше

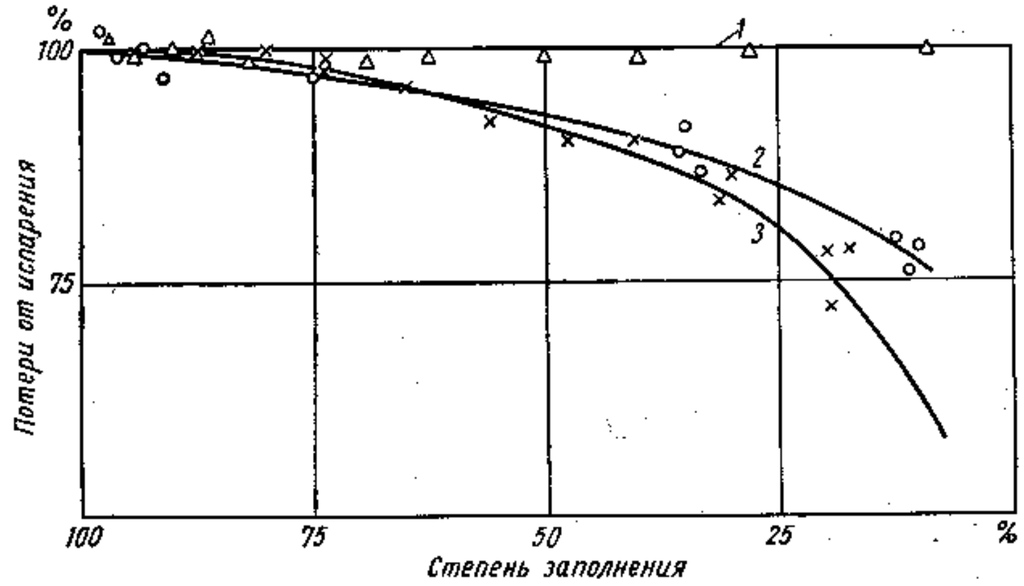


Рис. 92. Зависимость скорости испарения от степени заполнения резервуаров для жидкого кислорода:

1 — сосуд с высоковакуумной изоляцией емкостью 28 *дм*³ из меди; *2* — сосуд емкостью 28 *дм*³ из стали Х18Н9Т; *3* — сосуд с вакуумно-порошковой изоляцией емкостью 6 *м*³ из стали Х18Н9Т

коэффициент теплопроводности металла и его толщина), тем выше температура стенок над уровнем жидкости и сильнее зависимость теплопритока от уровня жидкости. В резервуарах с внутренним сосудом из нержавеющей стали Х18Н9Т даже при хорошей теплоизоляции теплоприток заметно уменьшается по мере снижения уровня жидкости (рис. 92).

Расчет изменения теплопритока с уровнем жидкости затрудняется наличием теплообмена между выходящим паром и стенками сосуда. Поэтому необходимо проводить испытания при полностью залитом сосуде.

По мере испарения жидкости из сосуда освобождающийся объем заполняется паром. В результате часть образующегося

пара остается в сосуде. Поправочный коэффициент $K = \frac{\rho_{ж}}{\rho_{ж} - \rho_{п}}$, учитывающий уменьшение измеряемого расхода газа, равен

Жидкость	Кислород	Азот	Водород	Гелий
K	1,003	1,006	1,019	1,152

На этот коэффициент нужно умножить правую часть уравнения (184). Пренебрежение этой поправкой недопустимо для сосудов с жидким гелием.

Молекулы водорода могут находиться в орто- и парасостояниях, отличающихся друг от друга ядерными спинами. При 300° К водород содержит 25% пара- и 75% ортомодификации, а при 20° К он находится почти полностью в парасостоянии. При ожижении водорода происходит самопроизвольный орто-пара-переход, сопровождающийся выделением большого количества тепла (1420 *дж/моль*), превышающего теплоту парообразования водорода (916 *дж/моль*). Поэтому при замерах потерь от испарения в сосудах для жидкого водорода необходимо контролировать орто-парасостав и для получения надежных данных проводить испытания на параводороде.

Криогенные жидкости склонны к перегреву. На некоторой стадии перегретая жидкость интенсивно вскипает, что может приводить к гидравлическим ударам и выбросам жидкости. Для исключения этих явлений в некоторых случаях принимают специальные меры обеспечения равномерного испарения жидкости, состоящие в создании центров интенсивного образования пузырьков пара.

Если теплоприток по тепловым мостам может быть вычислен достаточно надежно и составляет менее 50% от общего теплопритока, то по замеренной величине потерь от испарения можно вычислить теплоприток через изоляцию и эффективный коэффициент теплопроводности изоляции. При соблюдении всех требований, предъявляемых к изоляционным работам, это значение близко к результатам лабораторных измерений для насыпной и вакуумно-порошковой изоляции и превышает их в 2—4 раза при вакуумно-многослойной изоляции. В последнем случае при недостаточно качественном монтаже эффективный коэффициент теплопроводности на промышленном изделии может превышать полученный в лаборатории в 5—10 раз.

Измерение теплового потока при нестационарном режиме

Скорость охлаждения изоляции и время стабилизации теплового потока также могут быть определены по замерам скорости испарения сжиженного газа из сосуда. Время стабилизации опре-

деляется формулой (183), которая может быть представлена в следующем виде:

$$\tau_{стаб} = \frac{\lambda c \rho \Delta T^2}{2q^2}.$$

Следовательно, $\tau_{стаб}$ уменьшается с уменьшением коэффициента теплопроводности и плотности изоляции. Наилучшей в этом отношении является высоковакуумная изоляция, для которой время стабилизации должно быть практически равным нулю. Затем следуют вакуумно-многослойная, вакуумно-порошковая и насыпная изоляции.

На практике время стабилизации потерь от испарения в крупных резервуарах с вакуумно-порошковой изоляцией достигает 300—500 *ч*, с вакуумно-многослойной изоляцией 100—200 *ч* при средних значениях толщины слоя (см. выше).

Измерения потерь от испарения в период охлаждения изоляции могут быть использованы для оценки ее эффективности. Уравнение (182), описывающее процесс охлаждения изоляции, может быть преобразовано в форму, более удобную для практического применения,

$$\ln\left(\frac{q(\tau)}{q_{стац}} - 1\right) = 0{,}693 - \pi^2 \frac{a\tau}{\delta^2}. \qquad (185)$$

Величины $q(\tau)$ и $q_{стац}$ в уравнении (185) представляют собой значения теплового потока через изоляцию при нестационарном и установившемся режиме. Эта зависимость выражается прямой линией в координатах $\ln\left(\frac{q(\tau)}{q_{стац}} - 1\right) - \tau$. Измерив тангенс угла наклона прямой, равный 4,29 $\frac{a}{\delta^2}$, можно определить значения a и λ.

Основываясь на уравнении (185), можно предложить излагаемый ниже метод испытания сосудов для сжиженных газов, позволяющий определить коэффициент теплопроводности изоляции и долю притока тепла через изоляцию от общего теплопритока к жидкости. В резервуарах для сжиженных газов значительная часть тепла ($q^м$) притекает к внутреннему сосуду по тепловым мостам.

Измеряя скорость испарения жидкости, мы определяем суммарный приток тепла к ней ($q^{общ}$). Величина, стоящая под знаком логарифма в левой части уравнения (185), может быть представлена в виде

$$\frac{q(\tau)^{из} - q^{из}_{стац}}{q^{из}_{стац}} = \frac{q(\tau)^{общ} - q(\tau)^{м} - q^{общ}_{стац} + q^{м}_{стац}}{q^{общ}_{стац} - q^{м}_{стац}}.$$

Из четырех величин две [$q(\tau)^{общ}$ и $q^{общ}_{стац}$] могут быть определены экспериментально, а третья ($q^{м}_{стац}$) вычислена. Переменную величину $q(\tau)^{м}$ трудно рассчитать достаточно надежно. На практике температуропроводность материалов, из которых выполнены тепловые мосты, большей частью во много раз больше температуропроводности эффективных видов низкотемпературной изоляции. Поэтому тепловые мосты охлаждаются сравнительно быстро; по прошествии небольшого начального периода охлаждения можно принять $q(\tau)^{м} = q^{м}_{стац}$. Прибавляя к обеим частям уравнения (185) величину $\ln\left(\frac{q^{из}_{стац}}{q^{общ}_{стац}}\right)$ и учитывая изложенное, получаем окончательно

$$\ln\frac{q(\tau)^{общ} - q^{общ}_{стац}}{q^{общ}_{стац}} = \ln 2\frac{q^{из}_{стац}}{q^{общ}_{стац}} - \pi^2\frac{a\tau}{\delta^2} \qquad (186)$$

Следовательно, построив по опытным данным график в координатах $\lg\left(\frac{q(\tau)^{общ} - q^{общ}_{стац}}{q^{общ}_{стац}}\right) - \tau$, можно по наклону прямого участка при достаточно больших τ вычислить значения a и λ для изоляции. Экстраполируя прямолинейный участок экспериментальной кривой, найдем ординату точки пересечения прямой с осью. Если все тепло передается только через изоляцию, то ордината этой точки в соответствии с уравнением (185) должна быть равной 2. При наличии притока тепла по тепловым мостам ордината у точки пересечения должна быть меньше 2. Ее положение определяется, согласно уравнению (186), соотношением

$$y = 2\frac{q^{из}_{стац}}{q^{общ}_{стац}}.$$

Таким образом, найдя наклон конечного прямолинейного участка на кривой скорости охлаждения и точку пересечения прямой линии с осью ординат, можно определить из опытных данных коэффициент температуропроводности изоляции и долю притока тепла через изоляцию от общего теплопритока. Зная эффективную площадь поверхности и толщину изоляции и определив из опытных данных теплоприток через нее, нетрудно найти коэффициент теплопроводности изоляции и затем вычислить ее теплоемкость с использованием опытного значения температуропроводности.

На рис. 93 нанесены зависимости, полученные при испытаниях нескольких сосудов для жидкого кислорода и азота. При достаточно большой длительности испытаний экспериментальные кривые переходят в прямые линии. Сравнительно большое отклонение кривой *2* от прямолинейной зависимости при $\tau < 50$ *ч* объяс-

няется медленным понижением давления в изоляции, которое через 10 *ч* после заливки превышало 10 *н/м²*, через 50 *ч* снизилось до 2 *н/м²* и после 90—100 *ч* достигло 0,1 *н/м²*.

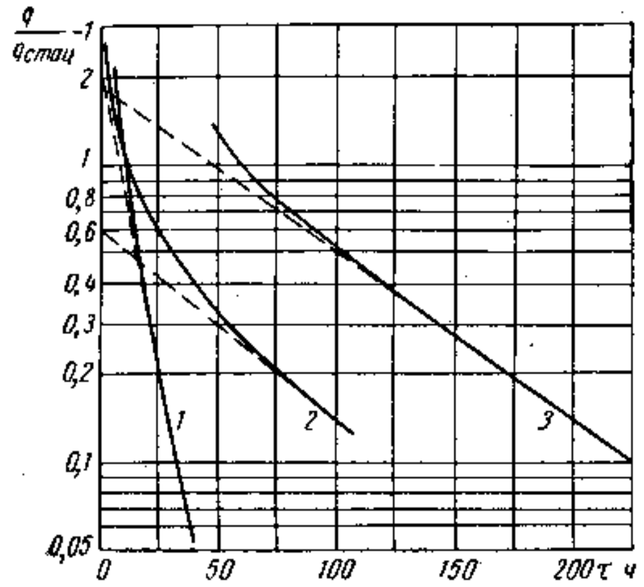


Рис. 93. Зависимость теплового потока через вакуумированную изоляцию от времени ее охлаждения:

1 — алюминиевая фольга + стеклобумага СБР, δ = = 20 *мм*; *2* — аэрогель + бронзовая пудра, δ = = 150 *мм*; *3* — перлитовая пудра, $\delta = 300$ *мм*

Значения коэффициента теплопроводности изоляции, найденные из опытных данных по скорости охлаждения изоляции, хорошо согласуются с результатами испытаний при стационарном режиме. Приведем в качестве примера результаты расчетов для сосуда, изолированного перлитовой пудрой (линия *3* на рис. 93). Давление в изоляционном пространстве составляло 4 *н/м²* (0,03 *мм рт. ст.*). Коэффициент теплопроводности перлитовой пудры при этом давлении, измеренный на лабораторном приборе, равен 2,1 *мвт/(м · град)*. Значение коэффициента, найденное на основе измерения потерь от испарения в сосуде при стационарном режиме и вычисленного притока тепла по тепловым мостам, составило 1,75 *мвт/(м · град)*.

Наклон прямолинейного участка кривой 3 $\frac{\pi^2 a}{\delta^2} = 3{,}60 \times$ $\times 10^{-6}\ \frac{1}{сек}$, откуда $a = 3{,}28 \cdot 10^{-8}$ *м²/сек*. Находим коэффициент теплопроводности

$$\lambda = ac\rho = 3{,}28 \cdot 10^{-8} \cdot 0{,}46 \cdot 10^{6} \cdot 120 = 1{,}81\ мвт/(м \cdot град).$$

ГЛАВА X

Получение и сохранение вакуума в теплоизоляционных устройствах

Основная трудность при практической реализации эффективных видов теплоизоляции с использованием вакуума заключается в получении требуемого вакуума в изоляционном пространстве и сохранении его в течение продолжительного времени. Технология получения и сохранения вакуума в рассматриваемом случае имеет ряд характерных особенностей.

В вакуумной технике различают статические системы (объект на последнем этапе отделяется от насоса) и динамические системы (требуемый вакуум поддерживается непрерывной откачкой, компенсирующей большие газовыделения или натекания).

Система с вакуумно-порошковой или вакуумно-многослойной изоляцией сочетает особенности статической и динамической систем: большое газовыделение и необходимость длительной эксплуатации при отключенном насосе. Обычно отключаемая система, примером которой может служить электронная лампа, прогревается для удаления газов при откачке до 500—1000° С. Конструкцию с вакуумной изоляцией нельзя, как правило, нагревать выше 100—150° С в связи с наличием паяных швов на мягком припое и фланцевых уплотнений с резиновыми прокладками. Дополнительные трудности возникают из-за необычно большого сопротивления откачке порошкообразных или волокнистых материалов, заполняющих вакуумированное пространство.

Применение вакуумной теплоизоляции для оборудования, работающего при низких температурах, создает благоприятные условия для сохранения вакуума.

Газовыделение при понижении температуры быстро уменьшается. Кроме того, низкие температуры позволяют использовать адсорбенты для поглощения остаточных газов в вакуумном пространстве.

Технология получения и сохранения вакуума в обычных вакуумных системах, а также применяемое вакуумное оборудование подробно описаны в ряде монографий и учебных пособий (см. например, [13, 34]).

Проверка герметичности

Проверка герметичности аппаратуры является одной из основных операций при изготовлении и эксплуатации вакуумного оборудования. От надежности проверки зависит успех всей дальнейшей работы с вакуумной аппаратурой.

До введения системы единиц СИ величину течи измеряли в *л · мк/сек* (т. е. в *л/сек* при давлении в системе 1 *мк* или 10^{-3} *мм рт. ст.*). Поскольку 1 *л · мк* равен 1,315 $мм^3$ газа при давлении $1{,}013 \cdot 10^5$ $н/м^2$ (760 *мм рт. ст.*), измерение величины течи в $мм^3/сек$ сравнительно мало изменяет прежние численные значения в *л · мк/сек*.

Самый чувствительный метод отыскания течей основан на использовании масс-спектрометра. Для проверки на герметичность вакуумируемых теплоизоляционных устройств используется гелиевый масс-спектрометрический течеискатель ПТИ-6, имеющий чувствительность порядка 10^{-7} $мм^3/сек$.

Резервуары для сжиженных газов имеют много сварных швов, которые предпочитают в ряде случаев проверять отдельно, перед окончательной сваркой резервуара [86, 114]. Испытываемый узел соединяют с вакуумным стендом и течеискателем и обдувают снаружи гелием или покрывают чехлом из полиэтиленовой пленки, который заполняют затем гелием.

Внутренний сосуд и резервуар в сборе также проверяют гелиевым течеискателем. Проверяемый сосуд откачивают на стенде с ротационным и бустерным насосами до давления 0,1—0,5 $н/м^2$. Между сосудом и насосами устанавливается охлаждаемая жидким азотом ловушка, ускоряющая откачку паров и предотвращающая попадание паров масла в сосуд.

Изоляционные устройства относятся к системам с большим газовыделением.

В отличие от обычной методики здесь рекомендуется подключать течеискатель не между механическим и пароструйным насосами, а между пароструйным насосом и испытываемым объектом. Такой способ позволяет понизить давление на входе в течеискатель, больше открыть дроссельный вентиль течеискателя, а иногда и отключить откачной агрегат. В результате повышается чувствительность способа.

Внутренний сосуд обычно сообщается с окружающей средой узкими и длинными трубками с целью уменьшения притока тепла по ним. Для повышения чувствительности метода проверки

к внутреннему сосуду временно присоединяют короткий и широкий трубопровод, позволяющий значительно увеличить быстроту откачки.

Внутренний сосуд резервуара с вакуумной изоляцией находится обычно в рабочих условиях под атмосферным или избыточным давлением. В соответствии с этим он рассчитан в ряде случаев только на внутреннее давление, теряет устойчивость и сминается при воздействии на него наружного давления. При наличии на внутреннем сосуде фланцевых соединений с прокладками (например, люков для ревизии) следует учесть, что в соединении может в рабочих условиях под избыточным давлением возникать течь, отсутствующая или не обнаруживаемая при проверке герметичности под вакуумом.

Во всех этих случаях необходимо применять метод заполнения сосуда пробным газом под избыточным давлением и отыскания течей путем определения содержания пробного газа в воздухе. Для проверки используют специальный щуп, соединенный с вакуумной системой гелиевого течеискателя.

Герметичность под избыточным давлением проверяют также с помощью галоидного течеискателя.

В ряде случаев необходимо проверять герметичность наружного кожуха при наличии в межстенном пространстве изоляционного порошка. Здесь также иногда затруднительно пользоваться обычным способом с откачкой испытываемого объекта ввиду очень малой быстроты откачки.

Используемый в изоляционных устройствах адсорбент затрудняет проверку герметичности. Его необходимо загружать в последнюю очередь, перед началом вакуумирования, и исключить, если это возможно, проверку после его загрузки.

После проверки наружного кожуха резервуара течеискателем дополнительно проверяют внутренний сосуд. Для этого достаточно впустить во внутренний сосуд, находящийся под рабочим давлением, 0,1% гелия и отключить межстенное пространство от вакуумного стенда на 1—2 *мин* для накопления гелия в случае наличия течи [86].

После проверки течеискателем проверяют внутренний сосуд и кожух резервуара на натекание под вакуумом. Эта проверка желательна во всех случаях и обязательна для крупных резервуаров, в которых трудно гарантировать надежную проверку всех возможных неплотностей течеискателем. Величину натекания определяют по скорости возрастания давления в испытываемом объекте. Допускаемая скорость возрастания давления в межстенном пространстве резервуаров с вакуумно-порошковой изоляцией находится обычно в пределах 1—5 $н/м^2$ в сутки (7,5—37,5 *мкм рт. ст.* в сутки) и мало зависит от объема резервуара. Допускаемая величина натекания соответственно увеличивается от 10^{-3} $мм^3/сек$ для небольших сосудов емкостью несколько

литров до 10^2 *мм³/сек* для крупных резервуаров емкостью более 10 *м³*. Эту величину задают исходя из требования эксплуатации сосуда в течение нескольких лет без восстановления вакуума, а также чувствительности метода проверки герметичности и возможности измерения соответствующей скорости возрастания давления.

Вакуумирование изоляции

Для получения требуемого вакуума при низкой температуре вакуумно-порошковую изоляцию достаточно откачать в теплом состоянии до 10 *н/м²*, а вакуумно-многослойную изоляцию — до 0,1 *н/м²*. При современном состоянии вакуумной техники получить такой вакуум несложно. Тем не менее вакуумирование изоляции вызывает затруднения и требует сравнительно большого времени ввиду сильного газовыделения изоляционных материалов и значительного сопротивления, создаваемого ими потоку откачиваемого газа.

Скорость газовыделения V монолитных материалов, в частности металлических стенок теплоизоляционных устройств, относительно невелика и уменьшается со временем τ в большинстве случаев по экспоненциальному закону

$$V = Ce^{-k\tau},$$

где C и k — постоянные, зависящие от рода материала и температуры.

Количество выделяющихся газов пропорционально площади поверхности; скорость газовыделения для металлов в начале откачки порядка 0,1—10 *мм³/(сек · м²)*.

Пористые материалы имеют развитую внутреннюю поверхность, адсорбирующую большие количества газов и являющуюся источником газовыделения. Количество выделяющихся при вакуумировании газов в этом случае также приблизительно пропорционально поверхности, но не внешней, а внутренней. Поэтому скорость газовыделения пористых материалов следует относить к единице массы материала. Газовыделение большинства пористых материалов удовлетворительно подчиняется закону

$$V = \frac{B}{\tau^n},$$

где B и n — постоянные (n близко к 1).

Некоторые опытные данные, полученные во ВНИИКИМАШе, приведены на рис. 94. Газовыделение 1 *кг* многих теплоизоляционных материалов после нескольких десятков часов вакуумирования значительно превышает по величине допустимое натекание через неплотности в изоляционное пространство. Это затрудняет контроль герметичности изделия с изоляцией.

Основное количество газов, выделяющихся из теплоизоляционных материалов и полимерных материалов для опор, конденсируется при низких температурах. Сюда относятся пары воды, адсорбируемые пористыми материалами, и пары органических веществ. Казалось бы, присутствие паров не должно затруднять получения требуемого вакуума в низкотемпературной изоляции, так как они будут вымораживаться при ее охлаждении. Все же наличие паров ухудшает условия работы изоляции ввиду насы-

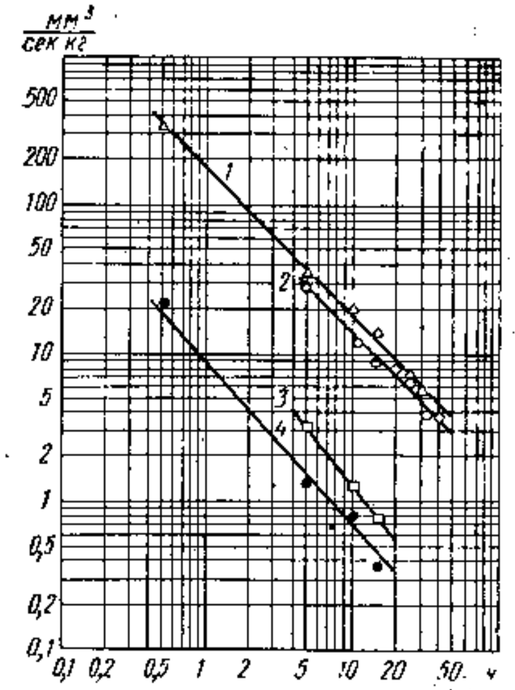


Рис. 94. Зависимость газовыделения материалов для теплоизоляции и опор сосудов сжиженных газов от времени вакуумирования: *1* — аэрогель; *2* — текстолит ПТК; *3* — перлит; *4* — стекловолокнит АГ-4С

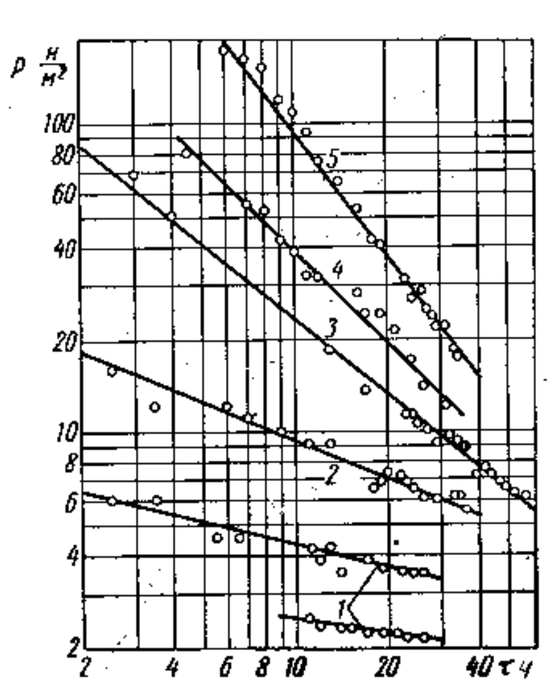


Рис. 95. Зависимость давления в слое аэрогеля от времени его вакуумирования при различной влажности: *1* — прокаленный аэрогель; *2* — аэрогель, просушенный продувкой сухого азота; *3* — аэрогель с влажностью 1,6%; *4* — аэрогель с влажностью 2,5%; *5* — аэрогель с влажностью 8%

щения ими адсорбента, помещаемого в изоляционное пространство для поглощения неконденсируемых газов.

Содержание в изоляционном материале летучих веществ, в частности влаги, резко замедляет вакуумирование. Например, при влажности изоляционного порошка в 1% количество выделяющегося при откачке водяного пара приблизительно равно количеству воздуха, содержащегося в изоляционном пространстве. К этому следует добавить, что вода, удерживаемая в порах материала адсорбционными силами, удаляется при вакуумировании значительно медленнее, чем воздух. Влияние влажности аэрогеля на скорость откачки заполненного им объема в 1 *дм³* видно из рис. 95. Для предотвращения увлажнения изоляционные

порошки хранят и перевозят в герметичных металлических банках или коробках, облицованных полиэтиленовой пленкой. При содержании влаги более 0,5% порошок следует предварительно просушить. Его сушат потоком горячего сухого воздуха или азота непосредственно перед загрузкой в изоляционное пространство.

То же самое следует сказать и о полимерных материалах. Предварительный прогрев их позволяет удалить основную массу легколетучих компонентов. Например, масса текстолита ПТК при прогреве в течение 80 *ч* при 100° С уменьшилась на 3,0%, а при 150° С — на 5%. В результате газовыделение в последнем случае снизилось в 4—5 раз по сравнению с необработанным текстолитом.

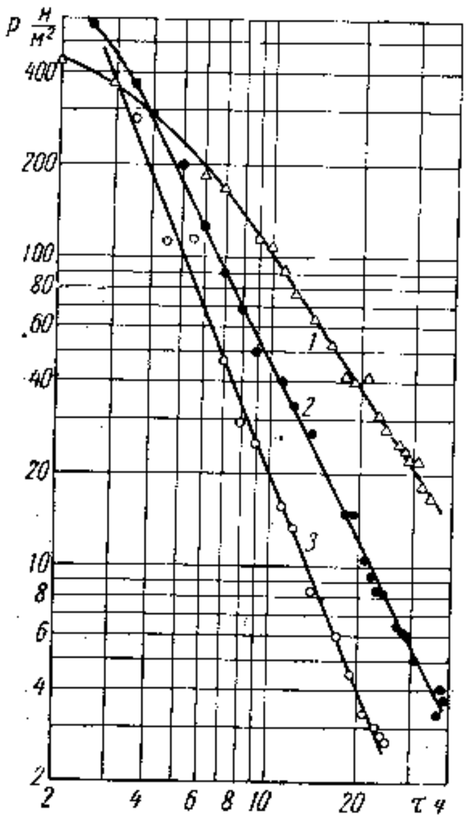


Рис. 96. Зависимость давления в слое аэрогеля от времени его вакуумирования при различной температуре: *1* — при $t = 20°$ С; *2* — при $t = 50°$ С; *3* — при $t = 100°$ С

Остатки влаги удаляют во время вакуумирования. При этом изолированное изделие следует прогревать. Повышение температуры с 20 до 100° С увеличивает скорость вакуумирования в несколько раз (рис. 96).

Из тонких пор влагу вообще нельзя полностью удалить вакуумированием при обычной температуре. Прогрев не только ускоряет вакуумирование, но и способствует выделению из пористого материала остатков влаги, удерживаемых в тонких порах. Нагрев резервуара часто затрудняется большими размерами его, а также применением резиновых прокладок на наружном кожухе. Поэтому во многих случаях ограничиваются подогревом внутреннего сосуда приблизительно до 100° С. Это обеспечивает также прогрев адсорбента, помещенного в карманах на внутреннем сосуде.

В газах, выделяющихся при вакуумировании материалов, содержащих органические вещества, часто имеются заметные количества водорода. Водород сравнительно плохо поглощается адсорбентами, что затрудняет создание требуемого вакуума в рабочих условиях. Следовательно, содержание органических

примесей в изоляционных материалах и по этой причине нежелательно.

При откачке изделия с вакуумно-порошковой изоляцией для предотвращения уноса порошка в изоляционной полости устанавливают фильтр. Фильтрующая перегородка не оказывает существенного сопротивления откачке, но образующийся на перегородке уплотненный слой порошка резко снижает ее пропускную способность. Вид фильтрующей перегородки не оказывает при этом влияния на скорость откачки. Увеличения скорости откачки достигают применением коллектора — разветвленной системы труб с перфорированной поверхностью, покрытой фильтрующим материалом.

Вакуумные насосы и трубопроводы для откачки должны обеспечить быстроту откачки, достаточную для быстрого удаления газов, выделяющихся из изоляционного материала. При откачке порошковой и многослойной изоляции следует устанавливать ловушку, охлаждаемую жидким азотом. Она служит насосом для откачки конденсируемых паров с большой быстротой действия и значительно ускоряет процесс вакуумирования.

Быстрота снижения давления при откачке зависит от многих причин, в том числе содержания летучих примесей в изоляционных материалах, вида и подготовки адсорбента, помещаемого в изоляционном объеме, температуры подогрева изделия, быстроты действия насосов и пропускной способности трубопроводов для вакуумирования. Многослойная изоляция монтируется перед окончательной сборкой изделия в кожухе и предварительно вакуумируется при проверке герметичности кожуха, что приводит к соответствующему уменьшению длительности окончательного вакуумирования.

Первичное вакуумирование резервуаров с вакуумно-порошковой и вакуумно-многослойной изоляцией емкостью от одного до нескольких десятков кубических метров продолжается 50—100 *ч*, а иногда и до 200 *ч* (рис. 97). Давление в конце откачки (при отключенном насосе) составляет 10—50 *н/м²* при вакуумно-порошковой изоляции и 0,05—1 *н/м²* при вакуумно-многослойной изоляции.

Дальнейшее понижение давления происходит значительно медленнее. Поэтому вакуумирование прекращают при достижении указанного давления, дальнейшее понижение давления до 0,1—1 *н/м²* при порошковой и до 0,001—0,01 *н/м²* при многослойной изоляции происходит после охлаждения сосуда.

После окончания вакуумирования и отключения насоса определяют скорость возрастания давления в изоляции с теплой и холодной азотной ловушкой. В последнем случае скорость не должна превышать величины натекания, допускаемой для изделия исходя из заданной длительности эксплуатации до повторного вакуумирования.

Вакуумную полость небольших сосудов в конце откачки перекрывают большей частью путем пережатия вакуумировочной трубки. Для надежности пережатия наружный диаметр трубки не должен превышать 12—15 *мм*. Вакуумировочную трубку изготовляют из свинца, отожженной меди или алюминия. Трубку пережимают специальными клещами вручную или двумя пуансонами с помощью гидравлического пресса. После этого конец трубки опаивают или заваривают. В крупных резервуарах вакуумную полость перекрывают вакуумным вентилем, второй конец которого затем заглушают.

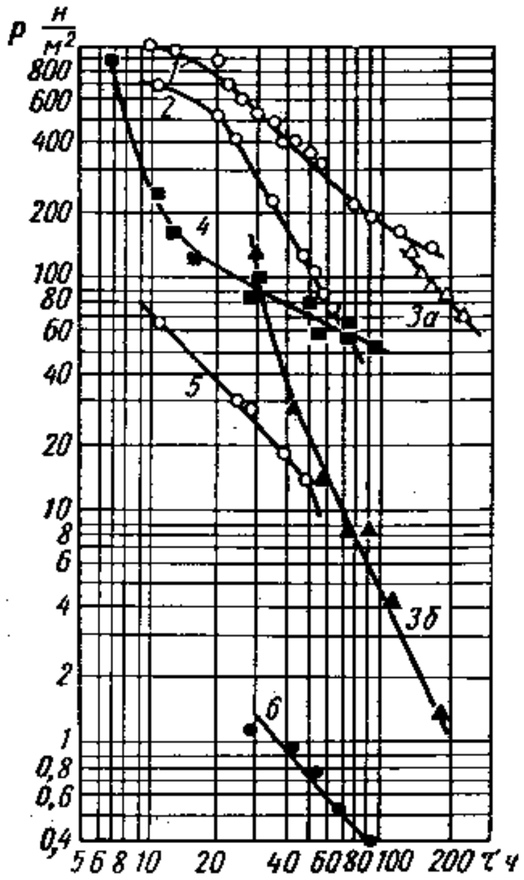


Рис. 97. Зависимость давления в изоляции резервуаров сжиженных газов от времени вакуумирования:

1 — аэрогель + бронзовая пудра, силикагель КСМ, объем резервуара 1,15 *м*³; *2* — перлитовая пудра, силикагель КСМ, объем резервуара 1,15 *м*³; *3* — аэрогель + бронзовая пудра, силикагель КСМ, объем резервуара 5,3 *м*³; *4* — аэрогель, без адсорбевта, объем резервуара 30 *м*³; *5* — алюминиевая фольга + стеклохолст ЭВТИ, уголь СКТ, объем резервуара 5 *дм*³; *6* — изоляция и адсорбент те же, объем резервуара 8,2 *м*³

Вакуум в изоляции получают обычно откачкой механическим и пароструйным насосами. Был предложен также способ создания вакуума, состоящий в замещении воздуха паром, конденсирующимся при рабочей температуре в изоляции, например, двуокисью углерода [5]. Это способ можно рассматривать как вариант применения криогенной откачки, получающей в последнее время все большее распространение. Он позволяет обойтись без вакуумных насосов и удобен при отсутствии источников электроэнергии. Когда изолированная аппаратура не используется и находится в теплом состоянии, давление в изоляции равно атмосферному и возможное натекание воздуха значительно уменьшается.

Углекислый газ, выпускаемый промышленностью (ГОСТ 8050—64), содержит от 0,5 до 2% неконденсирующихся примесей, что соответствует их парциальному давлению (0,5—2). 10^3 *н/м*². Применение углекислого газа, полученного возгонкой твердой двуокиси углерода («сухого льда»), позволило снизить давление неконденсируемых примесей [27] в изоляции до 55 *н/м*².

Дальнейшее понижение давления было достигнуто с помощью адсорбента. Достаточно полное замещение воздуха конденсируемым газом происходит при кратности продувки 15—20. Воздух замещается тем полнее, чем меньше скорость продувки. Хорошие результаты дает также продувка фреоном-12. Заполнение изоляционного объема фреоном под небольшим избыточным давлением после продувки изоляции углекислым газом позволяет проверять герметичность аппаратуры галоидным течеискателем, когда она находится в теплом состоянии. Описанный способ создания вакуума находит применение в кратковременно работающих трубопроводах для сжиженных газов.

Дополнительное достоинство применения двуокиси углерода — способность поглощать водород при вымораживании ее на стенке, имеющей температуру 20° К. Это повышает срок службы трубопроводов для жидкого водорода с вакуумной изоляцией [122].

Улучшение и сохранение вакуума с помощью адсорбентов

В электровакуумной технике для улучшения и длительного поддержания высокого вакуума в откачанных насосом изделиях используют разного рода поглотители, действие которых основано в большинстве случаев на химическом взаимодействии при повышенных температурах с газами, содержащимися и выделяющимися в вакуумном пространстве.

В изоляции, работающей при низких температурах, применение таких поглотителей затруднительно. Однако низкая температура благоприятна для использования адсорбентов — пористых веществ, действие которых основано на удерживании молекул газа на поверхности твердого тела силами межмолекулярного взаимодействия.

Адсорбцию называют мономолекулярной в том случае, если поверхность твердого тела покрывается одним слоем молекул газа, и полимолекулярной, если образуется несколько слоев молекул. Мономолекулярная адсорбция имеет место в области низких давлений, переходя постепенно при повышении давления в полимолекулярную адсорбцию. Естественно, что для целей низкотемпературной изоляции наибольший интерес представляют закономерности мономолекулярной адсорбции.

В области малых давлений объем адсорбированного газа изменяется пропорционально давлению (закон Генри для случая адсорбции).

Исследование показало [28], что начальный участок изотермы адсорбции при низких давлениях описывается с достаточным

приближением уравнением Вильямса—Генри, которое может быть представлено в безразмерном виде

$$\lg \frac{\theta}{\frac{p}{p_s}} = \alpha - \beta\theta, \qquad (187)$$

где $\theta = \frac{a}{a_m}$ — степень покрытия поверхности адсорбента молекулами газа;

p_s — давление насыщенного пара при температуре адсорбции.

Экспериментальные значения адсорбции азота при 77 и 90° К укладываются на прямые в координатах $\lg \frac{\theta}{\frac{p}{p_s}} - \theta$ при давлениях ниже 0,1—0,2 *н/м²*.

Важным уравнением изотермы адсорбции является уравнение (159) М. М. Дубинина и Л. В. Радушкевича. Исследование показало [25], что нижняя граница области, в которой уравнению (159) следуют все дисперсные твердые материалы (мелкопористые и крупнопористые), лежит в интервале $\theta = 0{,}1 \div 0{,}5$, а верхняя граница — в интервале $\theta = 0{,}75 \div 0{,}9$. Отклонение точек от прямой линии в координатах $\lg a - \left(\lg \frac{p}{p_s}\right)^2$ при высоких значениях θ $\left(\text{или } \frac{p}{p_s}\right)$ тем больше, чем более крупнопористым является адсорбент, т. е. чем больше максимальное число слоев, которое может адсорбироваться на стенках пор.

Если принять, что уравнение (159) характеризует мономолекулярную адсорбцию, то опытные точки должны ложиться вплоть до $\frac{p}{p_s} = 1$ в указанных координатах на прямую линию, пересекающую ось ординат в точке с ординатой $C = \lg a_m$. Это условие выполняется для естественных и синтетических цеолитов, имеющих поры диаметром около 0,5 *нм*, в которых полимолекулярная адсорбция невозможна.

Уравнение БЭТ (158), основанное на теории полимолекулярной адсорбции, хорошо выражает изотерму адсорбции в узких пределах $\frac{p}{p_s} = 0{,}05 \div 0{,}35$. Отклонения от этого уравнения начинаются при $\frac{p}{p_s} = 0{,}01 \div 0{,}04$, причем во всех случаях соответствующие участки характеризуют одновременно начало прямолинейной зависимости в координатах уравнения (159). Таким образом на изотерме адсорбции существует определенный участок перехода от уравнения Дубинина и Радушкевича к уравнению БЭТ, представляющий в сущности участок постепенного перехода от мономолекулярной к полимолекулярной адсорбции.

Как было показано в гл. VII, уравнение (159) в уточненной форме имеет вид уравнения (162).

Это уравнение хорошо согласуется с опытными данными по мономолекулярной адсорбции в широкой области давлений. В ряде случаев опытные данные согласуются с ним до давлений порядка 10^{-5} *н/м²* [57]. Большей частью изотермы адсорбции сохраняют прямолинейность в координатах уравнения (162) до давлений $\frac{p}{p_s} = 10^{-4} \div 10^{-5}$, что соответствует 10—1 *н/м²* для адсорбции паров при температуре их конденсации.

Уравнение (187) может служить для представления изотермы адсорбции азота при степени покрытия поверхности от $\theta = 0$ (нижняя граница) до $\theta = 0{,}1 \div 0{,}3$ (верхняя граница), тогда как уравнение (162) охватывает область от $\theta = 0{,}1 \div 0{,}5$ (нижняя граница) до $\theta = 0{,}75 = 0{,}9$ (верхняя граница). Таким образом, оба уравнения охватывают почти всю мономолекулярную область адсорбции.

Коэффициенты уравнений (162) и (187) связаны в случае адсорбции азота [28] соотношением

$$\frac{\lg 3}{\alpha} = 5{,}24D. \qquad (188)$$

Зная взаимосвязь между постоянными уравнений (162) и (187), можно построить изотерму адсорбции в мономолекулярной области вплоть до $\theta = 0$ по трем опытным точкам. Две точки должны быть получены в области $\theta = 0{,}5 \div 0{,}75$ и одна — при $\theta = 0{,}1$. В случае адсорбции азота при температуре его кипения два замера следует произвести при давлении 70—700 *н/м²* и один замер при 0,1—0,2 *н/м²*. Нанеся две первые точки на график в координатах $\lg a - \left(\lg \frac{p}{p_s}\right)^2$ и проведя через них прямую, можно найти a_m и D. С помощью соотношения вида (188) находим постоянные α и β уравнения (187), подставляя в него значения a/a_m и $\frac{p}{p_s}$ для третьей точки. Использование установленных закономерностей исключает необходимость проведения длительных и трудоемких измерений при низких давлениях.

В последние годы проведены измерения адсорбции атмосферных газов различными адсорбентами при низких давлениях. На рис. 98—102 и в табл. 23 представлены некоторые опытные данные, опубликованные в работах [25, 28, 41, 56, 57, 58], а также новые данные, полученные во ВНИИКИМАШе.

Большинство представленных на графиках изотерм адсорбции хорошо описываются в области давлений $\frac{p}{p_s} = 10^{-2} \div 10^{-4}$

уравнением (162), а при более низких давлениях — уравнением (187).

Из атмосферных газов адсорбенты лучше всего поглощают азот. Это объясняется наличием у молекул азота заметного квадрупольного момента. Энергия взаимодействия квадруполя азота с электростатическим полем поверхности твердого тела довольно велика и в некоторых случаях близка по величине к дисперсионной энергии взаимодействия. В результате молекулы

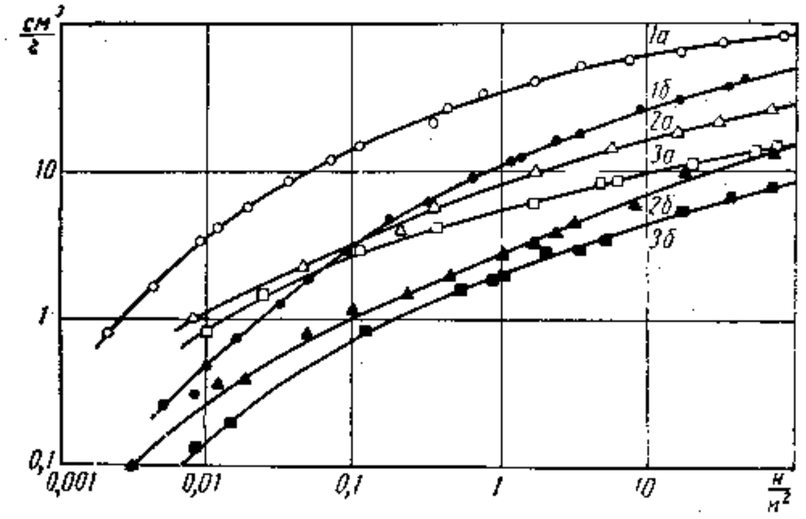


Рис. 98. Изотермы адсорбции азота силикагелем и алюмогелем при 77° К (кривые *а*) и 90° К (кривые *б*):
1 — силикагель КСМ; *2* — крупнопористый силикагель; *3* — активный глинозем

азота относительно сильнее удерживаются на поверхности адсорбента. По той же причине водород адсорбируется значительно лучше неона, имеющего более высокую температуру кипения.

Таблица 23

Константа * $\kappa = \frac{a}{p}$ уравнения Генри для плохо адсорбируемых газов

Адсорбент	κ при 77,4° К для			κ при 90° К для	
	H_2	Ne	He	Ne	He
Уголь СКТ	—	$1{,}5\cdot10^{-3}$	$4{,}2\cdot10^{-5}$	$5{,}4\cdot10^{-4}$	$2{,}0\cdot10^{-5}$
Уголь АГ-2	$7{,}5\cdot10^{-2}$	$6{,}3\cdot10^{-4}$	$3{,}5\cdot10^{-5}$	$2{,}4\cdot10^{-4}$	$1{,}4\cdot10^{-5}$
Силикагель КСМ . . .	$1{,}0\cdot10^{-3}$	—	—	—	—

* a в *см³/г* при 273° К и $1{,}013\cdot10^5$ *н/м²* (760 *мм рт. ст.*).

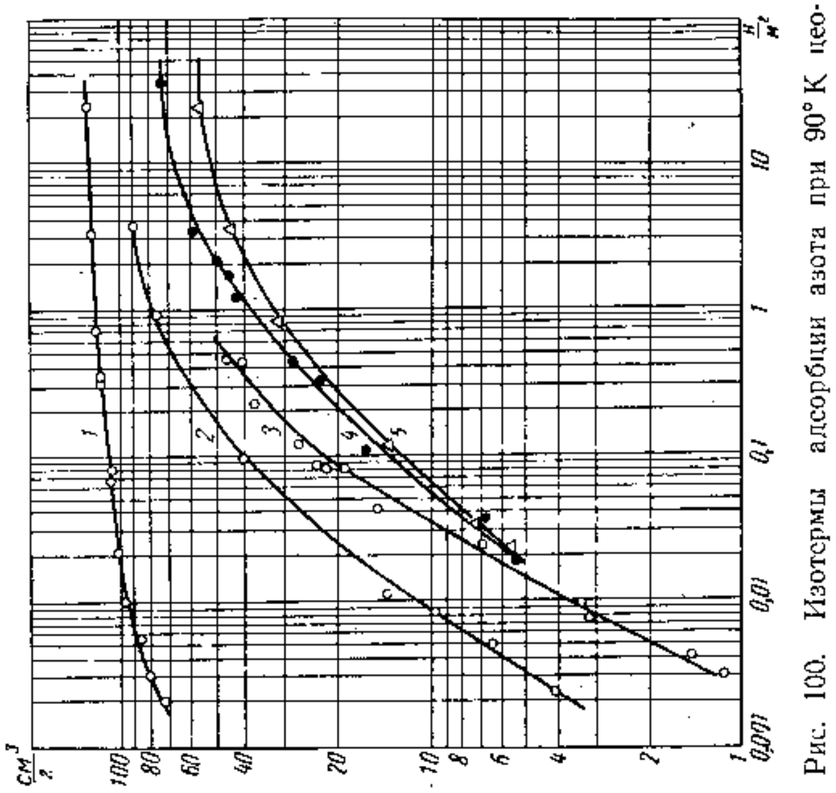


Рис. 100. Изотермы адсорбции азота при 90° К цеолитами:
1 — шабазит; *2* — CaE; *3* — CaA; *4* — NaX; *5* — CaX

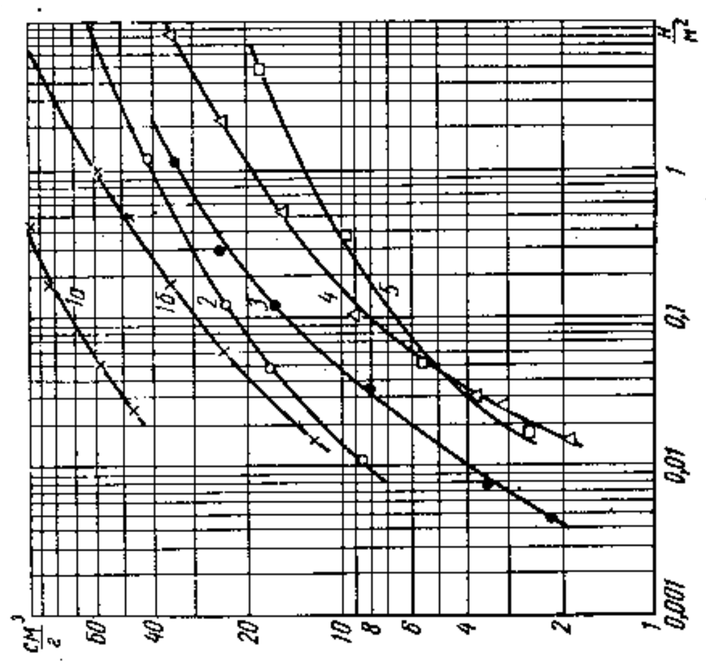


Рис. 99. Изотермы адсорбции азота при 90° К активированными углями:
1 — уголь СКТ (*а* — при 77° К, *б* — при 90° К); *2* — уголь БАУ; *3* — уголь КАД; *4* — уголь АР-3; *5* — уголь АГ-2

Аргон и кислород адсорбируются почти так же, как и азот активированными углями, представляющими собой аморфный углерод с неполярной поверхностью, и хуже азота на других адсорбентах, имеющих кристаллическую структуру.

Наибольшей адсорбционной способностью при низких давлениях обладает естественный цеолит — шабазит. Синтетические цеолиты также хорошо поглощают газы в условиях вакуума,

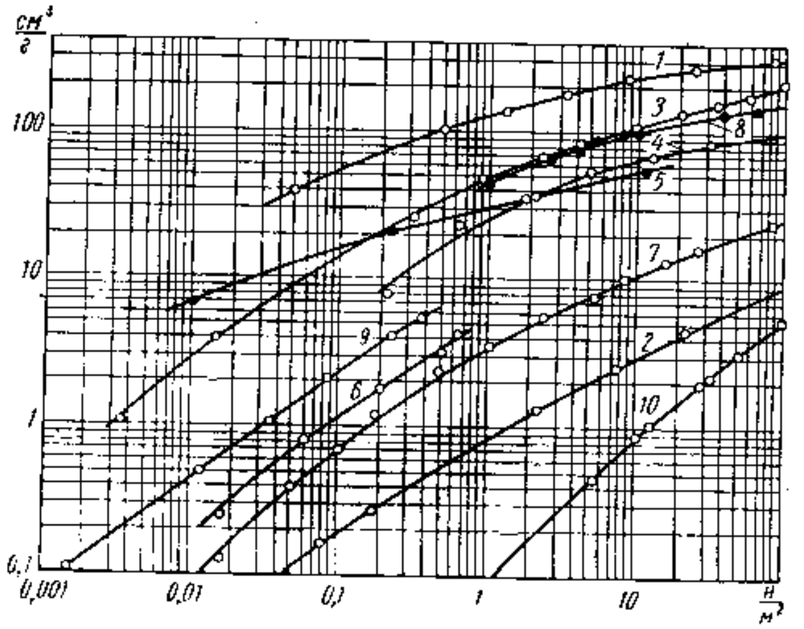


Рис 101. Изотермы адсорбции аргона, кислорода и водорода различными адсорбентами:

1 — уголь СКТ (аргон, 77° К); *2* — активный глинозем (аргон, 77° К); *3* — уголь СКТ (аргон, 90° К); *4* — шабазит (аргон, 90° К); *5* — СаЕ (аргон, 90° К); *6* — СаА (аргон, 90° К); *7* — силикагель С-У (аргон, 90° К); *8* — АГ-2 (кислород, 77° К); *9* — КСМ (кислород 77° К); *10* — АГ-2 (водород 77° К)

хотя и уступают шабазиту по адсорбционной способности. Цеолиты, называемые также молекулярными ситами, являются наиболее мелкопористыми среди известных сорбентов и находят в последнее время все большее применение.

Таблица 24

Структурные параметры цеолитов

Параметр	Шабазит	Цеолит типа А	Цеолит типа Х
Параметр элементарной ячейки в *нм*	—	1,23	2,49
Диаметр большой полости в *нм* . .	0,66—0,76	1,14	1,18
Диаметр малой полости в *нм* . . .	—	0,66	0,66
Количество молекул воды, размещающихся в большой полости . . .	12—14	27—28	32
Эффективный диаметр окон в большой полости в *нм*:	0,49—0,50	—	—
кальциевая форма	—	0,50—0,56	0,7
натриевая форма	—	0,42—0,475	0,8—0,9

Хорошие адсорбционные свойства цеолитов объясняются небольшими размерами полостей в кристаллической решетке, а избирательные свойства, благодаря которым эти адсорбенты получили название молекулярных сит,— малыми диаметрами окон в полостях, близкими к диаметрам молекул газов. Как видно из табл. 24, самые малые размеры полостей имеет шабазит. Это и является причиной его высокой адсорбционной способности при низких давлениях. К сожалению, шабазит, как и многие другие цеолиты, редко встречается в природе, а синтезировать его не удалось.

Другие адсорбенты имеют еще более крупные поры и, как следствие, меньшую поглотительную способность при низких давлениях (табл. 25). Увеличение количества пор, характеризуемого величиной удельной поверхности, может частично компенсировать увеличение их диаметра. Поэтому уголь СКТ не уступает по величине адсорбции цеолиту СаА, а в некоторой области давлений даже превосходит его.

Адсорбционная способность быстро возрастает с понижением температуры. Она увеличивается примерно в 10 раз при переходе от 90 к 77° К. Поэтому обеспечить длительное сохранение высокого вакуума в сосудах для жидкого азота значительно легче, чем в сосудах для жидкого кислорода.

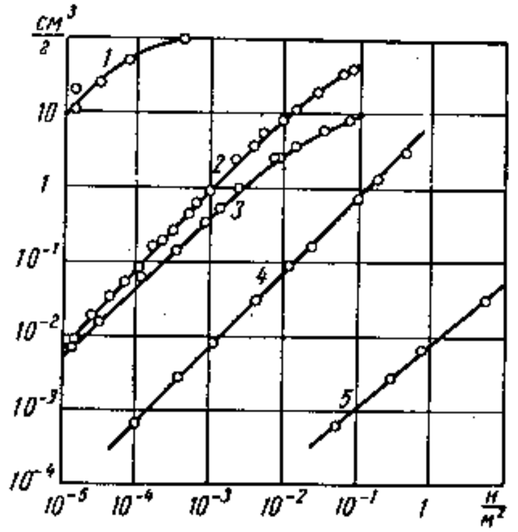


Рис. 102. Изотермы адсорбции водорода, неона и гелия при 20,4° К:

1 — уголь БАУ (водород); *2* — уголь БАУ (неон); *3* — силикагель КСМ (водород); *4* — силикагель КСМ (неон); *5* — силикагель КСМ (гелий)

Таблица 25

Сравнительная характеристика адсорбентов (*а* — адсорбция азота при 90° К)

Адсорбент	*a* в *см³/г* при 1,33 *мкн/м²* (10⁻⁵ *мм рт. ст.*)	$a/a_{КСМ}$ при 1,33 *мкн/м²*	*a* в *см³/г* при 1,33 *н/м²* (0,01 *мм рт. ст.*)	$a/a_{КСМ}$ при 1,33 *н/м²*	Удельная поверхность в *м²/г*	Средний диаметр пор (полостей) в *нм*
Шабазит	70	1170	125	10,4	650	0,7
Цеолит СаЕ (опытный образец) . .	2,8	46,6	80	6,7	—	—
Цеолит СаА	0,50	8,3	65	5,4	800	0,9
Уголь СКТ	1,0	17	65	5,4	1520	1,6
Силикагель КСМ	0,06	1	12	1	650	2,5
Активный глинозем	0,024	0,4	2,3	0,19	120	5,0

Наиболее эффективным способом подготовки (регенерации) адсорбента является термовакуумная обработка. Для полного удаления воды из пор [29] силикагель следует вакуумировать при 400° С, алюмогель — при 500° С. Термовакуумная обработка силикагеля при 150° С дает на практике достаточно удовлетворительные результаты и несколько уступает обработке при 400° С. Цеолиты типа А и Х, как и природные цеолиты, нужно вакуумировать при температуре не ниже 350° С.

Цеолиты типа Е [14] имеют сравнительно малую термостойкость, они частично разрушаются на воздухе, при 300° С. Однако это нельзя считать существенным недостатком, так как они хорошо регенерируются при 200° С. Сравнительно низкая температура регенерации является важным достоинством применительно к низкотемпературному оборудованию, которое большей частью не рассчитано на нагрев до высоких температур.

Активированные угли практически не адсорбируют воду на воздухе, поэтому их можно регенерировать при сравнительно низких температурах. Адсорбционная способность при низких давлениях угля СКТ, вакуумированного при 20° С, лишь на 15—20% ниже, чем у угля, вакуумированного при 100° С. Дальнейшее повышение температуры термовакуумной обработки до 300° С не изменяет адсорбционной способности угля СКТ.

Адсорбер, служащий для поддержания вакуума в изоляции, помещается большей частью в изоляционном пространстве и часто не может быть нагрет до температуры, необходимой для регенерации адсорбента. В этом случае адсорбент предварительно вакуумируется при требуемой температуре в отдельном аппарате или просто прокаливается при атмосферном давлении с обеспечением отвода водяного пара в атмосферу путем продувки адсорбента воздухом или азотом. Затем адсорбент в горячем виде загружают в адсорбер и вакуумируют вместе с изоляцией, подогревая его до максимально возможной температуры, желательно более 100° С. При таком способе регенерации адсорбционная способность, естественно, снижается. Так, адсорбционная способность при низких давлениях цеолита СаА, прокаленного при 400° С и затем вакуумированного, на 20—30% ниже, чем у того же цеолита, подвергнутого термовакуумной обработке при 400° С.

Если в изоляционном материале после вакуумирования остается много влаги и других летучих веществ, то адсорбент постепенно поглощает их. При содержании в цеолите СаА 5% влаги его адсорбционная способность при низком давлении снижается примерно вдвое. Для восстановления адсорбционной способности необходима повторная регенерация с таким же режимом, как и первоначальная.

В процессе эксплуатации теплоизоляционной конструкции адсорбент поглощает также воздух, натекающий через неплотности, не обнаруженные при изготовлении или появившиеся при эксплуатации.

При выполнении всех требований технологии вакуумирования влага попадает в адсорбент только с атмосферным воздухом. Даже при возрастании давления в изоляции до атмосферного 1 *кг* адсорбента поглотит около 1 *г* или 0,1% воды. Такое количество влаги незначительно повлияет на эффективность адсорбента. Поэтому адсорбент можно повторно регенерировать несколько раз, вакуумируя его вместе с изоляцией при 20° С, и лишь после этого проводить регенерацию с соблюдением изложенных выше требований.

Адсорбент должен выбираться с учетом всех его свойств. В теплоизоляционных устройствах применяют силикагель КСМ, цеолит СаА и уголь СКТ-Д, отличающийся от угля СКТ лучшей очисткой от примесей, облегчающей его вакуумирование. Он превосходит по адсорбционной способности силикагель, не уступает цеолиту СаА, легко регенерируется, но огне- и взрывоопасен в среде кислорода. Поэтому уголь СКТ-Д целесообразно применять во всех конструкциях, за исключением резервуаров для жидкого кислорода. В этом случае в адсорбер загружают обычно цеолит. Исключение представляют крупные резервуары, в которых в изоляционное пространство засыпают аэрогель или его смесь с металлическим порошком. Аэрогель гигроскопичен, содержит сравнительно много влаги, от попадания которой в процессе вакуумирования и эксплуатации (при неполном ее удалении) трудно защитить цеолит, жадно поглощающий пары воды даже при 70—100° С. Меньшая адсорбционная способность силикагеля вполне компенсируется сравнительной легкостью ее обеспечения и восстановления путем вакуумирования при температуре несколько более 100° С.

На основании опытных данных по адсорбции можно определить приблизительно количество адсорбента, необходимого для длительного поддержания вакуума в изоляции. Наиболее сложная часть задачи — определение начального давления, которое установится после вакуумирования изоляции и охлаждения оборудования до необходимой температуры, и определение скорости возрастания давления из-за выделения газов из материалов, находящихся в изоляционном пространстве. Величина начального давления оценивается на основании накопленного опыта в зависимости от вида изоляции и температуры оборудования. Например, при вакуумно-порошковой изоляции из перлита и температуре 90° К начальное давление достигает 0,2—0,5 $н/м^2$, а при вакуумно-многослойной изоляции из алюминиевой фольги и стеклобумаги и температуре 77° К давление достигает 0,002—0,005 $н/м^2$.

Скорость возрастания давления из-за выделения газов из металлических стенок и материалов, находящихся в изоляцион-

ном пространстве, в настоящее время не представляется возможным оценить ввиду отсутствия достаточных опытных данных. Выделяющиеся газы содержат значительное количество водорода, относительно плохо поглощаемого адсорбентами. Было предложено поэтому помещать в изоляционное пространство помимо адсорбента поглотитель, селективный по отношению к водороду, например окись меди или окись палладия.

Наружный кожух изоляционной конструкции окружен атмосферным воздухом, а внутренний сосуд заполнен каким-либо рабочим веществом. Наибольшая опасность возникает при заполнении внутреннего сосуда водородом. Этот газ хорошо диффундирует через многие металлы, причем скорость диффузии резко возрастает с повышением температуры. Диффузия ничтожна при температуре жидкого водорода и составляет существенную величину при положительных температурах. Поэтому желательно после слива жидкого водорода из сосуда и отогрева его удалить из сосуда оставшийся газообразный водород.

Потребное количество адсорбента можно определить, исходя из заданных величин допустимого натекания воздуха через неплотности в изоляционное пространство и допустимого возрастания давления в изоляции к концу срока эксплуатации.

Поглотительная способность адсорбентов по отношению к содержащимся в воздухе неону и гелию при температурах 77—90° К очень мала. Поэтому воздух адсорбируется значительно хуже, чем его основной компонент — азот в чистом виде, несмотря на малое содержание указанных газов в атмосфере ($1{,}8 \cdot 10^{-3}$% об. неона и $5{,}24 \cdot 10^{-4}$% об. гелия). Если в изоляционном пространстве на 1 $м^3$ приходится менее 10 $кг$ адсорбента при 77—90° К, то большая часть неона и почти весь гелий не адсорбируются и находятся в газовой фазе.

В этом случае непосредственные экспериментальные данные по адсорбции воздуха имеют ограниченную применимость и могут быть использованы лишь для расчетов систем, в которых соблюдается такое же соотношение веса адсорбента и объема системы, что и в опытах. Проще и надежнее вести расчет на основе данных по адсорбции азота, принимая, что кислород и аргон поглощаются так же, как и азот, а неон и гелий совершенно не адсорбируются. При таком методе вычисленное количество адсорбента будет несколько больше, что пойдет в запас. Рассмотрим два примера.

Пример 1. Определить количество угля СКТ-Д, необходимое для поддержания вакуума в изоляционном пространстве резервуара для жидкого азота с вакуумно-порошковой изоляцией.

Исходные данные для расчета: допустимая величина натекания $H = 5$ $н/м^2$ в сутки, срок эксплуатации до восстановления вакуума $\tau = 5$ лет, давление в начале эксплуатации $p_н = 0{,}5$ $н/м^2$, давление в конце срока эксплуатации $p_к = 5$ $н/м^2$.

Определяем количество воздуха, натекающего в изоляцию за время эксплуатации,

$$v_в = \frac{H\tau}{p_0} = \frac{5 \cdot 365 \cdot 5}{1{,}013 \cdot 10^5} = 9{,}0 \cdot 10^{-2}\ м^3/м^3 \text{ изоляционного объема.}$$

Здесь p_0 — нормальное (стандартное) атмосферное давление.

Определяем парциальное давление гелия и неона к концу срока эксплуатации

$$p_{\text{Не+Ne}} = v_в c_{\text{He+Ne}} p_0 =$$

$$= 9{,}0 \cdot 10^{-2} \cdot 2{,}32 \cdot 10^{-5} \cdot 1{,}013 \cdot 10^5 = 0{,}212\ н/м^2.$$

Это давление составляет лишь 4% от допустимой величины давления. Следовательно, влияние неона и гелия в данном случае можно не учитывать.

Находим по изотерме адсорбции при 77,4° К количество азота, адсорбируемое 1 $г$ угля СКТ, как разность значений адсорбции при $p_к$ и $p_н$

$$a_1 = a_к - a_н = 174 - 107 = 67\ см^3/г.$$

Требуемое количество угля СКТ-Д

$$G = \frac{v_в}{a_1} \cdot 10^3\ кг/м^3 = \frac{9{,}0 \cdot 10^{-2}}{67} \cdot 10^3 = 1{,}34\ кг/м^3.$$

Вычисленное таким образом количество адсорбента следует увеличить в 2—3 раза, учитывая неполную регенерацию его в промышленных условиях и необходимость поглощения газов, выделяющихся из материалов в изоляционном объеме.

Пример 2. Определить количество цеолита СаА, необходимое для поддержания вакуума в изоляционном пространстве резервуара для жидкого кислорода с вакуумно-многослойной изоляцией.

Исходные данные расчета: срок эксплуатации до восстановления вакуума $\tau = 1$ год, давление в начале эксплуатации $p_н = 0{,}001$ $н/м^2$, давление в конце эксплуатации $p_к = 0{,}01$ $н/м^2$.

При столь низком давлении допустимую величину натекания следует определять из условия, что парциальное давление гелия и неона к концу срока эксплуатации не должно превышать половины от $(p_к - p_н)$.

$$H = \frac{p_к - p_н}{2\tau c_{\text{He+Ne}}} = \frac{0{,}01 - 0{,}001}{2 \cdot 1 \cdot 365 \cdot 2{,}32 \cdot 10^{-5}} = 0{,}53\ н/м^2 \text{ в сутки.}$$

Количество натекающего воздуха

$$v_з = \frac{H\tau}{p_0} = \frac{0{,}53 \cdot 1 \cdot 365}{1{,}013 \cdot 10^5} =$$

$$= 1{,}91 \cdot 10^{-3}\ м^3/м^3 \text{ изоляционного объема.}$$

Определяем по изотерме адсорбции при 90° К количество азота, адсорбируемое 1 *г* цеолита CaA, как разность значений адсорбции при давлениях $\frac{p_к}{2}$ и $p_н$

$$a_1 = 1{,}7 - 0{,}4 = 1{,}3 \ см^3/г.$$

Требуемое количество цеолита

$$G = \frac{v_в}{a_1} \cdot 10^3 = \frac{1{,}91 \cdot 10^{-3}}{1{,}3} \cdot 10^3 = 1{,}47 \ кг/м^3.$$

Таким образом, в этом случае требуется приблизительно столько же адсорбента, как и в предыдущем. Однако при этом следует иметь в виду, что здесь, в отличие от первого примера, увеличением количества адсорбента не удается увеличить существенно срок эксплуатации до восстановления вакуума или допустимую величину натекания.

В теплоизоляционных конструкциях с температурой холодной стенки ниже 30° К, в частности, в сосудах для жидких водорода, неона и гелия, создание и поддержание высокого вакуума не вызывает затруднений. Давление паров всех веществ, кроме указанных, не превышает при этих температурах 10^{-3} *н/м²*, что достаточно для эффективной работы всех видов изоляции. Адсорбент здесь необходим лишь для поглощения трех упомянутых газов при проникновении их через неплотности в холодной или теплой стенке. При температуре жидкого гелия 4,2° К аналогичным образом вымораживаются также водород и неон.

Статика адсорбции в условиях вакуума исследована довольно хорошо, чего нельзя сказать о кинетике и динамике адсорбции под вакуумом, изучение которых необходимо для разработки наиболее рациональной конструкции адсорберов (адсорбционных насосов).

Рассмотрим изменение давления от начальной величины p_0 в изоляционном пространстве объема V с натеканием H в *н · м/сек* при работе адсорбционного насоса, обладающего скоростью поглощения S *м³/сек*. Предполагаем, что H и S постоянны и не зависят от времени и давления.

За время $d\tau$ поступает количество газа H $d\tau$, одновременно адсорбент поглощает количество газа $pS\,d\tau$. Напишем уравнение баланса газа

$$V dp = \mathrm{H} d\tau - pS d\tau,$$

откуда

$$\frac{dp}{p} = \frac{\mathrm{H}}{pV} d\tau - \frac{S}{V} d\tau.$$

Интегрирование по частям дает

$$p = \left(p_0 - \frac{\mathrm{H}}{S}\right) e^{-(S/V)\tau} + \frac{\mathrm{H}}{S}. \qquad (189)$$

По истечении достаточно длительного времени $\left(\tau \gg \frac{V}{S}\right)$ получим

$$p = \frac{\mathrm{H}}{S}.$$

Если скорость откачки адсорбционного насоса мала по сравнению с величиной натекания, то получить требуемый вакуум не удается, несмотря на достаточное количество адсорбента, найденное по описанной выше методике.

Скорость откачки адсорбционного насоса, аналогично конденсационному насосу, прямо пропорциональна площади геометрической поверхности слоя адсорбента. Поэтому желательно адсорбент, количество которого вычислено, как показано выше, распределить тонким слоем на возможно большей площади.

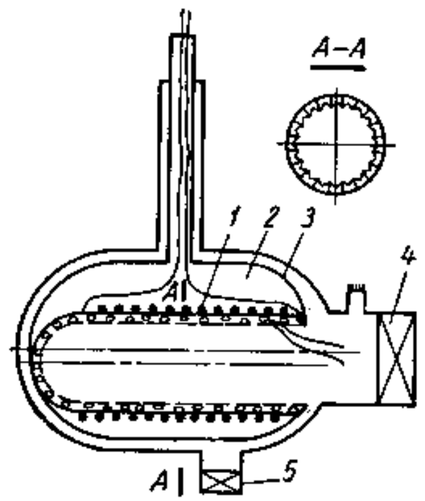


Рис. 103. Адсорбционный насос конструкции УФТИ (схема)

1 — адсорбент; *2* — нагреватель; *3* — сосуд для жидкого азота; *4* и *5* — вентили для откачки

Схема одного из адсорбционных насосов [37] показана на рис. 103. Адсорбент засыпан слоем толщиной 5—10 *мм* между трубой и концентрично расположенной сеткой. Для увеличения геометрической площади контакта адсорбента с газом сетке придается ребристая форма. Согласно опытным данным оптимальная величина отношения длины полости насоса к диаметру близка к 3.

Конструкция адсорбционного насоса, часто применяемая в сосудах для сжиженных газов, представляет собой камеру, помещенную на нижней части внутреннего сосуда. Одну стенку камеры образует сосуд, другую — каркас, обтянутый сеткой.

ГЛАВА XI

Конструкции теплоизоляционных устройств в технике низких температур

1. Изоляция низкотемпературных установок

Аппараты установок низкотемпературного разделения газовых смесей обычно помещают в общий кожух и изолируют волокнистыми материалами: минеральной или стеклянной ватой, шелковыми очесами. Кожух выполняется из отдельных стальных щитов с приваренными по краям уголками. Щиты соединяются между собой болтами. Между полками уголков прокладывают для уплотнения резиновые полосы. Изоляционный материал заполняет все пространство между кожухом и расположенными в нем аппаратами и трубопроводами.

Для защиты изоляции от увлажнения в нее иногда подают под небольшим избыточным давлением часть отходящего из блока разделения сухого азота, препятствующего проникновению влажного атмосферного воздуха. С этой целью в изоляционном пространстве помещают несколько перфорированных трубок, в которые подают газ с помощью специального вентиля на линии выхода азота из блока разделения.

Способ изоляции путем заполнения всего пространства внутри кожуха минеральной ватой имеет существенные недостатки. Значительная часть изоляционного материала расходуется излишне на заполнение промежутков между основными аппаратами, температуры которых близки между собой. Большое количество изоляционного материала удлиняет пусковой период установки. При ремонтах приходится выгружать большие количества шлаковой ваты, что усложняет и удорожает ремонт.

В связи с этим в крупных установках в последние годы стали применять двустенный кожух (так называемая камерная изоляция). Основные низкотемпературные аппараты размещаются во внутреннем кожухе (холодной камере), свободном от изоляции. Пространство между наружным кожухом и холодной камерой заполняется изоляционным материалом.

При проектировании холодной камеры необходимо учесть наличие температурных деформаций, возникающих при ее охлаждении от температуры окружающей среды до примерно —160° С.

В отечественных установках как внутренний, так и наружный кожух изготовляются из стального листа толщиной 4 *мм*. Между ними устанавливаются распорки, конструкция которых показана на рис. 104, *а*. Для уменьшения притока тепла труба *1* выполнена из стали Х18Н9Т и изолируется от стенок деревянными подушками. Толщину слоя изоляции принимают равной 500—600 *мм*.

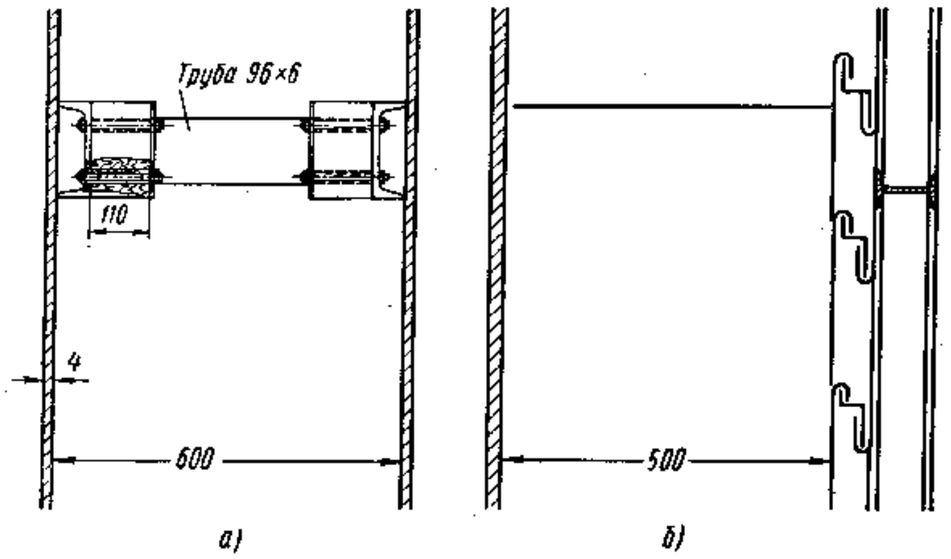


Рис. 104. Схема камерной теплоизоляции блоков разделения кислородных установок:
а — установка БР-1 ВНИИКИМАШ; *б* — установка фирмы Линде (ФРГ)

В кожухе оставляют специальные люки для прохода, закрываемые отдельными щитами.

На рис. 104, *б* показано устройство двустенного кожуха установки на 5000 $м^3/ч$ кислорода фирмы Линде (ФРГ). К тавровым балкам крепятся специальные направляющие элементы, на которые навешиваются алюминиевые листы наподобие кровельной черепицы. Такое устройство позволяет осуществлять местное удаление минеральной ваты, после того, как будет вынуто несколько алюминиевых листов.

Применение двустенного кожуха (рис. 105) позволяет уменьшить массу изоляции приблизительно в 2 раза [125] по сравнению с обычными конструкциями. Это приводит к значительному сокращению пускового периода. Приток тепла через изоляцию несколько увеличивается.

Приток тепла через изоляцию установок, работающих на температурном уровне 80—90° К и изолированных минеральной ватой, может быть оценен без учета увлажнения и конвективных токов в изоляции

$$q = \frac{\lambda}{\delta}(T_2 - T_1) = \frac{0{,}04}{0{,}5}(293 - 80) = 17\ вт/м^2.$$

По данным испытаний двух установок производительностью 5000 $м^3/ч$ кислорода приток тепла в установке со «сплошной» изоляцией находился в пределах 10,1—17,5 $вт/м^2$, а в установке с двустенным кожухом 9,9—27,5 $вт/м^2$. По данным обследования нескольких установок КТ-3600 и БР-5 приток тепла составил на установках первого типа 35—45 $вт/м^2$, а второго типа 30—35 $вт/м^2$.

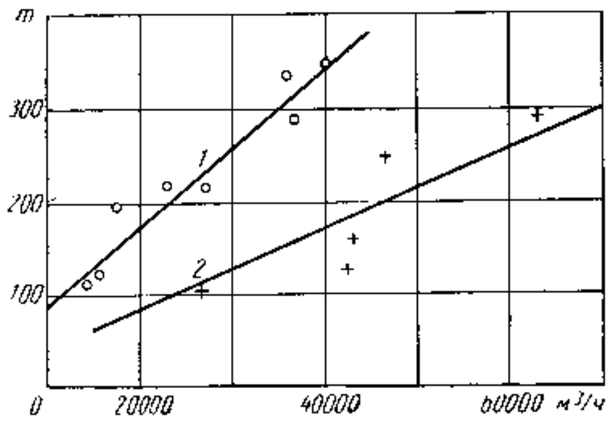


Рис. 105. Зависимость количества минеральной ваты, необходимой для изоляции кислородных установок, от количества перерабатываемого воздуха:
1 — сплошная изоляция; *2* — камерная изоляция

Для удобства расчетов приток тепла через изоляцию кислородных установок принято относить к количеству перерабатываемого воздуха. В частности, приведенные выше цифры для установок КТ-3600 и БР-5 соответствуют 1,7—2,0 $кдж/м^3$ перерабатываемого воздуха. Значительное количество тепла передается также по трубопроводам, вентилям и другой арматуре. Принимаемая для расчета величина притока тепла из окружающей среды отчасти учитывает и не поддающиеся точному учету утечки холодного газа через неплотности. Эта величина составляет 8,4 $кдж/м^3$ и более для установок, перерабатывающих воздух в количестве до 2000 $м^3/ч$; от 4,6 до 7,5 $кдж/м^3$ в установках, перерабатывающих 5000—10 000 $м^3/ч$; от 3,3 до 5,4 $кдж/м^3$ в установках, перерабатывающих от 10 000 до 30 000 $м^3/ч$. В установках, перерабатывающих от 30 000 до 100 000 $м^3/ч$ приток тепла через изоляцию находится в пределах 2,5—4,2 $кдж/м^3$.

Даже в установках с двустенным кожухом масса изоляции весьма велика и составляет от $^1/_3$ до $^1/_2$ от общей массы установки. Например, установка БР-2 производительностью 35 000 $м^3/ч$ кислорода имеет массу вместе с изоляцией 1230 $т$, из которых масса изоляции составляет 540 $т$ или 44%. Резкого снижения массы изоляции можно достичь путем замены минеральной ваты на вспученный перлитовый песок, объемная масса которого в

3—4 раза меньше. При этом значительно улучшатся условия труда при загрузке изоляции и уменьшится приток тепла через изоляцию.

В установках для ожижения водорода с насыпной изоляцией воздух, содержащийся в изоляционном объеме, будет конденсироваться в зоне изоляции, имеющей температуру ниже 80° К. Поэтому изоляцию заполняют водородом или гелием под избыточным давлением 50—100 $н/м^2$. Коэффициент теплопроводности изоляции в этом случае в 3—5 раз выше, чем у изоляции, заполненной воздухом. Поэтому для уменьшения общей толщины изоляции ее разделяют герметичной перегородкой на два слоя, из которых водородом заполняют лишь слой, прилегающий к холодной аппаратуре. Это позволяет уменьшить толщину изоляции примерно в 3 раза, не увеличивая теплопритока через нее.

Расход дорогостоящего низкотемпературного холода уровня 20° К может быть уменьшен путем установки экрана, охлаждаемого жидким азотом. При заданной общей толщине изоляции δ может быть найдено теоретически [40] оптимальное место расположения экрана.

Обозначим через x толщину изоляции между экраном и поверхностью холодного аппарата, T_0, T_1 и T_2 — температуры наружного кожуха, экрана и холодного аппарата, λ_1 и λ_2 — теплопроводность изоляции до и после экрана.

Тепло, проникающее через изоляцию, компенсируется холодильным циклом на уровнях T_1 и T_2. Для компенсации потерь холода на уровне T_1 потребуется работа $Q_1 \frac{T_0 - T_1}{T_1 \eta_1}$, где η_1 — термодинамический к. п. д. холодильного цикла на уровне T_1. Соответственно для компенсации потерь холода Q_2 на уровне T_2 будет необходима работа $Q_2 \frac{T_0 - T_2}{T_2 \eta_2}$.

Учитывая, что $Q_1 = \frac{\lambda_1}{\delta - x}(T_0 - T_1)$ и $Q_2 = \frac{\lambda_2}{x}(T_1 - T_2)$, находим

$$Q_1 \frac{T_0 - T_1}{T_1 \eta_1} + Q_2 \frac{T_0 - T_2}{T_2 \eta_2} =$$

$$= \frac{\lambda_1 (T_0 - T_1)(T_0 - T_1)}{(\delta - x) T_1 \eta_1} + \frac{\lambda_2 (T_1 - T_2)(T_0 - T_2)}{x T_2 \eta_2}.$$

Эта сумма должна быть минимальной. Приравнивая нулю первую производную, получаем

$$\lambda_1 (T_0 - T_1)^2 x^2 T_2 \eta_2 - \lambda_2 (T_1 - T_2)(T_0 - T_2)(\delta - x)^2 T_1 \eta_1 = 0. \quad (190)$$

Из этого уравнения можно найти x. Если положить $T_0 = 288°$ К; $T_1 = 80°$ К, $T_2 = 22°$ К; $\lambda_1 = 0{,}029\ вт/(м \cdot град)$; $\lambda_2 = 0{,}046\ вт/(м \cdot град)$; $\eta_1 = 0{,}3$ и $\eta_2 = 0{,}15$, то получим $x = 0{,}7$ и $\delta - x = 0{,}3$.

Дальнейшего снижения потерь холода достигают путем применения вакуумных видов изоляции. Так, например, выпускаемый серийно водородный ожижитель ВОС-3 снабжен вакуумно-порошковой изоляцией, а гелиевый ожижитель ГС-2 — высоковакуумной изоляцией с экраном, охлаждаемым жидким азотом.

В конструкциях с вакуумными видами изоляции граничные стенки должны иметь сравнительно большую толщину, обеспечивающую устойчивость от смятия под воздействием атмосферного давления. М. И. Блат, С. Е. Бреслер и Ю. Н. Рябинин [5] предложили использовать изоляционный материал для поддержания стенок и восприятия нагрузки от атмосферного давления. Промышленные конструкции тонкостенных панелей с вакуумными видами изоляции были разработаны лишь недавно [54, 89]. В качестве изоляционного материала используется стекловолокно или перлит. Толщина вакуумированного стекловолокнистого мата уменьшается под воздействием атмосферного давления примерно на 2%. В дальнейшем толщина постепенно стабилизируется, уменьшаясь еще на 2% через 1000 *ч*. Коэффициент теплопроводности мата почти не изменяется при обжатии.

Панель со стекловолокнистым матом откачивается 30 *мин* при 300° С, что обеспечивает начальное давление около 1 *н/м*². Вакуум имеет тенденцию к повышению и сохраняется по данным испытаний 10 лет. Средняя толщина панелей составляет 10—12 *мм*. В панелях размером 1 × 1 *м* тепловой поток через края, выполненные из нержавеющей стали толщиной 0,25 *мм*, примерно в 2 раза меньше теплового потока через изоляцию панели. Панели площадью 0,3 *м*² и больше эквивалентны по изолирующему действию мату такой же площади из стекловолокна плотностью 40 *кг/м*³ и толщиной 90—100 *мм*.

В качестве порошка для заполнения панелей был выбран перлит. Испытания показали, что наименьшей сжимаемостью обладает крупнозернистый перлит, для которого сжатие под атмосферным давлением составляет около 10% по объему.

Стенки панели изготовляют из листовой холоднокатаной стали толщиной 0,7 *мм*. Противоположные стенки панели соединяют по краям проставками U-образной формы из нержавеющей стали с целью уменьшения потока тепла между теплой и холодной стенками. Проставка приваривается между двумя гладкими стенками и может образовывать закругленные углы.

Желательно, чтобы в панели было как можно меньше отверстий, для чего был разработан способ ввода порошка в панель через одно небольшое отверстие. Устройство представляет собой эжектор, в который потоком воздуха высокого давления порошок засасывается и затем подается в панель. Трубка, по которой идет взвешенный в воздухе порошок, окружена наружной концентрической трубкой, по которой возвращается отработанный газ. Давление внутри панели регулируется путем изменения скорости

выходящего потока. Во время процесса заполнения панель должна вибрировать, чтобы облегчить заполнение порошком всех углов. При заполнении в панель вводится небольшой избыток порошка; в процессе вакуумирования порошок сжимается и панель сглаживается.

Примером применения описанных панелей может служить холодильник с внутренним объемом 550 *дм*³ и изоляцией толщиной 16 *мм*. Вместо использования в холодильнике отдельных панелей его корпус выполнен из внешней и внутренней оболочек, которые соединяются у края, обращенного к дверце. Дверца изготовлена из отдельной панели.

Согласно результатам испытаний ряда панелей увеличение давления в течение трех лет от исходного давления 2,7 *н/м*² составляло от 24,6 до 66,6 *н/м*².

Основы конструирования резервуаров для сжиженных газов

Основные элементы конструкции и схема резервуаров для сжиженных газов. При выборе материалов для изготовления резервуаров приходится учитывать ряд факторов. Внутренний сосуд резервуара изготовляют из металлов, сохраняющих достаточную ударную вязкость при низких температурах. В сосудах с высоковакуумной изоляцией применяют обычно медь, имеющую малую степень черноты. При использовании других видов изоляции внутренний сосуд изготовляют из аустенитных сталей или алюминиевых сплавов. В большинстве случаев применяют сталь Х18Н9Т, характеризующуюся высокой прочностью, хорошей свариваемостью и низкой теплопроводностью. Из алюминиевых сплавов наибольшее распространение получил сплав АМц, дающий вакуумно-плотные швы при электросварке с защитной атмосферой из аргона или под слоем флюса. Освоено также изготовление сосудов из сплава АМг5В, обладающего более высокой прочностью.

В последнее время в резервуарах для сжиженных газов (за исключением жидкого кислорода) все шире применяется титан и его сплавы, позволяющие резко снизить вес сосуда.

При эксплуатации резервуара сосуд нагружается только внутренним давлением. Однако для проверки герметичности сосуда гелиевым масс-спектрометрическим течеискателем и последующего контроля герметичности по величине натекания необходимо создавать вакуум в сосуде, т. е. нагружать его наружным давлением. Наружное давление составляет всего 0,1 *Мн/м*², а внутреннее 0,3 *Мн/м*² и более. Тем не менее прочность внутреннего сосуда определяется в первую очередь исходя из условий нагружения его наружным давлением, так как в этом случае возможна потеря устойчивости стенок и смятие сосуда.

В некоторых случаях, при необходимости снижения массы сосуда, невысоких требованиях к герметичности или малом количестве сварных швов, сосуд рассчитывают только на внутреннее давление и проверяют на герметичность под избыточным давлением методом щупа с помощью галоидного или гелиевого течеискателя.

Внутренний сосуд транспортного резервуара снабжают продольным и поперечным волнорезами для уменьшения плескания жидкости, которое увеличивает испаряемость вследствие перехода механической энергии в тепловую и попадания жидкости в теплые участки труб.

Наружный кожух резервуаров может выполняться, помимо указанных выше металлов, и из обычной углеродистой стали. Наиболее пригодна для этой цели сталь 20.

Кожух должен быть рассчитан на устойчивость против смятия под воздействием атмосферного давления. С целью уменьшения массы кожуха в большинстве случаев его делают относительно тонкостенным, обеспечивая необходимую жесткость с помощью продольных и поперечных ребер. Ребра жесткости могут привариваться как на внутренней, так и наружной поверхности кожуха. При этом нельзя допускать образования замкнутых полостей, изолированных от вакуумного пространства или окружающей среды. Такие полости затрудняют проверку герметичности резервуара и могут служить источником длительного поступления газов в вакуумируемое пространство.

Трубопроводы, пересекающие межстенное пространство и сообщающие внутренний сосуд с окружающей средой, выполняют с целью уменьшения притока тепла к жидкости из материала с малой теплопроводностью, например стали Х18Н9Т или медно-никелевых сплавов. Важную проблему при изготовлении резервуаров для сжиженных газов представляет создание вакуумно-плотного соединения алюминиевых сплавов, применяемых для изготовления сосудов, с другими металлами, используемыми для изготовления трубопроводов.

Известно несколько способов прочно-плотного соединения алюминия и его сплавов с другими металлами. Хорошие результаты даст меднение алюминиевого сплава химическим путем или плакированием с последующей пайкой оловянносвинцовым припоем. Алюминий имеет сравнительно высокий коэффициент термического расширения. Поэтому алюминиевая деталь должна быть охватывающей, чтобы при охлаждении в соединении возникали только напряжения сжатия.

Трубопроводы изготовляют, как правило, длинными с применением петлевых компенсаторов. Это позволяет исключить возникновение больших напряжений при заливке жидкости и небольших смещениях внутреннего сосуда относительно кожуха, снижая одновременно приток тепла по трубам. Сравнительно ко-

роткие трубы большого диаметра соединяют с кожухом с помощью тонкостенных сильфонов. Устанавливать сильфоны на трубах внутри изоляционного пространства не рекомендуется. Этот узел является относительно менее надежным в эксплуатации и должен располагаться в месте, доступном для ремонта без вскрытия кожуха.

Внутренний сосуд в кожухе крепится с помощью подвесок и опор. В некоторых конструкциях внутренний сосуд крепят только на подвесках, в других — используют сочетание опор с подвесками. При конструировании предусматривают возможность перемещения при сжатии охлажденного внутреннего сосуда.

Для расчета систем подвесок и опор в транспортных резервуарах принимают обычно следующие величины инерционных нагрузок:

Вертикальные нагрузки—вниз	$2 \div 4\ G$
Вертикальные нагрузки—вверх	$1\ G$
Продольные (осевые) нагрузки	$1 \div 3\ G$
Боковые нагрузки	$0{,}5 \div 1\ G$

Здесь G — сила тяжести внутреннего сосуда с жидкостью.

В резервуарах с вакуумно-многослойной изоляцией все конструктивные элементы, перссекающие изоляционное пространство, должны быть сконцентрированы в возможно меньшем числе мест. В первую очередь желательно освободить от конструктивных элементов цилиндрическую поверхность резервуара.

Некоторые элементы в резервуарах крепят с помощью фланцевых разъемных соединений. Уплотняющим материалом в соединениях на наружном кожухе обычно служит морозостойкая резина 14К-10 (ТУ МХП № 1166—58), которая выдерживает понижение температуры до 210° К без потери своих уплотняющих свойств. Уплотнительные прокладки на фланцевых соединениях внутреннего сосуда, работающего при температуре 77—90° К, выполняются из алюминия или меди. В этом случае прокладка заменяется новой после каждого демонтажа сосдинения. Хорошим прокладочным материалом для фланцевых соединений, работающих при температурах жидкого водорода и гелия, является индий.

Иногда в крупных резервуарах устраивают люк для доступа во внутренний сосуд. При этом [70] используют два типа люков (рис. 106). Первый тип не вносит дополнительного притока тепла, но требует нарушения вакуума в изоляции для доступа. Во втором типе заглушки в кожухе и сосуде связаны обечайкой с компенсатором, изолирующей проход от изоляционного пространства. В этом случае появляется дополнительный приток тепла, вследствие чего он используется при сравнительно кратковременном хранении и необходимости частого доступа во внутренний сосуд, так как обеспечивает сохранение вакуума при открытии лю-

ка. Кроме того, появление течи в уплотнениях заглушки внутреннего сосуда не вызывает во втором варианте ухудшения вакуума в изоляции.

Резервуар заполняется жидкостью обычно при помощи трубы, входящей во внутренний сосуд сверху и достигающей низа сосуда. В сосудах, как правило, имеется незаполненное жидкостью паровое пространство, составляющее 5—10% от полной емкости сосуда. Полнее залить сосуд сжиженным газом трудно. Указываемая в литературе величина емкости сосуда представляет собой обычно объем, заполняемый жидкостью. Жидкость можно сливать тремя способами: самотеком, передавливанием или с помощью насоса. Первый способ обычно применяют лишь в сосудах малой емкости. В некоторых случаях крупные резервуары имеют трубу для аварийного слива самотеком.

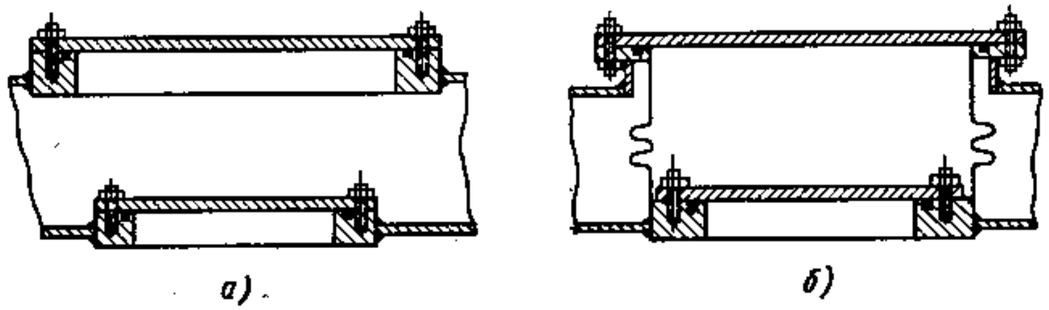


Рис. 106. Люки в резервуарах для сжиженных газов:
а — изолированный люк; *б* — сообщающийся люк

Для слива жидкости передавливанием резервуары снабжают вспомогательным устройством для поднятия давления. Устройство представляет собой испаритель в виде змеевика или оребренной трубы, в который может подаваться жидкость самотеком через специальный вентиль. Образовавшийся при испарении жидкости газ подается в газовое пространство резервуара, вызывая возрастание давления над жидкостью. Во время слива жидкости вентиль подъема давления держат слегка приоткрытым для поддержания требуемого давления. В некоторых случаях передавливание жидкости осуществляют при помощи наддува вспомогательного газа.

Слив жидкости с помощью насоса является наиболее эффективным способом, позволяющим быстро опорожнить резервуар и подать жидкость под необходимым давлением. В этом случае применяют обычно центробежные насосы.

Все трубы, соединенные с жидкостным пространством резервуара, выполнены таким образом, что при отсутствии потока образующийся при испарении жидкости газ вытесняет ее в емкость и теплый наружный конец трубы содержит только газ. Это достигается при наличии участка подъема на пути от

внутреннего сосуда к кожуху. В некоторых случаях достаточно установки гидравлического затвора на входе из внутреннего сосуда в трубу в виде колпака с прорезями. Если не принять мер для предотвращения «просачивания» жидкости в трубы, то потери от испарения могут увеличиться в несколько раз по сравнению с расчетными. В крупных резервуарах предпочитают все трубы выводить через верх емкости во избежание необходимости опорожнения резервуара при появлении течи в какой-либо линии.

Вентили на жидкостных трубах имеют обычную для таких условий конструкцию с удлиненным штоком из металла с малой теплопроводностью. Резервуары снабжают, как правило, указателем уровня жидкости. Чаще всего применяют указатели, основанные на измерении разности давлений между низом и верхом с помощью жидкостного или мембранного дифференциального манометра.

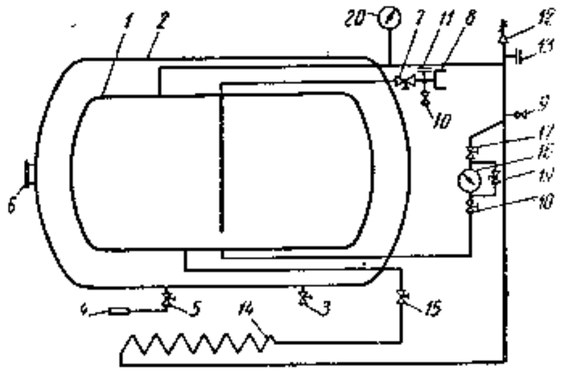


Рис. 107. Схема резервуара для жидкого кислорода

Типичная схема резервуара для жидкого кислорода показана на рис. 107. Внутренний сосуд *1* и кожух *2* имеют обычно цилиндрическую форму с эллиптическими днищами. Межстенное пространство вакуумируется через вентиль *3*. Давление в изоляции контролируют вакуумметром, датчик *4* которого может отключаться вентилем *5*. Кожух снабжен предохранительной мембраной *6*, защищающей его от разрыва в случае возрастания давления в межстенном пространстве при образовании течи во внутреннем сосуде.

Резервуар заполняется жидкостью и опорожняется через трубу, выходящую через верх сосуда и снабженную на конце вентилем *7* и гайкой Ротта *8* для присоединения гибкого шланга. Пары, образующиеся при заполнении сосуда жидкостью так же, как и пары, образующиеся вследствие теплопритока через изоляцию, отводятся в атмосферу через вентиль *9*. После перелива жидкости и отключения сосуда вентилем *7* давление в шланге может быстро увеличиться вследствие испарения оставшейся в шланге жидкости. Для предотвращения этого явления резервуар снабжается вентилем *10* для сброса газа из шланга. Кроме того, шланг защищается от разрыва предохранительной мембраной *11*. Внутренний сосуд защищен от разрыва в случае возрастания давления выше допустимого предохранительным клапаном *12* и разрывной мембраной *13*.

Для слива из сосуда кислорода поднимают в нем давление, подавая жидкость под действием статического столба в испаритель *14* через вентиль *15*. Уровнемер *16* подключают с помощью вентилей *17*, *18* и *19*, давление в сосуде измеряют манометром *20*.

Выбор типа изоляции. Областью применения высоковакуумной изоляции пока еще остаются небольшие сосуды для сжиженных газов, в частности, жидкого кислорода и азота емкостью от долей $дм^3$ до 10—15 $дм^3$. Эта изоляция позволяет обеспечить удовлетворительный в многих случаях уровень потерь от испарения при минимальных габаритах и сравнительной простоте выполнения. Высоковакуумную изоляцию целесообразно применять и в небольших сосудах для жидкого гелия в сочетании с установкой экрана, охлаждаемого жидким азотом.

Основные преимущества вакуумно-порошковой и вакуумно-многослойной изоляции перед высоковакуумной:

1) перенос тепла через изоляцию уменьшается;

2) граничные стенки не нужно полировать, их можно изготовлять из любых конструционных материалов, пригодных в данном случае.

При вакуумно-порошковой изоляции можно работать с более низким вакуумом, следовательно, требования к герметичности и чистоте стенок понижаются.

В отличие от высоковакуумной изоляции перенос тепла через вакуумно-порошковую и вакуумно-многослойную изоляцию зависит от толщины изоляционного слоя. В случае сосудов для сжиженных газов с температурой кожуха 293° К и температурой внутреннего сосуда не выше 90° К вакуумно-порошковая изоляция с использованием аэрогеля или перлита становится эквивалентной высоковакуумной при толщине слоя 30—40 *мм*. При использовании добавок металлических порошков указанное соответствие достигается при толщине слоя около 10 *мм*, а в случае многослойной изоляции для этого достаточно намотки трех-четырех экранов из алюминиевой фольги.

Вакуумно-многослойная теплоизоляция является наиболее эффективным из известных на сегодняшний день видов изоляции и должна использоваться во всех случаях, где необходимо обеспечить минимальный приток тепла. Однако в многих случаях целесообразно по экономическим соображениям использовать вакуумно-порошковую изоляцию. Так, например, в сосуде для хранения жидкого кислорода емкостью 100 $м^3$ потери продукта составляют 0,1—0,15% в сутки или 35—55% в год. С применением вакуумно-многослойной изоляции потери можно сократить в 10 раз. Однако связанное с этим увеличение стоимости изоляции таково, что потребовалось бы от 20 до 40 лет, чтобы окупить дополнительные затраты [119].

При выборе вида изоляции нужно учитывать род жидкости.

Сжиженные газы можно разделить на две группы. В группу А входят жидкости с точкой кипения от 77 до 185° К (кислород, азот, аргон и др.). В группу Б входят жидкости с точками кипения от 4,2 до 27° К (неон, дейтерий, водород и гелий). Жидкости группы Б имеют более высокую стоимость и значительно меньшие значения теплоты парообразования. Поэтому снижение притока тепла через изоляцию приобретает для них особенно важное значение.

Основной областью применения вакуумно-многослойной изоляции в настоящее время следует считать оборудование для работы с жидкостями группы Б. Дополнительное удобство использования вакуумно-многослойной изоляции в этом случае состоит в легкости обеспечения требуемого вакуума благодаря наличию чрезвычайно низких температур. Большинство веществ имеет при этих температурах очень малое давление паров. Так, например, давление паров кислорода достигает 10^{-5} *мм рт. ст.* уже при 30—35° К.

Иногда многослойную изоляцию целесообразно использовать и в сосудах для жидкостей группы А. Это относится, в первую очередь, к транспортным сосудам, в которых габариты и вес жестко ограничены. По мере дальнейшего развития и усовершенствования вакуумно-многослойной изоляции сфера ее применения будет расширяться.

Преимущества вакуумно-многослойной изоляции используются наиболее эффективно в том случае, если ею может быть заполнено все межстенное пространство. Если же ширина межстенного пространства в 2—3 и более раз превышает необходимую толщину многослойной изоляции ввиду необходимости размещения ребер жесткости, труб, опор и подвесок, то более целесообразно применять вакуумно-порошковую изоляцию, позволяющую обеспечить требуемое снижение потерь путем засыпки порошком всего межстенного пространства.

Одним из основных критериев при выборе типа изоляции сосуда должно служить конструктивное решение его основных элементов. В случае невозможности обеспечить сравнительно малый приток тепла по «тепловым мостам» (опорам, подвескам и трубам) применение наиболее эффективных видов изоляции, имеющих сравнительно высокую стоимость, может оказаться неоправданным. С другой стороны, если необходимо обеспечить минимальную величину потерь от испарения, то следует не только использовать наиболее эффективную изоляцию, но и создать конструкцию тепловых мостов с минимальными теплопритоками. При правильной конструкции сосуда приток тепла по конструктивным элементам не должен превышать 30—50% от общего притока тепла к жидкости.

На основании изложенного могут быть сформулированы общие рекомендации по применению изоляции для различных групп газов.

1) *Обычная (насыпная) изоляция* должна применяться в установках для ожижения газов групп А и В, трубопроводах и стационарных сосудах емкостью более 100 $м^3$ для газов группы А.

2) *Вакуумно-порошковая изоляция* должна применяться в установках для ожижения газов группы Б, миниатюрных установках для ожижения газов группы А, трубопроводах и сосудах емкостью более 100 $м^3$ для газов групп А и Б, стационарных сосудах любой емкости и транспортных сосудах емкостью более 1 $м^3$ для газов группы А.

3) *Вакуумно-многослойная изоляция* должна применяться в небольших установках для ожижения газов группы Б, трубопроводах и сосудах любой емкости для газов группы Б, трубопроводах, транспортных сосудах емкостью до 10—20 $м^3$ и стационарных сосудах емкостью до 1 $м^3$ для газов группы А.

Тип изоляции должен выбираться с учетом приведенных общих рекомендаций, а также конструктивных особенностей оборудования и дополнительных требований в каждом конкретном случае.

Эффективность хранения жидкости в резервуарах в зависимости от их размеров и конструкции. Приток тепла к жидкости через изоляцию тем ниже, чем меньше площадь поверхности сосуда, приходящаяся на единицу объема. С этой точки зрения наиболее выгодной формой является шаровая, имеющая наименьшее отношение поверхности к объему. Такую форму имеют небольшие сосуды с высоковакуумной и вакуумно-порошковой изоляцией, а также крупные хранилища. Резервуары емкостью от 100 $дм^3$ до 100 $м^3$ выполняют, как правило, в виде цилиндра с эллиптическими днищами. Сосуды такой формы легко могут быть изготовлены и лучше вписываются в габариты, допускаемые при перевозке автомобильным или железнодорожным транспортом.

Удельная поверхность цилиндра с длиной, равной диаметру, лишь на 10% больше, чем у шара такого же диаметра.

Увеличение емкости резервуара приводит к уменьшению потерь от испарения, которое может быть в общем случае выражено формулой

$$g = \frac{C}{V^{\frac{1}{n}}}, \qquad (191)$$

где g — потери от испарения (в % от полной емкости) в сутки;
V — емкость резервуара в $м^3$;
C и n — постоянные.

Увеличивая длину резервуара при заданном диаметре, ограниченном транспортными габаритами, мы практически не изменяем его удельной поверхности, а следовательно, и удельных

потерь жидкости от испарения, что соответствует значению $n = \infty$. Увеличение емкости резервуара при сохранении геометрического подобия его размеров и постоянства толщины изоляции приводит к уменьшению потерь в соответствии с уравнением (191) при $n = 3$. Для сосудов с высоковакуумной изоляцией n также должно быть равно 3, так как в этом случае увеличение расстояния между стенками не уменьшает переноса тепла. Наконец, если толщина изоляции возрастает пропорционально линейным размерам сосуда, то показатель степени n уменьшается до 1,5.

В действительности потери от испарения за счет притока тепла через изоляцию являются сложной функцией габаритов и конструкции резервуара. Толщина изоляции при увеличении емкости сосуда обычно возрастает медленнее, чем диаметр. Объем сосуда сначала увеличивают путем пропорционального увеличения диаметра и длины, а при достижении предельно допускаемого габаритами диаметра — за счет увеличения длины.

Потери жидкости от испарения зависят в значительной мере также и от притока тепла по опорам, подвескам и трубам. Доля этого притока в общем притоке тепла к жидкости зависит от емкости сосуда и его конструкции. Точки, соответствующие потерям жидкого кислорода, азота и водорода в промышленных резервуарах, нанесены на рис. 108. Согласно опытным данным для выпускаемых промышленностью кислородных сосудов с высоковакуумной изоляцией $C = 2{,}4$ и $n = 4{,}3$. Увеличение n по сравнению с теоретическим значением ($n = 3$) объясняется влиянием притока тепла по горловине и опорам.

При вакуумно-порошковой изоляции из аэрогеля или перлита $C = 1{,}3$ и $n = 1{,}9$, а при вакуумно-многослойной изоляции $C = 0{,}5$ и $n = 1{,}6$. Таким образом, потери от испарения в промышленных резервуарах для жидкого кислорода и азота можно принять в среднем пропорциональными $V^{-0{,}57}$. Отношение потерь от испарения в резервуарах с вакуумно-порошковой изоляцией к потерям при многослойной изоляции мало зависит от емкости резервуара и составляет приблизительно 2,5, т. е. в 10 раз меньше отношения коэффициентов теплопроводности изоляций. Можно назвать три причины такого расхождения отношений: 1) коэффициент теплопроводности смонтированной на сосуде многослойной изоляции в 2—3 и более раз превышает лабораторный коэффициент теплопроводности; 2) толщину многослойной изоляции делают обычно в несколько раз меньше по сравнению с порошковой изоляцией; 3) значительную долю от общего теплопритока составляет приток по тепловым мостам.

Естественно ожидать, что при использовании экранированной вакуумно-порошковой изоляции, имеющей коэффициент теплопроводности в 3—4 раза ниже по сравнению с чистыми

аэрогелем или перлитом, резервуары могут иметь примерно такие же потери, как и при многослойной изоляции. Это подтверждается приведенными на рис. 108 данными для нескольких резервуаров. Следует учесть, что резервуары емкостью 640 и 1200 *дм*³ имеют повышенный приток тепла по тепловым мостам, в частности, первый из них снабжен широкой горловиной диаметром 380 *мм*.

Для резервуаров с вакуумно-порошковой изоляцией из аэрогеля и перлита приведены две кривые. Кривая *3* характеризует потери в резервуарах с более совершенной системой крепления

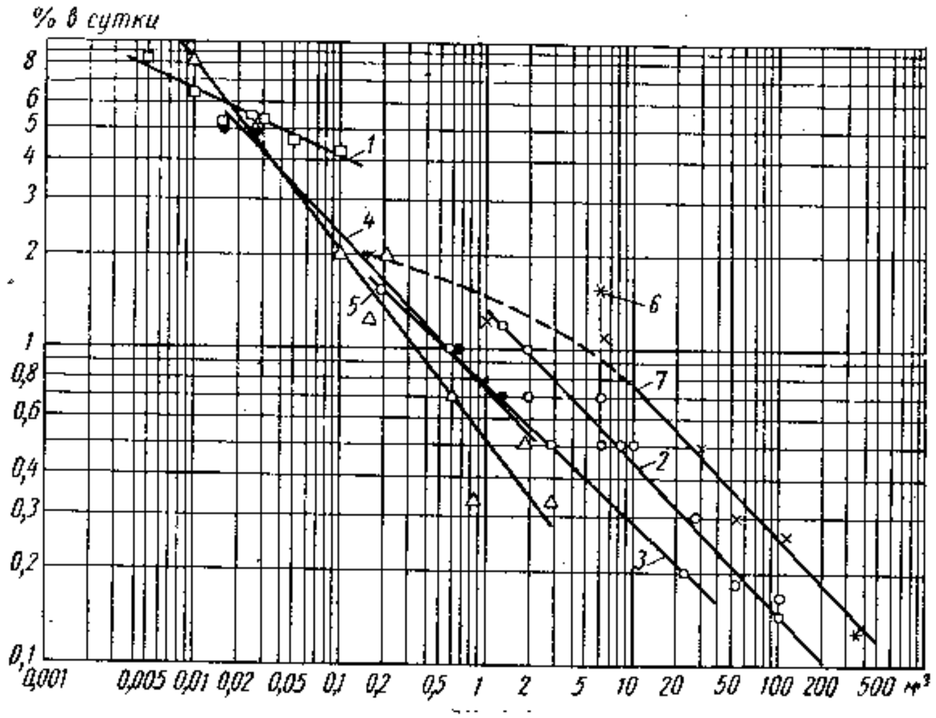


Рис. 108. Зависимость потерь от испарения в резервуарах для сжиженных газов от их емкости:

1 — высоковакуумная изоляция (кислород и азот); *2* — вакуумированные перлит и аэрогель (кислород и азот); *3* — вакуумированный перлит в резервуарах с усовершенствованными подвесками (кислород и азот); *4* — вакуумированная смесь аэрогеля с металлическим порошком (кислород и азот); *5* — вакуумно-многослойная изоляция (кислород и азот); *6* — вакуумированный перлит (водород); *7* — вакуумно-многослойная изоляция (водород)

внутреннего сосуда в кожухе на предварительно напряженных подвесках, описанной в гл VIII. Мы видим, что удельные потери жидкости от испарения при одном и том же типе изоляции изменяются в широких пределах в зависимости от конструкции резервуаров. Поэтому нельзя оценивать, как это иногда делают, качество изоляции непосредственно на основании данных по потерям. Следует всегда учитывать емкость резервуара и конструкцию тепловых мостов.

Потери жидкого водорода в промышленных резервуарах (рис. 108) при емкости более 5 *м*³ следуют уравнению (191) с постоянными $C = 2{,}4$ и $n = 2{,}0$. Поскольку величина n близка для сосудов с жидким водородом и азотом, отношение значений C, равное приблизительно 5, определяет отношение удельных потерь этих жидкостей в промышленных резервуарах. Потери в относительно небольших сосудах для жидкого водорода близки к потерям азота в сосудах такой же емкости, что объясняется использованием в первом случае холода испарившегося водорода.

Потери водорода приблизительно одинаковы при использовании вакуумно-порошковой и вакуумно-многослойной изоляции. Однако толщина слоя порошковой изоляции из перлита в несколько раз больше, что увеличивает габариты резервуара и потери водорода на охлаждение. Поэтому вакуумно-порошковую изоляцию применяют лишь в крупных стационарных хранилищах для жидкого водорода, где удельные потери малы даже при менее эффективной изоляции, а простота и надежность в эксплуатации приобретает особенно важное значение.

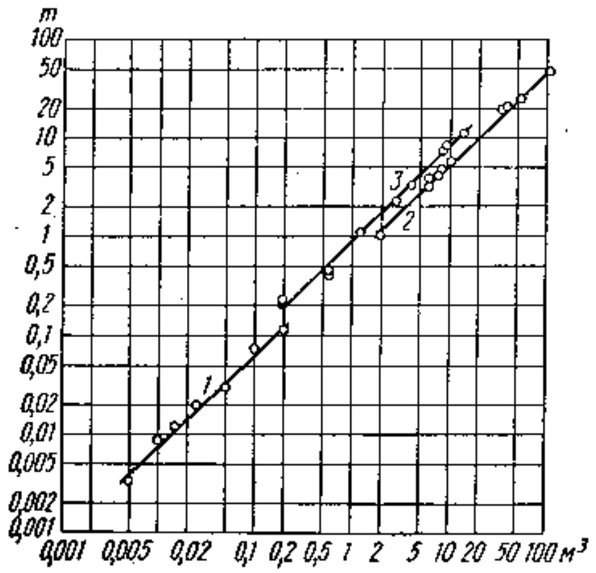


Рис. 109. Зависимость массы резервуаров для жидкого кислорода от их емкости:

1 — сосуды с вакуумной изоляцией; *2* — стационарные резервуары с вакуумно-порошковой изоляцией; *3* — транспортные резервуары с вакуумно-порошковой изоляцией

Важной характеристикой резервуаров для сжиженных газов является удельная масса резервуара, приходящаяся на единицу полезной емкости. Зависимость между массой резервуаров для жидкого кислорода и азота, выпускаемых промышленностью, и их емкостью приведена на рис. 109. Удельная масса однотипных резервуаров при увеличении емкости постепенно снижается. Для небольших сосудов с вакуумно-порошковой изоляцией она почти в 2 раза меньше, чем для сосудов с высоковакуумной изоляцией. Масса транспортных резервуаров приблизительно в 1,5 раза больше, чем стационарных, благодаря более мощным креплениям, воспринимающим инерционные нагрузки. Величина удельной массы практически всех сосудов для жидкого кислорода и азота находится в пределах 400—1000 *кг/м*³.

Резервуары для сжиженных газов

Резервуары с обычной изоляцией. В настоящее время обычной изоляцией снабжаются лишь резервуары емкостью более 100 *м*³. Выпускавшиеся ранее сосуды меньшей емкости описаны в работе [48].

Хранилища для жидкого кислорода с обычной изоляцией изготавливают большей частью в виде шара или вертикального цилиндра с днищем, опирающимся на изолирующий фундамент из пеностекла. Остальную поверхность изолируют шлаковой ватой или вспученным перлитовым песком.

В таких резервуарах необходимо принимать меры против промерзания грунта под ними. С этой целью применяют нагревательное устройство под резервуаром или устанавливают последний на столбах.

Защитить изоляцию от увлажнения можно несколькими способами: созданием парового барьера на теплой стороне изоляционного слоя, устройством вентиляционной трубы с осушительным патроном, заполненным адсорбентом, и подачей в изоляционное пространство сухого газа под небольшим избыточным давлением.

В крупных хранилищах обычно используют последний способ, пропуская через изоляцию сухой азот, выходящий из воздухоразделительной установки.

Большие размеры сосуда позволяют увеличить толщину слоя изоляции до 1 *м* и более. В результате относительная величина потерь от испарения становится даже меньшей, чем в сосудах с вакуумно-порошковой изоляцией. Так, например, в цилиндрическом резервуаре на 935 *т* потери кислорода от испарения составляют 0,15% в сутки, а при емкости 2800 *т* потери снижаются до 0,12% в сутки [15]. Другим примером вертикального цилиндрического сосуда может служить резервуар на 560 *т* жидкого кислорода, изолированный перлитом и имеющий потери 0,1—0,25% в сутки [118]. Для предотвращения каких-либо потерь кислорода на сосуде предусмотрен змеевик обратной конденсации.

В качестве примера шарового хранилища можно указать на сосуд, служащий для заполнения баков первой ступени ракеты Сатурн [110]. Сосуд имеет емкость 473 *м*³ и наружный диаметр 13,1 *м*³. Изоляция из перлита толщиной 1,2 *м* обеспечивает потери менее 0,5% в сутки.

Хранение жидкого азота в сосудах с обычной изоляцией представляет трудности вследствие конденсации атмосферного воздуха на внутренней стенке. Это приводит к значительному увеличению потерь от испарения. Один из способов устранения указанного явления заключается в поддержании избыточного давления в слое изоляции путем подачи в межстенное пространство части испаряющегося азота. Второй способ состоит в хранении

жидкого азота под давлением выше 0,27 *Мн/м*², при котором температура кипения азота становится выше температуры начала конденсации воздуха.

Сосуды с высоковакуумной изоляцией. Сосуды с высоковакуумной изоляцией, получившие название сосудов Дьюара, применяются для хранения и транспортирования небольших количеств сжиженных газов.

Сосуд состоит из двух медных шаров, зазор между которыми не превышает обычно 10—15 *мм*. Внутренний шар подвешен на длинной тонкостенной горловине из мельхиора или нержавеющей стали и закрепляется для устранения боковых перемещений несколькими упорами. Снизу к внутреннему шару припаяна камера, заполняемая адсорбентом. Стенки шаров и камеры, расположенные в изоляционном пространстве отполированы до зеркального блеска.

Изоляционное пространство откачивается до давления 0,1 *н/м*², после чего перекрывается путем пережатия свинцовой вакуумировочной трубки. При заливке жидкости в сосуд охлажденный адсорбент поглощает остаточные газы, снижая давление до 10^{-3} *н/м*². Минимальный приток тепла через 1 *м*² поверхности при этом составляет 8—10 *вт*. Длительность сохранения достаточно высокого вакуума в сосудах колеблется от нескольких месяцев до нескольких лет. Гарантийный срок равен 6 месяцам, не считая 3 месяцев хранения на складе.

Характеристика выпускаемых отечественной промышленностью сосудов Дьюара емкостью от 5 до 25 *дм*³ дана в табл. 26. Здесь же приведены данные для сосудов большей емкости.

Таблица 26

Характеристика сосудов Дьюара

Полезная емкость сосуда			Масса порожнего сосуда в *кг*	Наружный диаметр в *мм*	Высота в *мм*	Испаряемость в в спокойном состоянии в *г/ч*	
в *дм*³	по жидкому кислороду в *кг*	по жидкому азоту в *кг*				в начале эксплуатации	в конце гарантийного срока
5	5,7	4,01	3,4	240	442	25	40
10	11,4	8,02	8,8	320	560	30	45
15	17,1	12,03	11,9	370	700	35	50
25	28,5	20,05	20,0	440	775	65	80
50	57	40,1	30	560	840	110	
100	114	80,2	73	560	1420	200	
200	228	160,4	113	670	1600	—	

В ряде случаев пользуются сосудами, представляющими собой открытый сверху вертикальный цилиндр. Такие сосуды удобны, когда необходимо погрузить какой-либо материал или аппараты в сжиженный газ. Вследствие большой площади поперечного сечения холодной внутренней стенки в месте соединения ее с кожухом потери от испарения в цилиндрических сосудах сравнительно велики. Поэтому такие сосуды не рекомендуются для длительного хранения и перевозки жидкости.

Выпускаемые промышленностью металлические сосуды цилиндрической формы имеют емкость от 0,5 до 150 *дм*³. Внутренний диаметр сосудов 50—450 *мм*, глубина 230—1000 *мм*. Величина потерь от испарения зависит от емкости сосуда, отношения длины к диаметру, а также степени заполнения сосуда. В сосудах емкостью 5—10 *дм*³ жидкий кислород или азот обычно полностью испаряется в течение 2—3 суток.

Высоковакуумная изоляция постепенно вытесняется вакуумно-порошковой и вакуумно-многослойной изоляциями. Все же она, по-видимому, сохранится в сосудах емкостью до 10 *дм*³, в которых она позволяет обеспечить достаточно малые потери от испарения при малых габаритах и массе. Сосуды с высоковакуумной изоляцией для хранения водорода, неона и гелия снабжают в большинстве случаев охлаждаемым экраном. Конструкция этих сосудов описана ниже.

Резервуары с вакуумно-порошковой изоляцией. Вакуумно-порошковой изоляцией снабжается большинство резервуаров для жидкого кислорода и азота емкостью от нескольких литров до 100 *м*³. Сравнительно небольшие сосуды изолируются смесью теплоизоляционного и металлического порошков, крупные резервуары — теплоизоляционным порошком в чистом виде.

Сосуды АСД-15 и АСД-25 емкостью 15 и 25 *дм*³ изолированы смесью порошков [44]. Сосуд АСД-15 (рис. 110) цельносварной из алюминиевого сплава АМц. Горловина *3* из нержавеющей стали (0,3 *мм*) диаметром 25 *мм* присоединена к внутреннему и наружному сосудам *1* и *2* на припое ПОС-61 через медненые втулки из АМц. Увеличение диаметра горловины по сравнению с выпускаемыми сосудами с вакуумной изоляцией позволяет значительно сократить время наполнения и опорожнения. В нижней части установлен фиксатор *4*, ограничивающий поперечное перемещение внутреннего сосуда в кожухе. Межстенное пространство шириной 30 *мм* заполнено смесью аэрогеля с бронзовой пудрой в количестве 2,5 *кг*. В адсорбционную камеру засыпается 500—700 *г* цеолита СаА, если сосуд предназначен для кислорода, или угля СКТ, если сосуд предназначен для азота. Масса сосуда составляет 7 *кг*. Вакуумирование производится через отожженную алюминиевую трубку диаметром 12 × 2 *мм*, которая соединена с помещенной в изоляции свернутой в кольцо перфорированной трубкой, покрытой снаружи фильтрующим материалом.

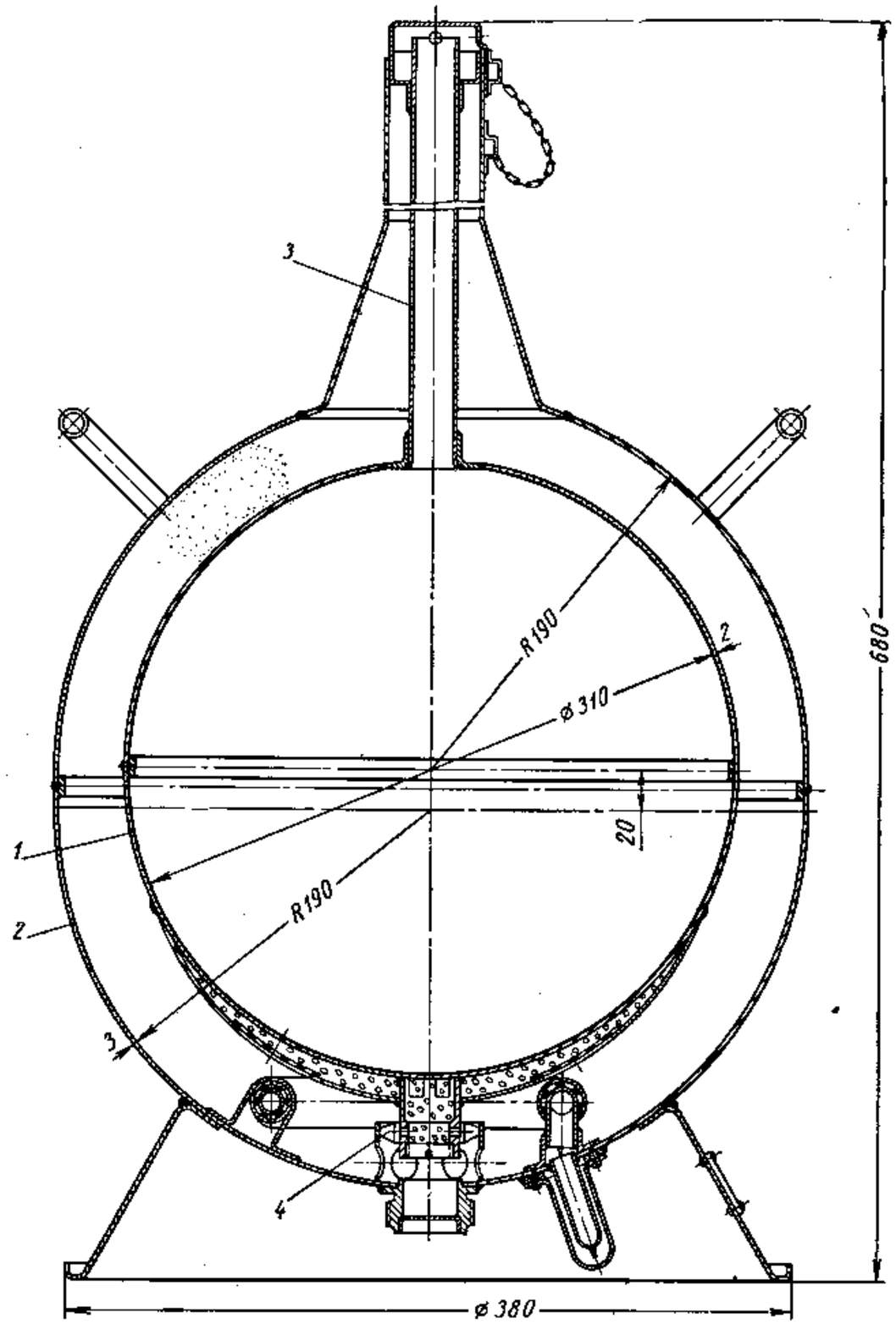


Рис. 110. Сосуд емкостью 15 *дм*³ с вакуумно-порошковой изоляцией

Установка такой трубки позволила уменьшить время вакуумирования в 4 раза. После окончания откачки вакуумировочная трубка пережимается и заваривается. Потери жидкого азота от испарения в этом сосуде составляют 25 *г/ч* или 5,0% в сутки, т. е. на 30% меньше, чем в сосуде с вакуумной изоляцией.

Сосуд АСД-25 отличается от АСД-15 включением цилиндрической обечайки высотой 130 *мм*.

Фирмой Линде (США) выпускается сосуд емкостью 25 *дм*³, изолированный смесью аэрогеля и медного порошка (материал CS-5). Потери от испарения составляют 3,8% в сутки при заполнении жидким кислородом и 5,0% в сутки при заполнении жидким азотом. Использование вакуумно-порошковой изоляции снижает требования к вакууму и увеличивает, по данным фирмы, длительность эксплуатации без ремонта до 5—10 лет.

Большую выгоду дает применение вакуумно-порошковой изоляции, экранированной металлическим порошком, в небольших газификаторах жидкого кислорода. В этом случае возможно хранение жидкого кислорода в течение 2—3 суток без стравливания газа через предохранительный клапан. Газификатор LC-3, выпускаемый [15] фирмой Линде (США), изолирован смесью аэрогеля и медного порошка. Он представляет собой вертикальный цилиндр диаметром 510 *мм* и высотой 1470 *мм* с массой 95 *кг* и вмещает 113 *кг* жидкого кислорода. Кислород может храниться без потерь через предохранительный клапан (давление срабатывания клапана 1,72 *Мн/м*²) в течение 60 *ч* при условии, что начальное давление составляло 0,62 *Мн/м*². Для обеспечения требуемой эффективности изоляции она вакуумируется в течение нескольких суток при нагреве сосуда до 200° С. После окончания откачки давление при комнатной температуре составляет около 13,3 *н/м*² (0,1 *мм рт. ст.*), а при заливке жидкого кислорода снижается до 0,13 *н/м*².

Процесс газификации в этом аппарате прост. Рабочее давление создается сразу же при наполнении газификатора и поддерживается все время, поэтому устройство для подъема давления не нужно. При сравнительно высоком давлении отбор кислорода производится непосредственно из газовой фазы. При уменьшении давления ниже 0,62 *Мн/м*² автоматически закрывается байпасный клапан и начинает отбираться жидкий кислород, газифицирующийся в испарителе. Газификатор при нормальной работе выдает 8.5 *м*³/*ч* кислорода.

Экранированной вакуумно-порошковой изоляцией снабжаются также сосуды большей емкости. В качестве примера можно указать на сосуд емкостью 640 *дм*³ для хранения биологических и других материалов в жидком азоте. Сосуд имеет широкую горловину диаметром 380 *мм* и две поворотные тарелки диаметром 1000 *мм*, погруженные в жидкий азот. Потери азота от испарения составляют около 1% в сутки.

Резервуар конструкции ВНИИКИМАШа емкостью 320 *дм*³ показан на рис. 111. Внутренний сосуд представляет собой цилиндрическую обечайку диаметром 800 *мм* с коробовыми днищами. Сосуд сваривается из листов алюминиевого сплава АМг6 толщиной 3 *мм*, кожух — из того же материала толщиной 5 *мм*. Сосуд подвешен вертикально в кожухе на верхней опоре. Горизонтальные нагрузки, возникающие при движении резервуара, воспринимает нижняя опора. Обе опоры выполнены из текстолита. Трубы изготовлены из стали Х18Н9Т и припаиваются к медным штуцерам из сплава АМг6, приваренным к сосуду и кожуху. В нижней части внутреннего сосуда приварена адсорбционная камера объемом около 6 *дм*³. Ширина цилиндрической части межстенного пространства составляет 70 *мм*. Резервуар рассчитан на рабочее давление 0,2 *Мн/м*². Он имеет высоту 1270 *мм*, габариты в плане 1070 × 1150 *мм*, массу 180 *кг*.

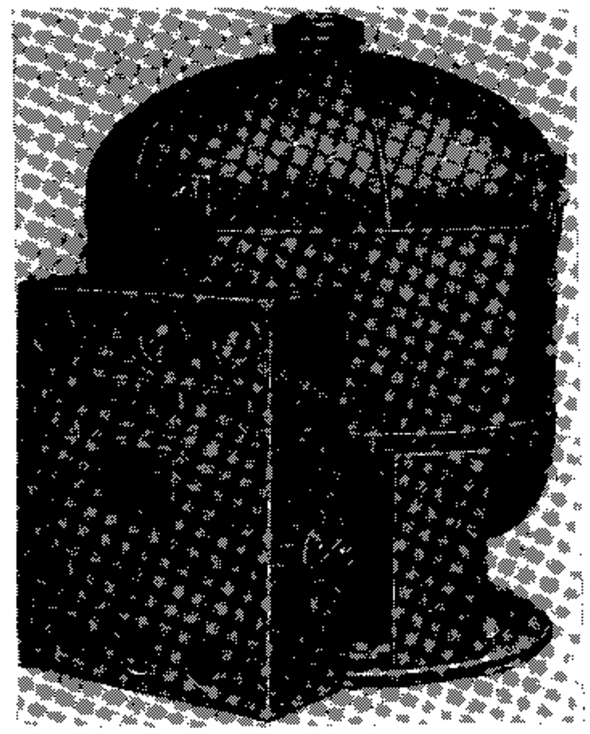


Рис. 111. Резервуар емкостью 320 *дм*³ с вакуумно-порошковой изоляцией

Потери кислорода от испарения при заполнении изоляционного пространства аэрогелем составляют 0,3—0,4 *кг/ч* или 2,0—2,6% в сутки.

Конструкция транспортного резервуара [42] емкостью 1,1 *м*³ показана на рис. 112. Внутренний сосуд *1* резервуара представляет собой цилиндрическую емкость диаметром 940 *мм* с эллиптическими днищами из стали Х18Н9Т. Сосуд опирается на четыре текстолитовых подушки, к которым он притягивается с помощью четырех вертикальных цепей *7*. Для восприятия продольных инерционных усилий служат четыре продольные цепи, связывающие сосуд с вертикальными стойками кожуха.

Все цепи как вертикальные, так и продольные, изготовляются из нержавеющей стали и снабжаются тарельчатыми пружинами — амортизаторами.

Кожух *2* из стали 20 также состоит из цилиндрической обечайки с эллиптическими днищами. В местах прохода через дни-

ще кожуха установлены сильфоны из нержавеющей стали. Газовая труба соединяет паровое пространство сосуда с коллектором, укрепленным на внутренней стороне крышки *5*, от которого идут трубки к вентилю сброса газа, манометру, предохранительному клапану и вентилю указателя уровня «верх». Такое выполнение уменьшает количество выводов труб через вакуумное пространство и делает конструкцию более надежной. Манометр, указатель уровня жидкости и все вентили смонтированы на крышке, которая своим фланцем подсоединяется к кожуху. Пространство между днищем кожуха и крышкой забивается мипорой.

К нижней части внутреннего сосуда припаян карман *4*, в который загружается около 15 *кг* силикагеля КСМ. Пространство между кожухом и сосудом имеет ширину приблизительно 150 *мм*.

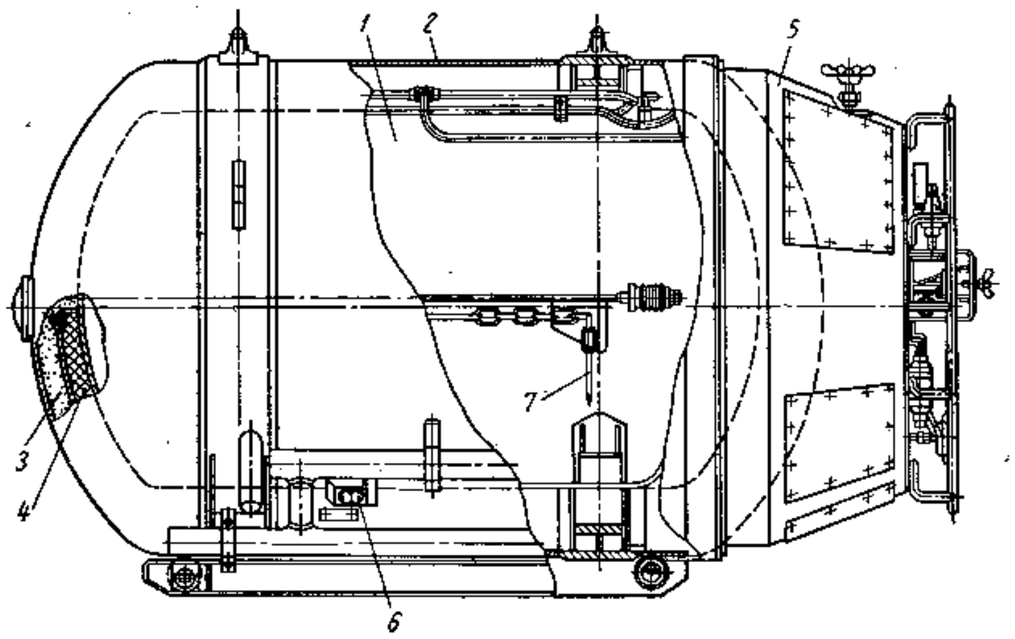


Рис. 112. Транспортный резервуар емкостью 1,1 $м^3$ жидкого кислорода с вакуумно-порошковой изоляцией:
1 — внутренний сосуд; *2* — кожух; *3* — изоляция; *4* — адсорбционная камера; *5* — крышка; *6* — вентиль для откачки; *7* — цепь

Оно засыпается через специальные люки изоляционным порошком и после заварки люков вакуумируется. Откачка производится с помощью коллектора из труб с перфорированной поверхностью, покрытой фильтрующим материалом (слоем сетки № 0071 и слоем фланели). Коллектор сообщен с вакуумным вентилем *6* с диаметром условного прохода 25 *мм*.

Время откачки изоляционного пространства, заполненного аэрогелем, составляет 100—150 *ч*, а при заполнении перлитом снижается до 50—75 *ч*.

Резервуар имеет следующую техническую характеристику:

Максимальное рабочее давление	0.2 $Мн/м^2$
Максимально допустимое количество заливаемого кислорода	1250 *кг*
Общая масса резервуара без кислорода:	
с алюминиевым кожухом	700 *кг*
со стальным кожухом	1120 *кг*
Габаритные размеры:	
длина	2510 *мм*
ширина	1275 *мм*
высота	1430 *мм*

Потери кислорода от испарения, отнесенные к температуре окружающей среды 20° С, при изоляции аэрогелем не превышают 0,70 *кг/ч*, или 1,3% от полной емкости в сутки. При изоляции перлитовой пудрой и давлении менее 1 $н/м^2$ потери снижаются до 0,50 *кг/ч*, или 0,9% в сутки.

При изоляции смесью аэрогеля и бронзовой пудры величина потерь уменьшается до 0,45 *кг/ч* по азоту и до 0,40 *кг/ч* по кислороду, или до 0,72% в сутки. Снижение потерь при засыпке экранированного порошка сравнительно невелико ввиду большого притока тепла по «тепловым мостам». Согласно данным расчетов и испытаний приток тепла по опорам, подвескам и трубам равен 19,5 *вт*, что соответствует 0,33 *кг/ч* кислорода, или примерно 50% общих потерь при изоляции аэрогелем. Приток тепла через изоляцию в случае экранированного порошка составляет 4,0 *вт*, что соответствует потерям 0,07 *кг/ч*, или 0,13% в сутки. Следовательно, применение экранированной вакуумно-порошковой изоляции может дать существенный эффект при одновременном усовершенствовании конструкции резервуара с целью уменьшения притока тепла по подвескам, опорам и трубам.

Транспортный резервуар ТРЖК-5 на 6000 *кг* жидкого кислорода предназначен для использования в автомобильных газификационных [43] установках АГУ-4 и АГУ-6. Резервуар представляет собой горизонтальный цилиндрический сосуд с эллиптическими днищами. Внутренний сосуд выполнен сварным из стали Х18Н10Т, кожух — из сплава АМг6 толщиной 8 *мм*. Габариты резервуара 3840 × 2000 × 1990 *мм*, масса 2860 *кг*. Общий вид установки АГУ-6, включающей ТРЖК-5, показан на рис. 113. Внутренний сосуд резервуара изолирован слоем перлитовой пудры толщиной 150 *мм*. При давлении в изоляционном пространстве 1—2 $н/м^2$ и температуре окружающей среды 20° С потери кислорода от испарения составляют примерно 1,3 *кг/ч*, или 0,5% в сутки.

Резервуар емкостью 7,38 $м^3$ имеет внутренний сосуд в виде цилиндра со сферическими днищами. Сосуд выполнен из стали Х18Н9Т толщиной 3 *мм*, а кожух — из алюминиевого сплава АМг6 толщиной 8 *мм*. Изоляционное пространство шириной 147 *мм* заполняется аэрогелем или перлитом. При заполнении аэрогелем потери от испарения составляют 0,5% в сутки.

Резервуар рассчитан на рабочее давление 0,25 *Мн/м²*, масса его 3150 *кг*, габариты 5000 × 2000 × 1950 *мм*.

В зависимости от типа и емкости резервуар может быть установлен в кузове грузового автомобиля, смонтирован на его шасси, прицепе или полуприцепе. В кузове устанавливаются обычно резервуары емкостью менее 7—8 *м³*. Максимальная емкость резервуаров, перевозимых автомобильным транспортом, составляет приблизительно 20 *м³*.

Железнодорожные цистерны для жидкого кислорода имеют емкость 30—40 *м³*. Цистерна [15], выпускаемая фирмой Линде (США), показана на рис. 114. Внутренний сосуд подвешен на стержнях из нержавеющей стали. Пружинящие устройства на продольных подвесках компенсируют сжатие внутреннего сосуда

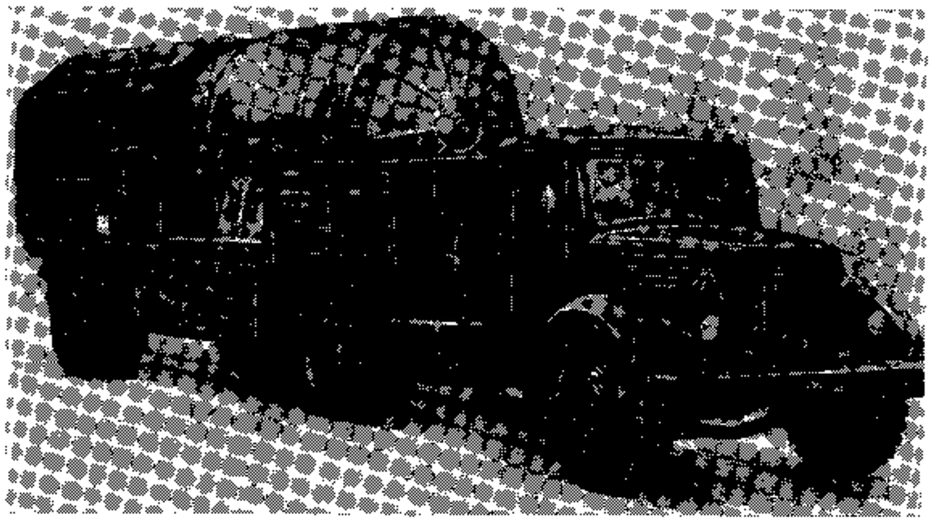


Рис. 113. Транспортный резервуар емкостью 5,3 *м³* жидкого кислорода с вакуумно-порошковой изоляцией

при его охлаждении. Вес цистерны передается на железнодорожную платформу через опорные подушки. Продольные нагрузки передаются от кожуха на раму платформы через поперечные брусья, работающие на срез.

Продольные стержни сделаны длинными и тонкими для снижения притока тепла по ним. Точки крепления стержней к внутреннему сосуду расположены симметрично. Предусмотрено несколько точек крепления, что позволяет сделать внутренний сосуд относительно тонкостенным. Цистерна снабжена специальным вентилем с удлиненным штоком для закрытия трубы слива жидкости непосредственно на выходе из внутреннего сосуда.

Цистерна имеет емкость 37,8 *м³* и следующие габариты: наружный диаметр 2,76 *м*, полная длина 11,9 *м*, высота от верхней точки цистерны до пола платформы 3,04 *м*. Масса цистерны

20,4 *т*, а цистерны вместе с платформой 52 *т*. Потери от испарения составляют 0,3% в сутки.

Резервуары для жидкого кислорода и азота большой емкости используют, в основном, для стационарного хранения жидкости.

Поперечный разрез одного из таких резервуаров [50] емкостью 98 *м³* дан на рис. 115. Внутренний сосуд и трубы выполнены

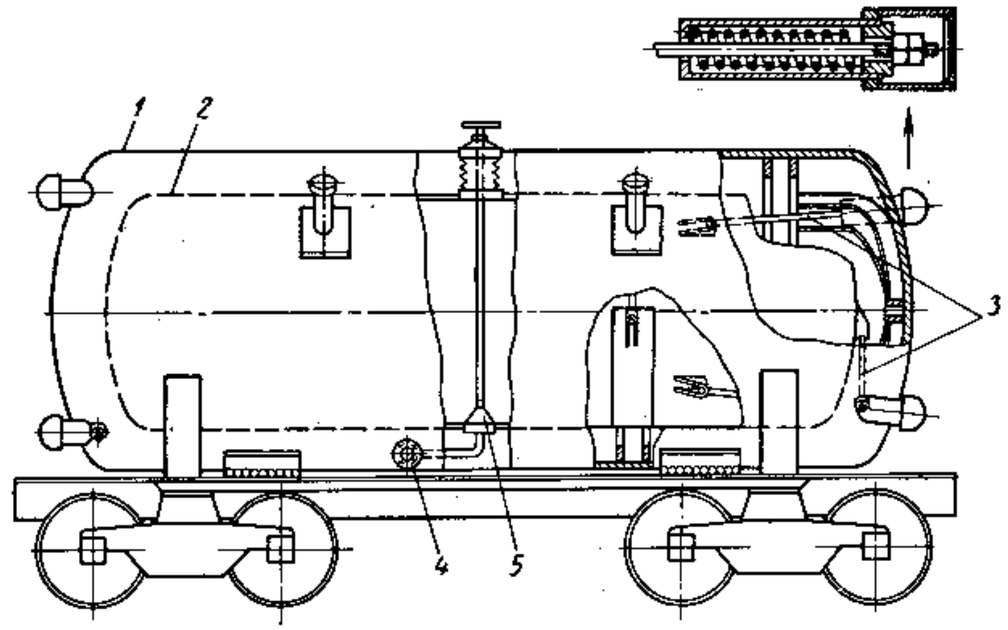


Рис. 114. Железнодорожная цистерна емкостью 38 *м³* жидкого кислорода с вакуумно-порошковой изоляцией:

1 — кожух; *2* — внутренний сосуд; *3* — подвески; *4* — труба для слива жидкости; *5* — вентиль слива

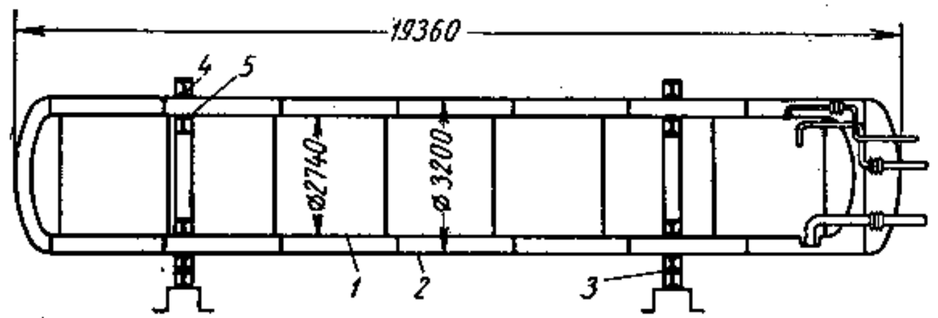


Рис. 115. Стационарный резервуар емкостью 98 *м³* жидкого кислорода с вакуумно-порошковой изоляцией:

1 — внутренний сосуд; *2* — кожух; *3* — опора; *4* — наружное опорное кольцо; *5* — внутреннее опорное кольцо

из нержавеющей стали типа Х18Н9Т, а наружный кожух из углеродистой стали. Резервуар имеет вакуумно-порошковую изоляцию из перлита с размером зерен менее 0,18 *мм*. Толщина слоя изоляции в цилиндрической части составляет 215 *мм*, на одном днище — 147 *мм* и на другом — 915 *мм*. Внутренний сосуд подве-

шивается к кожуху на четырех стержнях (диаметр 70 *мм*, длина 1270 *мм*) из нержавеющей стали. Внутренний сосуд и кожух в местах крепления стержней имеют упрочняющие бандажи. Трубопроводы включают трубу для слива жидкости диаметром 150 *мм*, трубу наполнения диаметром 100 *мм* и трубу для выхода газа диаметром 75 *мм*. Изменения размеров при охлаждении компенсируются сильфонами из нержавеющей стали на каждой трубе.

По расчету приток тепла в *вт* к жидкости составляет:

Через изоляцию при давлении 3,3 *н/м²*	337
По трубам	13
По подвескам	27
Общий приток тепла	377
Расчетные потери от испарения	0,14% в сутки

Фактические потери близки к расчетным. Резервуары такого типа приняты в США в качестве стандартных для системы снабжения кислородом [70].

Фирма Эйр Продактс (США) изготовила в заводских условиях (с последующей перевозкой по железной дороге к месту установки) серию цистерн для жидких кислорода, азота и окиси углерода емкостью 190 *м³*. Цистерна имеет диаметр 3,66 *м*, длину более 24 *м* и массу 55 *т*.

Вакуумно-порошковая изоляция используется также в резервуарах для жидкого водорода. Примером может служить транспортный танк емкостью 6 *м³*, изолированный слоем перлита толщиной 300 *мм*. Холод выходящего газа используется для отвода тепла от труб, выведенных через специальный отсек. Потери водорода от испарения составляют 1,5% в сутки.

В США построен и находится в стадии строительства ряд шаровых хранилищ для жидкого водорода емкостью более 300 *м³*. Внутренний сосуд хранилища емкостью 340 *м³* [106] имеет диаметр 10,7 *м*, он изготовлен из алюминиевого листа толщиной 22 *мм* (масса 15,5 *т*). Наружный кожух выполнен из углеродистой стали (масса 50 *т*). Сегменты внутреннего и наружного шаров сварены на месте и смонтированы при помощи кранов. Внутренний сосуд подвешен в кожухе на длинных стержнях. В межстенное пространство шириной 750 *мм* засыпано 27 *т* перлита. Потери от испарения составляют приблизительно 0,13% в сутки.

В Сакраменто, на заводе фирмы Линде строится шаровое хранилище емкостью 2650 *м³*. Внутренний сосуд хранилища изготовлен из алюминиевого сплава и имеет диаметр 17,5 *м*. Наружный кожух выполнен из стали и имеет диаметр 19,5 *м*. Масса хранилища в заполненном состоянии 200 *т*.

Резервуары с вакуумно-многослойной изоляцией. Резервуары с этим видом изоляции предназначаются, в основном, для жидкого водорода и гелия. Их целесообразно применять также для

хранения и транспортирования относительно небольших количеств жидкого кислорода и азота. Это подтверждается практикой фирмы Линде — ведущей фирмы США по производству таких сосудов [84]. Она выпускает сосуды для жидкого кислорода и азота с вакуумно-многослойной изоляцией емкостью 10—3000 *дм³*. Данные о потерях от испарения в этих сосудах были приведены выше (см. рис. 108). Сосуд емкостью 830 *дм³* со смонтированной на нем изоляцией показан на рис. 116.

Сосуды для хранения и транспортирования небольших количеств жидкого кислорода и азота емкостью 5,15 и 25 *дм³* опи-

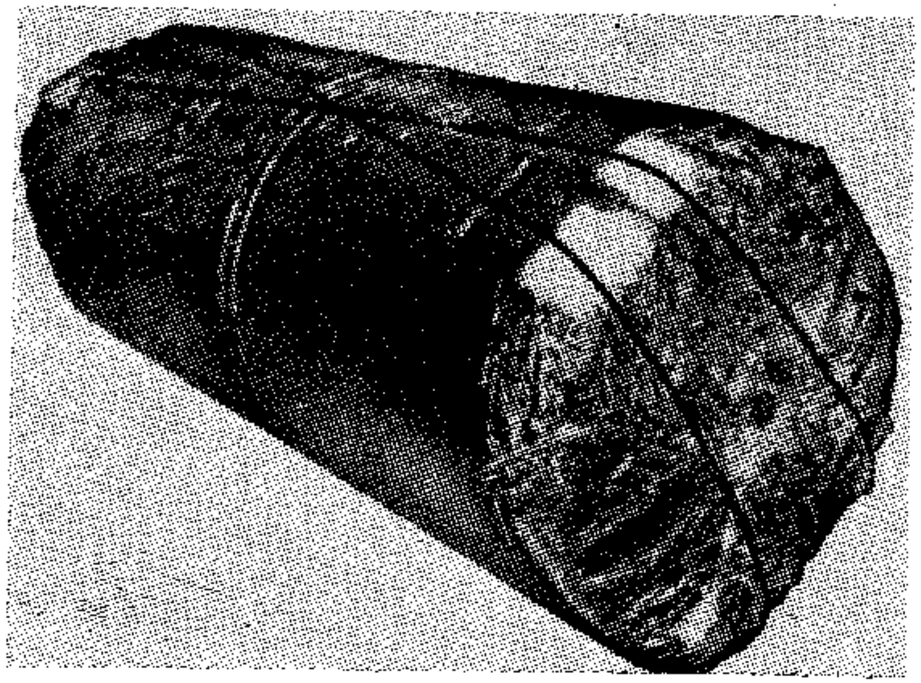


Рис. 116. Сосуд емкостью 830 *дм³* с многослойной изоляцией (без кожуха)

саны в работе [44]. Для удобства монтажа многослойной изоляции сосуды имеют цилиндрическую форму. С той же целью эллиптические днища внутреннего сосуда закрыты снаружи ложными плоскими днищами. Конструкция сосуда ГАСД-25 емкостью 25 *дм³* показана на рис. 117. Внутренний сосуд *1* и наружный кожух *2* изготовлены из алюминиевого сплава АМц. Сосуд подвешен в кожухе на горловине *3* (диаметр 25 *мм*) из нержавеющей стали. В нижней части сосуда установлена опора *4*, служащая для фиксации внутреннего сосуда от боковых перемещений.

Многослойная изоляция выполнена из алюминиевой фольги толщиной 0,01 *мм* и стеклобумаги СБР-М толщиной 0,05 *мм*. После монтажа многослойной изоляции межстенное пространство заполняется перлитовой пудрой и откачивается через

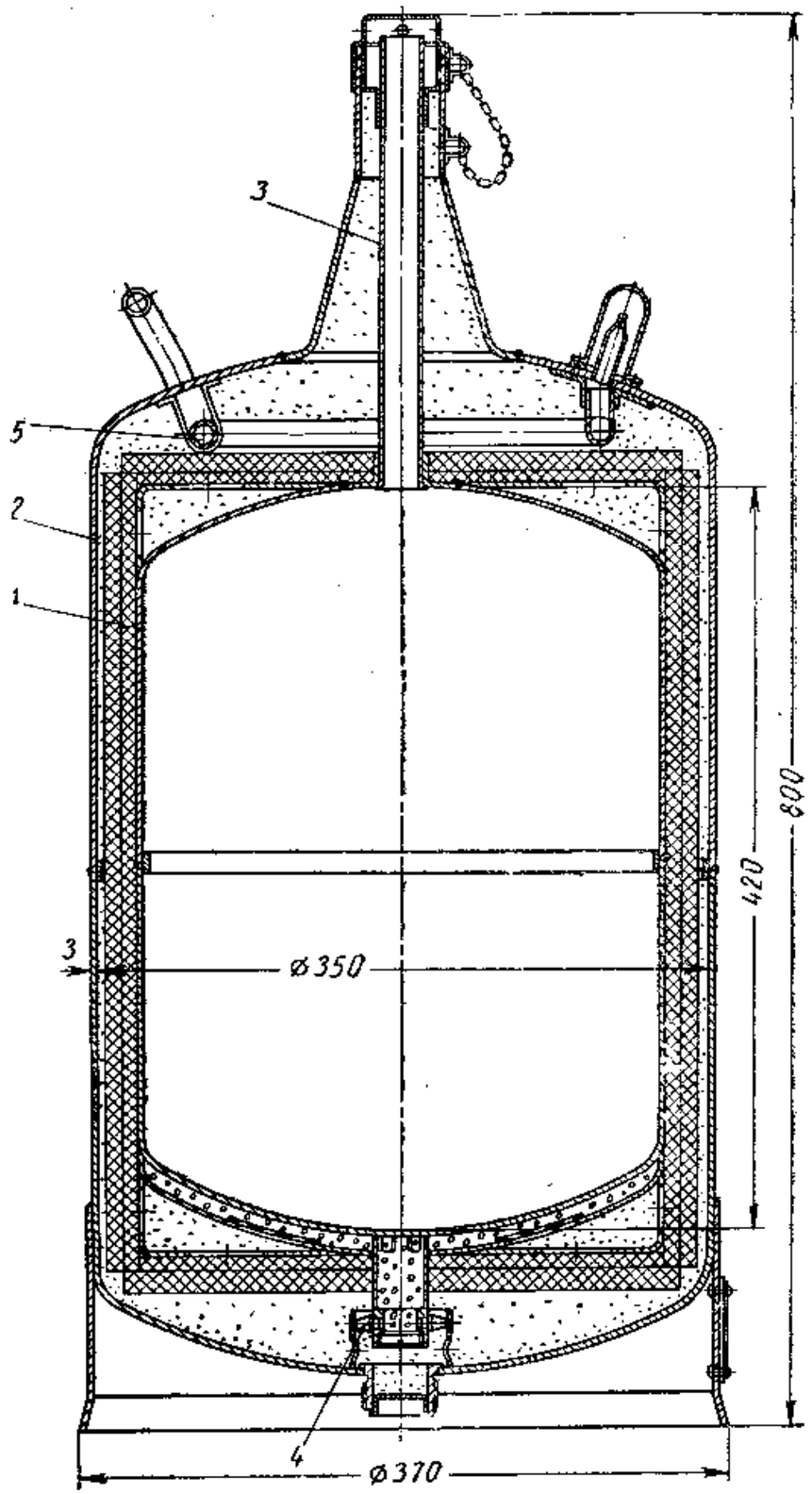


Рис. 117. Сосуд емкостью 25 *дм*³ жидкого кислорода с вакуумной многослойно-порошковой изоляцией

размещенный в верхней части коллектор *5* (в виде кольца). Потери жидкого азота от испарения в сосуде 1АСД-25 с многослойной изоляцией составляют 40 *г/ч*, а с многослойно-порошковой изоляцией 30—35 *г/ч*.

Сосуды для жидкого водорода фирма Линде изготовляет емкостью от 150 *дм*³ до 107 *м*³, сосуды для гелия — емкостью от 100 *дм*³ до 19 *м*³. Сосуд на 150 *дм*³ жидкого водорода [111] представляет собой вертикальный цилиндр диаметром 508 *мм* и высотой 1470 *мм*, масса в наполненном состоянии 84 *кг*. Он снабжен изоляцией из материала SI-62 толщиной 22 *мм*, потери 2% в сутки.

Резервуар на 1000 *дм*³ водорода выполнен в виде горизонтального цилиндрического сосуда и монтируется на тележке. Он имеет изоляцию толщиной 32 *мм*, потери 1,25% жидкости в сутки. Водород сливается через вентиль с вакуумной изоляцией.

Полуприцеп емкостью 29,5 *м*³ жидкого водорода имеет длину 12,2 *м*, общую массу 16,6 *т*. Рабочее давление равно 0,7 *Мн/м*².

Жидкостная линия диаметром 51 *мм* и газовая линия диаметром 63 *мм* снабжены вакуумной изоляцией. Потери от испарения при толщине изоляции 25 *мм* составляют менее 0,5% в сутки.

Железнодорожная цистерна для жидкого водорода имеет емкость 107 *м*³ [92]. Цистерна состоит из внутреннего сосуда диаметром 2,72 *м* и длиной 20,4 *м* из нержавеющей стали и наружного кожуха из углеродистой стали диаметром 2,92 *мм* и длиной 20,8 *м*. На одном из концов расположен отсек, в котором находятся выводы труб, контрольные приборы и предохранительные устройства. Внутренний сосуд рассчитан на давление 0,32 *Мн/м*².

В межстенном пространстве шириной 89 *мм* помещена изоляция из материала SI-62 толщиной 38 *мм*. Остальное пространство шириной 51 *мм* необходимо для монтажа внутреннего сосуда в кожухе.

Внутренний сосуд и кожух снабжены упрочняющими ребрами в виде бандажей, расположенными вне изоляционного пространства. С целью экономии места упрочняющие кольца на кожухе расположены на расстоянии 4,4 *м* от центра цистерны и не увеличивают допустимую ширину в этом месте. Расстояние между осями платформы равно 17,8 *м*.

Внутренний сосуд закреплен в кожухе на пяти трубчатых растяжках, каждая из которых может работать на растяжение и сжатие. Конструкция растяжек видна на рис. 118. Они пересекают внутренний сосуд, будучи изолированными от него с помощью вакуумно-плотных трубчатых кожухов. Это позволяет резко увеличить длину подвесок при малом монтажном зазоре между сосудом и кожухом цистерны. Шаровые и муфтовые соединения на растяжках допускают сжатие сосуда на 60 *мм* при охлаж-

дении его до температуры жидкого водорода. Трубопроводы также помещены внутри сосуда и окружены вакуумным кожухом. Основные трубы для жидкости и газа имеют диаметр 102 *мм*.

Требуемое давление в изоляции ниже $1 \cdot 10^{-2}$ *н/м²* поддерживается с помощью цеолита Линде 5А. Для обеспечения необходимой герметичности на цистерне исключены какие-либо разъемные соединения. Для защиты кожуха использована специальная цельносварная предохранительная мембрана. Вакуумные вентили опаяны мягким припоем. Полностью запаянная вакуумная система не должна требовать повторного вакуумирования в течение всего срока службы цистерны.

Общий теплоприток через изоляцию, растяжки и трубы составил согласно расчету 101 *вт*, что соответствует скорости испа-

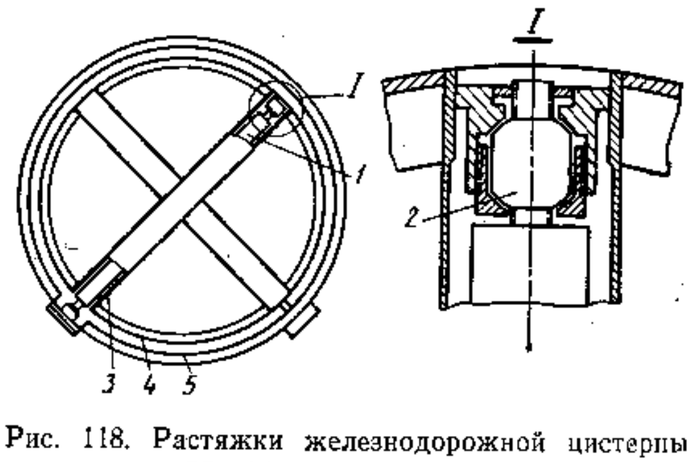


Рис. 118. Растяжки железнодорожной цистерны для жидкого водорода:

1 — растяжка; *2* — шаровое соединение; *3* — вакуумный кожух опорного стержня; *4* — внутренний сосуд; *5* — наружный кожух

рения водорода 0,82 *кг/ч*, или 0,26% в сутки. При испытаниях цистерна была заполнена жидким водородом на 10%. Через 74 *ч* после заполнения потери от испарения достигли 0,21% в сутки, вакуум при этом был равен $1{,}3 \cdot 10^{-3}$ *н/м²*. При транспортировке полностью залитой цистерны потери составили приблизительно 0,3% в сутки, а потери при заполнении и опорожнении цистерны 2,6%.

Потери достаточно низки, чтобы перевозить продукт без сброса его в атмосферу. На случай вынужденного сброса газа разработано специальное устройство, разбавляющее водород воздухом до концентрации ниже предела воспламеняемости.

Примером резервуаров для жидкого гелия с многослойной изоляцией может служить разработанный фирмой Линде (США) полуприцеп емкостью 19 *м³*. Изоляция толщиной 100 *мм* и усовершенствованная конструкция подвески внутреннего сосуда на стержнях позволяют обеспечить время транспортировки без потерь 20 суток при возрастании давления не более чем до

1,25 *Мн/м²*. При этом гелий нагревается до 8° К и переходит в надкритическое состояние. Полуприцеп снабжен насосом высокого давления для перекачки гелия в баллоны. При выпуске газа из сосуда потери от испарения составляют 1,5% в сутки.

Сосуды с охлаждаемым экраном. Небольшие сосуды для жидкого гелия и водорода снабжают экраном, охлаждаемым жидким азотом. Сосуд состоит из четырех концентричных медных шаров. В первый (внутренний) шар заливается жидкий гелий или водород, а в пространство между вторым и третьим шаром — жидкий азот. В двух других сообщающихся между собой полостях поддерживается высокий вакуум. Поверхности, обращенные в вакуумное пространство, тщательно полируются. Сосуд для жидкого гелия и азотная ванна подвешиваются на тонкостенных трубках из нержавеющей стали или мельхиора. Для уменьшения притока тепла к жидкому гелию по горловине к ней приблизительно на половине высоты припаивается трубка азотной ванны.

В Советском Союзе промышленностью выпускается сосуд СД-10Г емкостью 10 *дм³* и массой 16 *кг*. Потери гелия в нем не превышают 100 *дм³* газа в сутки (1,4% в сутки) и снижаются при тщательном исполнении до 40 *дм³* газа в сутки. При перевозке на автомашинах по дорогам с усовершенствованным покрытием испаряемость увеличивается в 3—8 раз. Расход азота равен 1,5—2,5 *кг* в сутки, ванна азота испаряется полностью за 2,5 суток.

Сосуды аналогичной конструкции емкостью 50—100 *дм³* испаряют в сутки около 0,5% гелия и расходуют 3—5 *дм³* жидкого азота.

Резервуары для хранения больших количеств жидкого водорода и гелия также могут быть выполнены с экраном, охлаждаемым жидким азотом. Примером могут служить [50] сосуды для хранения и транспортирования жидкого водорода емкостью 500, 840 и 2000 *дм³*. Хотя потери от испарения низки и составляют 0,26% в сутки у сосуда на 500 *дм³*, это достигается за счет значительного усложнения конструкции и увеличения массы сосуда.

Применение многослойной изоляции позволило отказаться от применения азотного экрана в крупных резервуарах для жидкого водорода и гелия. В сосудах емкостью менее 1 *м³* одна лишь многослойная изоляция не обеспечивает требуемого снижения потерь. Проблема решается при использовании экрана, охлаждаемого выходящим паром.

При использовании такого экрана и многослойной изоляции с экранами из алюминиевой фольги и прокладками из стеклобумаги СБР потери от испарения в сосуде на 25 *дм³* жидкого гелия с экраном, охлаждаемым паром, составили 2,8% в сутки [4]. Контейнер с жидким гелием *1* (рис. 119) окружен медным экраном *2*, припаянным к горловине сосуда *3*, которая выполнена из

нержавеющей трубки ($15 \times 0{,}3$ *мм*). К наружной поверхности экрана припаян медный змеевик *4*, концы которого присоединены к горловине. Экран изолирован от кожуха многослойной изоляцией. Температура экрана равна 96° К, а общий теплоприток к нему составляет 0,51 *вт*. После заливки сосуда в горловину вставляется поршень, направляющий поток газа через змеевик. После охлаждения экрана и изоляции, что происходит примерно двое суток, поршень вынимается и экран охлаждается газом, проходящим по горловине.

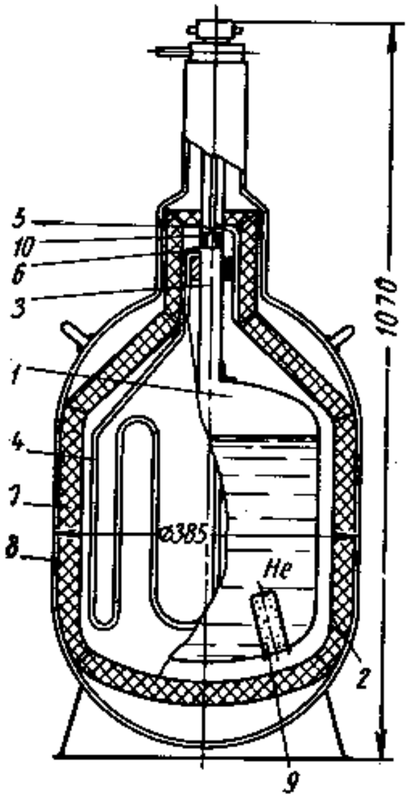


Рис. 119. Сосуд емкостью 25 *дм*³ жидкого гелия с экраном, охлаждаемым выходящим паром:

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

Аналогичный сосуд на 100 *дм*³ жидкого гелия имеет потери около 1,7% в сутки [109]. Медный экран в этом сосуде охлаждается гелием, проходящим по припаянному к экрану змеевику. Между экраном и кожухом помещена многослойная изоляция толщиной 28,5 *мм*. Температура экрана 76° К. Общая высота сосуда 1420 *мм*, диаметр 510 *мм*, масса около 91 *кг*. Масса сосуда такой же емкости с азотным экраном (при заливке 65 *дм*³ азота) приблизительно 210 *кг*.

Трубопроводы для сжиженных газов

Трубопровод для передачи жидкого кислорода или азота может быть неизолированным, если длина его мала, длительность работы невелика, а скорость жидкости большая. Водород и гелий недопустимо транспортировать в жидком виде по неизолированным трубам. Изоляция трубопровода позволяет уменьшить коэффициент теплоотдачи от окружающей среды к жидкости в несколько десятков раз. Одновременно резко возрастает скорость передачи жидкости при том же напоре вследствие уменьшения количества пара в паро-жидкостной смеси. В результате дополнительно снижаются удельные потери от испарения, отнесенные к количеству протекающей в единицу времени жидкости.

Трубопроводы для жидкого кислорода часто изолируют матами из стеклянного волокна. При выполнении изоляции важно

создание надежного парового барьера, защищающего ее от увлажнения. Его создают, в частности, покрывая изоляцию снаружи полимерной пленкой. Изоляцию труб выполняют также из пенопластов (в частности, пенополистирола и пенополиуретана) и пеностекла. Стыки между отдельными скорлупами замазывают специальной мастикой.

Длительно работающие трубопроводы для жидкого кислорода и азота и все трубопроводы для водорода и гелия снабжают вакуумными видами изоляции. В первом случае используют как вакуумно-порошковую, так и вакуумно-многослойную изоляцию, во втором случае, как правило, многослойную. Основные конструктивные элементы трубопроводов при всех типах вакуумной изоляции одинаковы.

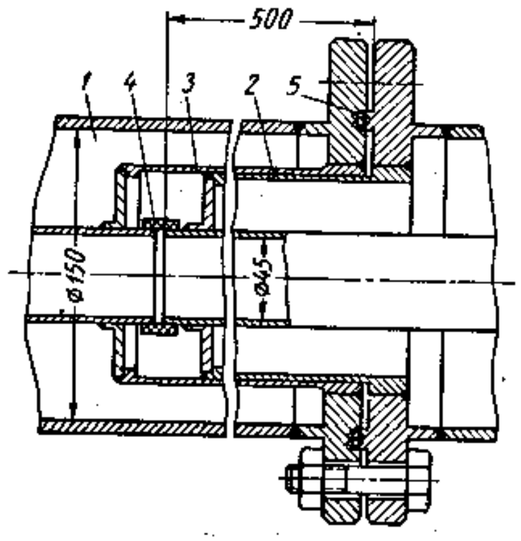


Рис. 120. Разъемное (штыковое) соединение секций трубопровода с вакуумной изоляцией:

1 — вакуумное пространство; *2* — охватываемая часть соединения (правая секция); *3* — охватывающая часть соединения (левая секция); *4* — уплотнение для уменьшения утечки в зазор; *5* — фланцевое соединение

Трубопроводы с вакуумной изоляцией изготовляют в виде отдельных секций со своими собственными вакуумными камерами или в виде сплошной трубы. Выбор того или другого варианта зависит от конкретных размеров и условий работы трубопровода. В обоих случаях важной проблемой является компенсация температурных деформаций. Сжатие внутренней трубы при охлаждении компенсируется с помощью установки сильфона. Он является одним из наиболее уязвимых элементов трубопровода, поэтому желательно устанавливать его на наружном кожухе, чтобы сделать доступным для осмотра и ремонта. Для защиты от излишнего сжатия или растяжения сильфоны снабжаются ограничителями. Наилучший путь решения проблемы, исключающий необходимость в компенсаторах, состоит в изготовлении жидкостной трубы из материала с очень малым коэффициентом термического расширения, в частности из инвара.

Через каждые 1,5—3 *м* по длине трубы устанавливаются опоры, центрирующие внутреннюю трубу в кожухе. Квадратные или треугольные опоры изготовляют из фторопласта-4, стеклопластика АГ-4С или другого пластика с малым газовыделением в вакууме (конструкцию опоры из шаров см. рис. 85).

Для соединения секций трубопровода широко используется штыковое соединение, показанное на рис. 120. Оно позволяет

свести к минимуму приток тепла по металлу на концах секции, поддерживая уплотнение при температуре окружающей среды. Это соединение хорошо работает в конструкциях, где при разъеме возможно осевое перемещение, и весьма нежелательно при длинном прямом трубопроводе из-за трудности снятия какой-нибудь промежуточной секции.

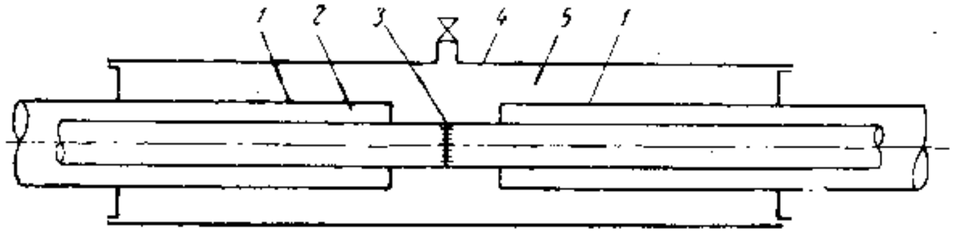


Рис. 121. Укороченное соединение секций трубопровода с вакуумной изоляцией:

1 — секция трубопровода; *2* — вакуумное пространство; *3* — сварной шов внутренней трубы; *4* — кожух соединения; *5* — изоляция соединения

Метод соединения [70, 95, 104], рекомендуемый в последнем случае, показан на рис. 121. Во время монтажа жидкостные трубы сваривают, затем изолируют голый участок трубы, после чего

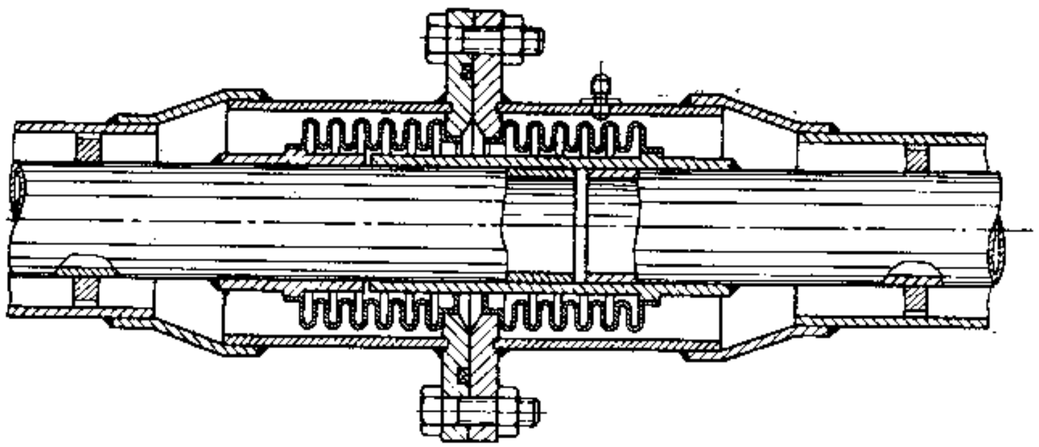


Рис. 122. Соединение секций трубопровода с использованием сильфонов

приваривают цилиндрическую обечайку кожуха. В некоторых случаях уплотнения стыков на наружной, а также жидкостной трубах делают разъемными на прокладках. После сборки пространство вокруг соединения откачивается через вакуумный вентиль. В трубопроводах для жидкого водорода и гелия можно вакуумирования не производить. Когда система работает, соединение действует как криогенный насос, создавая вакуум в изоляции соединения.

Другая конструкция показана на рис. 122. Здесь уменьшение притока тепла к жидкости через концевые соединения достигается установкой сильфонов.

Секции обычно имеют длину 12 *м*. В каждой секции на жидкостной трубе помещается камера, в которую загружают адсорбент для поддержания вакуума при эксплуатации. На кожухе устанавливают вакуумный вентиль для откачки изоляции, датчик для контроля вакуума и предохранительную мембрану. При вакуумно-порошковой изоляции в межстенном пространстве по всей длине секции прокладывают перфорированную трубку, покрытую фильтрующим материалом, через которую вакуумируют изоляцию. Многослойную изоляцию наматывают на специальных станках.

Приток тепла [101] в трубопроводе диаметром 79,5 *мм* для жидкого водорода, изолированном многослойной изоляцией толщиной 25 *мм* из алюминированной пленки и стекловолокнистого материала, составил 2,5 $вт/м^2$ при давлении $1{,}3 \cdot 10^{-3}$ $н/м^2$, что соответствует коэффициенту теплопроводности 0,18 $мвт/(м \cdot град)$. По данным фирмы Линде [104] приток тепла через многослойную изоляцию трубопроводов равен 0,145 *вт* на погонный метр при отношении наружного и внутреннего диаметров изоляции, равном 1,8. Отсюда можно найти, что коэффициент теплопроводности составляет 0,16 $мвт/(м \cdot град)$. Во ВНИИКИМАШе разработана многослойная изоляция и технология ее монтажа на трубопроводах, обеспечивающие получение коэффициента теплопроводности 0,10—0,12 $мвт/(м \cdot град)$.

Литература

1. Адрианов В. Н. Роль рассеяния в процессах лучистого обмена энергией.— «Теплоэнергетика», 1961, т. 8, № 2, стр. 63—66.

2. Адрианов В. Н. Радиационно-кондуктивный и радиационно-конвективный теплообмен. Докл. на II Всес. совещ. по тепло- и массообмену. Минск, Ин-т тепло- и массообмена АН БССР, 1964.

3. Айлер А. К. Коллоидная химия кремнезема и силикатов. М., Госстройиздат, 1959, 288 стр.

4. Анашкин О. П., Данилов И. Б., Кривенко В. Г. Гелиевый сосуд Дьюара без азотного охлаждения.— «Приборы и техн. эксперим.», 1964, № 6, стр. 149—150.

5. Блат М. И., Бреслер С. Е., Рябинин Ю. Н. Новый метод хранения сжиженных газов.— «Журн. техн. физики», 1945, т. 15, № 12, стр. 916—923.

6. Блох А. Г. Основы теплообмена излучением. М.— Л., Госэнергоиздат, 1962, 331 стр.

7. Блох А. Г. Рассеяние теплового излучения в полидисперсной мутной среде. «Теплофизика высоких температур», 1963, т. 1, стр. 121—127.

8. Ван де Хюлст Г. Рассеяние света малыми частицами. М., Изд. ин. лит., 1961, 536 стр.

9. Голянд М. М. Определение теплофизических характеристик теплоизоляторов при весьма низких температурах. «Труды ЛТИХП», 1956, т. 14, стр. 111—123.

10. Голянд М. М. Расчеты и испытания тепловой изоляции. Л. Гостоптехиздат, 1961, 314 стр.

11. Дудник Д. М., Мельцер Л. З. Экспериментальное исследование свойств новых пенопластов. «Труды ОТИПХП», Одесса, 1961, т. 10, стр. 75—86.

12. Дульнев Г. Н., Сигалова З. В. Теплопроводность зернистых систем.— «Инж.-физ. журнал» 1964, № 10, стр. 49—55. Доклад на II Всесоюзном совещании по тепло- и массообмену, Минск, 1964, 20 стр.

13. Дэшман С. Научные основы вакуумной техники. 2-е изд., М., Изд. «Мир», 1964, 715 стр.

14. Жданов С. П., Бунтарь Н. Н. Исследование условий гидротермального синтеза и свойств натриевых цеолитов. Сб. «Синтетические цеолиты». М., Изд. АН СССР, 1962, стр. 105—116.

15. Зеннер. Хранение сжиженных газов и обращение с ними. Сб. «Вопросы глубокого охлаждения». М., Изд. Ин. лит. 1961, стр. 267—319.

16. Каганер М. Г., Репнина Т. Г. Степень черноты некоторых металлических поверхностей при температурах +20 и —183° С. «Аппараты и машины кислородных установок». Труды ВНИИКИМАШа. М., Машгиз, 1962, вып. 5, стр. 100—107.

17. Каганер М. Г., Семенова Р. С., Глебова Л. И. Вспученный перлитовый песок как теплоизоляционный материал для аппаратов, работающих при низких температурах. Труды ВНИИКИМАШа, 1962, вып. 5, стр. 108—118.

18. Каганер М. Г., Семенова Р. С. Физические и эксплуатационные свойства аэрогеля кремневой кислоты. Труды ВНИИКИМАШа, 1963, вып. 6, стр. 73—83.

19. Каганер М. Г., Глебова Л. И. Влияние объемного веса пористых материалов на перенос тепла.— «Инженерно-физический журнал», 1963, т. 6, № 4, стр. 27—32.

20. Каганер М. Г., Глебова Л. И. Влияние заполняющего газа на перенос тепла в пористых материалах. «Инж.-физ. журнал», 1964, т. 7, № 5, стр. 59—62.

21. Каганер М. Г., Глебова Л. И. Теплопроводность изоляционных материалов под вакуумом.— «Кислород», 1959, № 1, стр. 13.

22. Каганер М. Г., Великанова М. Г., Сидорова Л. И. Исследование теплопередачи через вакуумно-многослойную изоляцию. Докл. на II Всес. Совещ. по тепло- и массообмену, Изд. Ин-та научно-технич. информации БССР, Минск, 1964, 18 стр.

23. Каганер М. Г. Прибор для определения структуры пористых материалов методом вдавливания ртути. «Зав. лаборатория», 1963, № 11, стр. 1387—8.

24. Каганер М. Г. Адсорбция азота, аргона и криптона на различных поверхностях и определение площади поверхности. «ДАН», 1961, т. 138, № 2, стр. 405—8.

25. Каганер М. Г. Новый метод определения удельной поверхности адсорбентов и других мелкодисперсных веществ.—«Журн. физ. химии», 1959, т. 33, № 10, стр. 2202—10.

26. Каганер М. Г., Семенова Р. С. Исследование переноса тепла по горловине сосудов для жидкого кислорода.— «Инж.-физ. журнал», 1964, т. 7, № 8, стр. 97—102.

27. Каганер М. Г., Семенова Р. С. Изменение вакуума в сосуде с вакуумно-порошковой изоляцией в зависимости от условий ее заполнения конденсирующимся паром. «Труды ВНИИКИМАШ», 1963, вып. 6, стр. 84—89.

28. Каганер М. Г., Изотерма адсорбции азота при низких давлениях. «ДАН», 1958, т. 122, № 3, стр. 416—419.

29. Каганер М. Г. О влиянии температуры термообработки силикагеля и алюмогеля на величину адсорбции при низких давлениях.— «Журн. физ. химии», 1962, т. 36, № 8, стр. 1761—4.

30. Кальянов Н. Н., Мерзляк А. Н. Вермикулит- и перлит-пористые заполнители для теплоизоляционных изделий и бетонов. М., Госстройиздат, 1961, 154 стр.

31. Каменецкий С. П. Перлиты. М., Госстройиздат, 1963, 280 с.

32. Киселев А. В. Корпускулярная структура адсорбентов — гелей. Сб «Методы исследования структуры высокодисперсных и пористых тел». М., Изд АН СССР, 1958, стр. 47—59.

33. Колченогова И. П., Шорин С. Н. Исследование переноса лучистой энергии в ослабляющей среде.— «Известия АН СССР, отд. техн. наук», 1956, № 5, стр. 29—39.

34. Королев Б. И. Основы вакуумной техники. Изд. 5-е, перераб. М., М.— Л., Изд. «Энергия», 1964, 464 стр.

35. Костылев В. М. Теплопроводность дисперсных тел при различной величине атмосферного давления. «Теплофизика высоких температур», 1964, т. 2, № 1, стр. 21—28.

36. Кропшот. Низкотемпературная изоляция. Сб. «Вопросы глубокого охлаждения», М., Изд. инж. лит., 1961, стр. 320—334.

37. Лазарев Б. Г., Федорова М. Ф. Вакуумный адсорбционный насос большой производительности. — «Журн. техн. физ.», 1960, т. 30, № 7, стр. 865—867.

38. Ляликов А. С. Методы расчета коэффициента теплопроводности сухих сыпучих зернистых материалов. «Известия томского политехнич. ин-та им. С. М. Кирова», 1960, т. 109, стр. 40—52, 1962, т. 110, стр. 34—38.

39. Майкселл и Скотт. Теплоподвод через теплоизолирующие опоры в низкотемпературном оборудовании. Сб. «Вопросы глубокого охлаждения», М., Изд. ин. лит., 1961, стр. 390—408.

40. Малков М. П., Зельдович А. Г., Фрадков А. Б., Данилов И. Б. Выделение дейтерия из водорода методом глубокого охлаждения. М., Госатомиздат, 1961, 151 стр.

41. Малков М. П., Данилов И. Б., Зельдович А. Г., Фрадков А. Б. Справочник по физико-техническим основам глубокого охлаждения. М., Госэнергоиздат, 1963, 416 стр.

42. Мирославская Ю. А., Каганер М. Г. Транспортный резервуар на 1200 *л* жидкого кислорода с вакуумно-порошковой изоляцией, «Труды ВНИИКИМАШ», 1962, вып. 5, стр. 119—133.

43. Мирославская Ю. А. Оборудование для снабжения кислородом установок огневого бурения «Насосы компрессоры, и т. д.». ЦИНТИАМ, 1964, вып. 2, стр. 1—4.

44. Мирославская Ю. А. Сосуды емкостью 5—100 *л* для хранения сжиженных газов. «Насосы, компрессоры, кислор., холод. оборудов. и арматура». ЦИНТИАМ 1964, вып. 2, стр. 17—19.

45. Осипова В. А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена. М.— Л., Изд. «Энергия», 1964, 328 стр.

46. Платунов Е. С. Методика скоростного определения температурной зависимости теплопроводности волокнистых и сыпучих материалов. «Известия вузов,— Приборостроение», 1962, т. 5, № 1, стр. 110—117.

47. Прасолов Р. С. Обобщение уравнения теплопроводности газов. Известия вузов СССР,— «Приборостроение», 1961, № 6, стр. 132—139.

48. Рипс С. М. Хранение, транспортировка и газификация кислорода. М., Машгиз, 1959, 383 стр.

49. Розенберг Г. В. Световой режим в глубине рассеивающей среды и спектроскопия диспергированных веществ. «ДАН», 1958, т. 122, № 2, стр. 211—214.

50. Скотт Р. Б. Техника низких температур. М., Изд. ин. лит., 1962, 413 стр.

51. Соколов А. В. Оптические свойства металлов. М., Физматгиз, 1961, 464 стр.

52. Спектор Б. В., Ложкина Т. В. Теплофизические свойства вспученного перлитового песка.—«Строительные материалы», 1962, № 2, стр. 35—36.

53. Степанов Б. И., Чекалинская Ю. И., Гирин О. П. Методы определения оптических постоянных светорассеивающих сред. «Труды института физики и математики АН БССР». 1956, вып. 1, стр. 153—175.

54. Стронг, Бэнди и Бовенкерк. Вакуумная тепловая изоляция для плоских стенок. Сб. «Вопросы глубокого охлаждения». М., Изд. ин. лит., 1961, стр. 362—389.

55. Факторович Л. М. Краткий справочник по тепловой изоляции. Л., Гостоптехиздат, 1962, 450 стр.

56. Федорова М. Ф. Изотермы адсорбции газов на угле БАУ при низких температурах в области давлений 10^{-9}—10^{-2} *мм рт. ст.* Изотермы адсорбции водорода и дейтерия.— «Журн. техн. физики», 1963, № 33, № 5. стр. 585—591.

57. Федорова М. Ф., Алиев А. Н. Изотермы адсорбции газов на силикагеле при низких температурах в интервале давлений 10^{-8}—10^{-2} *мм рт. ст.* «Журн. физ. химии», 1964, т. 38, вып. 4, стр. 989—992.

58. Федорова М. Ф., Алиев А. Н. Изотермы адсорбции неона и аргона на угле БАУ и силикагеле КСМ при низких температурах и малых давлениях.— «Журн. физ. химии», 1964, т. 38, № 12, стр. 2792—5.

59. Федорченко И. М., Андриевский Р. А. Основы порошковой металлургии. Киев, Изд. АН УССР, 1963, 420 стр.

60. Фрадков А. Б. К вопросу о новых способах теплоизоляции аппаратуры глубокого холода. «ДАН», 1951, т. 81, № 4, стр. 549.

61. Фрадков А. Б. Гелиевые и водородные криостаты без дополнительного охлаждения жидким азотом. — «Приборы и техн. экспер.», 1961, № 4, стр. 170—173.

62. Фулк. Вакуумно-порошковая изоляция для низких температур. Сб. «Вопросы глубокого охлаждения», М., Изд. ин. лит., 1961, стр. 335—361.

63. Хольм Р. Электрические контакты. М., Изд. ин. лит., 1961, 464 стр.

64. Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов (справочное руководство). М., Физматгиз, 1959, 356 стр.

65. Чудновский А. Ф. Теплообмен в дисперсных средах. М., ГИТТЛ, 1954, 444 стр.

66. Чудновский А. Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов. М., Физматгиз, 1962, 456 стр.

67. Шифрин К. С. Рассеяние света в мутной среде. М.— Л., ГИТТЛ, 1951, 288 стр.

68. Шлыков Ю. П., Ганин Е. А. Контактный теплообмен. М.— Л., Госэнергоиздат, 1963, 144 стр.

69. Achtziger J. Wärmeleitfähigkeitmessungen an Isolierstoffen mit dem Plattengerät bei tiefen Temperaturen. «Kältetechnik», 1960, B. 12, № 12, S. 372—375.

70. Applied cryogenic engineering. Ed. by Vance R. W. and Duke W. M. N.Y, John Wiley and Sons, 1962, 510 p.

71. Battle B., Laine P. Dilatation thermique d'isolants plastiques cellulaires. «Suppl. Bull. Inst. Intern. du Froid», Annexe, 1958—4, p. 267—273.

72. Beck D. R., Kreith F., Kropshot R. H. A new steady—state calorimeter for measuring heat transfer through cryogenic insulation. «Advances in cryogenic engineering», N.Y., Plenum Press, 1964, v. 9, p. 64—70.

73. Bell J. H. Cryogenic engineering. Prentice-Hall, 1963, 411 p.

74. Black J. A., Glaser P. E. Progress report on development of high-efficiency insulation. «Adv. cryog. eng.», 1961, v. 6, p. 32—41.

75. Black J. A., Doherty P., Glaser P., Mellner M. Effectiveness of evacuated multiple-layer insulations. «Modern Refrig.», 1964, v. 67, № 793, p. 367—8.

76. Blackman M., Egerton A., Truter E. V. Heat transfer by radiation to surfaces at low temperatures. «Proc. Roy. Soc. (London)», 1948, v. A194, № 1037, p. 147—169.

77. Cammerer W. F. Die Messung der Wärmeleitfähigkeit von Isolierstoffen bei tiefen Temperaturen. «Kältetechnik», 1960, B. 12, № 4, S. 107—110.

78. Christiansen R. M., Hollingsworth M. The performance of glass fiber insulation under high vacuum. «Adv. cryog. eng.», 1960, v. 4, p. 141—153.

79. Christiansen R. M., Hollingsworth M., Marsh H. N. Low temperature insulating system. «Adv. cryog. eng.», 1960, v. 5, p. 171—8.

80. Cockett A. H., Molnar W. Recent improvements in insulants «Cryogenics», 1960, v. 1, № 1, p. 21—26.

81. Cooper A. Low temperature properties of expanded ebonite «Proc. X Intern. Congr. Refrig.», 1961, v. 1, p. 251—260.

82. De Barr A. E. Efficiency of radiation shields. «Rev. Sci. instruments», 1948, v. 19, № 9, p. 569—573.

83. Deissler R. G., Boegly. Y. S. An investigation of effective thermal conductivities of powders in various gases. «Transactions of ASME», 1958, v. 80, № 7, p. 1417.

84. Dubs M. A., Dana L. J. Superinsulation for the large scale storage and transport of liquefied gases. «Suppl. Bull. Inst. Intern. Froid», Annexe 1961—5, p. 71—83.

85. Fulk M. M., Reynolds M. M. Emissivities of metallic surfaces at 76° K. «J. Appl. Phys.», 1957, v. 28, № 12, p. 1464—7.
86. Garrod R. J., Nankivell Y. E. Leak testing of large Welded Vacuum Vessels. «Vacuum», 1961, v. 11, № 3, p. 139—146.
87. Glaser P. E., Black J. A. Cryogenic insulation Systems. «Suppl. Bull. Inst. Intern. Froid», Annexe 1960—2, p. 79—90.
88. Glaser P. E. Heat transfer in evacuated powder insulation. «Intern. developments in heat transfer», 1961, part 4, p. 829—837.
89. Glaser P. E., Reiter A. Thin-wall evacuated heat insulating panels. «Suppl. Bull. Inst. Intern. Froid». Annexe, 1962—1, p. 71—82.
90. Haskins J. F., Hertz J. Thermal conductivity of plaslic foams from—423° F to 75° F. «Adv. cryog. eng.», 1962, v. 7, p. 353—9.
91. Hnilicka M. P. Engineering aspects of heat transfer in multilayer reflective insulation and performance of NRC insulation «Adv. cryog. eng.», 1960, v. 5, p. 199—208.
92. Hudders R. S., Dorf C. J., Holcombe A. H. Railway tank for transcontinental shipment of liquefied hydrogen. «Adv. cryog. eng.», 1963, v. 8, p. 461—6.
93. Hunter B. J., Kropshot R. H., Scrodt J. E., Fulk M. M. Metal powder additivities in evacuated — powder insulation. «Adv. cryog. eng.», 1960, v. 5, p. 146—158.
94. Ishaghoff J., Canty J. M. Quilted superinsulation. «Adv. cryog. eng.», 1964, v. 9, p. 46—51.
95. Judge J. F. Emphasis on space cryogenics advances at Linde. «Missiles and rockets», 1963, v. 13, № 13, p. 22—4.
96. Kinzer G. R. Thermal conductivity of expanded perlite cryogenic fill insulatoin. «ASHRAE Journal», 1963, v. 5, № 2, p. 99—103.
97. Konakov P. K. On the regularities of composite heat transfer. «Intern. J. Heat Mass Transfer», 1961, v. 2, № 1/2, p. 136—149.
98. Kortüm G., Oelkrug D. Über den Streukoeffizienten der Kubelka-Munk-Theorie. «Z. für Naturforschung», 1964, B. 19a, № 1, S. 28—37.
99. Kreith F., Dean J. W., Brooks L. Cool—down and Warm—up of large powder-insulaled dewars. «Adv. cryog. eng.», 1963, v. 8, p. 536—43.
100. Kropshot R. H., Schrodt J. E., Fulk M. M., Hunter B. J. Multiple—layer insulation. «Adv. cryog. eng.», 1960, v. 5, p. 189—198.
101. Kropshot R. H. Multiple layer insulation for cryogenic applications. «Cryogenics», 1961, v. 1, № 3, p. 171—7.
102. Kropshot R. H., Burgess R. W. Perlite for cryogenic insulation. «Adv. cryod. eng»., 1963, v. 8, p. 425—436.
103. Larkin B. K., Churchill S. W. Heat transfer by radiation through porous insulation. «A. I. Ch. E. Journal», 1959, v. 5, № 4, p. 467—74.
104. Le Valley W. H., Sutton W. K. Design of piping for cryogenic fluids. «Adv. cryog. eng.», 1961, v. 6, p. 293—301.
105. Matsh L. C. Advances in multilayer insulations. «Adv. cryog. eng.», 1962, v. 7, p. 413—8.
106. McGuire F. G. Douglas gears for Saturn S—IV test program «Missiles and rockets», 1961, v. 3, № 23, p. 40.
107. Miller R. N., Bailey C. D., Beall R. T., Freeman S. M. Foams and plastic films for insulation systems. «Adv. cryog. eng.», 1963, v. 8, p. 417—24.
108. Multilayer insulation takes 2200° F. «Space/Aeronautics», 1962, v. 38, № 6, p. 123.
109. Murto P. Y. A gas shielding storage and transport vessel for liquid helium. «Adv. cryog. eng.», 1962, v. 7, p. 291—5.
110. NASA gels huge Saturn launch site at Cape. «Missiles and rockets», 1961, v. 8, № 24, p. 16—17.
111. Perkins W. E., Frainier R. J. Practical Storage and distribution of liquid hydrogen and helium. «Adv. cryog. eng.», 1960, v. 5, p. 69—74.
112. Perkins P. J., Colabuca M. A., Smith L. S. Preliminary test results on a compressed multilayer insulation system for a liquid—hydrogen—fueled rocket. «Adv. cryod. eng.», 1964, v. 9, p. 38—45.
113. Petersen P. Some means to improve the vacuum insulation of the Dewar flask. «Teknisk-vetenskaplig forskning», 1958, v. 29, № 4, p. 151—160.
114. Potter V. L. Cryogenic storage vessels are made to stringent requirements. «Mashinery» (USA), 1964, v. 70, № 8, p. 117M124
115. Power W. H. Improvement of evacuated aerogel powder insulation. «Adv. cryog. eng.», 1951, v. 6, p. 42—9.
116. Ramanathan K. G. Infra-red absorption by metals at low temperalures. «Proc. Phys. Soc.», 1962, v. A65, № 391, p. 532—540.
117. Reynolds M. M., Brown J. D., Fulk M. M., and others. Vacuum powder insulation. «Adv. cryog. eng.», 1960, v. 1, p. 216.
118. Schuftan P. M. Separation of air. «Chem. Proc. Eng.», 1962, v. 43, № 9, p. 458—53.
119. Stoy S. T. Cryogenic insulation development «Adv. cryog. eng.», 1960, v. 5, p. 216—221.
120. Trainor J. Aluminized mylar tops as insulator. «Missiles and rockets», 1962, v. 10, № 6, p. 41.
121. Vahl L. Some observations on the thermal expansion of polystyrene foams at low temperature. «Proc. X Intern. Congr. Refr.», 1961, v. 1, p. 267—273.
122. Van Gundy D. A., Mullen L. O., Jacobs R. B. A study of condensing—vacuum insulation. «Adv. cryog. eng.», 1960, v. 5, p. 162—170.
123. Verschoor J. D., Greebler P. Heat transfer by gas conduction and radiation in fibrous insulations. «Transactions of ASME», 1952, v. 74, № 6, p. 961—7.
124. Weber H. H. Über das optische Verhalten von kugeligen, isotropen Teilchen in verschiedenen Medien. «Kolloid—Zeitschrift», 1961, B. 174, № 1, S. 86—72.
125. Weishaupt J. Kammerisolierung bei Linde—Fränkl-Apparaten. «Linde—Berichte», 1962, № 13, S. 3—11.
126. Weiss K. Das Ultrarot—Absorptionsvermögen einiger Metalle bei Zimmertemperatur und —183° C. «Ann. Physik», 6. Folge, 1948, B. 2. № 1—2, s. 1—18.
127. Wilson F. C. Evacuated and gas-filled insulation systems «Refrig. Eng.», 1957, v. 65, № 4, p. 57—60.
128. Ziegler W. F., Cheung H. Total emissivity of some surfaces at 77° K. «Adv. cryog. eng.», 1960, v. 2, p. 100—3.
129. Zimmermann F. J. Total emissivities and absorptivities of some commercial surfaces at room and liquid—nitrogen temperatures. «J. Appl. Phys.», 1955, v. 26, № 12, p. 1483—8.
130. Matsch L. C., Francis A. W. USA patent № 2967152, 3/I—61.
131. British oxygen co. Brit. patent № 892477, 28/III—62.
132. Union carbide corp., Brit. patent № 925416.
133. Union carbide corp., Brit. patent № 925417.
134. Hnilica. M. P. Brit. patent № 900525, 24/X—1960.
135. Franc. patent № 1264507, 15/V—1961.
136. Royet J. Franc. patent № 1276699, 16/X—1961.
137. Yeager M. L. USA patent № 2926810.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3
Введение 5

Глава I. **Перенос тепла в изоляции теплопроводностью** 8

Перенос тепла теплопроводностью газа 9
Перенос тепла в дисперсных средах 13
Перенос тепла в изоляционных материалах 23
Контактный теплообмен в дисперсных материалах 27

Глава II. **Перенос тепла в изоляции излучением** 35

Основные законы излучения 35
Оптические свойства металлов 37
Теплообмен излучением между твердыми телами в непоглощающей и нерассеивающей среде 42
Экранирование излучения 43
Теплообмен излучением в поглощающей и рассеивающей среде 46

Глава III. **Теплоизоляционные материалы и их свойства** 64

Характеристики и область применения 64
Теплофизические свойства 73
Влажностные свойства 82
Механические свойства 85
Структура 87

Глава IV. **Вакуумно-порошковая и вакуумно-волокнистая теплоизоляция** 90

Перенос тепла газом 91
Перенос тепла излучением 98
Перенос тепла по твердому телу 109
Применяемые материалы и их свойства 110
Вакуумно-порошковая теплоизоляция с экранированием излучения 116

Глава V. **Высоковакуумная и вакуумно-многослойная теплоизпляция** 129

Высоковакуумная теплоизоляция 129
Перенос тепла в многослойной изоляции 133
Материалы для вакуумно-многослойной изоляции и их свойства 149
Технология монтажа многослойной изоляции 154

Глава VI. **Вакуумная многослойно-порошковая теплоизоляция** 158

Глава VII. **Методы исследования низкотемпературной теплоизоляции** 162

Методы определения теплопроводности и температуропроводности 162
Методы определения излучательной, поглощательной и пропускательной способностей 171
Методы исследования структуры 172

Глава VIII. **«Тепловые мосты» в изоляционных устройствах** 180

Подвески 180
Опоры 180
Трубы 189

Глава IX. **Расчеты и испытания теплоизоляционных устройств** 192

Расчет теплового потока через изоляцию при стационарном режиме 192
Расчет скорости охлаждения и нагрев изоляции 196
Измерение теплового потока при стационарном режиме 199
Измерение теплового потока при нестационарном режиме 207

Глава X. **Получение и сохранение вакуума в теплоизоляционных устройствах** 211

Проверка герметичности 212
Вакуумирование изоляции 214
Улучшение и сохранение вакуума с помощью адсорбентов 219

Глава XI. **Конструкции теплоизоляционных устройств в технике низких температур** 232

Изоляция низкотемпературных установок 232
Основы конструирования резервуаров для сжиженных газов ... 237
Резервуары для сжиженных газов 248
Трубопроводы для сжиженных газов 264

Литература 268