

5/1-622.

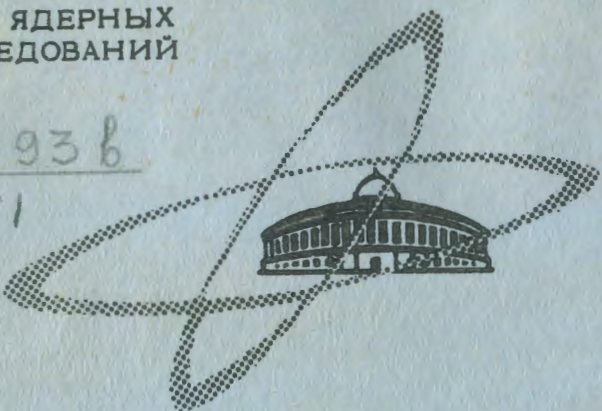
ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

с 3936

Г-61

P8 - 3236



ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Л.Б. Голованов

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ
КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ
МНОГОСЛОЙНЫХ ИЗОЛЯЦИЙ

1967.

P8 - 3236

Л.Б. Голованов

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ
КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ
МНОГОСЛОЙНЫХ ИЗОЛЯЦИЙ

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

4939/1 мф

В в е д е н и е

Многослойная изоляция обладает рядом специфических особенностей по сравнению, например, с порошково-вакуумной. Эти особенности отразились и на определении коэффициента теплопроводности. Приборы для определения коэффициента теплопроводности, как правило, основаны на измерении теплового потока, идущего через образец изоляции, при установившемся режиме. Для измерения коэффициента теплопроводности многослойной изоляции используются приборы, имеющие цилиндрическую или плоскую форму, в которых измерение теплового потока производится по мощности нагревателя или по количеству испарившейся жидкости. Чрезвычайно важно знать точность измерения коэффициента теплопроводности многослойной изоляции. Это поможет до некоторой степени сократить довольно часто встречающиеся расхождения коэффициентов теплопроводности, измеренных на приборе и на изделии.

Прибор, на котором были произведены замеры коэффициентов теплопроводности и определена точность их измерений, показан на рис.1. Он состоит: из вакуумного кожуха (1), основного (2), охранного (3) и экранирующего (4) бачков, основного нагревателя (6), охранного нагревателя (7) и системы поджима (8). В отличие от существующих приборов^{1,2,3/}, тепловой поток, проходящий через образец изоляции, измеряется одновременно двумя способами: по количеству испарившейся жидкости и по мощности нагревателя^{4/}.

Коэффициент теплопроводности определяется по формуле:

$$\lambda = \frac{q \delta}{F (T_m - T_x)} \quad . \quad (1)$$

где q - тепловой поток, проходящий через рабочую часть образца изоляции,
 δ - толщина изоляции,

T_x - температура жидкости, заливаемой в основной бачок,

T_m - температура нагревателя,

F - площадь рабочей части образца изоляции.

Рабочей частью образца изоляции называется часть образца, заключенная между основным бачком и основным нагревателем. Относительная точность определения коэффициента теплопроводности зависит от точности измерения величин, входящих в формулу, и определяется по формуле

$$\Delta \lambda = \Delta q + \Delta \delta + \Delta F + \Delta \Delta T \quad (2)$$

где $\Delta \lambda$ - относительная ошибка определения коэффициента теплопроводности,
 Δq - относительная ошибка определения теплового потока,
 $\Delta \delta$ - относительная ошибка измерения толщины изоляции,
 ΔF - относительная ошибка измерения площади рабочей части образца,
 $\Delta \Delta T$ - относительная ошибка измерения разницы граничных температур.

Измерение толщины и площади поверхности образца, а также перепада температур не составляет трудности. Точность измерения этих величин равна соответственно: $\Delta \delta = \pm 3\%$, $\Delta F = \pm 0,3\%$, $\Delta \Delta T = \pm 0,1\%$. Двумя последними величинами при определении ошибок измерения коэффициента теплопроводности можно пренебречь. Основной задачей при определении коэффициента теплопроводности является определение теплового потока через образец изоляции и оценка его точности.

Измерение теплового потока, проходящего через рабочую часть образца изоляции, и оценка точности его измерения

Краевой эффект

Одним из основных условий, которое должно выполняться при измерении теплового потока, проходящего через образец изоляции, является тождественность потока тепла через исследуемый образец потоку тепла через изоляцию

такой же толщины, но неограниченных размеров в установившемся режиме. Измеряемый тепловой поток через рабочую часть образца может быть искажен теплообменом, возникающим между рабочей частью образца и окружающими его с торца поверхностями. Это явление называется "краевым эффектом", т.к. оно вызвано существованием краев у изоляции, т.е. конечным размером образца. В идеальных условиях, при отсутствии краевого эффекта, испарение жидкости в основном бачке должно происходить только за счёт тепла, идущего от основного нагревателя, т.е. должно соблюдаться равенство:

$$q_{и} = q_0 = q_n \quad (3)$$

где q_0 - идеальный тепловой поток через образец изоляции (при отсутствии краевого эффекта).

$q_{и}$ - тепловой поток через образец изоляции, замеренный по количеству испарившейся жидкости из основного бачка,

q_n - тепловой поток через образец изоляции, замеренный по мощности, подаваемой на основной нагреватель.

Всякий другой тепловой поток к основному бачку или основному нагревателю вносит ошибку в измеряемую величину.

В действительности между торцом изоляции и окружающими его поверхностями происходит теплообмен, который вносит ошибку при измерении теплового потока через образец изоляции. Определить идеальный тепловой поток, т.е. поток через образец изоляции при идеальных условиях (при отсутствии краевого эффекта), и оценить ошибку измерений можно в том случае, если торец изоляции будет защищен таким образом, что тепловой поток, замеренный по нагревателю, будет заведомо больше, а тепловой поток одновременно замеренный по испарителю, будет заведомо меньше идеального теплового потока или наоборот. Рассмотрим два предельных случая защиты торца изоляции: первый - торец образца изоляции защищен экраном, имеющим температуру жидкости, заливаемой в основной бачок (рис.3б), второй - экран, защищающий торец, имеет температуру нагревателя (рис.3а). В первом случае защитный экран холодней, чем торец образца изоляции. Поэтому от нагревателя только часть тепла идет к основному бачку, а остальное тепло идет к

экрану. Температура слоев изоляции, защищенных холодным экраном, перераспределяется таким образом, что каждый слой изоляции становится холодней. В этом случае тепловой поток, замеренный по испарителю, будет меньше, а тепловой поток, замеренный по нагревателю, будет больше, чем идеальный тепловой поток, т.е.

$$q_{и} < q_{о} < q_{н} \quad (4)$$

Во втором случае защитный экран теплей, чем торец изоляции. Поэтому тепловой поток к основному бачку идет от нагревателя и от экрана. Температура слоев изоляции, защищенных теплым экраном, перераспределяется таким образом, что каждый слой изоляции становится теплей. В этом случае тепловой поток, замеренный по нагревателю, будет меньше, а тепловой поток, замеренный по количеству испарившейся жидкости, будет больше, чем идеальный тепловой поток, т.е.

$$q_{н} > q_{о} > q_{и} \quad (5)$$

Было рассмотрено два предельных случая, при которых идеальный тепловой поток лежит между тепловыми потоками, замеренными по количеству испарившейся жидкости и по мощности нагревателя. В общем случае для того, чтобы $q_{о}$ заведомо лежало между $q_{и}$ и $q_{н}$, необходимо, чтобы был односторонний тепловой поток по всей высоте образца или от торца изоляции к защитной поверхности, как в первом случае, или, наоборот, как во втором. Это главное условие защиты торца, при котором справедливы неравенства (4) и (5). В этом случае искомый тепловой поток будет равен:

$$q_{о} = K \frac{q_{и} + q_{н}}{2} \quad (6)$$

где K - коэффициент, зависящий от распределения температур в образце изо-

ляции и защищающей его поверхности. В первом приближении этот коэффициент можно принять равным единице.

Относительная ошибка измерения теплового потока, возникающая от краевого эффекта, равна:

$$\Delta K_{э} \pm \frac{q_{н} - q_{и}}{q_{н} + q_{и}} \cdot 100 \quad (7)$$

Большое влияние на ошибку измерения теплового потока оказывает отношение коэффициента теплопроводности изоляции поперек слоев - λ попер. к коэффициенту теплопроводности вдоль слоев - λ прод. Для определения влияния λ попер. / λ прод. на ошибку при определении теплового потока были произведены замеры теплового потока через изоляции, имеющие близкие λ попер. и разные λ прод. Изменение λ прод. достигалось за счет изменения толщины экранов в образце изоляции. Прокладочный материал во всех случаях был одним и тем же. Эксперименты проводились при толщине изоляции 20мм, удельном давлении на изоляцию 1г/см^2 , при вакууме $1 \cdot 10^{-5}$ и $1 \cdot 10^{-2}$ мм рт.ст. при граничных температурах 77,8 и 293°K. Поверхность, защищающая торец образца, имела температуру, близкую к комнатной. Результаты измерений даны на рис.2.

Выше рассматривались два предельных случая защиты торца изоляции. В этих случаях ошибка при определении теплового потока была максимальной. Ошибку можно уменьшить, если уменьшить перепад температур между экраном и торцом изоляции, соблюдая главное условие защиты торца.

На нашем приборе защита торца исследуемого образца производилась многослойной изоляцией с фиксированными температурами верха и низа (рис.3в). Для фиксации температуры многослойная изоляция, собранная в виде ленты, прикреплялась соответственно верхней своей частью к охранному бачку, а нижней - к охранному нагревателю. Качество изоляции, её толщина и место крепления были выбраны таким образом, чтобы при любых условиях испытания изоляции, т.е. при различном изоляционном вакууме и удельном давлении на изоляцию, соблюдалось главное условие защиты торца.

На рис.3 даны 4 различных варианта: первые три (а,б,в) - в которых выполняется главное условие защиты торца изоляции, и четвертый вариант (г) - в котором основное условие защиты торца не выполняется. На этом же рисунке дано распределение температур по высоте исследуемой изоляции (1), рас-

пределение температур в защищающих торцевых поверхностях (2). Пунктиром дано распределение температур в образце изоляции при отсутствии краевого эффекта (3). Из рис.3, II видно, что в трех вариантах (а, б и в) кривые распределения температуры по высоте образца изоляции и защитной поверхности не пересекаются, т.е. существует однонаправленный тепловой поток. В этих вариантах q_0 лежит между $q_{и}$ и $q_{н}$. В варианте г кривые распределения температур пересекаются, т.е. существует двунаправленный тепловой поток — главное условие защиты торца не выполняется. В этом случае $q_{н}$ и $q_{и}$ больше, чем q_0 .

В табл.1 даны величины тепловых потоков, замеренных по мощности нагревателя и по количеству испарившейся жидкости для четырех вариантов, данных на рис.3. Все измерения производились на одном и том же образце изоляции.

Таблица 1

Величины тепловых потоков, замеренных по количеству испарившейся жидкости и по мощности нагревателя, в зависимости от способа защиты торца образца изоляции

Способ защиты торца изоляции	Тепловой поток,	
	Мвт	
	$q_{и}$	$q_{н}$
Теплый экран $T_{э} = 293^{\circ}\text{K}$	50	27
Холодный экран $T_{э} = 77,8^{\circ}\text{K}$	23,4	58
Многослойная изоляция с фиксированными температурами верха и низа	24,5	32,5
Незащищенный торец	48	37,5

На рис.4 даны коэффициенты теплопроводности и ошибки, возникающие при их определении. Расчет коэффициентов теплопроводности производился по данным табл.1. Из рис.4 видно, что максимальные ошибки возникают при защите торца изоляции холодным и теплым экраном (варианты а и б). Отклонения от среднего значения уменьшаются при защите торца изоляцией с фиксирован-

ными температурами верха и низа (вариант в). Замеры, произведенные на образце с незащищенным торцом (вариант г) показывают, что коэффициент теплопроводности в этом случае лежит несколько выше, чем в других вариантах.

Многочисленные измерения, произведенные по разработанной методике, показывают, что относительная ошибка при определении теплового потока, обусловленная краевым эффектом и подсчитанная по формуле (7), колеблется для различных изоляций и условий измерения в основном от ± 5 до $\pm 30\%$.

Тепловой поток через изоляцию и ошибки, возникающие от краевого эффекта, определяются по количеству испарившейся жидкости $q_{н}$ и по мощности, подаваемой на нагреватель $q_{н}$. В свою очередь, эти величины могут быть замерены с определенной точностью.

— Точность определения теплового потока по количеству испарившейся жидкости

Тепловой поток, замеренный по количеству испарившегося азота, определяется с ошибкой не более $\pm 5\%$. Основными источниками ошибок являются ошибки, возникающие при измерении объема испарившейся жидкости (ошибка составляет от 1,3 до 2,7%) и при колебании давления над кипящей жидкостью. Так, например, при стабилизации давления над кипящим азотом с точностью до 1 мм.вод.ст. ошибка составляет 3%. Суммарная ошибка от прочих факторов составляет не более 1%. Необходимо отметить, что примеси кислорода в азоте также вносят ошибку. Она составляет около 0,1% при содержании кислорода 1%.

Тепловой поток, замеренный по количеству испарившегося водорода, определяется с ошибкой не более $\pm 4\%$. Основным источником ошибок являлась конверсия водорода. Так, например, при работе на водороде, имеющем 95%-ный парасостав, ошибки составляют 4,5%.

Тепловой поток, замеренный по количеству испарившегося гелия, определяется с ошибкой не более 2%.

Ошибки, возникающие при определении теплового потока по количеству испарившейся жидкости, сведены в табл.2.

Таблица 2

Точность определения теплопритока к основному бачку по количеству испарившейся жидкости (в скобках даны величины, применяемые для расчёта) $\Delta q_{и}$

Жидкость	Точность определения в%	
Азот 99,5%	4,4	(5)
Параводород 97%	3,8	(4)
Гелий	1,8	(2)

Фоновый эффект

Большая часть теплопритока к основному бачку идет через образец изоляции, а небольшая часть - от охранный бачка. Теплоприток от охранный бачка к основному (фоновый эффект) возникает в связи с тем, что давление в основном бачке поддерживается несколько ниже, чем в охранный. Перепад давлений необходим для того, чтобы газ, выходящий из основного бачка, не конденсировался по трубке, омываемой жидкостью охранный бачка. Величина фонового эффекта зависит не только от конструкции и размеров прибора, но и от давления в изоляционном пространстве, рода и состава заливаемой жидкости в основной и охранный бачки, от перепада давлений в бачках и т.п. Из пяти видов теплопритока к основному бачку только два имеют существенное значение - это теплоприток остаточными газами и теплоприток по стенке горловины, остальные можно пренебречь.

Фоновый эффект $q_{ф}$ был подсчитан и замерен при работе на азоте, водороде и гелии. Измерение фонового эффекта представляет некоторую сложность из-за необходимости тщательного экранирования основного бачка снизу.

Измерения и расчёты фонового эффекта производились при перепаде давлений между бачками в 1 ммрт.ст. При измерении фона на азоте концентрация азота в основном и охранный бачках была 99,5%. При измерении на водороде концентрация параводорода была в основном и охранный бачке не менее 97%. Результаты расчётов и измерений фонового эффекта даны на рис.5. Величина фонового эффекта на данном приборе составляет не более 10% от минимального теплового потока через изоляцию. Было определено влияние на фоновый эффект концентрации азота и параконцентрации водорода, заливаемых в основной и охранный бачки. Для того, чтобы фоновый эффект не превышал величин, данных на графике, азот, заливаемый в основной и охранный бачки, должен иметь концентрацию не ниже 99,5%. Водород, заливаемый в основной бачок, должен иметь параконцентрацию не ниже 97%, а разница параконцентраций водорода в основном и охранный бачках не должна превышать 2%.

Точность определения теплового потока по мощности, подаваемой на основной нагреватель

Мощность подавалась на основной и охранный нагреватели таким образом, чтобы температуры нагревателей были постоянны и одинаковы. Контроль температуры охранный нагревателя осуществлялся медноконстантановой термопарой с точностью $\pm 0,1^{\circ}$. Контроль перепада температур между основным и охранный нагревателями осуществлялся термостолбиком с точностью $0,02^{\circ}$. Точность, с которой измерялся тепловой поток по мощности, подаваемой на основной нагреватель, зависит от ряда факторов: во-первых, от теплообмена между основным и охранный нагревателями, вызванного разницей температур между ними в пределах точности поддержания равенства температур (ошибка из-за теплообмена составляет 3%); во-вторых - от расхода мощности на изменение температуры основного нагревателя в пределах точности её поддержания (ошибка от этого фактора составляет 8%); в-третьих, неточностью измерения тока, напряжения и сопротивления, по которым определяется мощность, подаваемая на нагреватель (ошибка от неточности измерения мощности составляет 3%). Таким образом, суммарная предельная

ошибка измерения теплового потока по мощности нагревателя составляет $\Delta q_n \pm 12\%$.

Зная величину фонового эффекта и точность определения теплового потока по количеству испарившейся жидкости и по мощности нагревателя, находим тепловой поток через изоляцию:

$$q_0 = K \frac{q_n + (q_n - q_{\phi})}{2} \quad (8)$$

Ошибка определения теплового потока через изоляцию равна:

$$\Delta q = \pm \frac{q_n - (q_n - q_{\phi})}{q_n + (q_n - q_{\phi})} \cdot 100 \begin{matrix} + \Delta q_n \\ - \Delta q_n \end{matrix} \quad (9)$$

Относительная ошибка, возникающая при определении теплового потока через изоляцию, зависит от теплофизических свойств изоляции и условий проведения опыта: давления в изоляционном пространстве и удельного давления на изоляцию. Она может колебаться в среднем от 10 до 35%. Относительная ошибка при определении коэффициента теплопроводности изоляции может колебаться в среднем от 15 до 40%. Увеличение ошибки при измерении коэффициента теплопроводности по сравнению с ошибкой при измерении теплового потока обусловлено неточностью измерения толщины образца.

Определение ошибки измерения теплового потока при одинарном его контроле

Ошибка, возникающую при определении теплового потока через образец изоляции, можно замерить и при одинарном его контроле, например, по количеству испарившейся жидкости. В этом случае для определения ошибки нужно произвести 2 замера. Первый замер теплового потока необходимо произвести при защите торца изоляции холодным экраном $T_{\ominus} = 77,8^{\circ}\text{K}$ (при работе на азоте) и определить q_x . Второй замер теплового потока необходимо произвести при защите торца изоляции теплым экраном $T_{\oplus} = 293^{\circ}\text{K}$ и определить q_m . В этом случае величина теплового потока будет равна:

$$q = K \frac{(q_x - q_{\phi}) + (q_m - q_{\phi})}{2} \quad (10)$$

а предельная относительная ошибка измерения

$$\Delta q = K \frac{q_m - q_x}{q_m + q_x - 2q_{\phi}} \cdot 100 \quad (11)$$

Сравнение ошибок при измерении теплового потока на плоском и цилиндрическом приборах

Если принять, что для многослойных изоляций отсутствует градиент температур вдоль слоев изоляции, т.к. λ попер. $\ll \lambda$ прод., и что тепловой поток через торец изоляции равномерно притекает к холодным поверхностям основного и охранного бачков, то относительная ошибка измерения теплового потока на плоском приборе будет обратно пропорциональна половине диаметра охранного бачка, т.е.

$$\Delta q_{\text{пл.}} = \frac{A}{\frac{D}{2}} \quad (12)$$

Относительная ошибка измерения теплового потока на цилиндрическом приборе будет обратно пропорциональна двойной длине охранных бачков, т.е.

$$\Delta q_{\text{цил.}} = \frac{A}{2(l_1 + l_2)} \quad (13)$$

Обладая большей точностью, цилиндрический прибор имеет один существенный

недостаток: на нем нельзя мерить коэффициент теплопроводности изоляции при различных нагрузках.

Сравнение коэффициентов теплопроводности, измеренных по разным методикам

В табл. 3 сравниваются коэффициенты теплопроводности многослойной изоляции, замеренные на приборе с двойным контролем теплового потока, и на этом же приборе, но только по количеству испарившейся жидкости. Для сравнения дан коэффициент теплопроводности, взятый из работы /1/, который был измерен по количеству испарившейся жидкости.

Сравнивались коэффициенты теплопроводности многослойной изоляции, состоящей из стеклотрубки СБР толщиной 50 мк и алюминиевой фольги толщиной 10 мк. Замеры производились при давлении в изоляционном пространстве $1 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст.

Из табл. 3 видно, что коэффициент теплопроводности, замеренный только по количеству испарившейся жидкости, меньше приблизительно в 2 раза коэффициента теплопроводности замеренного при двойном контроле теплового потока.

Автор выражает свою признательность А.Г.Зельдовичу за плодотворные обсуждения при проведении работы и ценные замечания.

Таблица 3

Измерение теплового потока	Защита торца образца	Плотность изоляции		По данным	$\lambda \cdot 10^4 \frac{\text{мвт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$
		в сл/см	у кг/м ³		
По двойному контролю теплового потока	Многослойная изоляция с фиксированной температурой верха и низа.	25	107	ОИЯИ	0,7
По количеству испарившейся жидкости	Холодный экран с прокладкой многослойной изоляцией между экраном и образцом.	25	107	ОИЯИ	0,4
По количеству испарившейся жидкости		25	95	/1/	0,3

Л и т е р а т у р а

1. М.Г.Каганер. Тепловая изоляция в технике низких температур. М.Машиностроение, 1966, стр.162.
2. J.A.Black and P.E.Glaser, in *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol.9, Plenum Press, New York (1964), p.52.
3. R.H.Kropschot. *Multiple Layer Insulation for Cryogenic Applications "Cryogenics"* Vol. 1, N3, 1961, p.171.
4. Л.Б.Голованов. Авторское свидетельство № 162888 (1963).

Рукопись поступила в издательский отдел
22 марта 1967г.

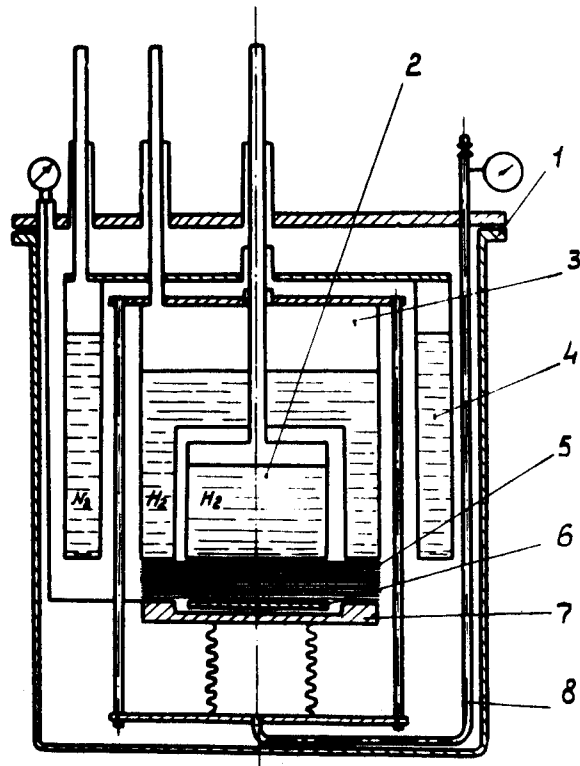


Рис.1. Схема плоского прибора для определения коэффициента теплопроводности изоляционных материалов при различных механических нагрузках с двойным контролем теплового потока:
 1 - вакуумный кожух; 2 - основной бачок; 3 - охранный бачок;
 4 - экранирующий бачок; 5 - исследуемая изоляция; 6 - основной нагреватель; 7 - охранный нагреватель; 8 - система поджима.

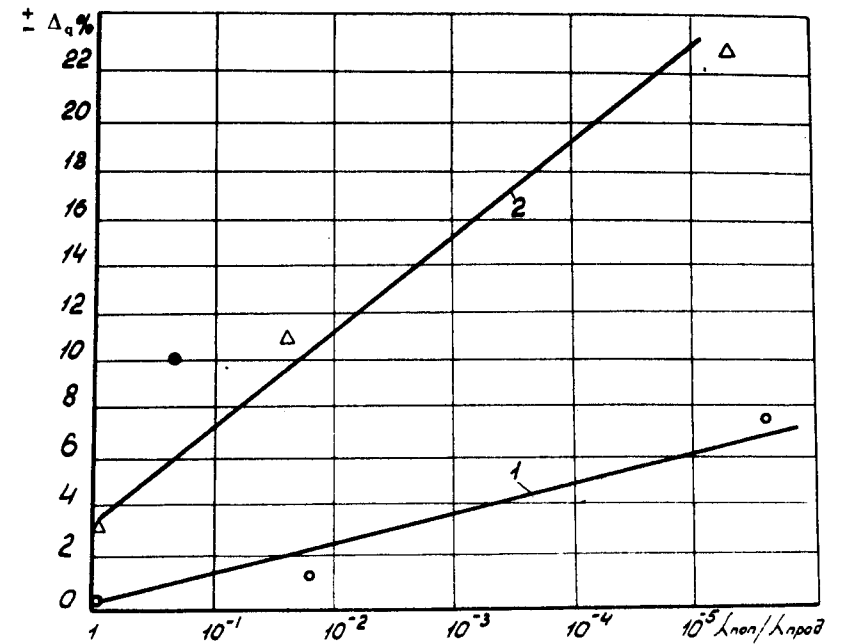


Рис.2. Зависимость средней относительной ошибки, вызванной краевым эффектом при определении теплового потока через изоляцию, от отношения коэффициента теплопроводности изоляции поперек и вдоль слоев при давлении в изоляционном пространстве: 1 - $1 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст., 2 - $1 \cdot 10^{-2}$ мм рт.ст.

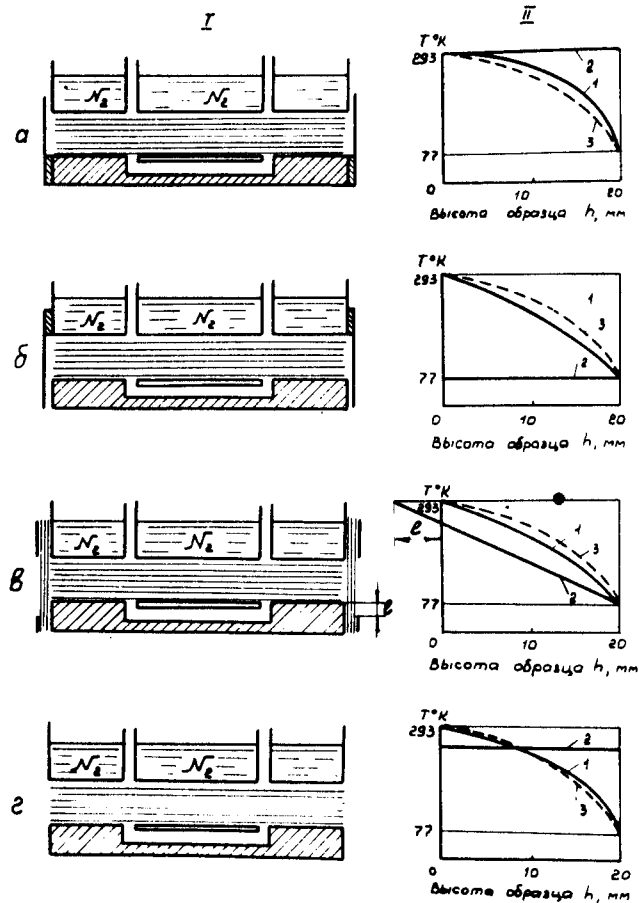


Рис.3. I. Различные варианты защиты торца образца изоляции от теплопритоков. а) - экран при температуре 293°K; б) - экран при температуре 77,6°K; в) многослойная изоляция с фиксированными температурами верха и низа; г) торец не защищен.

II. Распределение температур в образце изоляции 1 и в защищающей торец поверхности 2 по высоте. Пунктиром 3 дано распределение температур в образце при отсутствии краевого эффекта.

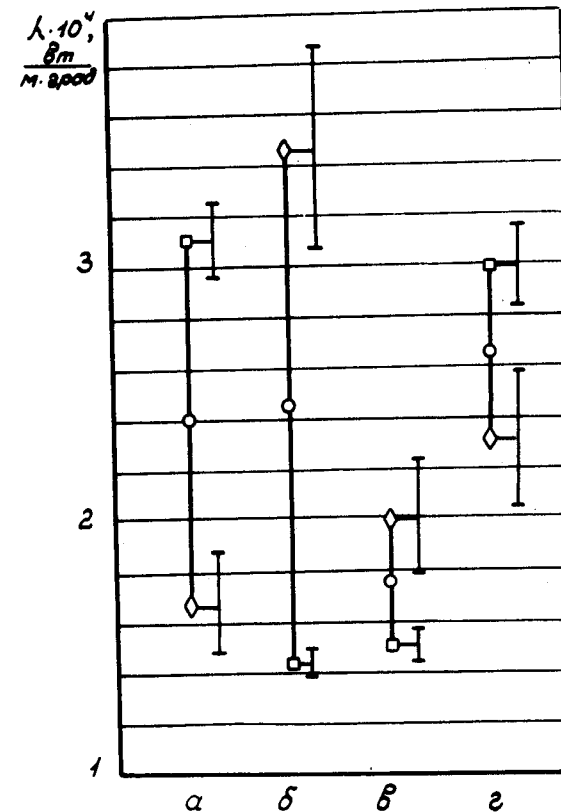


Рис.4. Величины коэффициентов теплопроводности многослойной изоляции, состоящей из стеклохолста и алюминиевой фольги толщиной 30 мк. Замеры произведены при высоте образца 20 мм, сжатии изоляции 1г/см² при вакууме 1·10⁻⁵ мм рт.ст. при различных вариантах защиты торца: а) экран при температуре 293°K; б) экран при температуре 77,6°K; в) многослойная изоляция с фиксированными температурами верха и низа; г) торец не защищен. Коэффициент теплопроводности определялся: \square - по количеству испарившейся жидкости; \diamond - по мощности подаваемой на нагреватель.

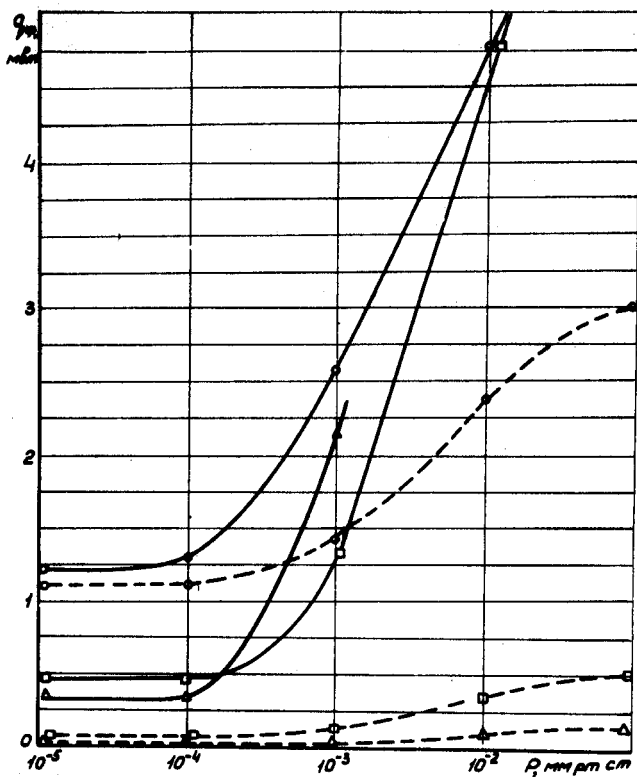


Рис.5. Зависимость величины фонового эффекта q_ϕ от давления в изоляционном пространстве P при перепаде давлений между основным и охранным бачком 1 мм рт.ст.:

- а) бабки залиты азотом, остаточный газ в изоляционном пространстве азот; б) бабки залиты параводородом, остаточный газ в изоляционном пространстве - водород; в) бабки залиты гелием, остаточный газ в изоляционном пространстве - гелий. Сплошными линиями даны экспериментальные данные, пунктирными - расчётные.