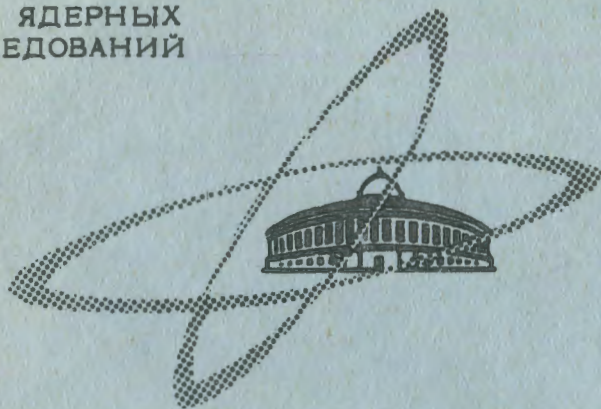


Г-61

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

Р8 - 3237



Л.Б. Голованов

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
НЕКОТОРЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ ИЗОЛЯЦИЙ ПРИ
КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

1967.

P8 - 3237

4940/2 кр.

Л.Б. Голованов

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
НЕКОТОРЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ ИЗОЛЯЦИЙ ПРИ
КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Объединенный институт
энергетических исследований
РАН

В криогенном отделе Объединенного института ядерных исследований был разработан прибор и методика для измерения коэффициентов теплопроводности многослойных изоляций^{/1/}. В отличие от существующих приборов на данном приборе можно определять не только величину коэффициентов теплопроводности изоляции, но и оценить ошибку измерений. Было исследовано более 10 образцов изоляции. Результаты измерения некоторых из них приведены в данной работе.

При исследованиях была найдена зависимость коэффициента теплопроводности изоляции от давления в изоляционном пространстве и от удельного давления на изоляцию. Исследования производились при постоянной граничной тепловой температуре (293°K) и при различных граничных холодных температурах: азотной, водородной и гелиевой. Была также найдена зависимость относительной деформации, числа слоев на 1 см толщины, объемного веса многослойной изоляции от удельного давления на нее.

Выбор диапазона изменений параметров, влияющих на величину коэффициента теплопроводности изоляции

Давление в изоляционном пространстве

Давление в изоляционном пространстве изменялось от $1 \cdot 10^{-5}$ до $1 \cdot 10^{-1}$ мм рт.ст. Выбор нижнего предела давлений $1 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст. обусловлен тем, что этот вакуум можно получить обычным диффузионным насосом, а также и тем, что начиная от давления $1 \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст. и ниже коэффициент теплопро-

водности многослойной изоляции не зависит от давления. Выбор верхнего предела давления $1 \cdot 10^{-1}$ мм рт.ст. вызван тем, что это давление можно легко получить с помощью обычного форвакуумного насоса. Измерение коэффициента теплопроводности изоляции при температуре холодной стенки $20,4^\circ\text{K}$ производилось в диапазоне $1 \cdot 10^{-5}$ - $1 \cdot 10^{-2}$ мм рт.ст., а при температуре холодной стенки $4,2^\circ\text{K}$ - в диапазоне $1 \cdot 10^{-5}$ - $1 \cdot 10^{-3}$ мм рт.ст. Сокращение диапазонов вызвано тем, что использование многослойных изоляций при форвакууме для теплоизоляций жидких водорода и гелия нецелесообразно из-за небольшой теплоты испарения этих жидкостей и сравнительно большого коэффициента теплопроводности изоляции при форвакууме.

Удельное давление на изоляцию

Удельное давление на изоляцию изменялось в диапазоне от 1 до 1000 г/см^2 . Выбор нижнего предела 1 г/см^2 обуславливался следующими соображениями:

1. В реальных условиях чрезвычайно трудно изолировать поверхности (особенно горизонтальные) так, чтобы усилие сжатия изоляции было менее 1 г/см^2 .
2. Удельное давление в 1 г/см^2 всего только в несколько раз превышает давление, вызванное весом самого образца.
3. При определении коэффициента теплопроводности изоляции, находящейся при нагрузке близкой к нулю, возникают ошибки из-за неопределенности контакта между слоями изоляции и холодной поверхностью прибора, вызванной тем, что часть теплового потока с торца изоляции не снимается поверхностью охранного бачка.

Выбор верхнего предела 1000 г/см^2 определен конструкциями сосудов, у которых обе стенки или одна из них (внутренняя или внешняя) изготовлены гибкими.

Точность измерений

Точность измерения коэффициента теплопроводности, определяемая по методике ОИЯИ, колебалась в среднем от 15 до 40%. Измерение давления в изоляционном пространстве производилось с точностью не более 20%. Удельное давление на изоляцию определялось с точностью 10%.

Предварительно рассмотрим механические свойства изоляции, а именно: зависимость объемного веса, числа слоев на 1 см толщины и коэффициента относительной деформации от удельного давления на изоляцию. Исследовались образцы изоляций, у которых в качестве прокладочного материала была использована стекlobумага СБР толщиной 50 мк и стеклохолст ЭВТИ толщиной 100 мк, а в качестве экранов - алюминированная лавсановая пленка толщиной 12 мк и алюминиевая фольга толщиной 10 и 30 мк.

На рис. 1 дана зависимость объемного веса перечисленных изоляций от удельного давления на них.

Из рисунка видно, что в зависимости от толщины и плотности материала объемный вес изоляции колеблется от 100 до 200 кг/м^3 при нагрузке на изоляцию 1 г/см^2 и от 300 до 600 кг/м^3 при нагрузке 1000 г/см^2 . В среднем увеличение объемного веса изоляции при сжатии ее от 1 до 1000 г/см^2 происходит в 3 раза.

На рис. 2 дана зависимость числа слоев на 1 см толщины от удельной нагрузки на изоляцию. Число слоев для изоляции с прокладочным материалом из стеклохолста при удельной нагрузке 1 г/см^2 около 20 сл/см, а для стекlobумаги - около 50 сл/см. По мере возрастания нагрузки до 1000 г/см^2 число слоев возрастает до 60 сл/см для стеклохолста и до 150 сл/см - для стекlobумаги.

На рис. 3 дана зависимость коэффициента относительной деформации от удельного давления на изоляцию. Коэффициент относительной деформации определялся как отношение высоты образца при нагрузке p к высоте образца изоляции при нагрузке 1 г/см^2 . Коэффициент относительной деформации при нагрузке 1000 г/см^2 колеблется от 0,31 до 0,37 в зависимости от свойств прокладочного материала и экранов.

Рассмотрим влияние различных факторов на величину коэффициента теплопроводности.

На рис. 4 дана зависимость коэффициента теплопроводности многослойной изоляции, состоящей из стекlobумаги и алюминированной лавсановой пленки, от давления в изоляционном пространстве при различном усилии сжатия изоляции. При определении величин коэффициентов теплопроводности были найдены также ошибки измерений; так, например, коэффициент теплопроводности данной изоляции при давлении в изоляционном пространстве $1 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст. и удельном давлении

на изоляцию 1 г/см^2 равен $\lambda = (1,1^{+0,2}_{-0,1}) \cdot 10^{-4} \text{ вт/м град.}$, а при давлении $1 \cdot 10^{-1} \text{ мм рт.ст.}$ $\lambda = (19^{+4,1}_{-2,7}) \cdot 10^{-4} \text{ вт/м град.}$ Из графика видно, что коэффициент теплопроводности изоляции, сжатой усилием 1 г/см^2 , не зависит от давления в изоляционном пространстве, начиная от $1 \cdot 10^{-4} \text{ мм рт.ст.}$ и ниже, при сжатии на изоляции усилием 1000 г/см^2 коэффициент теплопроводности не зависит от давления, начиная с $1 \cdot 10^{-3} \text{ мм рт.ст.}$ и ниже. При сжатии изоляции от 1 до 1000 г/см^2 при давлении в изоляционном пространстве $1 \cdot 10^{-5} \text{ мм рт.ст.}$ коэффициент теплопроводности увеличивается приблизительно в 6 раз. При ухудшении вакуума коэффициенты теплопроводности изоляции при 1 и 1000 г/см^2 увеличиваются и сближаются между собой. При давлении $6 \cdot 10^{-2} \text{ мм рт.ст.}$ они становятся равными.

На рис. 5 дана зависимость коэффициента теплопроводности той же изоляции, которая дана на рис. 4, от удельного давления на изоляцию при различном давлении в изоляционном пространстве. На рисунке хорошо видно, что при давлении ниже чем $1 \cdot 10^{-2} \text{ мм рт.ст.}$ в изоляционном пространстве при увеличении нагрузки на изоляцию коэффициент теплопроводности монотонно возрастает. При давлении выше, чем $1 \cdot 10^{-2} \text{ мм рт.ст.}$ при увеличении нагрузки на изоляцию коэффициент теплопроводности сначала уменьшается и, достигнув минимума при удельном давлении около 100 г/см^2 , начинает возрастать.

В нижней части рисунка проведена горизонтальная пунктирная линия, ордината которой равна величине коэффициента теплопроводности данной изоляции, замеренной при вакууме $1 \cdot 10^{-5} \text{ мм рт.ст.}$ без нагрузки на изоляцию, т.е. минимальный коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{мин}} = 0,6 \cdot 10^{-4} \text{ вт/м град.}$ Зная величину минимального коэффициента теплопроводности, можно оценить вклад 3-х видов теплопередачи, существующей в многослойной изоляции, а именно: теплопередача радиацией, контактами и остаточными газами в общий тепловой поток через изоляцию при различном давлении в изоляционном пространстве и удельной нагрузке на нее. Так, например, общий тепловой поток через изоляцию при давлении в изоляционном пространстве $4 \cdot 10^{-3} \text{ мм рт.ст.}$ и удельном давлении на изоляцию 3 г/см^2 будет пропорционален отрезку а-г. Тепловой поток радиацией будет пропорционален отрезку а-б, заключенному между осью абсцисс и горизонталью, соответствующей минимальному коэффициенту теплопроводности

изоляции. Тепловой поток через контакты пропорционален отрезку б-в, заключенному между горизонталью, соответствующей $\lambda_{\text{мин}}$ и кривой, соответствующей коэффициенту теплопроводности изоляции при давлении $1 \cdot 10^{-5} \text{ мм рт.ст.}$ Тепловой поток остаточными газами определяется отрезком в-г, заключенным между кривыми, соответствующими коэффициентам теплопроводности при давлении в изоляционном пространстве $1 \cdot 10^{-5}$ и $4 \cdot 10^{-3} \text{ мм рт.ст.}$ Разделение общего теплового потока на составляющие является ориентировочным, так как в действительности все виды теплопередачи взаимно связаны.

На рис. 6 и 7 даны зависимости коэффициентов теплопроводности изоляции, состоящей из стеклохолста и алюминированной лавсановой пленки от давления в изоляционном пространстве и удельной нагрузки на изоляцию. Из рисунков видно, что характер кривых такой же, как и на рис. 4 и 5, отличие только в абсолютных значениях величин коэффициентов теплопроводности. Минимальное значение коэффициента теплопроводности изоляции при вакууме $1 \cdot 10^{-5} \text{ мм рт.ст.}$ и без давления на изоляцию $\lambda_{\text{мин}} = 0,9 \cdot 10^{-4} \text{ вт/м.град.}$ Этому значению соответствует пунктирная прямая на рис. 7. Коэффициент теплопроводности изоляции при удельном давлении 1 г/см^2 и вакууме $1 \cdot 10^{-5} \text{ мм рт.ст.}$ равен $\lambda = 1,7 \cdot 10^{-4} \text{ вт/м град.}$ Значительно больше и коэффициент теплопроводности при давлении $1 \cdot 10^{-1} \text{ мм рт.ст.}$ и удельном давлении на изоляцию 1 г/см^2 . Он равен $\lambda = (29,3^{+5,7}_{-3,7}) \cdot 10^{-4} \text{ вт/м град.}$ Таким образом, мы видим, что изоляция, имеющая число экранов приблизительно вдвое больше на единицу длины, имеет коэффициент теплопроводности вдвое ниже.

На рис. 8 показано влияние материала экранов многослойной изоляции на коэффициент теплопроводности. На рис. 8а сравниваются два образца изоляций, у которых прокладочным материалом является стеклоткань, а экранами для одного образца - алюминированный лавсан (на графике показано светлыми точками), а для другого - алюминиевая фольга (на графике показано черными точками). Сравнивая эти образцы, можно сделать заключение, что коэффициент теплопроводности изоляции с экранами из лавсана несколько ниже, чем коэффициент теплопроводности изоляции с экранами из фольги только при сжатии изоляции усилием 1 г/см^2 , при сжатии же около 1000 г/см^2 картина обратная: коэффициент теплопроводности изоляции с экранами из фольги ниже, чем с экранами из алюминированного лавсана. Аналогичные результаты, приведенные на рис. 8б,

получились при исследовании многослойной изоляции с другим прокладочным материалом—стеклохолстом.

На рис. 9 и 10 даны результаты измерений коэффициента теплопроводности изоляции, состоящей из стеклотумаги и алюминированной лавсановой пленки при граничных температурах 293 и 4,2°K (рис. 9а и 10а) и 293 и 20,4°K (рис. 9б и 10б). Для сравнения коэффициентов теплопроводности, полученных при различных температурах холодной стенки, на рис. 11 дана зависимость отношений коэффициентов теплопроводности изоляции, состоящей из стеклотумаги и алюминированной лавсановой пленки, замеренных при граничных температурах 293 и 77,6°K и 293 и 20,4°K от давления в изоляционном пространстве и удельного давления на изоляцию. На рис. 12 даны такие же зависимости, как и на рис. 11, но для отношения коэффициентов теплопроводности, замеренных при граничной гелиевой и азотной температурах холодной стенки.

Из рис. 11 видно, что коэффициент теплопроводности одной и той же изоляции, замеренный при температуре жидкого водорода, меньше в 0,88–0,8 или в среднем в 0,74 раза по сравнению с коэффициентом теплопроводности, замеренным при температуре жидкого азота, а отношение граничных температур: $(293-20)/(293-77)$ равно 0,79 (на рис. 11 дано пунктирной линией). Аналогичная картина наблюдается и при измерениях на гелии. На рис. 12 видно, что коэффициент теплопроводности изоляции, замеренный при температуре жидкого гелия, меньше в 0,8–0,65 или в среднем в 0,72 раза по сравнению с коэффициентом теплопроводности, замеренным при температуре жидкого азота, а отношение граничных температур равно 0,745 (на рис. 12 дано пунктирной линией). Отсюда можно сделать вывод, что величина теплового потока через изоляцию не зависит от граничной холодной температуры в диапазоне температур 77,6–4,2°K.

Автор выражает благодарность Н.И. Баландикову, В.Л. Нежаевскому, Е.А. Козыревой, А.А. Горюнову, А.П. Цвиневу, А.И. Калмыковой, В.И. Костярко, В.П. Власову за помощь при проведении экспериментов и обработке результатов.

Л и т е р а т у р а

1. Л.Б. Голованов. Особенности измерения коэффициентов теплопроводности многослойных изоляций. Препринт ОИЯИ Р8-3236, Дубна 1967.

Рукопись поступила в издательский отдел
22 марта 1967 г.

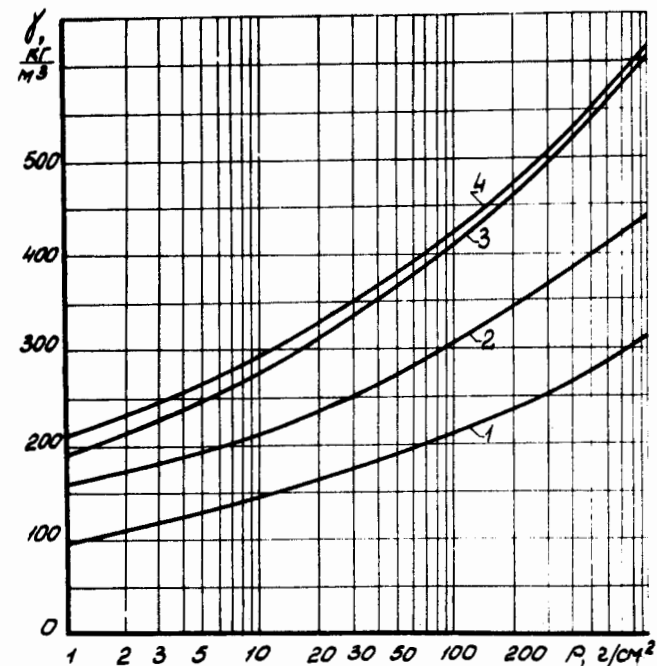
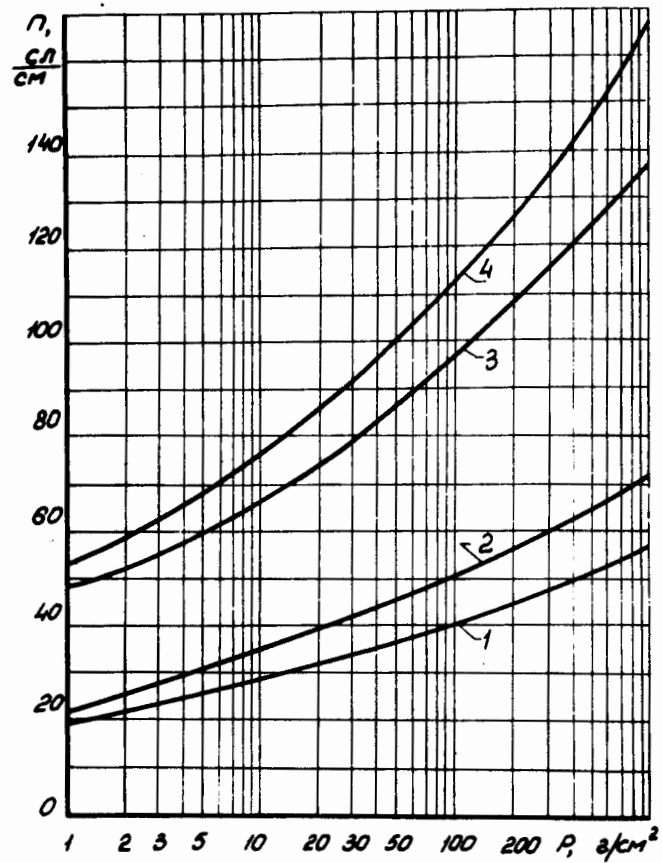


Рис. 1. Зависимость объемного веса γ изоляций от удельного давления ρ на изоляции. 1 – стеклохолст ЭВТИ толщиной 100 мк и алюминированная лавсановая пленка толщиной 12 мк; 2 – стеклотумага СБР толщиной 50 мк и алюминированная лавсановая пленка толщиной 12 мк; 3 – стеклотумага СБР толщиной 50 мк и алюминиевая фольга толщиной 10 мк; 4 – стеклохолст ЭВТИ толщиной 100 мк и алюминиевая фольга толщиной 30 мк.



ис. 2. Зависимость числа слоев n на 1 см толщины изоляций от удельного давления p на изоляции. 1 - стеклохолст ЭВТИ толщиной 100 мк и алюминированная лавсановая пленка толщиной 12 мк; 3 - стекlobумага СБР толщиной 50 мк и алюминированная лавсановая пленка толщиной 12 мк; 4 - стекlobумага СБР толщиной 50 мк и алюминиевая фольга толщиной 10 мк.

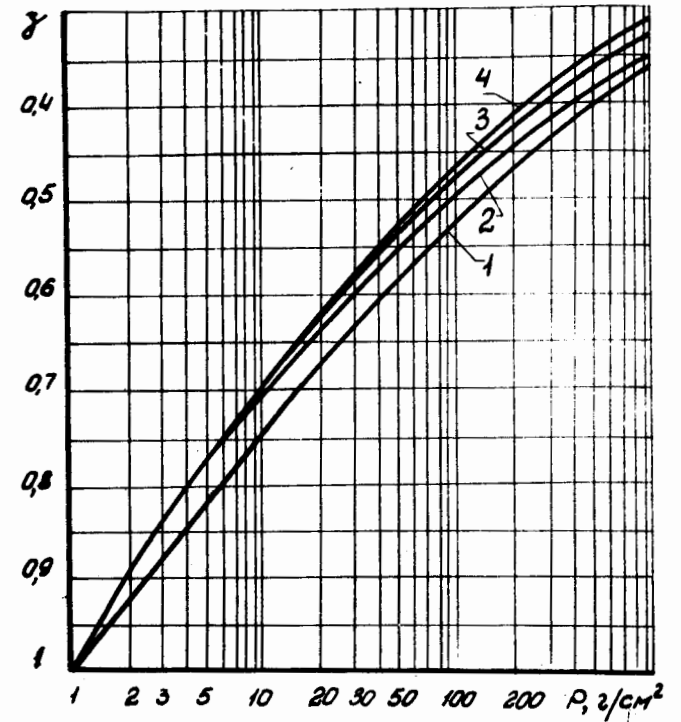


Рис. 3. Зависимость коэффициента относительной деформации ζ изоляций от удельного давления p на изоляции. 1 - стекlobумага СБР толщиной 50 мк и алюминированная лавсановая пленка толщиной 12 мк; 2 - стеклохолст ЭВТИ толщиной 100 мк и алюминиевая фольга толщиной 30 мк; 3 - стекlobумага СБР толщиной 50 мк и алюминиевая фольга толщиной 10 мк; 4 - стеклохолст ЭВТИ 100 мк и алюминированная лавсановая пленка толщиной 12 мк.

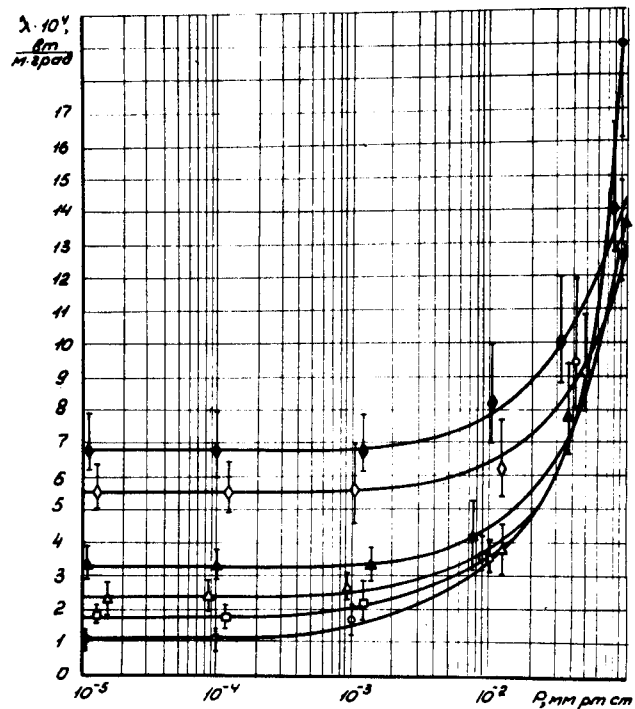


Рис. 4. Зависимость коэффициента теплопроводности изоляции λ , состоящей из стеклотбумаги СБР толщиной 50 мк и алюминированной лавсановой пленки толщиной 12 мк от давления в изоляционном пространстве P (граничные температуры 293 и 77,6°K, остаточный газ-азот) при удельном давлении на изоляцию p , г/см². \circ - 1, \square - 6, Δ - 35, \blacktriangle - 120, \diamond - 550, \blacklozenge - 800.

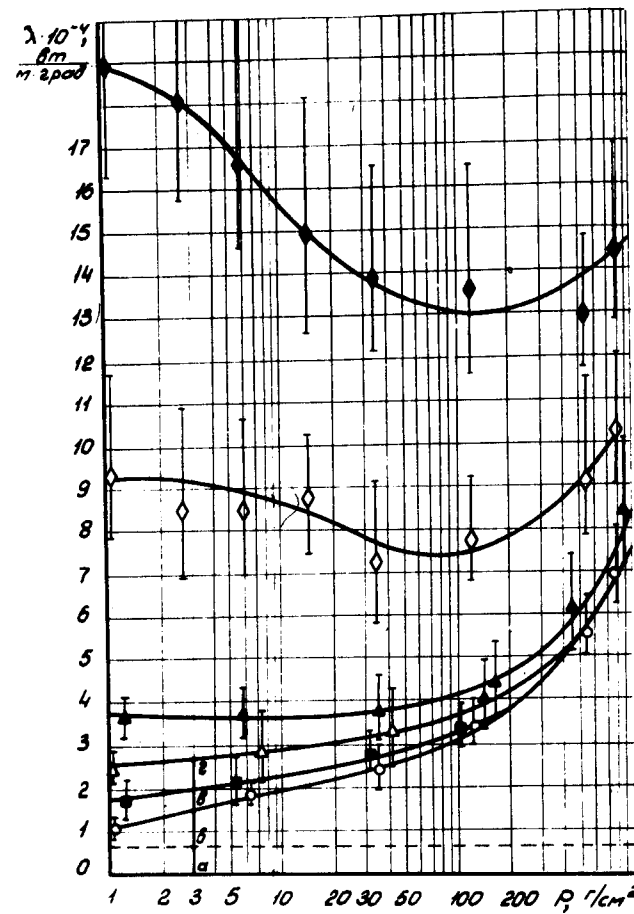


Рис. 5. Зависимость коэффициента теплопроводности изоляции λ , состоящей из стеклотбумаги СБР толщиной 50 мк и алюминированной лавсановой пленки толщиной 12 мк от удельного давления p на изоляцию (граничные температуры 293 и 77°K, остаточный газ-азот) при давлении в изоляционном пространстве P , мм рт.ст. \circ - $1 \cdot 10^{-5}$; \blacksquare - $1 \cdot 10^{-3}$; Δ - $4 \cdot 10^{-3}$; \blacktriangle - $1 \cdot 10^{-2}$; \diamond - $4 \cdot 10^{-2}$; \blacklozenge - $1 \cdot 10^{-1}$.

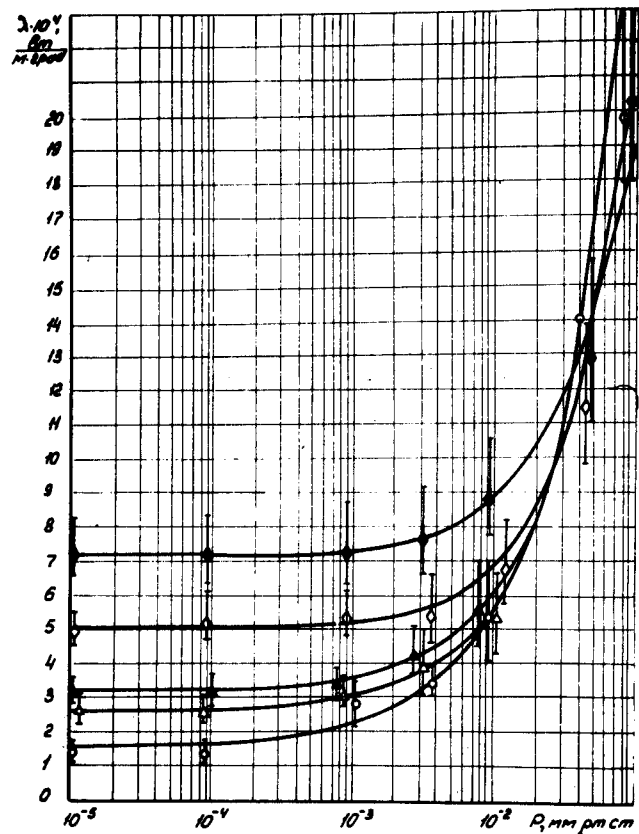


Рис. 6. Зависимость коэффициента теплопроводности изоляции λ , состоящей из стеклохолста ЭТИ толщиной 100 мк и алюминированной лавсановой пленки толщиной 12 мк от давления в изоляционном пространстве P (граничные температуры 293 и 77,6°К, остаточный газ-азот) при удельном давлении на изоляцию p , г/см²: \circ - 1, Δ - 25, \blacktriangle - 70, \blacklozenge - 270, \blacklozenge - 700.

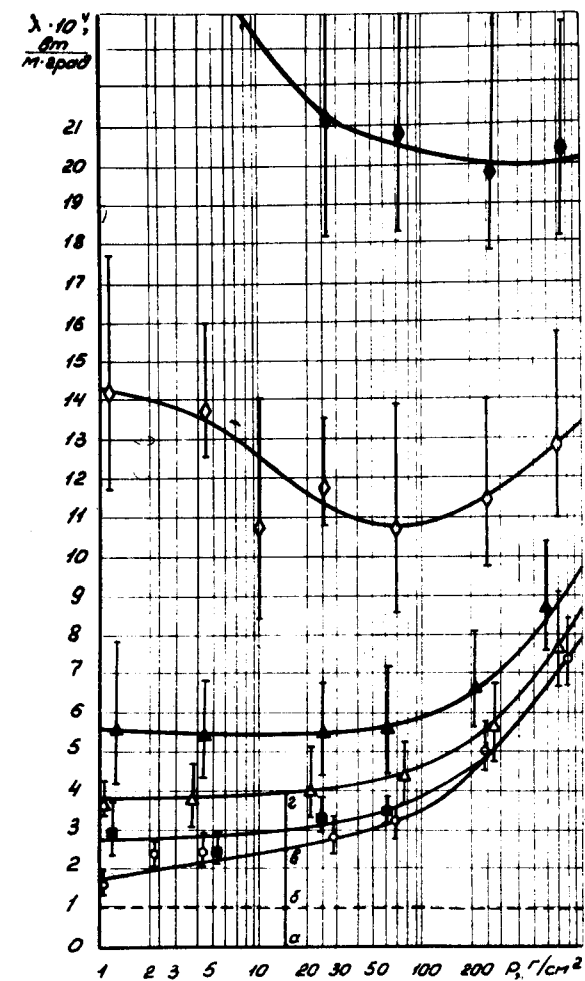


Рис. 7. Зависимость коэффициента теплопроводности изоляции λ , состоящей из стеклохолста ЭТИ толщиной 100 мк, и алюминированной лавсановой пленки толщиной 12 мк от удельного давления на изоляцию p (граничные температуры 293 и 77,6°К, остаточный газ/азот) при давлении в изоляционном пространстве P , мм рт.ст.: \circ - $1 \cdot 10^{-5}$; \blacksquare - $1 \cdot 10^{-3}$; Δ - $4 \cdot 10^{-3}$; \blacktriangle - $1 \cdot 10^{-2}$; \blacklozenge - $4 \cdot 10^{-2}$; \blacklozenge - $1 \cdot 10^{-1}$.

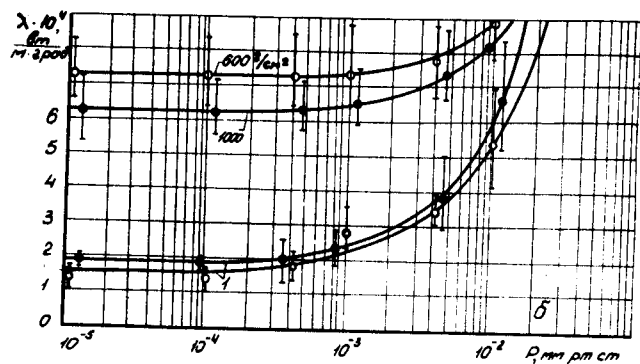
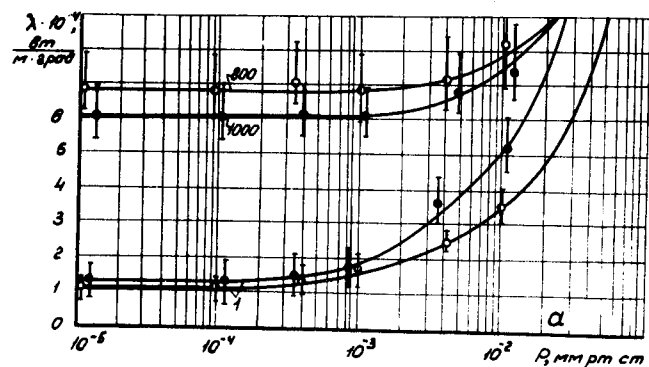


Рис. 8. Зависимость коэффициента теплопроводности изоляции λ от давления в изоляционном пространстве для образцов, состоящих из: а - стеклобумага СБР толщиной 50 мк и \circ - алюминированная лавсановая пленка толщиной 12 мк, \bullet - алюминиевой фольги толщиной 10 мк; б - стеклохолста ЭВТИ толщиной 100 мк и \circ - алюминированной лавсановой пленки толщиной 12 мк; \bullet - алюминиевой фольги толщиной 30 мк.

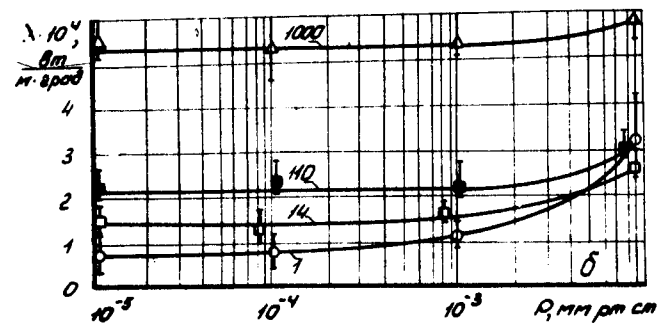
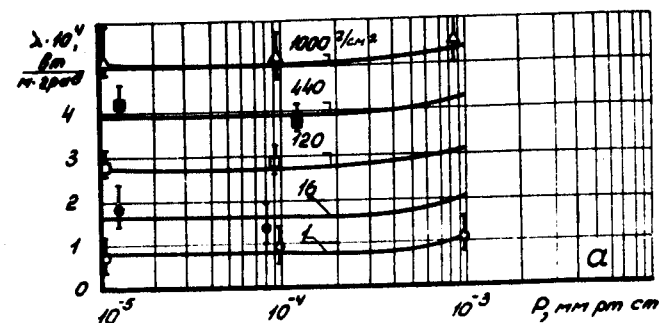


Рис. 9. Зависимость коэффициента теплопроводности изоляции λ , состоящей из стеклобумаги СБР толщиной 50 мк и алюминированной лавсановой пленки толщиной 12 мк от удельного давления на изоляцию при различном давлении в изоляционном пространстве P_2 , мм рт.ст. (а - граничные температуры 293 и 4,2°K, остаточный газ-гелий; б - граничные температуры 293 и 20,4°K, остаточный газ-водород).

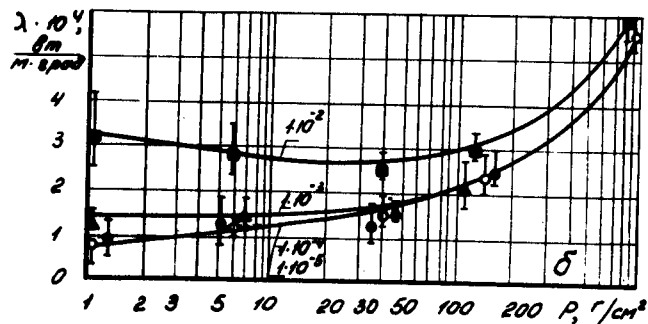
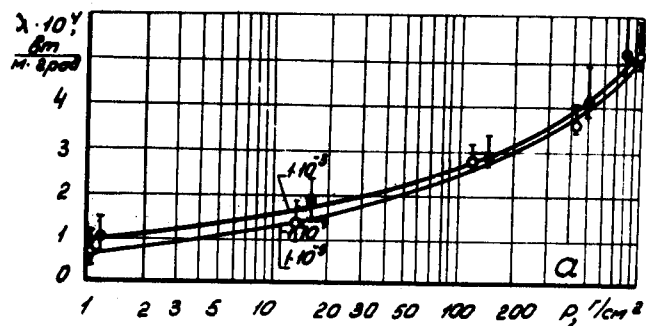


Рис. 10. Зависимость коэффициента теплопроводности изоляции λ , состоящей из стеклотолы СБР толщиной 50 мк и алюминированной лавсановой пленки толщиной 12 мк от удельного давления на изоляцию при различном давлении в изоляционном пространстве p , мм рт.ст. (а - граничные температуры 293 и 4,2°К, остаточный газ-гелий, б - граничные температуры 293 и 20,4°К, остаточный газ-водород).

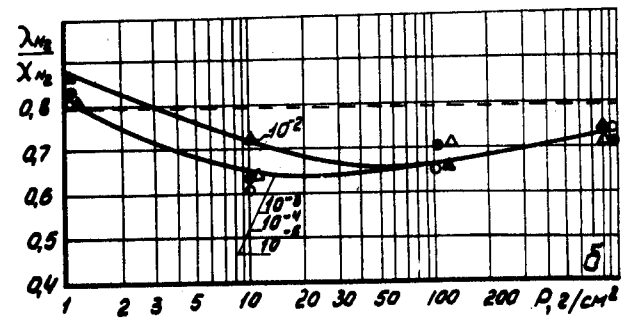
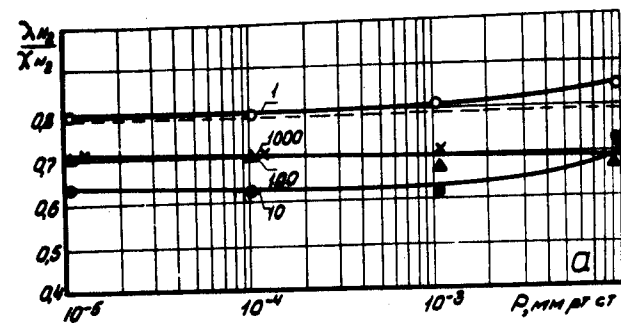


Рис. 11. Зависимость отношений коэффициентов теплопроводности изоляции λ , состоящей из стеклотолы СБР толщиной 50 мк, и алюминированной лавсановой пленки толщиной 12 мк, замеренных при граничных температурах 293 и 77,6°К и 293 и 20,4°К. а - от давления в изоляционном пространстве при различных удельных давлениях на изоляцию p , г/см³, б - от удельного давления на изоляцию при различных давлениях в изоляционном пространстве p , мм рт.ст.

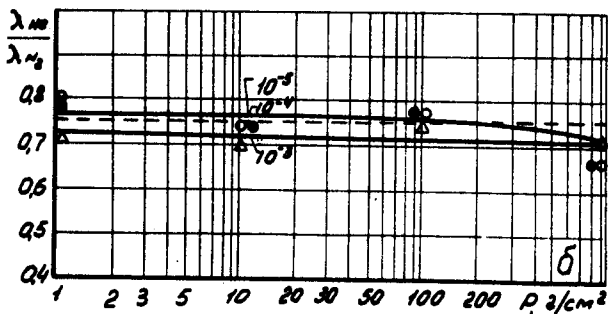
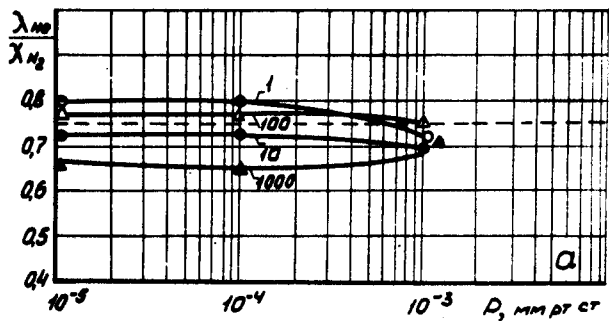


Рис. 12. Зависимость отношений коэффициентов теплопроводности изоляции, состоящей из стеклотолыаги СБР толщиной 50 мк, и алюминированной лавсановой пленки толщиной 12 мк, замеренных при граничных температурах 293 и $77,8^{\circ}$ и 293 и $4,2^{\circ}$ К. а - от давления в изоляционном пространстве при различных удельных давлениях на изоляцию p , $г/см^2$; б - от удельного давления на изоляцию при различном давлении в изоляционном пространстве P , мм рт. ст.