

P13-2008-179

М. В. Булавин, Е. Н. Кулагин, С. А. Куликов,  
В. В. Мелихов, К. А. Мухин

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОПРИТОКОВ  
К ТРУБОПРОВОДУ МЕЗИТИЛЕНОВЫХ ШАРИКОВ  
КРИОГЕННОГО ЗАМЕДЛИТЕЛЯ РЕАКТОРА **ИБР-2М**

Булавин М. В. и др.

P13-2008-179

Определение теплопритоков к трубопроводу мезитиленовых шариков криогенного замедлителя реактора ИБР-2М

В настоящее время в Лаборатории нейтронной физики Объединенного института ядерных исследований проходит модернизацию реактор ИБР-2. В план модернизации входит комплекс криогенных замедлителей на основе замороженных мезитиленовых шариков. Загрузка шариков в камеры замедлителей будет производиться путем их пневмотранспортировки потоком холодного гелия с температурой 40–50 К. В работе описаны эксперименты на модели для определения зависимости теплопритоков на транспортирующую трубу от количества слоев теплоизолирующей намотки и ее композиции. Показано, что можно обеспечить теплоприток на единицу длины трубопровода не более 1 Вт/м.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2008

Bulavin M. V. et al.

P13-2008-179

Determination of Heat Leakage into the Pipeline of Mesitylene Balls for Cryogenic Moderator of IBR-2M Reactor

The modernization reactor of IBR-2 takes place in the Laboratory of Neutron Physics of the Joint Institute for Nuclear Research at present. The complex of cryogenic moderators based on frozen mesitylene balls is included in the modernization plan of the reactor. The charge of the balls in the chamber of moderators will be produced by pneumatic transport by cold helium flow with a temperature of about 40–50 K. The experiments for definition of heat leakages on the transporting pipe from the quantity of the thermal protection layers are presented. It is shown that the heat leakage per unit surface, which can be achieved, is no more than 1 W/m.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2008

## ВВЕДЕНИЕ

Импульсный исследовательский реактор ИБР-2 (ОИЯИ, Дубна) введен в эксплуатацию в 1984 г. В ходе работы реактор достиг ресурсных показателей эксплуатации основного оборудования и был остановлен в конце 2006 г.

В настоящее время реализуется разработанная программа модернизации реактора, направленная на:

- улучшение основных параметров реактора;
- повышение безопасности и эксплуатационной надежности реактора;
- обновление основного оборудования реактора.

К такому оборудованию относится комплекс криогенных замедлителей на основе замороженных мезитиленовых шариков. Загрузка шариков в камеры замедлителей будет производиться путем их пневмотранспортировки потоком холодного гелия с температурой 30–40 К. Для этого будет использоваться трубопровод типа «труба в трубе». Во время пневмотранспортировки внутренний трубопровод и, соответственно, шарики, будут испытывать тепловое воздействие из окружающей среды. Температура шариков и транспортирующего газа должна быть ограничена определенным интервалом (40–50 К), дабы обеспечить постоянство газодинамического напора и сохранить твердость шариков. Для того чтобы определить это тепловое воздействие (теплопритоки), была создана модель трубопровода подвода мезитилена. На модели проведен ряд экспериментов для определения величины теплопритоков в зависимости от количества слоев теплоизолирующей намотки и ее композиции. Ниже приведены методики эксперимента и обработки полученных экспериментальных данных, результаты и выводы из работы.

### 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМОГО ТЕПЛОПРИТОКА

*Максимально допустимый теплоприток* — теплоприток, поступающий из окружающей среды к внутренней трубе подвода мезитилена (далее «трубопровода»), которому соответствует значение нагрева потока транспортируемого газа от входа до выхода трубопровода  $dT = 5$  К. При таком значении  $dT$  сохраняется твердость шариков.

Определим максимально допустимый теплоприток. Шарики движутся с потоком гелия, который подается во внутреннюю трубу криогенного трубопровода. Скорость, с которой гелий будет двигаться внутри трубы, составляет  $v_{\text{He}} = 6$  м/с. Температура гелия на входе в трубу — 40 К. Диаметр шарика  $d_{\text{ш}} = 5$  мм, длина трубопровода  $l_{\text{тр}} = 20$  м, внутренний диаметр трубы  $d_{\text{вн}} = 16$  мм.

Максимально допустимый теплоприток в трубе будет определяться по формуле  $dQ = dT \cdot G \cdot C_{p\text{He}} \cdot \rho_{\text{He}}$ , где  $G$  — объемный расход гелия,  $dT$  — нагрев гелия при движении по трубе (принимается равным 5 К),  $C_{p\text{He}}$  — теплоемкость гелия,  $\rho_{\text{He}}$  — плотность гелия. Таким образом, максимально допустимый теплоприток на единицу длины равен  $\frac{dQ}{l_{\text{тр}}} \approx 1$  Вт/м.

## 2. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ ТРУБОПРОВОДА ПОДВОДА МЕЗИТИЛЕНА

На рис. 1 представлена модель трубопровода подвода мезитилена.

Были определены части модели трубопровода, через которые теплопритоки поступают во внутреннюю трубу, а именно:

- 1) тепловой мост — используется для соединения фланца и медной трубы;
- 2) распорки — части трубопровода, фиксирующие внутреннюю трубу в вертикальном положении; присутствие теплопритока через распорки объясняется тем, что они соприкасаются с внутренней стенкой внешней трубы.

Также теплопритоки во внутреннюю трубу поступали за счет излучения и теплопроводности остаточных газов.

При изготовлении модели трубопровода использовали медную трубу, поскольку для проведения эксперимента необходим был материал с большой теплопроводностью.

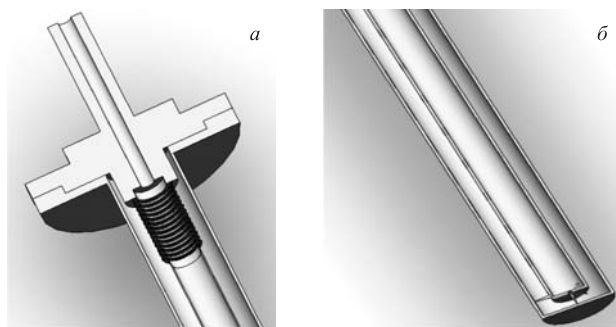


Рис. 1. Модель трубопровода подвода мезитилена: *a* — верхняя часть, *б* — нижняя часть

Эксперимент проводили с намотками трех типов: в виде теплоизолирующего материала из фольгопласта (плотная алюминиевая фольга с приклеенной к ней стеклосеткой), алюминиевой фольги (пищевой) и алюминиевой фольги (пищевой) с прокладкой из стекловуали. Теплоизолирующие материалы наматывали по спирали в соответствии с [8].

### 3. ОЦЕНКИ ТЕПЛОПРИТОКОВ ОТ ТЕПЛООВОГО МОСТА И ЧЕРЕЗ РАСПОРКИ

Поскольку в реальном трубопроводе теплового моста и распорок не предусмотрено, то величины теплопритоков за счет этих частей были рассчитаны теоретически. Полученные теоретические значения теплопритоков вычитались из экспериментальных данных.

**3.1. Расчет теплопритока от теплового моста.** Произведем расчет теплопритока в медную трубу от сильфона. Запишем общий вид уравнения теплопроводности [1]:

$$\operatorname{div}(\lambda(T) \operatorname{grad} T) + q_v = 0, \quad (1)$$

где  $q_v$  — плотность теплового потока от внутренних источников тепла ( $q_v = 0$ );  $\lambda(T)$  — коэффициент теплопроводности стали 12Х18Н10Т, из которой изготовлен сильфон, Вт/м·К;  $c_p$  — теплоемкость стали 12Х18Н10Т Дж/г·К. Получаем

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \lambda(T_c) \frac{\partial T_c}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \lambda(T_c) \frac{\partial T_c}{\partial z} = 0, \quad (2)$$

где  $T_c(r, z)$  — температура сильфона. Составим граничные условия:

$z = 0, T_c(0) = T_{N_2}^{\text{кип}} = 77 \text{ К}$ , где  $T_{N_2}^{\text{кип}}$  — температура кипения азота;

$z = L_c, T_c(L_c) = T_0 = 293 \text{ К}$  — температура окружающей среды;

$r = R_c, q_{\text{из}} = \lambda(T) \partial T_c / \partial r = \varepsilon \sigma (T_0^4 - T_c^4(R, z))$ ,  $R_c$  — радиус внешней поверхности сильфона, м;  $\varepsilon$  — коэффициент теплового излучения (степень черноты) теплоизолирующего материала (алюминия);  $\sigma$  — постоянная Стефана–Больцмана, Вт/м<sup>2</sup>К<sup>4</sup>;  $r = R_c - \delta_c, \lambda(T) \partial T_c / \partial r = \alpha (T_c(z) - T_a(z))$ , где  $T_a(z)$  — средняя температура азота внутри трубы, К;  $\delta_c = 0,45 \text{ мм}$  — толщина стенки сильфона.

Преобразуем уравнение (2), усреднив температуру по радиусу, для чего проинтегрируем уравнение по  $r$ :

$$\frac{d}{dz}\lambda(T_c)\frac{dT_c}{dz} + \frac{1}{R_c\delta_c}\left(R_c\varepsilon\sigma\left(T_o^4 - T_c^4(R, z)\right) - \alpha\left(T_c(z) - T_a(z)\right)(R_c - \delta_c)\right) = 0, \quad (3)$$

$$z = 0, T_c(r, 0) = T'_a = 77 \text{ К},$$

$$z = L_c, T_c(r, L_c) = T''_a = T_0 = 293 \text{ К}.$$

Теперь вычислим значение коэффициента теплоотдачи  $\alpha$ . Рассчитаем число Рейнольдса — критерий режима течения, служащий мерой отношения сил инерции и сил вязкости (внутреннего трения) в потоке:

$$\text{Re} = \frac{w_a d_c}{\nu} = \frac{\rho w_a d_c}{\mu},$$

где  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$  — кинематическая вязкость,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\mu$  — коэффициент динамической вязкости,  $\text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$ ;  $d_c$  — диаметр сильфона, м. Объемный расход азота через сечение сильфона:  $V_n = S_c w_a$ .

$V_n = S_c w_a \Rightarrow w_a = V_n / S_c$ , с другой стороны,  $\dot{m}_n = N / r_n, V_n = N / r_n \rho_a$ , где  $\dot{m}_n$  — масса испарившегося азота (азот, который испарился в результате проведения эксперимента),  $N$  — максимально допустимый теплоприток на единицу длины медной трубы,  $r_n$  — теплота испарения,  $\rho_a$  — плотность газообразного азота.

Отсюда  $\text{Re} = 764$ . Получаем, что  $\text{Re} < 2000$ , т.е. имеем ламинарный режим течения. Для ламинарного режима течения определим коэффициент теплоотдачи азота по числу Нуссельта [1]:

$$\text{Nu} = \frac{d_c \alpha}{\lambda_a} \Rightarrow \alpha = \frac{\lambda_a \text{Nu}}{d_c} = \frac{8 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Вт}}{\text{мК}} \cdot 4}{18 \cdot 10^{-3} \text{м}} = 1,8 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}}.$$

Примем  $\alpha = 0$ . Отсюда окончательно получаем упрощенное уравнение теплопроводности для сильфона:

$$\frac{d}{dz}\lambda(T_c)\frac{dT_c}{dz} + \frac{1}{\delta_c}\varepsilon\sigma\left(T_0^4 - T_c^4(z)\right) = 0, \quad (4)$$

где  $\varepsilon = \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 + n\left(\frac{2}{\varepsilon_e} - 1\right)\right)^{-1}$  — приведенная степень черноты,  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,8$  — коэффициенты теплового излучения (степени черноты) меди и

нержавеющей стали соответственно,  $\varepsilon_e = 0,05$  — коэффициент теплового излучения экрана [2].

Граничные условия:

$$z = 0, T_c(0) = T_a = 77 \text{ К},$$

$$z = L_c, T_c(L_c) = T_0 = 293 \text{ К}.$$

Принимаем зависимость коэффициента теплопроводности стали от температуры как

$$\lambda(T_c(z)) = \lambda_\infty - \lambda_* \cdot \exp\left(-\frac{T_c(z)}{T_*}\right). \quad (5)$$

где  $\lambda_\infty = 17,44$  Вт/мК,  $\lambda_* = 16,42$  Вт/мК,  $T_* = 154,2$  К.

Нелинейное уравнение (4) решаем в программе MathCAD [6]. Получаем  $T_c = 277,8$  К и получаем плотность теплового потока  $q_u = \varepsilon\sigma(T_0^4 - T_c^4)/2\delta_c L_c = 187$ , приток тепла за счет излучения

$$Q_u = 2\pi R_c \delta_c q_u = 0,005 \text{ Вт}.$$

Определим количества тепла, переданного медной трубе за счет теплопроводности сиффона. Тепловой поток за счет теплопроводности стали

$$q_\lambda = \frac{(T_0 - T_a)\lambda_\infty - T_* (\lambda(T_0) - \lambda(T_a))}{L_c}.$$

$q_\lambda = 10350$  Вт/м<sup>2</sup>. Поскольку тепловые потоки для излучения и теплопроводности во много раз больше теплоотдачи, то значение  $\alpha = 0$  было принято верно. Тогда  $Q_\lambda = 2\pi R_c \delta_c q_\lambda = 0,269$  Вт.

Суммарный теплоприток, переданный медной трубе сиффоном, таков:  $Q_c = 0,274$  Вт. Как видно из полученных результатов, основную часть составляет теплоприток за счет теплопроводности стали.

**3.2. Оценки теплопритока через распорки.** Для упрощения расчетов заостренный конец распорки заменяется продолжением ее цилиндрической части — это увеличивает оценку теплопритоков. Тогда уравнение теплопроводности для распорки:

$$\frac{d}{dx}\lambda(T) \frac{dT}{dx} = 0. \quad (6)$$

Граничные условия:  $x = 0, T(0) = T_a$ ;

$$x = l, T(l) = T_R; \quad \lambda(T_R) \frac{dT}{dx} = \alpha_T (T_0 - T_R).$$

Введем функцию

$$H = \int_{T_a}^{T(x)} \lambda(T) dT \rightarrow \frac{dH}{dx} = \lambda(T) \frac{dT}{dx} = 0,$$

отсюда получим  $d^2H/dx^2 = 0$ ,  $dH/dx = A$ ,  $H(x) = Ax + B$ , где  $A$  и  $B$  — константы. Зависимость коэффициента теплопроводности стали от температуры определяется (5).

Теперь получим

$$\int_{T_a}^{T_c} \lambda(T_c) dT_c = -\frac{1}{2\delta_c} \varepsilon \sigma T_0^4 z^2 + Az,$$

$$\begin{aligned} H(x) &= \int_{T_a}^{T(x)} \left( \lambda_\infty - \lambda_* \cdot \exp\left(-\frac{T(x)}{T_*}\right) \right) dT_c = \\ &= \lambda_\infty (T(x) - T_a) - \lambda_* T_* \left( \exp\left(-\frac{T_a}{T_*}\right) - \exp\left(-\frac{T(x)}{T_*}\right) \right) = Ax + B. \end{aligned} \quad (7)$$

Используя первое граничное условие, получим  $B = 0$ . Таким образом, функцию  $H(x)$  можно записать в виде

$$\lambda_\infty (T(x) - T_a) - T_* (\lambda(T_a) - \lambda(T(x))) = Ax.$$

Из второго граничного условия получим уравнение для вычисления  $T_R$ :

$$\frac{\lambda_\infty}{l} (T_R - T_a) + \frac{T_*}{l} (\lambda(T_a) - \lambda(T_R)) = \alpha_T (T_0 - T_R). \quad (8)$$

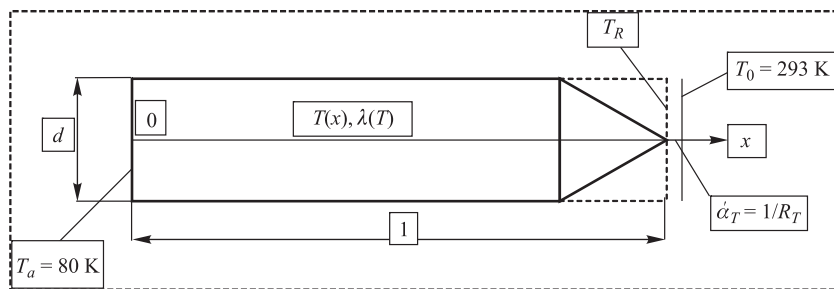


Рис. 2. Схема стальной распорки



Здесь  $\alpha_T = 1/R_T = 100 \text{ Вт/м}^2$  — коэффициент теплоотдачи в области контакта стальной распорки с внутренней поверхностью стальной трубки и  $R_T$  — контактное сопротивление.

Уравнение (7) нелинейное, и поэтому решение его находим, используя программу MathCAD [6]. При заданных параметрах решение его будет  $T_R = 100 \text{ К}$ . Тогда можно найти тепловой поток, который поступает к распорке от теплой стенки стальной трубы:

$$q_r = \alpha_T (T_0 - T_R) = 100 \cdot (293 - 100) = 1,93 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2.$$

Если принять площадь контакта равной поперечному сечению распорки ( $d = 2 \text{ мм}$ ), то получим максимальную тепловую мощность, поступающую к медной трубе через четыре распорки:  $Q_r = 4\pi d^2/4 \cdot q_r = 0,243 \text{ Вт}$ .

Так как конец распорки заострен и площадь контакта значительно меньше сечения распорки, то, соответственно, и  $Q_r$  много меньше, чем  $0,243 \text{ Вт}$ . Таким образом, теплоприток через распорки можно не учитывать.

#### 4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА МОДЕЛИ ТРУБОПРОВОДА И СХЕМА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 3 представлена технологическая схема установки.

Для подготовки модели к работе необходимо:

- достичь в межтрубном пространстве вакуума порядка  $10^{-2} \text{ Па}$  с помощью форвакуумного и диффузионного насосов;

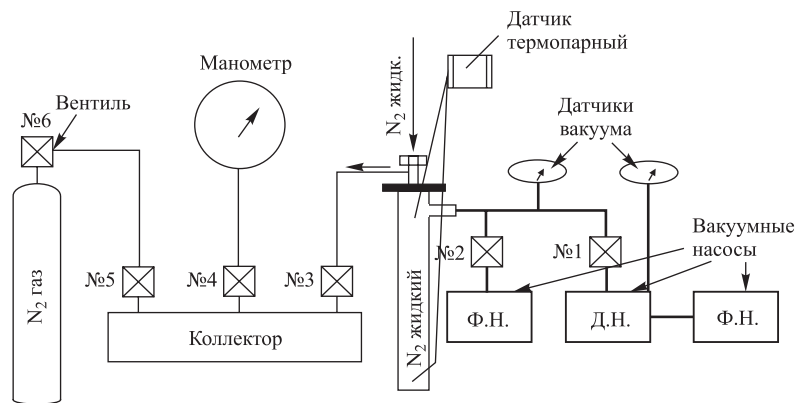


Рис. 3. Технологическая схема установки

- убедиться в отсутствии неплотностей в системе, через которые при проведении эксперимента может уходить испаряющийся азот, что может сказаться на достоверности экспериментальных данных.

После этого можно приступить к проведению непосредственно эксперимента. На рис. 4 можно видеть схему трубопровода со всеми составными частями.

Техника проведения эксперимента состоит в следующем: в медную трубу с помощью длинной лейки заливали жидкий азот. Через некоторое время медная труба захлаживалась по всему объему (показания температурного датчика внизу и сверху внутренней трубы были одинаковыми — рис. 3). После этого закрывали медную трубу. С течением времени давление на манометре повышалось (за счет испарения азота). Эксперимент было решено проводить до 40 делений (1 деление соответствует 1348 Па). Все полученные данные фиксировались и вносились в компьютер, после чего обрабатывались.

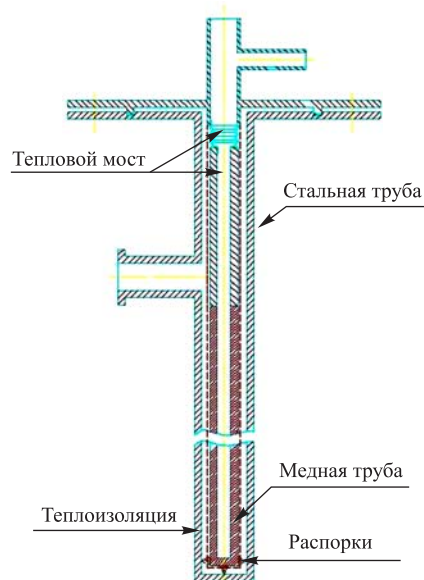


Рис. 4. Модель трубопровода подвода мезитилена

## 5. ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ И ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Как уже было сказано выше, каждому делению давления  $dP$  на манометре соответствует свое время  $dt$ . Теплопритоки, которые идут на испарение азота, складываются из трех частей:  $Q_{\Sigma} = (Q_n + Q_{Cu} + Q_e)$ , где  $Q_n = C_{N_2} \cdot m_{N_2} \cdot \partial T / \partial P \cdot dP / dt$  — теплоприток за счет нагрева азота,  $Q_{Cu} = C_{Cu} \cdot m_{Cu} \cdot \partial T / \partial P \cdot dP / dt$  — теплоприток за счет нагрева медной трубы и  $Q_e = dP / dt \cdot r_i V \cdot M_0 / R \cdot T_0$  — теплоприток за счет испарения азота.  $C_{N_2}$  и  $C_{Cu}$  — теплоемкости азота и меди соответственно;  $m_{N_2}$  и  $m_{Cu}$  — массы азотного столба и медной трубы;  $\partial T / \partial P$  и  $dP / dt$  — зависимости температуры от давления и давления от времени соответственно;  $r_i$  — теплота испарения жидкого азота;  $V$  — объем баллона, в который испаряется жидкий азот ( $V = 22$  л);  $M_0$  — молярная масса воздуха;  $R$  — постоянная Больцмана;

**Величины теплопритоков (Вт/м) для различного количества слоев теплоизоляции и ее композиции**

Количество слоев теплоизолирующего материала	Алюминий+стеклоуаль, Вт/м	Алюминий, Вт/м	Фольгопласт, Вт/м
0	3,23	3,23	3,23
1	0,757	1,607	0,856
2	0,659	0,596	0,916
3	0,621	0,626	0,924
4	0,557	0,68	1,052
5*	—	0,827	—

\* В имеющейся модели данное количество слоев технологически намотать не представляется возможным.

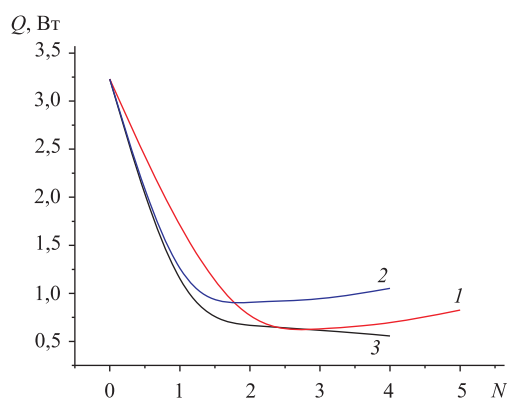


Рис. 5. Зависимость теплопритока от количества слоев теплоизолирующего материала: 1 — алюминий, 2 — фольгопласт, 3 — алюминий со стеклоуалью,  $N$  — количество слоев теплоизоляции

$T_0$  — температура окружающей среды. По этим формулам обработаны все экспериментальные данные. Полученные данные теплопритоков за вычетом из них теплопритоков от сифона и распорок (рассчитанные теоретически) приведены в таблице и на рис. 5.

**ВЫВОДЫ**

Анализируя таблицу и полученные графики, можно сделать следующие выводы:

- *Алюминий и стеклоуаль:* с увеличением слоев намотки теплоприток уменьшается. Так как максимально допустимый теплоприток составляет

1 Вт/м, то из таблицы видно, что достаточно одного слоя данного вида намотки, но, учитывая коэффициент запаса, можно рекомендовать наматывать 3–4 слоя (плотность намотки 10–12 слоев на 1 см). Однако использование стекловуали в радиационных условиях может оказаться проблематичным.

- *Для алюминия*, как видно из данных таблицы, теплоприток с увеличением количества слоев намотки сначала уменьшается и достигает минимального значения при  $N = 2$ , а затем увеличивается. Это можно объяснить тем, что с увеличением количества слоев теплоизоляции теплоприток за счет контактов между слоями больше, чем теплоприток за счет излучения, который добавленные слои отражают. Увеличение теплопритока при  $N = 3–4$  для нас не критично, поэтому, учитывая коэффициент запаса, также рекомендуется наматывать 3–4 слоя (плотность намотки 10–12 слоев на см).

- *Фольгопласт*: поскольку фольгопласт — это плотная алюминиевая фольга с приклеенной к одной из сторон стеклосеткой, то наличие контактного теплопритока между слоями сводится к минимуму. Тем не менее, для фольгопласта наблюдается постоянное увеличение теплопритока с ростом количества слоев теплоизоляции (для  $N > 1$ ). Это может быть объяснено тем, что вакуум между слоями теплоизоляции хуже, чем в свободном межтрубном пространстве из-за постоянного «гажения» фольгопласта, что увеличивает перенос тепла теплопроводностью остаточных газов. Поэтому этот материал в качестве вакуумной теплоизоляции использовать не рекомендуется, тем более в радиационных условиях, когда процесс газовой выделенности может ускориться.

Таким образом, опираясь на результаты данной работы, а также на многолетнюю практику использования многослойной вакуумной изоляции [7], рекомендуется по всей длине трубопровода мезитиленовых шариков наматывать алюминиевую фольгу. Также рекомендуется осуществлять монтаж слоев без обжата, чтобы избежать эффекта увеличения коэффициента теплопроводности между слоями теплоизоляции.

Авторы выражают благодарность Е. П. Шабалину за постановку задачи, ценные замечания при обработке экспериментальных данных и подготовке статьи.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С.* Теплопередача. Изд. 2-е. М.: Энергия, 1969. 378 с.
2. *Малков М. П., Данилов И. Б., Зельдович А. Г., Фрадков А. Б.* Справочник по физико-техническим основам криогеники; Под ред. М. П. Малкова. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1985. 432 с., ил.
3. *Солнцев Ю. П., Степанов Г. А.* Материалы в криогенной технике. Л.: Машиностроение, 1982. 342 с.

4. *Хэфер Р.* Криовакуумная техника: Пер. с нем. М.: Энергоатомиздат, 1983. 272 с., ил.
5. *Куликов С. А.* Оптимизация замедлителей нейтронов для высокопоточных источников: Автореферат кандидатской диссертации, ОИЯИ, 14-2006-35. Дубна, 2006. 18 с.
6. *Кирьянов Д. В.* MathCAD 13. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 608 с.: ил.
7. *Каганер М. Г.* Тепловая изоляция в технике низких температур: 1966, 275 с.
8. *Миролюбская Ю. А., Каганер М. Г., Великанова М. Г.* Вакуумно-многослойная изоляция в криогенной технике: Обзорная информация НПО Гелиймаш, Цинтихим-нефтемаш, 1978.

Получено 2 декабря 2008 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 24.02.2009.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,87. Уч.-изд. л. 1,04. Тираж 305 экз. Заказ № 56514.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)