

УДК 536.48; 538.941

# Криогенный цикл со сверхтекучим гелием

А. А. ЗАХАРОВ, д-р физ.-мат. наук А. П. СЕРЕБРОВ

Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константина  
188300, Ленинградская обл., г. Гатчина, Орлова роща

*Superfluid helium will be used to produce ultracold neutrons at the research nuclear reactor. Way of direct pumping helium vapor is proposed to remove heat from the superfluid helium. Cryogenic cycle with superfluid helium was developed. Maximum heat and flow rate cycle parameters were calculated taking into account performance of cryogenic and vacuum facilities. Maximum of 45,8 W can be removed from the liquid helium at a temperature level of 1,3 K.*

**Key words:** cryogenic cycle, superfluid helium, vacuum pumping.

**Ключевые слова:** криогенный цикл, сверхтекучий гелий, вакуумная откачка.

Температуру гелия немногим более 1 К можно достичь прямой вакуумной откачкой паров  $^4\text{He}$  без использования изотопа  $^3\text{He}$ . Прямая вакуумная откачка позволяет отводить десятки ватт тепловой нагрузки за счет теплоты испарения жидкости. Данный подход предлагается использовать на источнике ультрахолодных нейтронов для отвода тепла от жидкого гелия на исследовательском ядерном реакторе ВВР-М [1–3].

В состав оборудования криогенного цикла, в котором присутствует сверхтекучий гелий, входят: гелиевый охладитель, вакуумная установка, специальный криостат и камера источника ультрахолодных нейтронов с жидким гелием. Схема криогенного цикла со сверхтекучим гелием показана на рис. 1.

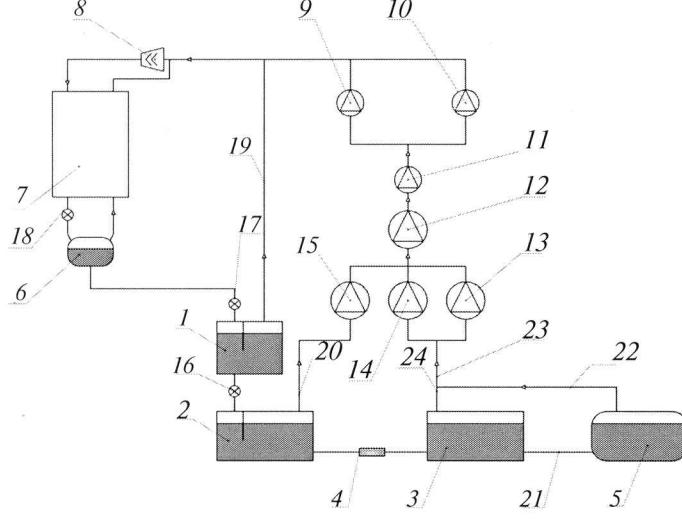


Рис. 1. Схема криогенного цикла со сверхтекучим гелием:

- 1 — верхняя ванна криостата;
- 2 — промежуточная ванна криостата;
- 3 — нижняя ванна криостата;
- 4 — фильтр;
- 5 — камера источника УХН;
- 6 — сборник жидкого гелия;
- 7 — блок охлаждения охладителя;
- 8 — гелиевый компрессор;
- 9—15 — вакуумные насосы;
- 16—18 — дроссельные вентили;
- 19 — трубопровод сброса паров гелия;
- 20 — трубопровод откачки промежуточной ванны;
- 21 — трубопровод подачи гелия в камеру;
- 22 — трубопровод откачки холодных паров из камеры;
- 23 — трубопровод откачки гелия из камеры;
- 24 — трубопровод, соединяющий нижнюю ванну с камерой.

Стандартный гелиевый охладитель L280 производства фирмы Linde обеспечивает подачу жидкого гелия с расходом 3,2 г/с (96 л/ч) и температурой 4,4 К. Вакуумная установка позволяет понизить температуру гелия до 1,0–1,3 К и отвести тепло, которое выделяется в камере с жидким гелием. Установка имеет четыре ступени откачки гелия. В состав вакуумной установки входят вакуумные насосы фирмы EDWARDS. Понижение температуры жидкого гелия происходит в специальном криостате с тремя ваннами жидкого гелия. Из криостата сверхтекучий гелий поступает в камеру, расположенную в реакторе.

Принципиально важным является отсутствие в камере источника ультрахолодных нейтронов изотопа  $^3\text{He}$ , который является захватчиком нейтронов. Содержание  $^3\text{He}$  в природном гелии достигает  $1,4 \cdot 10^{-6}$  долей. Использование специального фильтра, пропускающего только сверхтекущую составляющую жидкости, позволяет очистить гелий, поступающий в камеру, от примеси изотопа  $^3\text{He}$  [4]. Чтобы исключить попадание  $^3\text{He}$  из криостата в камеру через вакуумный тракт, предусмотрены две раздельные ветви откачки: первая ветка с одним насосом первой ступени откачивает промежуточную ванну криостата, вторая ветка с двумя насосами первой ступени откачивает камеру с жидким гелием.

Рассмотрим работу криогенного цикла. Газообразный гелий комнатной температуры сжимается в компрессоре 8 и поступает на охлаждение в блок охлаждения 7. В результате дросселирования на вентиле 18 жидкий гелий наполняет сборник 6. Из сборника жидкий гелий с температурой 4,4 К поступает через вентиль 17 в верхнюю ванну криостата 1. При дросселировании температура жидкого гелия понижается до 4,2 К, часть гелия испаряется, согревается в трубопроводе 19 и возвращается в компрессор. Из верхней ванны криостата 1 жидкий гелий через вентиль 16 поступает в промежуточную ванну криостата 2, где за счет вакуумной откачки его температура понижается до 1,0–1,3 К и он переходит в сверхтекучее состояние. Вакуумная откачка промежуточной ванны производится насосом 15 через вакуумный трубопровод 20. В вакуумном трубопроводе 20 происходит отогрев гелия до комнатных температур. После прохождения вакуумных насосов 15, 12, 11, 10 и 9 гелий направляется в компрессор.

Из промежуточной ванны криостата 2 через фильтр 4 сверхтекучий гелий поступает в нижнюю ванну криостата 3. На фильтре 4 происходит очистка гелия от природ-

ной примеси изотопа  $^3\text{He}$ . Из нижней ванны криостата 3 сверхтекущий гелий через трубопровод 21 заполняет камеру источника 5. Для отвода радиационного тепла, которое выделяется в камере при работе реактора, она вакуумируется насосами 13 и 14 через холодный внутриреакторный трубопровод 22 и наружный трубопровод 23. В трубопроводе 23 гелий отогревается до комнатной температуры. Пройдя вакуумные насосы 13, 14, 12, 11, 10 и 9, гелий возвращается в компрессор. Для поддержания в нижней ванне криостата и в камере источника одинакового давления они соединены трубопроводом 24.

Вследствие существующего требования обеспечить минимальное сопротивление вакуумных трубопроводов 20 и 23 становится невозможной установка на этих трубопроводах рекуперативных теплообменников для повышения термодинамической эффективности криогенного цикла. Небольшое сопротивление вакуумных трубопроводов необходимо для получения как можно более низкого давления над поверхностью жидкости, поскольку от давления зависит температура самой жидкости.

Производительность ветки откачки камеры источника с двумя вакуумными насосами на первой ступени и ветки откачки криостата с одним вакуумным насосом на первой ступени показана на рис. 2.

На рис. 3 представлена зависимость температуры жидкого гелия от давления насыщенных паров. Температура гелия в камере будет соответствовать давлению на входе в вакуумные насосы, плюс сопротивлению откачного трубопровода, плюс разности между давлением насыщенного пара и давлением над поверхностью жидкости. Сумма сопротивления откачного трубопровода и разность между давлением насыщенного пара и давлением над поверхностью жидкости в сумме не превышают 10 Па.

Далее приводится расчет криогенного цикла со сверхтекущим гелием для определения максимальных значений термодинамических параметров цикла, которые могут быть обеспечены гелиевым охладителем и вакуумным оборудованием. Целью расчета является определение количества тепла, отводимого откачкой паров гелия непосредственно из камеры, и температуры жидкого гелия

в камере. Внешние теплопритоки ввиду их малости по отношению к реакторной тепловой нагрузке в данном расчете не учитываются.

На основе полученных данных производится конструирование внешнего криостата и внутриреакторной части источника ультрахолодных нейтронов. Такой подход обеспечит эффективную работу термодинамического цикла при меньших тепловых и расходных нагрузках, поскольку в этом случае система будет обладать запасом по теплопередаче и гидравлическому сопротивлению. В расчете используется максимальное количество жидкого гелия, которое может быть доставлено криогенным гелиевым охладителем L280. Данное количество составляет 3,2 г/с при температуре 4,4 К. Вакуумная установка обладает достаточной производительностью для откачки указанного количества паров гелия.

Жидкий гелий, поступающий в криостат из сборника гелия, частично испаряется в верхней ванне при дросселировании, частично — в промежуточной ванне, а остальное количество поступает в камеру, где испаряется и отводит реакторное тепло.

Коэффициент испарения жидкого гелия в верхней ванне криостата

$$k_{\text{в}} = \frac{\Delta h_1}{r_{e, 4,2} \text{ К}};$$

энталпия при температуре 4,4 К:  $h_{4,4} \text{ К} = 10,7 \text{ Дж/г};$   
энталпия при температуре 4,2 К:  $h_{4,2} \text{ К} = 9,6 \text{ Дж/г};$   
теплота испарения при 4,2 К:  $r_{e, 4,2} \text{ К} = 21,6 \text{ Дж/г};$

$$k_{\text{в}} = 0,05.$$

Коэффициент испарения в промежуточной ванне криостата

$$k_{\text{пп}} = \frac{\Delta h_2}{r_{e, 1,3} \text{ К}};$$

энталпия при температуре 4,2 К:  $h_{4,2} \text{ К} = 9,6 \text{ Дж/г};$   
энталпия при температуре 1,3 К:  $h_{1,3} \text{ К} = 0,12 \text{ Дж/г};$   
теплота испарения при 1,3 К:  $r_{e, 1,3} \text{ К} = 21,6 \text{ Дж/г};$

$$k_{\text{пп}} = 0,44.$$

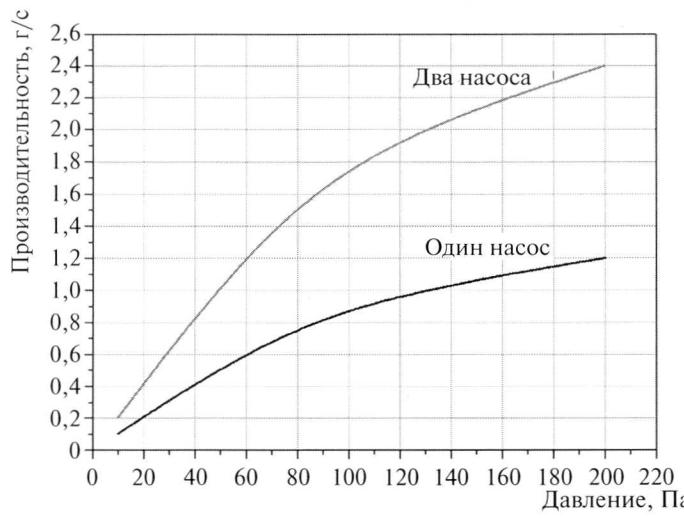


Рис. 2. Производительность вакуумных насосов в зависимости от количества насосов первой ступени и давления на входе в насосы

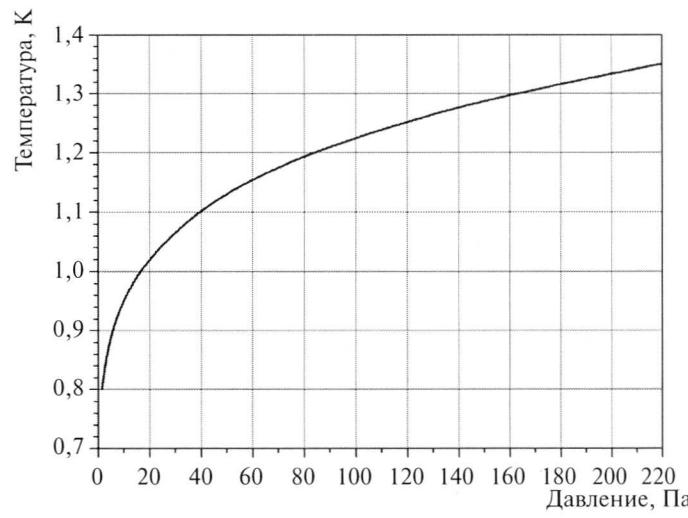


Рис. 3. Температура жидкого гелия в зависимости от давления насыщенных паров

Жидкий гелий подается от охладителя в количестве  $M = 3,2 \text{ г/с}$ :

$$\begin{aligned} M &= m_{\text{к}} + m_{\text{пр}} + m_{\text{в}} = \\ &= m_{\text{к}} + 0,44m_{\text{к}} + 0,05(m_{\text{к}} + 0,44m_{\text{к}}) = 1,51m_{\text{к}}. \end{aligned}$$

В верхней ванне испаряется:

$$m_{\text{в}} = 0,05(m_{\text{к}} + 0,44m_{\text{к}}) = 0,15 \text{ г/с.}$$

Данное количество гелия поступает в гелиевый компрессор, минуя вакуумные насосы.

В промежуточной ванне испаряется:

$$m_{\text{пр}} = 0,44m_{\text{к}} = 0,93 \text{ г/с.}$$

Указанное количество гелия удаляется через линию вакуумной откачки с одним насосом на первой ступени откачки. При таком расходе на входе в насос установится давление 110 Па. Сопротивление откачного трубопровода и разность между давлением насыщенного пара и давлением над поверхностью жидкости примем равными в сумме 10 Па. Температура жидкого гелия в промежуточной ванне будет равна 1,25 К и соответствовать давлению 120 Па.

В камеру источника поступает гелий в количестве 2,12 г/с. Он может быть испарен для отвода радиационного нагрева. Вакуумные насосы, откачивающие из камеры, способны удалить такое количество гелия при давлении на входе в насос 150 Па. Сопротивление откачного трубопровода и разность между давлением насыщенного пара и давлением над поверхностью жидкости примем равными в сумме 10 Па.

Получаем, что температура жидкого гелия должна соответствовать давлению 160 Па. При этом давлении температура жидкого гелия в камере источника будет равна 1,3 К.

Теплота испарения гелия  $r_{e,1,3} \text{ K}$  при температуре 1,3 К равна 21,6 Дж/г. Таким образом, при испарении 2,12 г/с гелия от камеры источника с жидким гелием отводится 45,8 Вт тепловой нагрузки. Расчет выполнен итерационным методом. Температура жидкого гелия в значительной степени зависит от давления, которое могут обеспечить вакуумные насосы для определенного значения расхода гелия (см. рис. 2).

Разность давления в 40 Па между промежуточной ванной и нижней ванной приведет к тому, что уровень жидкого гелия в промежуточной ванне расположится на 35 мм выше, чем в нижней ванне, и разность температур жидкого гелия в ваннах составит 0,05 К.

Путем регулирования частоты вращения ротора вакуумного насоса первой ступени, откачивающего пары гелия из промежуточной ванны, можно установить давление на входе в насос равным давлению в другой ветке 150 Па, и тогда разность уровней и разность температур между промежуточной ванной и нижней ванной будут устранены.

Проведем расчет процесса испарения для условия максимальной тепловой нагрузки на камеру с жидким гелием. Камера имеет радиус 150 мм и внутренний объем 35,6 л. При этом условии посредством вакуумной откачки с поверхности жидкости, находящейся в камере, удаляется 2,12 г/с паров гелия. Изменяя уровень жидкости, можно менять площадь испарения (см. таблицу).

Конструкция промежуточной ванны такова, что при любом уровне жидкости в ней поверхность испарения составляет 980 см<sup>2</sup>. Рассмотрим ситуацию, когда трубопровод подачи гелия в промежуточную ванну опущен в жидкость. В этом случае все тепло, вносимое гелием, передается жидкости в ванне и удаляется путем испарения паров. Вносимая кинетическая энергия потока в расчете не учитывается. Для охлаждения поступающего гелия из промежуточной ванны удаляются пары гелия в количестве 0,93 г/с.

Рассчитаем, как будет изменяться разность между давлением насыщенного пара и давлением над поверхностью перегретой жидкости при изменении площади поверхности, с которой происходит испарение.

Поток откачиваемого газа определяется уравнением

$$Q = Q_{ev} - Q_{con}, \quad (1)$$

где  $Q_{ev}$  — испарившийся с поверхности жидкости поток газа;

$Q_{con}$  — поток конденсирующегося газа.

В соответствии с моделью Ленгмюра [5]

$$Q_{ev} = q_d A k T; \quad (2)$$

$$Q_{con} = q_a A k T. \quad (3)$$

Поток газа при конденсации определяется выражением

$$Q_{con} = \frac{N_a P}{\sqrt{2\pi M R T}} A k T, \quad (4)$$

где  $P$  — давление над поверхностью жидкости.

### Рабочие параметры в камере при испарении 2,12 г/с гелия

Уровень от центра камеры, мм	Объем жидкости, л	Поверхность испарения, см <sup>2</sup>	Разность давлений на поверхности, Па
100	31,80	1100	2,53
110	32,80	1000	2,78
120	33,80	883	3,15
130	34,60	739	3,77
140	35,20	542	5,14
150	35,60	123	22,65
160*	35,70	111	25,32

\* Уровень жидкости находится в откачной трубе.

Поток при испарении в условиях равновесия при давлении насыщения  $P_n$

$$Q_{ev} = Q_{con} = \frac{N_a P_n}{\sqrt{2\pi M RT}} A k T. \quad (5)$$

В условиях постоянной температуры жидкости  $T$  и при давлении  $P$  ниже давления насыщения  $P_n$  будет откачиваться поток газа:

$$Q = \frac{N_a}{\sqrt{2\pi M RT}} A k T (P_n - P), \quad (6)$$

где  $Q$  — поток газа,  $\text{Па}\cdot\text{м}^3/\text{с}$ ;

$A$  — площадь поверхности жидкости,  $\text{м}^2$ ;

$k$  — постоянная Больцмана,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж}/\text{К}$ ;

$T$  — температура,  $\text{К}$ ;

$R$  — универсальная газовая постоянная,  $R = 8,314 \text{ Дж}/(\text{моль}\cdot\text{К})$ ;

$M$  — молярная масса,  $\text{кг}/\text{моль}$ ;

$N_a$  — число Авогадро,  $N_a = 6,02 \cdot 10^{23} 1/\text{моль}$ ;

$P$  — давление над жидкостью,  $\text{Па}$ ;

$P_n$  — давление насыщенного пара,  $\text{Па}$ .

Теплота испарения жидкого гелия ( $T = 1,25 \text{ К}$ ):  $r_e = 84 \text{ Дж}/\text{моль}$ ; молекулярная масса гелия:  $M = 4 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/\text{моль}$ .

Молекулярный поток газа, который необходимо удалить с поверхности жидкости, определяется из уравнения

$$Q = \frac{m R T}{M}. \quad (7)$$

Зная поток газа  $Q$ , который необходимо удалить с поверхности жидкости, чтобы отвести выделяемое тепло, можно рассчитать разность между давлением насыщенного пара и давлением над поверхностью перегретой жидкости для определенной площади испарения, используя уравнение

$$P_n - P = \frac{Q \sqrt{2\pi M R T}}{N_a k T A}. \quad (8)$$

Оценим разность между давлением насыщенного пара и давлением над поверхностью перегретой жидкости, возникающую при удалении указанного количества пара. Для этого используем уравнения (1)–(8) для расчета испарения в камере источника. Рассчитанная разность давлений составит 1,2 Па.

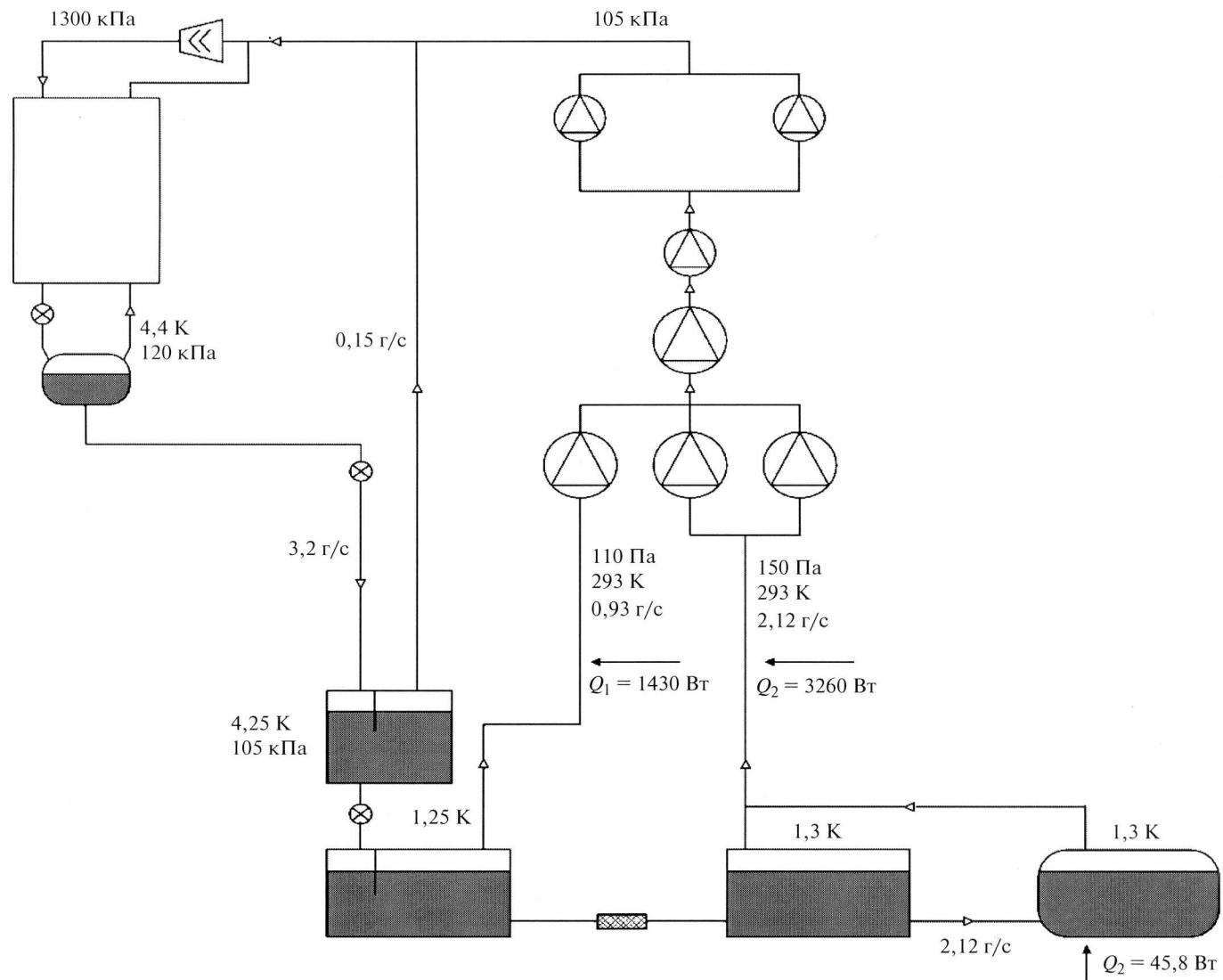


Рис. 4. Параметры цикла при максимальной тепловой нагрузке 45,8 Вт

Трубопроводы вакуумной откачки должны рассчитываться из условия максимальной производительности гелиевого цикла. Трубопровод откачки промежуточной ванны рассчитывается с учетом на расход гелия 0,93 г/с, а трубопровод откачки камеры источника рассчитывается — на расход гелия 2,12 г/с.

При подаче гелия в насосы необходимо обеспечить температуру газа на входе в насос, равную 293 К. Для этого газ должен быть подогрет в трубопроводе. Определим необходимую величину подогрева гелия. Энталпия откачиваемого пара близка к нулю. Энталпия гелия на входе в насос равна 1537 Дж/г.

В первом вакуумном трубопроводе к гелию необходимо подвести поток газа

$$Q_1 = 0,93 \text{ г/с} \cdot 1537 \text{ Дж/г} \approx 1430 \text{ Вт.}$$

Во втором вакуумном трубопроводе к гелию необходимо подвести поток газа

$$Q_2 = 2,12 \text{ г/с} \cdot 1537 \text{ Дж/г} \approx 3260 \text{ Вт.}$$

### Заключение

Для отвода радиационного нагрева от камеры источника ультрахолодных нейтронов со сверхтекучим гелием предложен способ вакуумирования паров гелия непосредственно из камеры. Определен состав оборудования и разработана схема криогенного цикла.

Для очистки жидкого гелия, поступающего в камеру источника УХН от изотопа  $^3\text{He}$ , используется фильтр сверхтекучей компоненты. Чтобы исключить попадание в камеру примеси  $^3\text{He}$  через вакуумный тракт, откачка камеры производится по отдельному трубопроводу.

Рассчитаны максимальные тепловые и расходные параметры цикла (рис. 4). Имеющееся криогенное и вакуумное оборудование обеспечит температуру жидкого гелия в камере ниже 1,3 К в соответствии с величиной тепловой нагрузки (рис. 5). Максимальная тепловая нагрузка, которая может быть отведена от камеры, равна 45,8 Вт. При этом температура жидкого гелия составит 1,3 К.

Гелиевый охладитель обеспечивает подачу 3,2 г/с жидкого гелия. При максимальной тепловой нагрузке из камеры вакуумированием будет удаляться 2,12 г/с гелия, из промежуточной ванны криостата — 0,93 г/с гелия. Из верхней ванны криостата испаряется 0,15 г/с гелия.

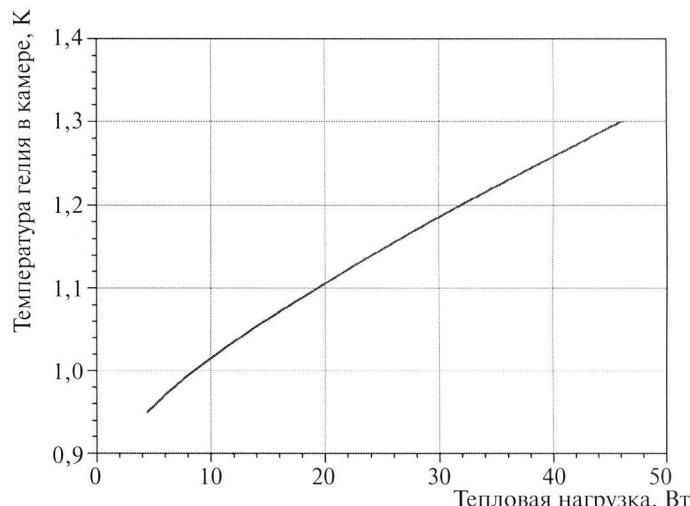


Рис. 5. Температура жидкого гелия в камере источника в зависимости от тепловой нагрузки

Пары гелия имеют очень низкую температуру и должны быть подогреты, прежде чем поступить в вакуумный насос. Для обеспечения подачи в вакуумные насосы гелия при комнатной температуре на трубопроводе откачки камеры к потоку гелия должен быть подведен поток газа 3260 Вт, а на трубопроводе откачки промежуточной ванны криостата — 1430 Вт.

### Список литературы

1. Захаров А. А., Серебров А. П. Новый источник холдных и ультрахолодных нейтронов на реакторе ВВР-М. II. Низкотемпературная часть. — СПб.: Препринт ПИЯФ-2812, 2009.
2. Serebrov A. P., Erykalov A. N., Fomin A. K., Onegin M. S., Zakharov A. A. Preparation of facilities for fundamental research with ultracold neutrons at PNPI // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 2009. Vol. 611. Issue 2–3.
3. Serebrov A. P., Zakharov A. A. et al. Project of the ultracold and cold neutron source at the WWR-M reactor with superfluid helium as a moderator // Physics and Solid States. 2010. № 5. Vol. 52.
4. Nakai H., Kimura N., Murakami M., Haruyama T. and Yamamoto A. Superfluid helium flow through porous media // Cryogenics. 1996. Vol. 36.
5. Невшупа Р. А., Синев Л. С. Модель динамики давления в вакуумной системе при вакуумировании летучей жидкости // Журнал технической физики. Т. 75. 2005. Вып. 10.