

**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

8-87-610

А.Г.Зельдович

**О ПРИМЕНЕНИИ СВЕРХТЕКУЧЕГО ГЕЛИЯ
В КАЧЕСТВЕ ХЛАДОАГЕНТА
ДЛЯ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ УСТРОЙСТВ**

1987

Зельдович А.Г.

8-87-610

О применении сверхтекучего гелия в качестве хладагента для сверхпроводящих устройств

Обсуждены преимущества и возможности использования сверхтекучего гелия в качестве хладагента для сверхпроводящих устройств. Понижение температуры жидкого гелия ниже 2 К значительно повышает плотность тока NbTi сверхпроводника в области индукций магнитного поля 8 - 10 Тл. Наилучшие практические условия применения сверхтекучего гелия /He II/: температура 1,8 К при атмосферном давлении. В этом случае еще не велико сопротивление Капицы и теплоотдача в He II примерно такая же, как в He I. He II под давлением получают, соединяя верхнюю часть ванны с He II с ванной He I под атмосферным давлением. Для большого адронного коллайдера на совещании ICFA, 1986 предложена система криостатирования с магнитами, погруженными в криостат неподвижным He II под давлением. Система с He II тщательно заэкранирована жидким He II.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1987

Перевод Л.Н. Барабаш.

Zeldovich A.G.

8-87-610

About the Usage of Superfluid Helium as a Coolant for Superconducting Devices

Advantages and possibilities of the usage of superfluid helium as a coolant for superconducting devices are discussed. The temperature decrease of liquid helium below 2 K increases considerably a current density of NbTi superconductors at magnetic fields of 8 - 10 T. A temperature of 1.8 K at atmospheric pressure are the best practical parameters of superfluid helium /He II/ as a coolant. In this case the value of Kapitza resistance is not yet great and the value of heat transfer into a He II bath about the same as that into a He I bath. Pressurized He II is obtained by connecting the He II bath with the He I bath under atmospheric pressure. A cryostat system with magnets sinked in immovable pressurized He II was proposed for the large hadron collider at the conference ICFA, 1986. The He II system is carefully protected from heat input by liquid He I shield.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1987

При создании сверхпроводящих магнитов стремятся получить максимальную плотность тока в обмотке, что позволяет снизить количество затрачиваемого сверхпроводника и уменьшить габариты магнита при заданной магнитной индукции или создать магнит с высокой магнитной индукцией при разумном расходе сверхпроводника. Основным способом повышения критической плотности тока в сверхпроводнике - это улучшение его качества. Критическая плотность тока при достигнутом качестве сверхпроводника может быть значительно повышена за счет снижения температуры криостатирующего жидкого гелия. Сейчас в качестве наиболее подходящей пониженной температуры выбирают 1,8 К, при которой жидкий гелий находится в сверхтекучем состоянии. Температура 1,8 К наиболее выгодна для удаления тепловыделений из магнита. При ней еще не велик скачок Капицы, т.е. разность температур между теплоотдающей поверхностью и сверхтекучим гелием, которая обратно пропорциональна T^3 /1/. Температуру 1,8 К легко получить путем откачки паров жидкого гелия, упругость которых при 1,8 К составляет 17 мбар. На рис.1 приведена зависимость критической плотности тока от величины магнитной индукции. Видно, что для реально используемого NbTi сверхпроводника наибольший эффект снижения температуры возникает при магнитной индукции $8 \div 10$ Тл. Высокая теплопроводность сверхтекучего гелия позволяет в принципе отводить тепло от криостатируемого объекта через неподвижную массу гелия. В тепловом отношении ванна со сверхтекучим гелием подобна твердому телу. В ней отсутствует конвекционное перемешивание, тепло распространяется только теплопроводностью, и между нагретой и охлаждающей поверхностями возникает градиент температур. Установление стабильного температурного режима после начала охлаждения занимает несколько десятков минут^{/2/}. Изучался тепловой поток внутри трубы с одним заделанным концом и другим, открытым в ванну со сверхтекучим гелием^{/3/}. Предельная тепловая нагрузка ограничивалась нагревом закрытого конца трубы до температуры перехода в нормальное состояние $T_{\lambda} = 2,17$ К. Получена удельная величина теплового потока $1,2$ Вт/см² для труб диаметром от 10 до 35 мм при длине до 9,9 м. Такой же тепловой поток отводится при пленочном кипении нормального гелия при температуре, близкой к T_{λ} . Стабильные условия работы сверхпроводящих магнитов

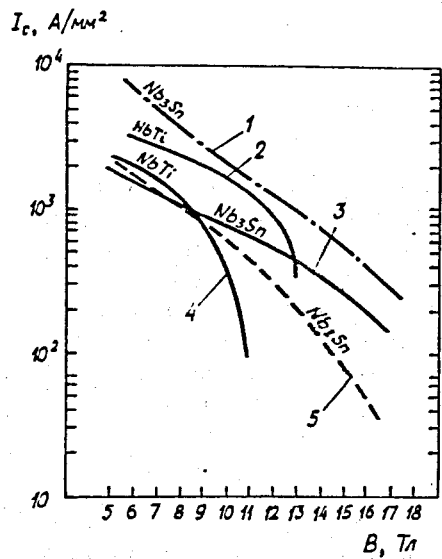


Рис.1. Верхние пределы плотностей тока в Nb_3Sn и $NbTi$ проволоках. 1 - Nb_3Sn , полученное внешней диффузией, 4,2 К; 2 - $NbTi$ при 1,8 К; 3 - Nb_3Sn по бронзовой технологии, 4,2 К; 4 - $NbTi$ при 1,8 К; 5 - Nb_3Sn , полученное внутренней диффузией, 4,2 К [4].

ускорителей могут быть сохранены при отводе теплового потока порядка 1 Вт/(см²·К).

Наиболее простой способ криостатирования сверхтекучим гелием - погрузить криостатируемый объект, например сверхпроводящий магнит, в криостат с жидким гелием и производить

откачку паров гелия форвакуумным насосом. Температуру в ванне 1,8 К таким образом получить достаточно легко. Упругость пара при этом 17 г·Па. Однако большинство разработчиков предпочитают несколько более сложное устройство /рис.2/. В нем имеются две ванны со сверхтекучим гелием. Одна, 13, в данном случае центральная, соединена с вакуумнасосом, и в нее подается жидкий гелий из стоящей выше ванны 8 через фильтр 10, теплообменник 7 и дроссельный вентиль 5. Назначение теплообменника 7 - понизить температуру жидкого гелия, питающего ванну 13, от 4,2 до 2,2 К за счет охлаждения откачиваемыми парами сверхтекучего гелия. В нижней части ванны 13 имеется теплообменник 1, отбирающий тепло из ванны 12, в которой сверхтекучий гелий находится под давлением, определяемым давлением в ванне 8, с которой он соединен отверстием с малым проходом, регулируемым вентилем 11, играющим одновременно роль предохранительного клапана. Поскольку плотность сверхтекучего гелия /146 г/л при 1,8 К/ выше плотности кипящего гелия /125 г/л при 4,2 К/, то перемешивание конвекцией исключено, и теплопередача от ванны 8 к ванне 12 происходит только теплопроводностью. Малая величина притока тепла теплопроводностью от ванны 8 к ванне 12 обеспечивается за счет низкого значения теплопроводности жидкого гелия и небольшой площади сечения канала между ваннами 8 и 12. Дальнейшее уменьшение потока тепла при необходимости легко получить удлинением канала между ваннами. С целью экранирования от притока тепла

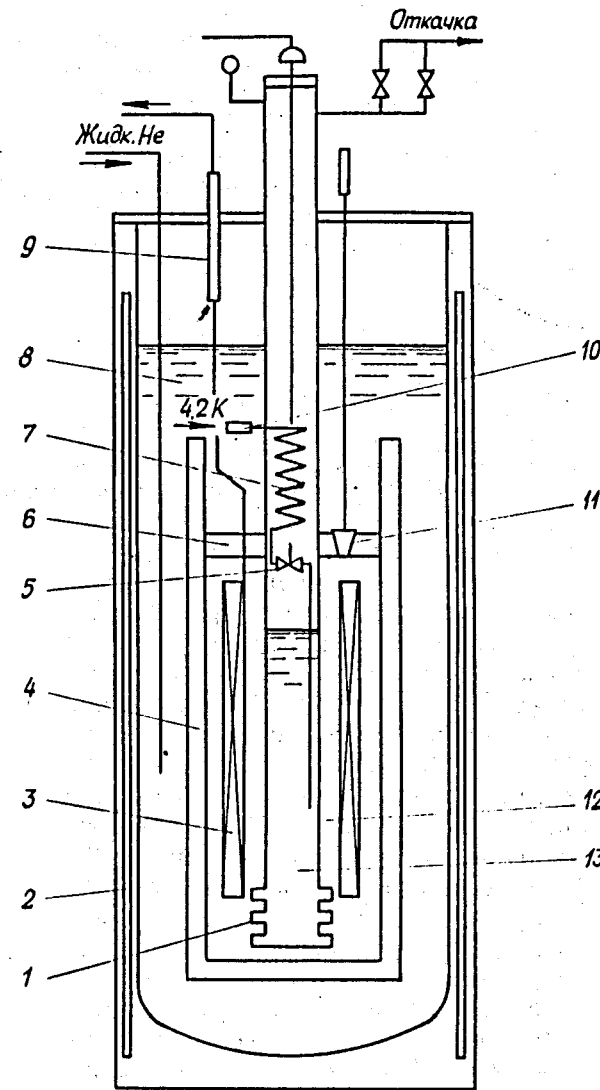


Рис.2. Система для охлаждения дипольного магнита сверхтекучим гелием под давлением /5/. 1 - теплообменник, 2 - экран с жидким азотом, 3 - дипольный магнит, 4 - изоляционный вакуум, 5 - дроссельный вентиль, 6 - теплоизоляционный фланец, 7 - теплообменник, 8 - ванна с He I, 9 - токовод, 10 - фильтр, 11 - регулирующий и предохранительный клапан, 12 - ванна с He II под давлением, 13 - ванна He II с давлением насыщенного пара.

из окружающей среды ванна 8 пространственно размещена вокруг ванны 12. Теплообмен между ваннами 8 и 12 ограничен изоляционным вакуумом 4 и теплоизоляционным фланцем 6. Применение двух ванн со сверхтекучим гелием позволяет иметь стабильные тепловые условия в криостатирующей ванне 12, мало зависящие от изменения режима подачи жидкого гелия в ванну 13, от изменения в ней вакуума и уровня гелия. Кроме того, в сверхтекучем гелии под повышенным давлением удастся получить более высокий максимум величины отводимого от объекта теплового потока, что ясно из рис.3. В системе охлаждения по рис.2 ванна 13 со сверхтекучим гелием под вакуумом может быть заменена змеевиком или каким-либо другим теплообменным устройством.

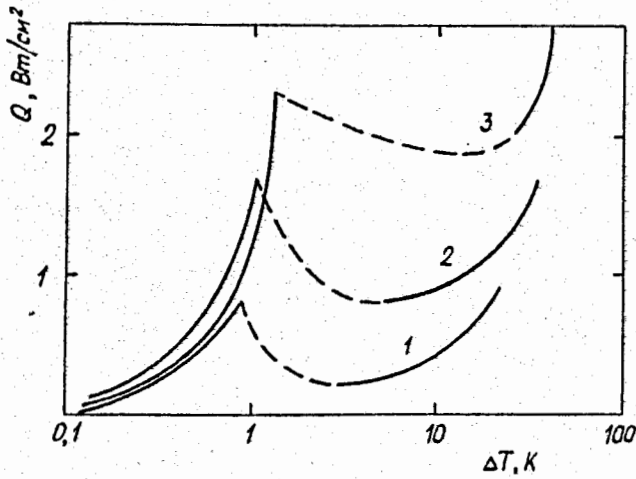


Рис. 3. Типичные кривые теплопередачи для He I и He II/1/. 1 - $p = 1,0$ бар, $T=4,2$ К; 2 - $p=0,02$ бар, $T=1,9$ К; 3 - $p = 1,3$ бар, $T=1,9$ К.

Прорабатывается возможность использования сверхтекучего гелия для криостатирования гигантской сверхпроводящей магнитной системы большого адронного коллайдера.

На рис. 4 приведена схема криостатирования модуля большого адронного коллайдера. Цепочка криостатов со сверхпроводящими магнитами 6 заполнена неподвижным сверхтекучим гелием под атмосферным давлением. Оба конца цепочки криостатов заведены в испарители насыщенного He II, где отводится тепло, выделившееся в магнитах на уровне 1,8 К. Расстояние 80 м между испарителями 5 и диаметр соединительной трубы 60 мм обеспечивают отвод, за счет теплопроводности He II, 0,2 Вт/м тепловыделений при максимальной температуре в центре цепочки 2 К. Проточная система с He II позволила бы интенсифицировать теплоотвод и увеличить расстояние между испарителями, однако ее создание требует разработки надежных циркуляторов с малыми тепловыделениями. В рассматриваемой схеме предусмотрено тщательное экранирование гелием при 4,2 К от всех внешних теплопритоков. В частности, вентилем В1 гелий из линии δ подается на внутренний экран 7, защищающий обмотку магнитов от радиации со стороны ионопроводов, и в теплообменники 8 на опорах магнитов. Испарители 5 питаются жидким гелием из линии β . Испаренный в них гелий отводится в линию α . Уровень гелия в испарителе 5 регулируется вентилем В3. Через вентили В2 из линии δ в криостат подают гелий при охлаждении и заполнении. Отвод гелия из криостата осуществляют вентилями В4 в линию γ . Они же служат предохранительными клапанами в случае вскипания гелия в криостатах при переходе магнитов в нормальное состояние и поддерживают в криостатах атмосферное давление. Коллекторы $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ размещены вдоль всего периметра

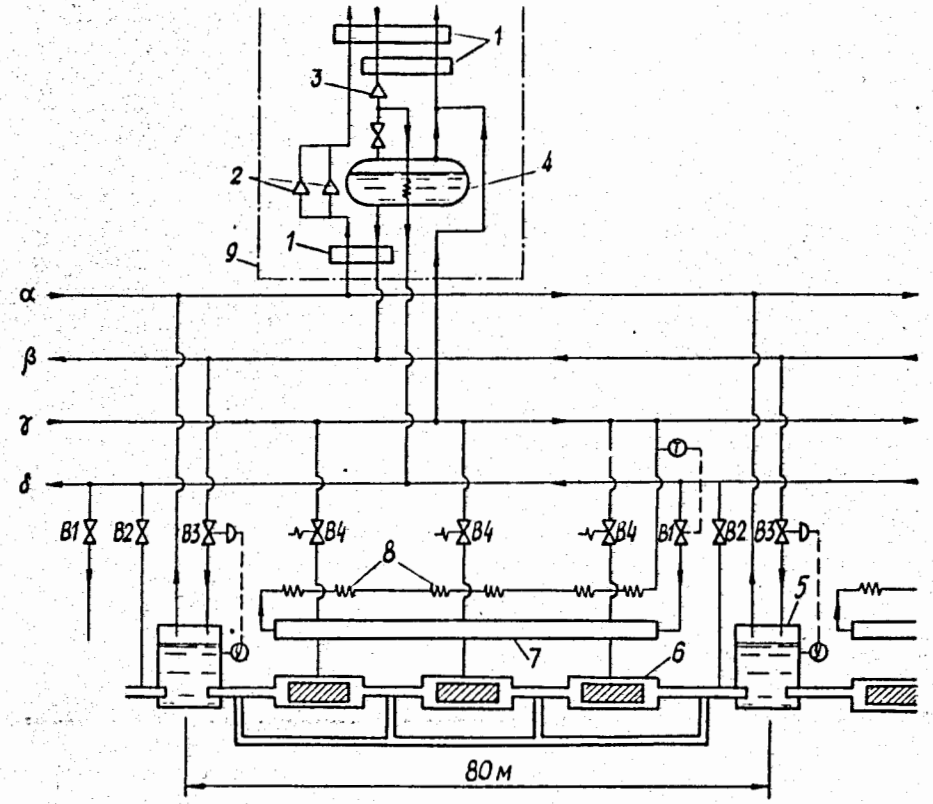


Рис. 4. Схема криостатирования модуля большого адронного коллайдера с использованием He II /6/. Коллекторы: α - газообразный гелий 1,8 К, 17 мбар; β - жидкий гелий 2,2 К, 1,2 бар; γ - газообразный гелий 4,5 К, 1,2 бар; δ - жидкий гелий 4,5 К, 3 бар. 1 - теплообменники; 2 - холодные компрессоры; 3 - турбодетандер; 4 - сборник жидкого гелия, 4,4 К и 1,2 бар; 5 - испаритель насыщенного He II, 1,8 К и 17 мбар; 6 - цепочка криостатов со сверхпроводящими магнитами; 7 - экран от излучения пучка; 8 - теплообменники на опорах магнита; 9 - рефрижераторы октанта. В1 - вентиль, регулирующий подачу жидкого гелия в экраны; В2 - вентиль подачи гелия при охлаждении; В3 - регулятор уровня в испарителе 5; В4 - предохранительный клапан.

ускорителя и имеют большую протяженность. Каждый из них содержит гелий только в каком-либо однофазном состоянии, что

считается преимуществом, так как при перемещении двухфазных потоков могут возникнуть разного рода гидродинамические неустойчивости в виде пульсаций в линиях, гидравлических ударов и других неприятностей. Воспроизводство жидкого гелия осуществляется рядом гелиевых рефрижераторов, равномерно расположенных по кольцу ускорителя. Рефрижераторы строят с 1,5-кратным запасом мощности, осуществляя таким образом резервирование. При выходе из строя одного из рефрижераторов два соседних могут взять на себя нагрузку участка ускорителя, обслуживаемого вышедшим из строя рефрижератором. В рефрижераторе 9 используется холод испаренного He II. Для этого его пропускают через нижний теплообменник 1 и затем холодными компрессорами повышают его давление до 0,1 бар. Дальнейшее повышение давления этой части гелия до атмосферного осуществляют нагнетателями на теплом конце рефрижератора. Можно было бы обойтись только теплыми нагнетателями без использования холодных компрессоров. Однако в таком варианте чрезвычайно возрос бы размер теплообменников рефрижератора из-за необходимости пропускать через них большое по объему количество гелия низкого давления /17 мбар/. Остальные узлы рефрижератора не отличаются от обычно применяемых. Считают, что "платить" за применение сверхтекучего гелия придется увеличением расхода энергии на 20%, усложнением криостата и криогенной установки, удлинением времени охлаждения системы. Может возникнуть вопрос: почему расход энергии повысился всего в 1,2 раза, а не в соответствии с циклом Карно в $4,4/1,8 = 2,4$ раза? Дело в том, что у редко циклирующих ускорителей основной теплоприток идет из окружающей среды и только относительно небольшой теплоприток определяется гистерезисными и вихревыми потерями при изменении поля в магните. Конструкция криостата предусматривает тщательное экранирование от теплопритока из окружающей среды экранами, охлаждаемыми гелием при 4,2 К, и в ванну с гелием при 1,8 К поступает практически только динамический теплоприток. Поток же тепла с уровня 4,2 К на уровень 1,8 К очень мал из-за малой разности температур и низкой теплопроводности материалов при таких температурах, а конструкторы, естественно, принимают все доступные им меры, чтобы максимально его снизить.

В США прорабатывается использование сверхтекучего гелия на космических станциях для охлаждения инфракрасных телескопов /емкость бака 10000 л для работы в течение 2 лет/ и на космических кораблях типа Шаттл /емкость бака 300÷600 л/. Для этих целей исследуют способы прокачки сверхтекучего гелия насосами, эжекторами, за счет эффекта фонтанирования^{17/}.

Вопросы испытания и оптимизации гелиевых рефрижераторов для сверхтекучего гелия рассматриваются в^{8,9/}.

ЛИТЕРАТУРА

1. Van Sciver S.W. Heat Transfer in Superfluid Helium II. ICEC-8, Genova/Italy, 1980.
2. Caspi S. Gravitational convection of subcooled He I and the transition into superfluid He II at atmospheric pressure. ICEC-8, Genova/Italy, 1980.
3. Caspi S., Schafer R.V. - In: Heat Transfer through He II in a 9,6 m long 35 mm ID Tube. ICEC 10, Helsinki, 1984, p.297.
4. Hirabayashi H. 8-10 T Dipole Magnets at KEK. ICFA, 1981.
5. Hirabayashi H. Pressurized Helium II Superfluid Cooling Test of 4m NbTi Dipole Magnet. ICFA, 1981.
6. Claudet G. et al. Preliminary study of a superfluid helium cryogenic system for the Large Hadron Collider. ICFA, 1986, BNL, USA.
7. Cryogenics, 1986, v.26, NP; - In: ICEC-10, Helsinki, 1984, p.304; ICEC-11, Berlin-West, 1986.
8. Hakuraku Y., Ogata H. Thermal Design and Tests of Subcooled Superfluid Helium Refrigerator. - Cryogenics, 1983, v.23, N6, p.291.
9. ICEC-10, Helsinki, 1984, p.284, 288, 292; ICEC-11, Berlin-West, 1986.

Рукопись поступила в издательский отдел
3 октября 1987 года.