

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

95-179

P13-95-179

Н.Н.Графов, В.Г.Гребинник, Д.Л.Демин,  
В.П.Джелепов, Ю.Г.Жестков, В.Г.Зинов, А.Д.Конин,  
Е.П.Красноперов\*, А.И.Руденко, Ю.А.Сорокина

### ТВЕРДОДЕЙТЕРИЕВАЯ МИШЕНЬ

Направлено в Оргкомитет Международного симпозиума  $\mu$ CF-95,  
Дубна, 19—24 июня 1995 г.

---

\*Российский научный центр «Курчатовский институт»

1995

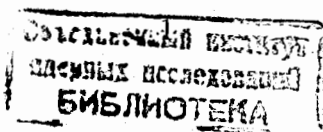
# 1. Введение

В процессе систематического изучения мюонного катализа ядерных реакций синтеза [1] в чистом дейтерии возникла необходимость в определении ряда важных характеристик этого явления при низких температурах вплоть до нескольких градусов Кельвина. С этой целью в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ разработана и создана так называемая твердодейтериевая мишень (ТДМ), способная работать в интервале температур  $5 \div 40$  К. ТДМ отличается от мишеней, описанных в [2,3,4] тем, что при ее проектировании были приняты специальные меры для равномерного (без каверн) заполнения твердым дейтерием и оперативного управления ее температурой при отсутствии заметного температурного градиента по всему объему дейтерия.

## 2. Ампула ТДМ

По условиям эксперимента дейтерий внутри ампулы может находиться в твердом, жидком и газообразном состоянии (с плотностью газообразного дейтерия не выше 0,8 от плотности жидкого водорода). Ампула выполнена из нержавеющей стали X18H10T в виде цилиндра с вертикальным расположением оси (рис.1). Толщина стенок ампулы 1,5 мм, диаметр - 60 мм, высота - 100 мм. Внутри ампулы расположены два одинаковых газовых термометра (ГТ), коллектор теплообменника с проволочным кондуктором. Ампула рассчитана на рабочее давление до 40 атм. Давление в мишени контролируется манометром типа "Сапфир" с диапазоном измерений до 10 атм (M2 на рис.4).

Ампула ТДМ охлаждается гелием, проходящим через медный трубчатый теплообменник Т1, и может нагреваться спиралью П из константановой проволоки, намотанной на этот теплообменник. Особенность мишени заключается в том, что для уменьшения градиента температуры по всему объему в ампулу ТДМ встроен кондуктор К, состоящий из 500 медных проволок диаметром 0,4 мм. Проволоки расположены вертикально в шахматном порядке, расстояние между соседними проволоками 2 мм. Конструкция кондуктора удерживается четырьмя сетками из нержавеющей стали с шагом 1 мм, расположенными равномерно по высоте мишени. Внизу ампулы проволоки собраны в 8 пучков и приварены к медному коллектору КТ. В цен-



тральной части кондуктора на разной высоте смонтированы ампулы двух газовых термометров, которые не касаются медных проволок и центрируются сетками. Высокая теплопроводность меди обеспечивает малый температурный градиент в объеме мишени и позволяет быстро переходить от одной температуры к другой.

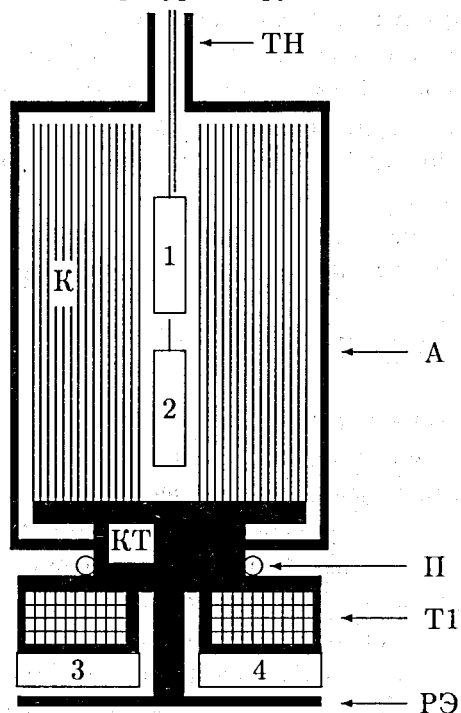


Рис. 1. Твердодейтериевая мишень

1-4 - ампулы ГТ; А - ампула ТДМ; К - проволоочный кондуктор; КТ - коллектор теплообменника; П - нагреватель; РЭ - радиационный экран; Т1 - теплообменник; ТН - трубка напуска дейтерия

### 3. Система охлаждения ТДМ

Низкотемпературная часть установки (рис.2) предназначена для длительного (10 ÷ 20 часов) поддержания фиксированной темпера-

туры мишени с точностью 0,2 К, в диапазоне 5,5 ÷ 40 К. Жидкий гелий из дьюара Д под давлением перетекает по сифону С в теплообменники мишени Т1-Т4, отбирает тепло и сбрасывается в газгольдер ГГ. При работе в диапазоне температур 5 ÷ 10 К гелий откачивается форвакуумным насосом типа НВР-5Д. Расход гелия устанавливается редуктором Р и вентилем В.

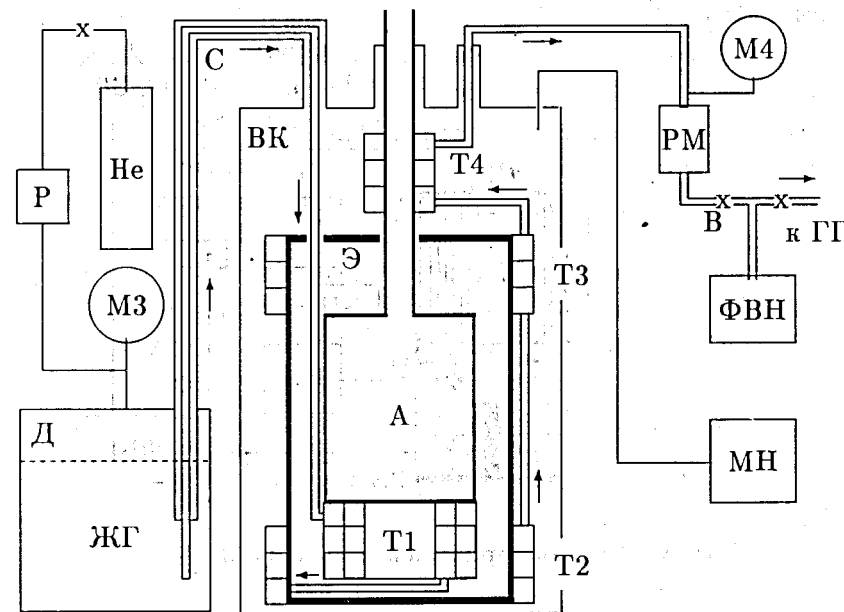


Рис. 2. Система охлаждения ТДМ

А - ампула ТДМ; В - вентиль; ВК - вакуумный кожух; ГГ - газгольдер; Д - дьюар; ЖГ - жидкий гелий; М3, М4 - манометры; МН - турбомолекулярный насос; Р - редуктор; РМ - расходомер; С - сифон; Т1-Т4 - теплообменники мишени; ФВН - форвакуумный насос; Э - радиационный экран

В целях теплоизоляции мишень заключена в вакуумный кожух с использованием экранно-вакуумной изоляции. Для уменьшения радиационного нагрева ампула мишени обмотана тремя слоями алюминизированного майлара толщиной 20 мкм. Между ампулой мишени и наружным вакуумным кожухом расположен радиационный экран из меди толщиной 1,5 мм, на него напаяны трубчатые теплообменники

T2, T3, охлаждаемые обратным потоком гелия, температура экрана не превышает 100 К. Теплообменник T4 охлаждает трубку подвода дейтерия к ампуле ТДМ. Все холодные поверхности внутри вакуумного кожуха обмотаны пятью слоями алюминизированного майлара (на рисунке не показано). Рабочий вакуум  $10^{-4} - 10^{-5}$  тор в переливном сифоне и вакуумном кожухе мишени обеспечивает турбомолекулярный насос ВМН-150М.

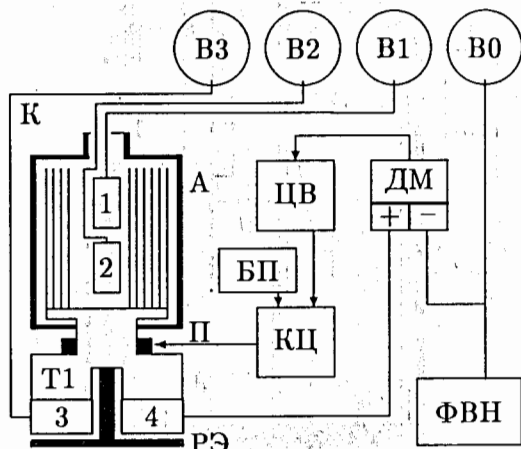


Рис. 3. Система термостабилизации ТДМ

1-4 - ампулы ГТ; А - ампула ТДМ; БП - блок питания; В0-В3 - вакуумметры; ДМ - дифференциальный манометр; К - капилляр; КЦ - цифровой компаратор; П - нагреватель; РЭ - радиационный экран; Т1 - теплообменник; ФВН - форвакуумный насос; ЦВ - цифровой вольтметр

На рис.3 изображена схема контроля и управления ТДМ. Она предусматривает возможность измерения температуры ампулы двумя газовыми термометрами с гелиевым заполнением ГТ1, ГТ2 и температуры теплообменника Т1 - ГТ3, ГТ4. Выбор газовых термометров связан с требованиями к чистоте дейтерия внутри ампулы ТДМ. Объем рабочих "холодных" ампул ГТ составляет 2 см<sup>3</sup>. "Теплыми" объемами ампул ГТ1-ГТ3 являются вакуумметры В1-В3, а ГТ4 - дифференциальный манометр ДМ. Ампулы ГТ сообщаются с теплыми объемами при помощи капилляров из нержавеющей стали  $\varnothing 1$  мм, дли-

ной 1,5 м. Капилляры соединены с ампулами лазерной сваркой. Для уменьшения радиационного нагрева ампул ГТ3 и ГТ4, напаянных на теплообменник Т1, предусмотрен медный экран РЭ в виде диска, соединенный теплопроводом с коллектором теплообменника Т1.

Вакуумметр В0 используется для учета изменения атмосферного давления. Поправка на температуру в помещении определяется с помощью показаний спиртового термометра (на рисунке не показан).

Для термометров ГТ1-ГТ3 отношение полного объема  $V_n$  к холодному  $V_x$  выбрано равным 30. Это обеспечивает максимальную чувствительность прибора в диапазоне температур 5 ÷ 20 К. Термометры ГТ1-ГТ3 калиброваны при гелиевой и азотной температурах и по давлению насыщенных паров жидкого дейтерия *in situ* в процессе заполнения мишени.

Результаты калибровки удовлетворительно описываются формулой, заимствованной из [5], при введении поправочного множителя  $z(T)$ , учитывающего изменение "эффективного" холодного объема соединительных капилляров и неидеальность гелия:

$$P(T) = z(T) \left( \frac{V_n}{V_x} \right) \frac{P_n / T_n}{1/T + (z(T)V_n - V_x) / T_n V_x}, \quad (1)$$

$$z(T) = 1 - 0,56/T. \quad (2)$$

Здесь  $P$  - давление;  $T$  - абсолютная температура;  $V_n$  - полный объем газового термометра;  $V_x$  - холодный объем;  $P_n$  - начальное давление;  $T_n$  - начальная температура.

Теплый объем ГТ4 есть положительная камера сравнения дифференциального манометра ДМ, его отрицательная камера откачана. Сигнал с ДМ считывается цифровым вольтметром Ш-300 и подается на трехдекадный цифровой компаратор КЦ. На компараторе вручную задается значение давления в ГТ4, соответствующее требуемой температуре. При снижении температуры Т1 ниже пороговой компаратор включает питание нагревателя П, при превышении - выключает. Таким образом, система термостабилизации работает в условиях избыточного расхода гелия.

## 4. Система газообеспечения ТДМ

Система газообеспечения (СГ) служит для очистки дейтерия от примесей до уровня  $10^{-7}$  и заполнения мишени дейтерием и гелием. Система газообеспечения (рис.4) содержит ПФ - палладиевый фильтр, цеолитовую ловушку ЦЛ, фильтр предварительной очистки - влагомаслоотделитель Ф, емкости для хранения дейтерия, манометры М1 и М2, 20 сильфонных вакуумных вентилей. Коммуникации СГ выполнены из трубки  $\varnothing 14$  мм и металлорукавов (нержавеющая сталь). Коммуникации "чистой" части установки, соединяющие ампулу мишени, буферный баллон Бб, палладиевый фильтр и высоковакуумный насос НОРД-100, обмотаны ленточным электронагревателем ЭНГЛ-180. Все узлы СГ рассчитаны на давление не менее 40 атм, палладиевый фильтр - 5 атм.

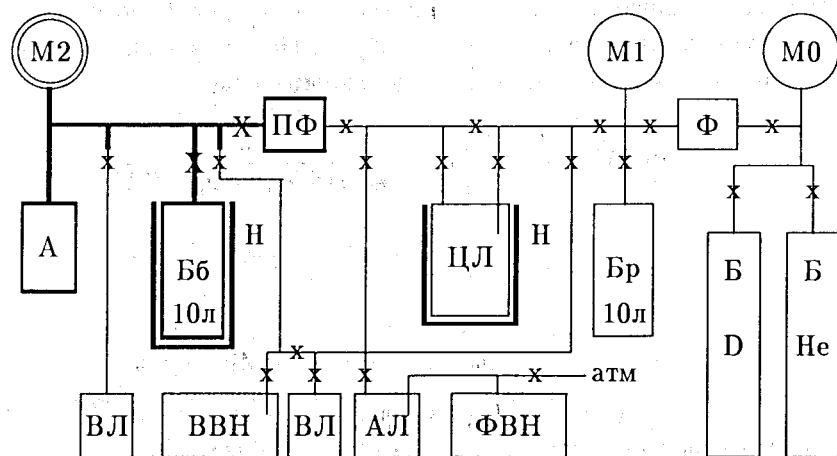


Рис. 4. Система газообеспечения ТДМ

А - ампула ТДМ; АЛ - азотная ловушка; Б - баллон; Бб - буферный баллон; Бр - рабочий баллон; ВВН - высоковакуумный насос; ВЛ - вакуумная лампа; М0, М1 - манометры; М2 - манометр типа "Сапфир"; Н - нагреватель; ПФ - палладиевый фильтр; Ф - влагомаслоотделитель; ФВН - форвакуумный насос; ЦЛ - цеолитовая ловушка

Очистка газа и заполнение ампулы ТДМ осуществляется следующим образом. Дейтерий из баллона Б перепускается в рабочий

баллон Бр в количестве, достаточном для эксперимента. Объем мишени, вакуумная лампа, манометр М2, буферный баллон, чистый объем палладиевого фильтра ПФ и коммуникации тренируются в течение десятков часов с нагревом до  $200^{\circ}\text{C}$  на уровне высокого вакуума абсорбционным насосом НОРД-100. Операция производится до тех пор, пока натекание в чистых объемах не станет меньше  $10^{-4}$  тор в сутки. Контроль вакуума осуществляется манометрическим преобразователем ПМТ-4М и прибором ВИТ-3. Далее чистая часть установки промывается дейтерием, пропущенным через палладиевый фильтр. После этого система готова к заполнению мишени дейтерием.

Выращивание кристалла твердого дейтерия осуществляется в два этапа. Сначала очищенный дейтерий ожижается в ампуле ТДМ при 20 К до заполнения всего ее объема. При этом давление дейтерия в буферном баллоне Бб и ампуле ТДМ поднимается до 5 атм. Затем в течение получаса дейтерий переводится в твердое состояние при температуре около 17 К. В процессе замораживания происходит усадка дейтерия в мишени и давление в буферном баллоне падает до 2-3 атм. Общее количество дейтерия в ампуле может составлять не более 350 литров при нормальных условиях. В целях безопасности на всех этапах работы, включая время экспозиции на ускорителе, вентиль баллона Бб на пути дейтерия из мишени остается открытым. В этом случае при внезапном выходе дейтерия из ампулы ТДМ давление в системе не превысит 35 атм. Рабочий баллон Бр служит для хранения дейтерия между сеансами на ускорителе.

## 5. Результаты испытаний ТДМ

Перед сборкой мишени наиболее ответственные узлы были испытаны на давление, проделана большая работа по выявлению и устранению течей.

Длительность заполнения мишени дейтерием определяется производительностью нашего палладиевого фильтра и составляет сутки. Переход жидкого дейтерия в твердый занимает около 0,5 часа при расходе гелия до 2 л/ч.

При проектировании ТДМ нас интересовало влияние проволочного кондуктора К (рис.1) на процесс кристаллизации дейтерия. Ди-

аметр проволок и расстояние между ними были рассчитаны таким образом, чтобы при кристаллизации не образовывались каверны в твердом дейтерии. При этом учитывались теплопроводности медного кондуктора и твердого дейтерия в районе тройной точки. Фактором, определяющим равномерность заполнения ампулы ТДМ твердым дейтерием, является форма поверхности раздела фаз. Как оказалось, она слабо зависит от градиента температуры по высоте мишени.

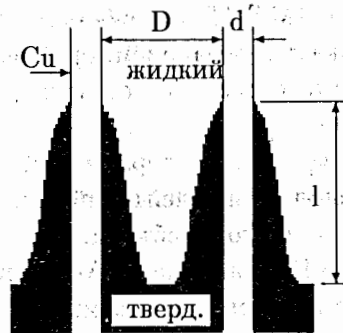


Рис. 5. Граница раздела фаз

Cu - медная проволока;  $d$  - диаметр проволоки;  $D$  - расстояние между проволоками;  $l$  - глубина провала на поверхности раздела фаз дейтерия

Оценим глубину провала  $l$  на поверхности раздела фаз при замораживании дейтерия. Теплопроводность проволок  $\lambda_{\text{п}}$  намного больше теплопроводности дейтерия  $\lambda_{\text{д}}$ , поэтому приравняем тепловой поток вдоль проволок  $\Phi_{\text{п}}$  тепловому потоку к проволокам от поверхности раздела  $\Phi_{\text{д}}$ :

$$\Phi_{\text{п}} = \Phi_{\text{д}}, \quad (3)$$

$$\lambda_{\text{п}}(dT/dz)S_{\text{п}} = \lambda_{\text{д}}(dT/dx)S_{\text{д}}, \quad (4)$$

$$\lambda_{\text{п}}d^2/l = \lambda_{\text{д}}2Dl/D, \quad (5)$$

$$l = d\sqrt{\lambda_{\text{п}}/2\lambda_{\text{д}}}, \quad (6)$$

где  $d$  - диаметр проволоки;  $D$  - расстояние между проволоками;  $S_{\text{п}}$  - площадь поперечного сечения проволоки;  $S_{\text{д}}$  - площадь поверхно-

сти раздела фаз, приходящаяся на одну проволоку. Для дейтерия  $l$  получается около 5 мм (рис.5). Из этой простой оценки видно, что максимальная глубина провала на поверхности раздела фаз слабо зависит от расстояния между проволоками  $D$ . На макете кондуктора был проведен эксперимент по выращиванию кристалла льда из воды. Этот модельный эксперимент подтвердил предположения относительно формы поверхности раздела твердой и жидкой фаз в процессе замораживания. Таким образом, при выбранной геометрии кондуктора (диаметр проволок и расстояние между ними) вероятность образования каверны невелика.

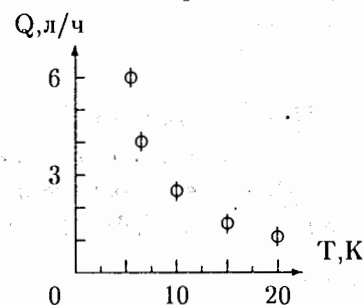


Рис. 6. Расход жидкого гелия

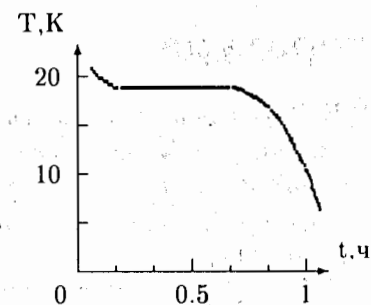


Рис. 7. Кривая замораживания

На рис.6 показана зависимость расхода жидкого гелия от температуры ампулы ТДМ. Ее вид обусловлен особенностями криогенной части установки. Расход жидкого гелия резко повышается по мере приближения к гелиевой температуре, а выше 20 К - слабо зависит от температуры ТДМ и составляет менее 1 л/ч. Динамика захлаживания (рис.7) отражает соотношение теплоемкости и теплопроводности мишени. Температурная нестабильность ампулы ТДМ не превышает 0,2 К.

В течение всего времени сеанса на фазотроне ЛЯП (100 часов) все узлы ТДМ показали свою устойчивую работу. При этом было проведено несколько дейтериевых экспозиций во всем диапазоне температур твердодейтериевой мишени.

Авторы выражают благодарность А. Т. Василенко, В. Н. Павлову, В. В. Фильченкову, И. А. Ютландову за ценные советы при обсуждении проекта мишени, а также М. М. Петровскому, А. П. Кустову, Л. В. Демину, А. Е. Новикову и А. А. Повикову за

помощь при изготовлении и испытаниях твердодейтериевой мишени.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант N 95-02-05197.

## Литература

- [1] В. П. Джелипов, В. Г. Зинов, С. А. Ивановский и др.: *Измерение температурной зависимости скорости образования моонных молекул дейтерия для различных спиновых состояний дитомов при высокой плотности дейтерия*. ЖЭТФ, 101 (1992), стр.1105-1117.
- [2] Ю. В. Гордков, Г. П. Елисеев : *Мишень с твердым водородом*. ПТЭ, 1 (1976), стр.20-22.
- [3] А. В. Арефьев, Д. А. Сучков: *Мишень с твердым дейтерием*. ПТЭ, 1 (1976), стр.22-23.
- [4] А. Г. Зельдович, Н. Н. Агапов и др.: *Криогенные приборы и устройства в ядерной физике*. Энергоатомиздат, 1982.
- [5] М. П. Малков и др.: *Справочник по физико-техническим основам криогеники*. Энергоатомиздат, 1985, стр.286.

Рукопись поступила в издательский отдел

20 апреля 1995 года.