



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

97-243

P13-97-243

Н.Н.Графов, В.Г.Гребинник, Д.Л.Демин, В.П.Джелепов,
В.Г.Зинов, С.В.Медведь, В.И.Пряничников, В.А.Уткин

ЖИДКОТРИТИЕВАЯ МИШЕНЬ

Направлено в журнал «Приборы и техника эксперимента»

1997

Вступление

Исследование основных параметров мюонного катализа всегда было интересной задачей. Экспериментальное изучение этого явления в жидкой D/T смеси было проведено в LAMPF (США) с целью выяснения потенциальной возможности использования его для производства энергии. Устройство, применявшееся в этом эксперименте, описано в [1]. Исследования по программе мюонного катализа в жидкой D/T смеси были проведены позднее также в PSI (Швейцария) с использованием установки, описанной в [2]. Отличительной чертой нашей установки является ее компактность, что позволяет обеспечить регистрацию продуктов мюонного катализа (нейтроны от dt -синтеза и электроны от распада мюонов) в условиях 4-л. геометрии.

Для систематического исследования процессов мю-катализа ядерных реакций синтеза в смесях изотопов водорода H/D/T при температуре ~ 22 К в Лаборатории ядерных проблем (ЛЯП) ОИЯИ разработана жидкотритиевая мишень (ЖТМ), устанавливаемая на мюонном канале 680 МэВ фазотрона ОИЯИ. ЖТМ (рис. 1) размещается в проточном гелиевом криостате и представляет собой комплекс устройств, в который входит ампула А (рис. 2) с системой заполнения ее рабочим газом (рис. 3), системы вакуумирования и термостатирования, а также набор приборов, обеспечивающих протоколирование экспериментальных параметров. ЖТМ присоединена к комплексу подготовки газовой смеси (КПГС) [3], работающему на основе палладиевых фильтров, обеспечивающих чистоту смесей изотопов водорода при уровне примесей веществ с $Z > 1$ не превышающем 10^{-7} . Конструкционный материал мишени — нержавеющей сталь 12Х18Н10Т. Для того, чтобы выполнить возросшие требования к безопасности экспериментов с радиоактивными материалами при разработке жидкотритиевой мишени, были приняты специальные меры по обеспечению безаварийной работы всех ее агрегатов и систем. На любом возможном пути проникновения газообразного трития в атмосферу предусмотрено два контура защиты. Особое внимание было уделено обеспечению безопасности персонала. Конструкционные особенности ЖТМ таковы, что в случае возникновения условий, при которых оператор не сможет управлять состоянием мишени, давление во всех объемах ЖТМ не превысит допустимого значения, и тем самым не приведет к возникновению аварийной ситуации. При проектировании мишени был учтен опыт испытаний жидкотритиевой мишени с водородным охлаждением, разработанной в ЛЯП [4]. Схема эксперимента аналогична описанной в работе [5].

Конструкция ЖТМ

Ампула мишени А (рис. 2) имеет цилиндрическую форму, наружный диаметр 25 мм, высота цилиндрической части 60 мм, толщина стенки 0,4 мм. Допускаемое давление в ампуле мишени $53,2$ кг/см², давление разрушения 156 кг/см². Через трубку G диаметром 8 мм, длиной 800 мм и толщиной стенки 0,5 мм ампула мишени А связана с системой измерения давления и количества газовой смеси (рис. 3). Эта подводная трубка проходит через дейтериевый объем гелиевого рефрижератора и служит теплообменником между промежуточным хладагентом — дейтерием и парами рабочей смеси изотопов водорода в ампуле ЖТМ. Ампула заполняется смесью жидких изотопов водорода, работает на принципе конденсационного охлаждения и позволяет удерживать температуру смеси с точностью $0,1$ К в диапазоне водородных температур (около 22 К). Возможно удержание в ампуле газов и газовых смесей при температуре вплоть до критич-

ческой температуры дейтерия (~38 K) и с плотностью газа порядка 0,1 от плотности жидкого водорода. Отрицательные мюоны, поступающие из мюонного канала фазотрона, проходят через стенку ампулы, останавливаются в жидкой смеси изотопов водорода и катализируют ядерные реакции синтеза. Константа перемешивания смеси внутри ампулы мишени составляет не более 15 минут, что исключает расслоение смеси в ампуле и облегчает выход ^3He от распада трития в газовую фазу. Для ускорения эвакуации рабочей смеси в КПГС к донышку ампулы припаян теплопровод Е (рис.2), на который намотан нагреватель Н2.

Система измерения давления и количества газовой смеси

Система измерения давления и количества газовой смеси (рис.3) смонтирована на фланце верхнего кожуха мишени. Давление в мишени контролируется тензометрическими манометрами типа "Сапфир" М1 и DM (рис.3). Уплотнения в исполнительных механизмах "Сапфиров" не предназначены для работы с изотопами водорода, поэтому резиновые прокладки были заменены на медные прокладки, облуженные сплавом Вуда. Для увеличения области измеряемых давлений без потери точности измерения выбран дифференциальный манометрический преобразователь (DM) типа "Сапфир" с диапазоном измерения от -1 до +0,5 атм. Паспортные характеристики этого прибора позволяют работать при давлении до 160 атм. Отрицательная камера сравнения DM соединена с системой подпора. Подпор осуществляется углекислым газом из баллона В и контролируется мановакуумметрами MV1, MV2. Давление насыщенных паров CO_2 при комнатной температуре позволяет поднимать сравнительное давление в системе подпора до 55 атм. При замораживании углекислоты в баллоне В с помощью жидкого азота удается получить давление в системе подпора не выше 10^2 торр, таким образом, при измерении перекрывается весь диапазон давлений в ампуле ЖТМ. В системе подпора предусмотрена магистраль заполнения баллона В углекислым газом и очистки CO_2 от низкокипящих компонентов. Система измерения давления и количества газовой смеси также содержит буферные объемы BV1 и BV2 0,35 и 1 л соответственно, четыре вентиля и тритиевые коммуникации. Буферные объемы позволяют работать при давлении до 46 атм. Важно заметить, что в случае аварии вакуумной системы давление в ампуле мишени при ее отогреве не превысит допустимого благодаря буферным объемам. В целях безопасности на всех этапах работы, включая время экспозиции на ускорителе, вентиль объема BV1 на пути изотопов из ампулы остается открытым. При экспозициях с малым количеством рабочей смеси для безопасности достаточно буферного объема BV1. Общее количество газовой смеси в ампуле может составлять не более 35 л при нормальных условиях. Буферный объем BV2 открывается для обеспечения безопасности экспозиций с малой концентрацией трития и относительно большим количеством газовой смеси. Таким образом, при внезапном выходе рабочей смеси из ампулы ЖТМ давление в системе не превысит 40 атм. Вентили позволяют отсекал буферные объемы поочередно и использовать их в качестве мерных объемов для измерения количества смеси изотопов водорода при заполнении ампулы мишени.

Система охлаждения

Низкотемпературная часть установки представляет собой проточный гелиевый криостат с холодной мощностью ~10 Вт и промежуточным теплоносителем – дейтерием. Проточный тип гелиевого криостата выбран для обеспечения надежности и безопасности ЖТМ в эксплуатации, а также для упрощения ее конструкции. Количество жидкого

дейтерия в промежуточном теплообменнике около 70 см³, давление паров 0,45 атм при температуре ~21 K. Система охлаждения предназначена для сжижения изотопов водорода в ампуле мишени и длительного (~10 час) поддержания фиксированной температуры ампулы мишени с точностью 0,1 K в диапазоне температур жидкого водорода. Гелиевый теплообменник Т1 (рис.1) сварен из трех оребренных винтом обечаек, вставленных друг в друга [6]. Этот теплообменник находится в объеме промежуточного хладагента. На его поверхности конденсируется дейтерий и стекает вниз, где охлаждает конденсационную трубку G. Схема стенда системы охлаждения жидкотритиевой мишени изображена на рис.1. В стенде расположены: баллон с гелием, редуктор РНе, сосуд Дьюара D с жидким гелием, сифон С, расходомеры гелия R, манометры М, коммуникации и дейтериевая линия, соединяющая ресивер РЕС с теплообменником Т1 мишени. Стенд подключен к откачке. Путь основного криоагента (гелия) показан на рисунке стрелками. Гелий из дьюара D под давлением перетекает по сифону С, проходит через гелиевый теплообменник Т1, находящийся в объеме с дейтерием – промежуточным хладагентом, затем через теплообменник Т2, охлаждает медный радиационный экран RS и сбрасывается в газольдер. Избыточное давление в гелиевом дьюаре создается редуктором РНе, расположенном на стенде системы охлаждения ЖТМ при помощи баллона со сжатым гелием. Для уменьшения радиационного нагрева мишень заключена в вакуумный кожух с использованием экранно-вакуумной изоляции. Теплообменники мишени обмотаны тремя слоями алюминизированного майлара толщиной 20 мкм за исключением самой ампулы мишени.

Особенности вакуумной системы

Система вакуумирования ЖТМ (рис.1) состоит из вакуумной магистрали, вакуумметра V, вакуумного буферного объема BV3, вакуумного кожуха гелиевого криостата, форвакуумного насоса F с азотной ловушкой и абсорбционных диодных разрядных высоковакуумных насосов N типа НОРД-100 (рис.1). Система вакуумирования позволяет тренировать "чистые" объемы мишени, а именно ампулу мишени, буферные объемы и перепускные магистрали для изотопов водорода на уровне высокого вакуума 10^7 торр с нагревом. Перед заполнением мишени изотопами водорода ампула и газовые коммуникации должны давать натекание не выше, чем 10^4 торр/час. Объем мишени, заполняемый изотопами водорода, буферные объемы и коммуникации тренируются в течение десятков часов с нагревом при форвакуумной откачке F, а затем на уровне высокого вакуума-абсорбционным насосом НОРД-100. Операция производится до тех пор, пока натекание в объемах не станет меньше 10^4 торр/час. Контроль вакуума осуществляется термометрическим манометрическим преобразователем ПМТ-4М и прибором ВИТ-3. Далее ампула мишени и система заполнения стыкуется к КПГС. При заправке мишени тритиевыми смесями для обеспечения безопасности персонала линия форвакуумной откачки отсекается и на нее ставится заглушка. Для поддержания вакуума на уровне 10^4 торр в вакуумном кожухе криостата мишени и обеспечения теплоизоляции гелиевых магистралей, теплообменников и самой ампулы при криогенных температурах используются те же НОРДы и вакуумная магистраль. Непосредственно с вакуумной системой соединен буферный объем 300 л (BV3 рис.1). Вакуумный объем второго контура с учетом BV3 таков, что при аварийном выходе всего количества изотопов водорода из мишени и дейтериевого теплообменника, давление в нем не будет превышать 50% от атмосферного. В процессе эксплуатации мишени вакуум в системе обеспечивает один из насосов N, второй из них резервный. Выбор этого типа насосов связан с тем, что он не требует форвакуумного объема и эффективно откачивает изо-

топы водорода. К вакуумной системе подсоединен титановый абсорбер АВ (рис.1). Он предназначен для автономного поглощения смеси изотопов водорода, содержащей тритий, при аварии первого контура защиты ЖТМ (см. далее). Этот абсорбер выполнен в виде цилиндрического сосуда из нержавеющей стали и заполнен титановым газопоглотителем. Сорбционная емкость титанового абсорбера составляет около 2000 л изотопов водорода при нормальных условиях, а общее количество изотопов водорода с учетом дейтерия промежуточного теплообменника не более 150 л. Таким образом, при выходе даже всего содержавшегося в мишени водорода во второй контур защиты давление в нем после поглощения не превысит 10^{-3} торр, что соответствует остаточной активности порядка ста Ки трития, адсорбированного на стенках вакуумной системы.

Термостатирование

Температура ампулы мишени при наличии в ней жидкой фазы изотопов водорода определяется с точностью 0,1 К в диапазоне от 20 до 30 К по давлению насыщенных паров дейтерия в конденсационном термометре (СТ рис.1,2) манометром М2 (диапазон измерения 5 атм). При нахождении в ампуле ЖТМ газовой смеси (температура, близкая к критической для дейтерия) температуру газа в ампуле можно оценить по показаниям термопары ТС1 (рис.2). Термопара ТС2 (рис.2) использовалась для определения температуры радиационного экрана RS (рис.1,2) в процессе методических криогенных испытаний. Термопара ТС3 (рис.2) использовалась при эвакуации смеси изотопов водорода в КППС для контроля температуры нагревателя Н2 (рис.2). Все три термопары, в зависимости от состояния вакуума в кожухе криостата, показывают температуру с точностью 5 К, поэтому они не использовались для измерения температуры, а служили для контроля за состоянием системы и направлением процессов. Система термостатирования ЖТМ повторяет схему термостабилизации, описанную в [7]. Для записи экспериментальных параметров (рис.4,5,6), в том числе и температуры, использовалась схема, описанная в [8].

Операции и режимы ЖТМ

ЖТМ позволяет производить контролируемым образом следующие операции.

- Откачка ампулы мишени, буферных объемов и вакуумного кожуха мишени.
- Заполнение ампулы мишени жидкими изотопами водорода и их смесями из КППС. На рис. 4а показаны временные зависимости параметров состояния (сверху давление по М1, снизу температура по СТ) смеси изотопов водорода в ампуле при ее заполнении (участок АВ) и выходе на стабильный температурный режим (участок ВС).
- Полное удаление из мишени смеси изотопов водорода. На рис. 4б показаны временные зависимости параметров состояния (сверху давление по М1, снизу температура по ТС1) смеси изотопов водорода в ампуле при эвакуации смеси в буферный объем (участок DE) и посадке смеси на урановую ловушку КППС (участок FG). Моменты времени Е и F соответствуют включению нагревателя Н2 для эвакуации и посадки смеси.
- Поддержание температуры исследуемой жидкой смеси изотопов водорода в течение сеанса на ускорителе в районе 22 К с точностью 0,1 К. На рис. 5 сверху показана временная зависимость давления в ампуле по манометру DM, снизу – температуры

ампулы по конденсационному термометру СТ в течение экспозиции мишени на пучке мюонов.

- Добавление изотопов водорода в ампулу мишени и частичная эвакуация изотопов водорода из ампулы. На рис. 6 показаны временные зависимости параметров состояния (сверху давление по М1, посередине – температура по ТС1, снизу температура по СТ) смеси изотопов водорода в ампуле. Участок Н1 на рис.6 соответствует частичной эвакуации изотопов водорода из ампулы.
- Отогрев мишени до ~ 38 К (участок ИJ рис. 6) и поддержание этой температуры (участок JK рис. 6).

Радиационная безопасность

По условиям эксперимента в ампулу мишени необходимо подавать тритий, а также смесь изотопов водорода, содержащая тритий, причем суммарная активность в ампуле и газовых магистралях мишени может достигать 10 кКи. Обеспечение тритиевой безопасности при эксплуатации ЖТМ сводится к недопущению попадания газообразного трития в атмосферу. Контроль за появлением следов трития в атмосфере производится со стороны КППС. Система радиационной безопасности содержит два уровня защиты от возможного проникновения трития в атмосферу. Первый цельнометаллический контур безопасности включает в себя: ампулу мишени А (рис.1,2), центральную трубку теплообменника G (рис.1,2), содержимое системы измерения давления и количества газовой смеси (рис.3). Тритиевые магистрали, ампула и теплообменники мишени, исполнительные механизмы манометрических преобразователей М1 и DM (рис.3), буферные объемы BV1 и BV2 (рис.3) расположены в вакуумно-плотных кожухах, которые вместе с вакуумным буферным объемом BV3 (рис.1) и вакуумными магистралями составляют второй контур защиты. Коммуникации второго контура безопасности выполнены из нержавеющей труб диаметром 14 и 30 мм, с толщиной стенок не менее 1 мм и металлорукавов и содержат высоковакуумные вентили и фторопластовые уплотнения. Объем вакуумно-плотного кожуха системы измерения давления и количества газовой смеси соединен с атмосферой бокса КППС. Вентили системы измерения ДУ-10 – цельнометаллические с сильфоном с двойными стенками. Они рассчитаны на давление до 200 атм и температуру до 200°С. Шток вентилей системы измерения давления и количества газовой смеси, проходящие через вакуумно-плотный рубеж, отполированы и уплотнены с использованием фторопластовых втулок.

Результаты испытаний и эксплуатации ЖТМ

Перед сборкой мишени ответственные узлы были испытаны на избыточное давление и вакуумную плотность. Захлаживание мишени от комнатной температуры до водородной с промежуточным азотным охлаждением занимает около 1,5 часов. Для поддержания температуры на уровне ~ 22 К требуется не более трех литров жидкого гелия в час.

В процессе поддержания водородной температуры мишени оказалось, что температура смеси изотопов водорода в ампуле мишени А систематически превышает температуру конденсационной трубки G. Эта разница температур зависит только от изотопного и молекулярного состава смеси в ампуле и достигает 3 К. При заполнении ампулы чистыми изотопами водорода (H_2 или D_2) разница температур трубки G и ампулы не превышает 0,1 К. На рис.7а показана концентрационная зависимость стационарного теплового эффекта [8] от концентрации дейтерия в двойных неравновесной (кружки) и равновесной (квадратики) смесях с водородом. На рис.7б показана концен-

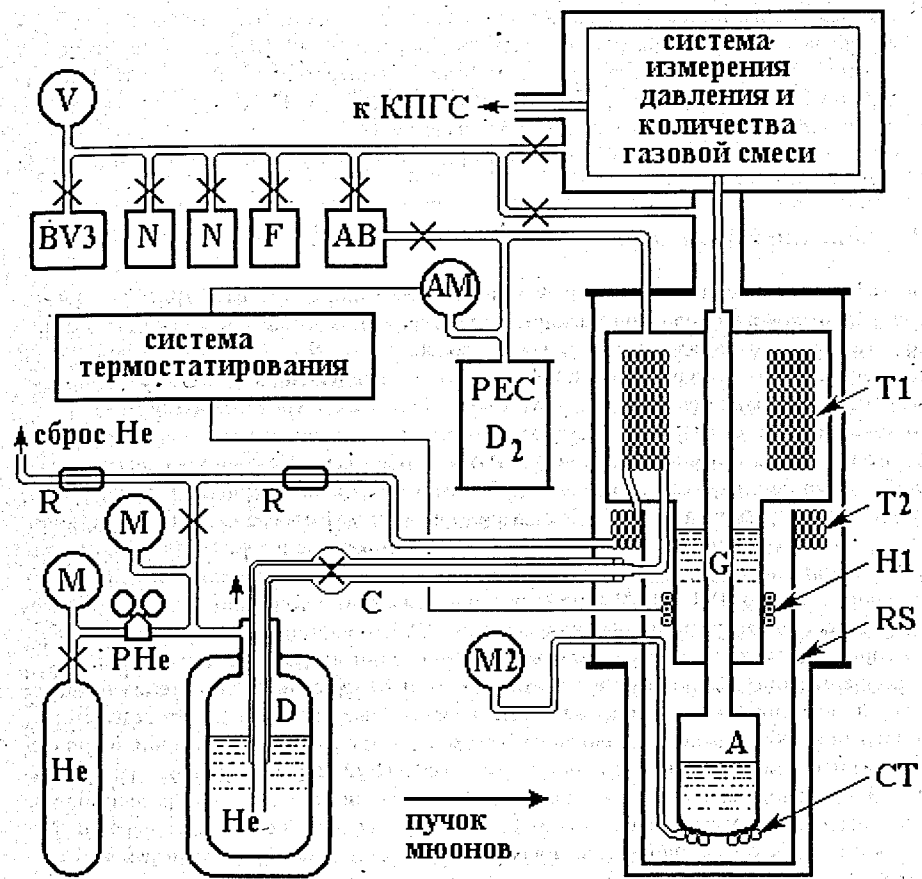


Рис. 1. Схема жидкотритиевой мишени

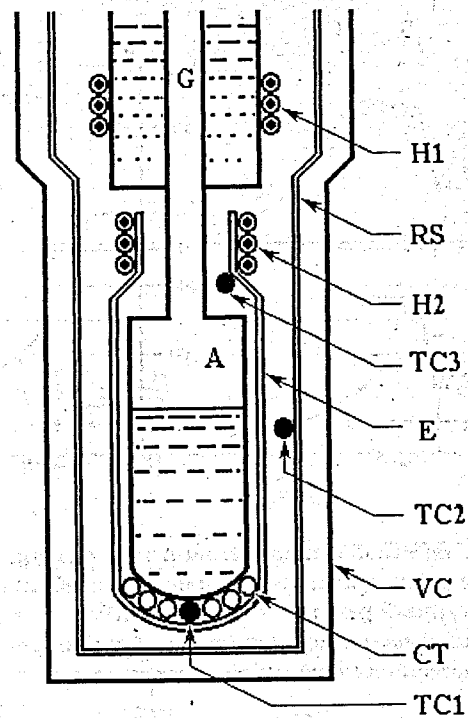


Рис. 2. Схема ампулы ЖТМ

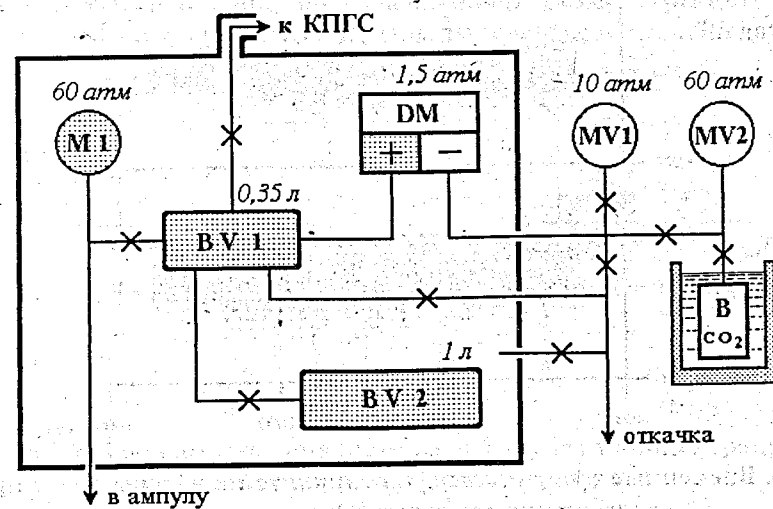


Рис. 3. Схема системы измерения давления и количества газовой смеси ЖТМ

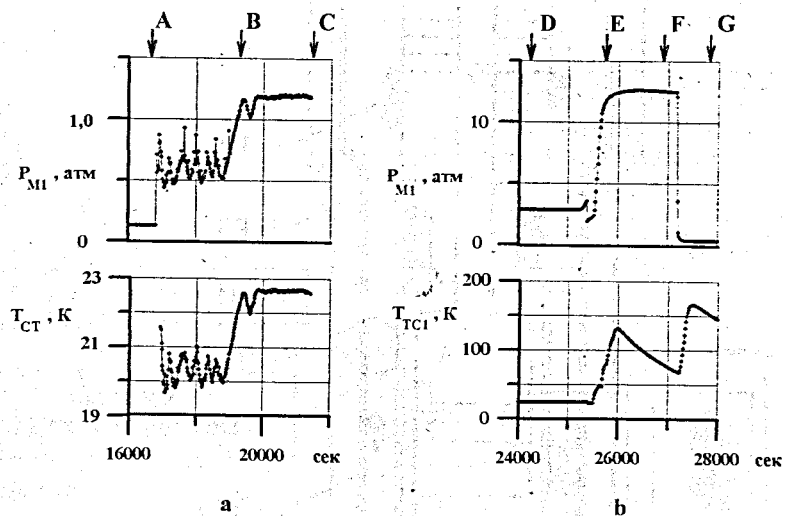


Рис. 4. Временные зависимости давления и температуры смеси при:
 а - заправке смеси в ампулу и выходе на стабильный температурный режим
 б - эвакуации смеси из ампулы в буферный объем и посадке смеси на ловушку

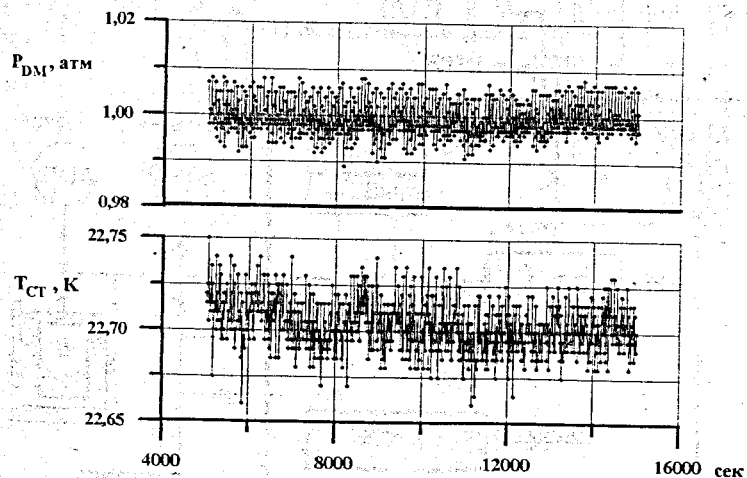


Рис. 5. Временные зависимости давления и температуры смеси при поддержании температуры смеси в ампуле

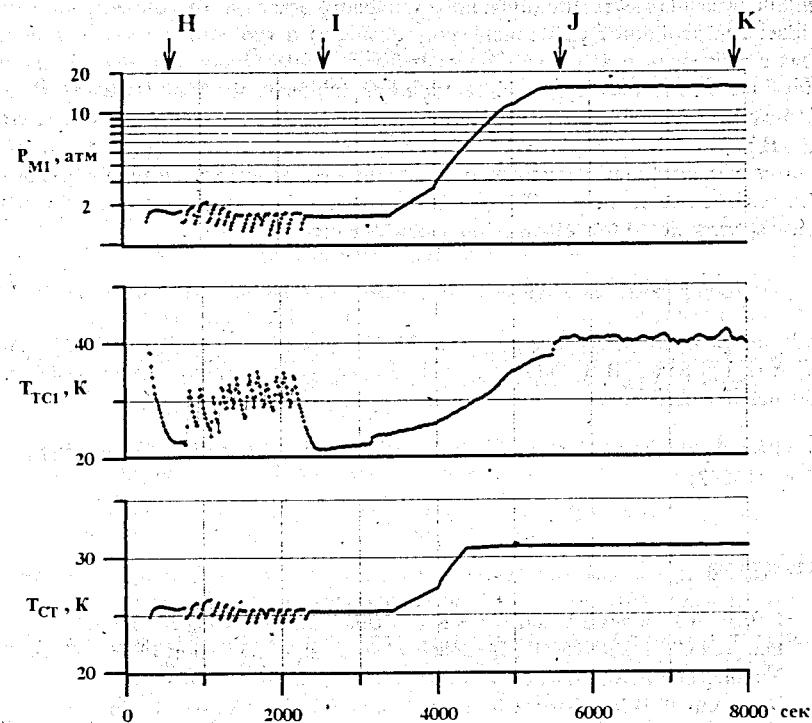


Рис. 6. Временные зависимости давления и температуры смеси при частичной эвакуации смеси из ампулы и отогреве мишени до 38 К

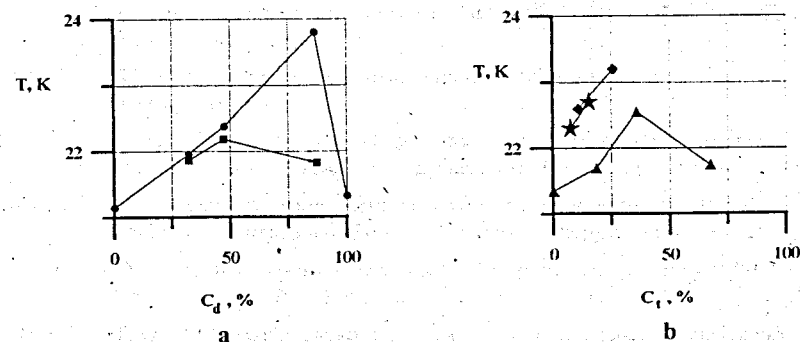


Рис. 7. Зависимость температуры в ампуле от концентрации:
 а - дейтерия в HD смеси,
 б - трития в DT смеси

трационная зависимость стационарного теплового эффекта от концентрации трития в равновесных двойной с дейтерием (треугольники) и тройной (ромбики и звездочки) смесях с дейтерием и водородом. Экспериментальные точки, отмеченные на рисунке 7b ромбиками, соответствуют концентрации водорода в тройной смеси около 30%, а звездочками – около 60%.

В рабочих условиях наблюдались незначительные броски вакуума, которые объясняются оттаиванием холодных стенок гелиевых магистралей и теплообменника при смене режимов охлаждения. В течение всего времени сеанса на фазотроне ЛЯП (150 часов) все узлы ЖТМ показали свою надежную работу.

Авторы выражают благодарность Л.Б. Голованову за помощь при разработке конструкции теплообменника ЖТМ, А.Д. Конину, В.В. Фильченкову за ценные советы при обсуждении проекта мишени, М.М. Петровскому, А.П. Кустову, А.Б. Аполлонову, А.Н. Графову, В.В. Ракалю и А.Н. Шевенину за помощь при испытаниях жидкотритиевой мишени.

Работа выполнена при поддержке МНТЦ (грант №025-95) и РФФИ (грант №97-02-16882).

Литература

- [1] Caffrey A.J., Jones S.E. and Watts K.D. // Bull. Am. Soc. 1983. №28. P. 646.
- [2] Petitjean C., Ackerbauer P., Breunlich W.H., et al. // SIN Report PR-87-07. 1987.
- [3] Yukhimchuk A.A., Lobanov V.N. // Нур. Int. 1996. №101/102. P. 661.
- [4] Быстрицкий В.М., Возняк Я., Гула А. и др. // ПТЭ 1985. № 1. С. 46.
- [5] Джелепов В.П., Зинов В.Г., Ивановский С.А. и др. // ЖЭТФ. 1992. №101. С. 1105.
- [6] Голованов Л.Б. // ЭЧАЯ. 1977. Т.8. Вып. 5. С. 1155.
- [7] Demin D.L., Dzheleпов V.P., Grafov N.N. et al. // Нур. Int. 1996. №101/102. P. 583.
- [8] Гребинник В.Г., Демин Д.Л., Зинов В.Г. и др. // Препринт ОИЯИ Р8-97-7. Дубна. 1997.

Рукопись поступила в издательский отдел
31 июля 1997 года.