

949016
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 539.89+539.217.5

Г 773
ГРАНОВСКИЙ
Владимир Болеславович

РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ МИШЕНЕЙ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МЮОННОГО КАТАЛИЗА ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ
СИНТЕЗА ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА

Специальность: 01.04.01 - экспериментальная физика,
01.04.07 - физика твердого тела

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Дубна - 1989

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований (г. Дубна), в Институте геохимии и физики минералов АН УССР (г. Киев).

Научный руководитель –
кандидат физико-математических наук В. М. Быстрицкий

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук В. В. Кокорин
кандидат физико-математических наук А. Е. Городецкий

Ведущее научно-исследовательское учреждение – Московский Всесоюзный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт атомного энергетического машиностроения.

Защита состоится " " декабре 1989 г.
в час. на заседании Специализированного совета Д-047.01.03 при Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна Московской области.

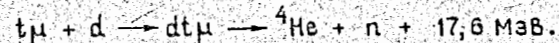
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан " 1 " ноября 1989 г.

Ученый секретарь Специализированного совета
доктор физико-математических наук Ю. А. Батусов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Экспериментальное обнаружение в 1977 г. в Дубне В. П. Дзюлеповым и др. ^{***} нового так называемого резонансного механизма образования мюонных молекул дейтерия и предсказание группы теоретиков ^{***} о существовании аналогичного, но более сильного резонанса в образовании дейтерий-третиевых молекул возродили интерес к идее мю-катализа ядерного синтеза в смеси дейтерия и трития. С этого момента можно считать начался второй этап исследований мю-атомных и мю-молекулярных процессов. В 1979 г. экспериментальной группой в Дубне ^{***} был впервые обнаружен и изучен мюонный синтез ядер дейтерия и трития. Результаты эксперимента подтвердили теоретическое предсказание о существовании интенсивного резонансного механизма образования $dt\mu$ -молекул, а также свидетельствовали о том, что один мюон за время жизни может вызвать более 100 реакций синтеза



Важность этого результата состоит в том, что, в принципе, он открывает возможность практического использования этого явления для производства энергии. Во многих крупных лабораториях мира Los Alamos (США), PSI (Швейцария) и др. начались исследования мюонного катализа в смеси $D_2 + T_2$. Было установлено, что скорость образования $dt\mu$ -молекул увеличивается с ростом температуры и плотности смеси ^{****}. В плане определения оптимальных условий по множественности нейтронов, а также для правильного описания кинетики процессов мюонного катализа было необходимо провести исследования мю-катализа в смеси $D_2 + T_2$ при высоких температурах и давлениях. Такого рода эксперименты явились программой новых исследований, намеченных в Дубне на фазотроне Лаборатории ядерных проблем.

* Быстрицкий В. М., Дзюлепов В. П., Петрухин В. И. и др. ЕЯТФ, 1979, т. 76, вып. 2, с. 460.

** Винницкий С. И., Пономарев Л. И., Пузынин И. В. и др. ЕЯТФ, 1978, т. 74, с. 849.

*** Быстрицкий В. М., Дзюлепов В. П., Ершова З. В. и др. Письма ЕЯТФ, 1980, т. 31, с. 249; ЕЯТФ, 1981, т. 80, с. 1700.

**** Breunlich et al. Muon Catalysed Fusion, 1, 1987, p. 67; Jones S. et al. Phys. Rev. Lett., 1986, v. 56, p. 588.

Диссертация посвящена разработке и созданию мишеней высокого давления для исследования мюонного катализа ядерных реакций синтеза изотопов водорода.

Цель работы — разработка и создание мишеней высокого давления, предназначенных для исследования процесса мюонного катализа реакций ядерного синтеза в смеси изотопов водорода при высоких давлениях (до 1500 ат) и в широком диапазоне температур ($20,4 \leq T \leq 1050$ К).

Научная новизна. Новыми результатами, представленными в данной работе, являются следующие:

1. Впервые разработана и создана мишень для исследования мюонного катализа в смеси $D_2 + T_2$ при давлениях до 1000 ат и температурах до 1050 К.

2. Впервые разработаны и созданы мишень и аппаратура высокого давления для исследования мю-катализа ядерных реакций синтеза в смеси $H_2 + D_2$ и в чистом дейтерии в диапазонах температур $20,4 \leq T \leq 300$ К и давлений до 1500 ат.

3. Экспериментально определены характеристики процессов взаимодействия изотопов водорода (проникновения, диффузии и растворения) с различными материалами в интервале температур до 1050 К и давлений до 1000 ат.

4. Проведены исследования целого ряда "защитных" покрытий жаропрочных сплавов (из которых были изготовлены мишени) при работе в широком диапазоне давлений и температур.

5. Разработана технология нанесения "защитных" покрытий с целью уменьшения диффузии водорода через стенки мишеней. Полученные в диссертации данные до сих пор являются единственными в указанной области температур и давлений.

Практическая ценность работы. С помощью разработанной и созданной аппаратуры высокого давления к настоящему времени на фазотроне Объединенного института ядерных исследований выполнены следующие исследования:

1. Выполнен эксперимент по измерению скорости образования мюонных молекул дейтерия в диапазонах температур от 20,4 К до 300 К и давлений от 0,4 до 1,5 кбар.

2. Выполнен эксперимент по измерению скорости захвата мюонов от $d\mu$ -атомов к ядрам ${}^4\text{He}$.

3. В настоящее время проводится подготовка экспериментов по исследованию мюонного катализа в смеси $D_2 + T_2$ при высоких давлениях и температурах.

Автор защищает:

1. Разработку мишени для исследования мю-катализа ядерных реакций синтеза изотопов водорода в смеси $H_2 + D_2$ при давлениях до 1500 ат в диапазоне температур $20,4 \text{ К} \leq T \leq 300 \text{ К}$.

2. Разработку и создание мишени для исследования мюонного катализа в смеси $D_2 + T_2$ при давлениях до 1000 ат и температурах до 1050 К.

3. Результаты исследований характеристик процессов взаимодействия изотопов водорода (проникновения, диффузии и растворения) с различными материалами (жаропрочным сплавом ЭИ698, нержавеющей стали XI8H10T, XI3M2BFP) в интервалах температур до 1050 К и давлений до 1000 ат.

4. Результаты исследований влияния разнообразных "защитных" покрытий жаропрочных сплавов на процесс диффузии изотопов водорода через стенки мишеней в широком диапазоне давлений и температур, а также технологию их нанесения.

5. Разработку вентиля высокого давления до 10 кбар и емкостного датчика, работающего в диапазоне давлений до 1000 ат.

Апробация результатов и публикации. Результаты исследований, обобщенные в диссертации, докладывались на научных семинарах Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, Международном совещании по проблемам мюонного катализа ядерных реакций синтеза изотопов водорода (Флорида, США, 1988 г.) и на XII Республиканском совещании "Влияние высоких давлений на вещество" (Одесса, 1987 г.).

По теме диссертации опубликовано 7 научных работ, список которых приведен в конце реферата.

Структура диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем составляет 101 страницу, включая 31 рисунок, 6 таблиц, список литературы насчитывает 87 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследований, перечислены основные результаты, вынесенные на защиту.

В первой главе приводится описание созданной нами установки для исследования взаимодействия изотопов водорода с жаропрочными сплавами и нержавеющей стали до 2000 ат и температурах до 1050 К.

Установка (рис.1) включает в себя: 1) двухходовый штокный компрессор-разделитель, осуществляющий сжатие водорода (дейтерия) до давления 2000 ат без загрязнения его маслом; 2) измерительную ячейку;

Во второй главе приведены результаты исследования процесса диффузии изотопов водорода через жаропрочный сплав ЭИ698^{/2/} и нержавеющие стали Х18Н10Т и Х13М2БФР^{/3/}. Указанные стали рассматриваются как перспективный конструкционный материал для первой стенки термоядерных реакторов^{*}. Эти стали имеют очень высокое сопротивление распуханию при больших повреждающих дозах, а также благоприятное сочетание физических свойств в интервале рабочих температур реактора.

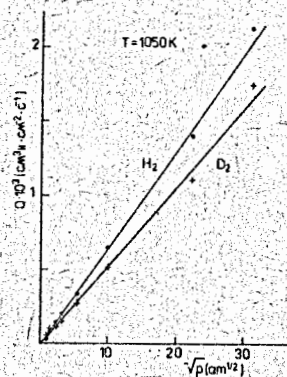


Рис.3. Зависимости потоков протиффундировавшихся через стенку образца водорода и дейтерия от давления в измерительной ячейке при температуре 1050 К.

На рис.3 приведена зависимость потоков водорода и дейтерия через сплав ЭИ698 от давления при температуре до 1050 К. Как видно, данная зависимость хорошо аппроксимируется линейной функцией от \sqrt{p} . Аналогичные зависимости наблюдаются также и для нержавеющих сталей Х18Н10Т и Х13М2БФР. Причем отношение потоков водорода и дейтерия в пределах экспериментальных ошибок согласуется с теоретической оценкой данной величины $\sim \sqrt{\frac{D_D}{D_H}}$.

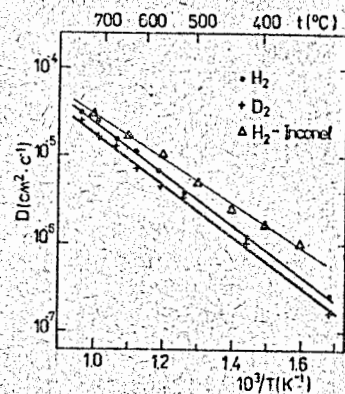


Рис.4. Температурные зависимости коэффициентов диффузии водорода и дейтерия для сплава ЭИ698. Для сравнения приведена зависимость коэффициента диффузии водорода в сплаве Inconel 600.

Зависимости коэффициента диффузии водорода (дейтерия) от температуры для сталей Х18Н10Т, Х13М2БФР и сплава ЭИ698 носят экспоненциальный характер (см. рис.4). Растворимость водорода (дейтерия) в сталях Х18Н10Т и Х13М2БФР определялась по формуле

$$s = \frac{P}{D}$$

* Орлов В.В., Альтовский И.В. Физические проблемы материалов первой стенки термоядерных реакторов. Препринт ИАЭ-3380/8, Москва, 1981.

Величины, характеризующие процесс проникновения изотопов водорода через указанные материалы, определялись на основании следующих зависимостей:

$$P = P_0 e^{-\frac{E_P}{RT}}, \quad D = D_0 e^{-\frac{E_D}{RT}}, \quad s = s_0 e^{-\frac{E_s}{RT}}$$

где P_0 , D_0 , s_0 - константы; E_P , E_D , E_s - энергии активации процессов проникновения, диффузии и растворимости соответственно.

Показано, что проникновение водорода P при давлении 300 ат через нержавеющую сталь Х18Н10Т при температуре 1050 К в ~ 2 раза, а при $T = 600$ К в ~ 6 раз меньше соответствующей величины для стали Х13М2БФР; коэффициент диффузии D водорода через сталь Х13М2БФР при $T = 1050$ К превышает соответствующую величину для стали Х18Н10Т в ~ 2 раза, а при $T = 600$ К в ~ 5 раз; значения растворимости водорода для указанных материалов в исследуемых диапазонах температур и давлений не очень различаются между собой.

В таблице I приведены полученные нами результаты исследований процессов взаимодействия водорода (дейтерия) с нержавеющими сталями Х18Н10Т и Х13М2БФР и жаропрочным сплавом ЭИ698.

Таблица I.

Материал	Газ	$P_0 \cdot 10^2$ $\frac{\text{см}^3 \cdot \text{н} \cdot \text{см}^{-1}}{\text{с} \cdot \text{ат} \cdot \text{I}^{1/2}}$	$D_0 \cdot 10^3$ $\frac{\text{см}^2}{\text{с} \cdot \text{I}}$	s_0 $\frac{\text{см}^3 \cdot \text{н} \cdot \text{см}^{-3}}{\text{ат} \cdot \text{I}^{1/2}}$	E_P ккал/ г-атом	E_D ккал/ г-атом	E_s ккал/ г-атом
Х18Н10Т	H ₂	5,0	15,5	3,2	16,8	13,6	3,2
Х18Н10Т	D ₂	4,1	12,9	3,2	16,9	13,7	3,2
Х13М2БФР	H ₂	1,0	3,9	2,6	12,6	9,9	2,7
ЭИ698	H ₂	2,6	1,9	1,4	15,8	13,3	2,5
ЭИ698	D ₂	2,1	1,5	1,4	15,9	13,4	2,5

Учитывая то, что предел текучести для сталей Х18Н10Т и Х13М2БФР не превышает 120 МПа, использование данных материалов для изготовления сосудов высокого давления, работающих при больших температурах, становится практически возможным только в диапазоне давлений: для стали Х18Н10Т - 500 ат, для стали Х13М2БФР - 300 ат.

Однако следует отметить, что в указанном диапазоне давлений и температур применение стали Х13М2БФР становится более приемлемым, так как, ввиду достаточно высокой диффузии водорода через нее, она по сравнению с нержавеющей сталью Х18Н10Т меньше подвержена водородному охрупчиванию.

Следует отметить, что для сплава ЭИ698 коэффициент диффузии водорода (дейтерия) не зависит от концентрации растворенного водорода (дейтерия), достигающей величины $4 \cdot 10^{-1} \text{ см}^3 \cdot \text{н} / \text{см}^3 \text{ Мэ}$ при давлении 1000 ат и температуре 1050 К.

Указанные концентрации растворенного водорода не являются критическими для сплава ЗИ698 с точки зрения водородного охрупчивания при механических нагрузках, обусловленных давлением 1000 ат в течение 600 ч.

Поэтому, согласно полученным данным, нами в качестве материала корпуса мишени, предназначенной для работы с изотопами водорода при давлениях до 1000 ат и температурах до 1050 К, был окончательно выбран жаропрочный сплав ЗИ698.

В третьей главе приводятся результаты исследований влияния "защитных" покрытий на проникновение изотопов водорода через сплав ЗИ698 при высоких температурах и давлениях [4,5].

Ранее полученные нами результаты исследования диффузии водорода через жаропрочный сплав ЗИ698 свидетельствовали о том, что он может быть использован для изготовления корпусов мишеней, предназначенных для исследования мюонного катализа реакций ядерного синтеза в смесях изотопов водорода при высоких температурах (1000 К) и высоких давлениях (1000 ат).

Учитывая то, что проникновение водорода при таких температурах и давлениях приводит к значительному уменьшению количества газа, находящегося в мишени (при температуре 1050 К потери могут достигать 5% в час), а длительности экспонирования мишени на пучке мюонов в процессе проведения экспериментов при высоких температурах могут достигать десятков часов, перед нами возникла проблема существенного снижения проникновения водорода через стенки мишени. Это особенно важно при работе с радиоактивным изотопом - тритием.

Одним из возможных способов уменьшения проникновения водорода является "защита" поверхности мишени (изготовленной из сплава ЗИ698) от непосредственного контакта с водородом в виде оболочки из такого материала, для которого проницаемость по отношению к водороду существенно меньше, чем для сплава ЗИ698. Кроме того, такой материал должен быть технологичным. Согласно литературным данным, указанным свойством обладает золото[‡]. В связи с этим нами были выполнены исследования процесса проникновения изотопов водорода через двойную оболочку (ЗИ698 + Au) при давлениях до 1000 ат и температурах до 1050 К. Зависимости потоков водорода и дейтерия через двойную оболочку в области температур от 700 К до 1050 К и при давлениях 500 и 1000 ат приведены на рис.5 и 6. Для сравнения на данных рисунках приведены потоки водорода и дейтерия через стенки образца из сплава ЗИ698, из-

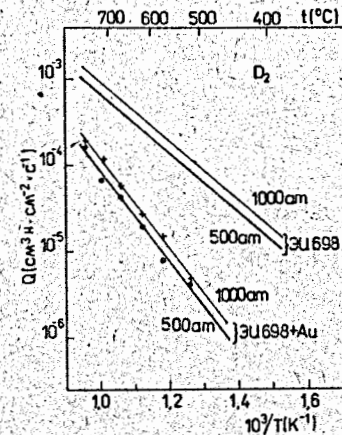
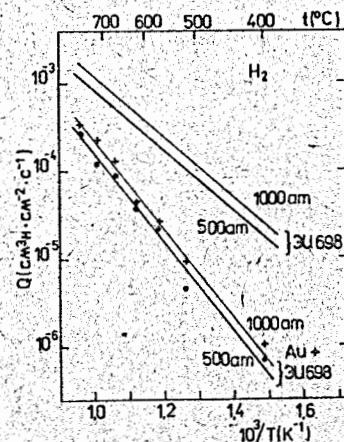


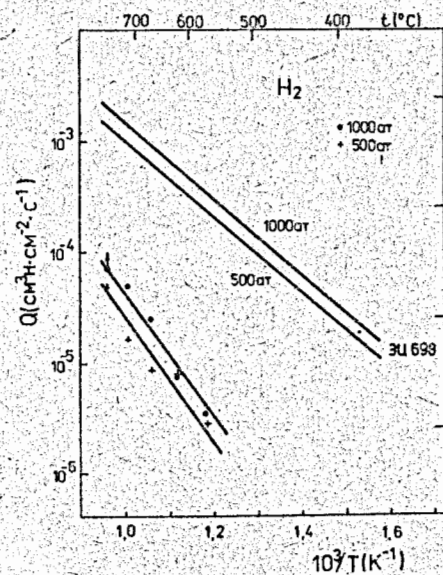
Рис.5 и 6. Температурные зависимости потоков водорода и дейтерия через двойную оболочку (Au + ЗИ698) и оболочку из ЗИ698.

меренные при тех же условиях. Из сравнения данных следует, что проникновение водорода через золото при $T = 1050$ К в ~ 50 раз меньше соответствующей величины для сплава ЗИ698, а проникновение дейтерия в ~ 70 раз меньше. Следует отметить, что в данной геометрии (толщина оболочки из Au = 0,2 мм, образец имел размеры $\phi_{\text{H}} = 6,3$ мм, $\phi_{\text{BH}} = 3,3$ мм, $l = 52,5$ мм) потоки водорода и дейтерия при $T = 1050$ К и $P = 1000$ ат через сплав + Au уменьшаются в ~ 5 и ~ 7 раз соответственно, по сравнению с потоками H_2 и D_2 через стенку мишени из сплава ЗИ698.

На основании полученных результатов можно сделать заключение, что использование в качестве материала стенки мишени сплава ЗИ698 совместно с оболочкой из золота позволяет проводить исследования с ограниченным количеством газа, находящегося в мишени при высоких температурах ($T = 1050$ К) и давлениях ($P = 1000$ ат) в течение достаточно длительного времени (~ 15 ч.) без введения существенных поправок при обработке экспериментальных данных. Тем не менее, чтобы еще больше увеличить допустимый временной диапазон экспозиции мишени при экспериментальных параметрах, нами был рассмотрен другой способ уменьшения проникновения водорода - нанесение на поверхность мишени "защитных" покрытий, препятствующих растворению водорода в стенке мишени. Такие покрытия должны быть технологичными и сохранять высокую чистоту водо-

[‡] Caskey G.R., Derrick R.G. Hydrogen Permeability Through Alpha-Brass-Metall. Trans., 8A, 511 (1977).

рода (суммарное содержание примесей по условиям экспериментов не должно превышать 10^{-7} об. долей). Известно, что для уменьшения проникновения водорода через металлическую стенку при комнатных температурах применяют алитирование. Однако до начала наших исследований в литературе отсутствовала информация о влиянии такого рода покрытий на проникновение водорода при давлениях ~ 1000 ат и температурах ~ 1000 К. С целью выбора более эффективного типа "защитного" покрытия нами были предварительно проведены исследования целого ряда покрытий сплава ЭИ698 (окисные пленки, эмалирование, нитрид циркония, алитирование). В результате исследований оказалось, что наиболее эффективным "защитным" покрытием является алитирование. В данной главе приведены полученные результаты исследования проникновения водорода через стенку мишени с алитированной поверхностью при высоких давлениях ($P \sim 1000$ ат) и температурах ($T \sim 1050$ К)^{15/}. Алитирование проводилось в порошковой смеси (98% FeAl и 2% NH₄Cl) в селитровой печи Г-40 при температуре 900°C (в течение 4 часов) с последующим отжигом в открытой печи (в окислительной атмосфере) при температуре 950°C (в течение 1 часа). Структура поверхности алитированного слоя соответствует соединению NiAl. Концентрация Al в слое уменьшается от 45-47 масс.% вблизи поверхности до практически нулевой на границе покрытие-матрица. На рис. 7 приведены результаты измерений



10

Рис. 7. Зависимости потока водорода от температуры образца при давлениях газа в измерительной ячейке 500 ат и 1000 ат (для образцов с алитированной поверхностью и без алитирования).

проникновения водорода через стенки образцов в исследуемом диапазоне температур при давлениях 500 и 1000 ат. Для сравнения на рисунке представлены температурные зависимости потока водорода через стенку образца без защитного покрытия при давлениях 500 и 1000 ат. Как видно, алитиро-

вание наружной поверхности образца позволило уменьшить проникновение водорода примерно в 30 раз при температуре 1050 К и давлении 1000 ат.

Для определения стойкости покрытия с течением времени были проведены исследования зависимости потока водорода от времени при давлении 1000 ат и температурах 1000 и 1050 К. В течение 150 ч. при температуре 1000 К уровень потока водорода оставался постоянным, а при $T = 1050$ К наблюдался медленный рост его в течение всего времени экспозиции, не превышавший 0,3% в час.

Четвертая глава содержит описание мишеней высокого давления для исследования ме-атомных и мо-молекулярных процессов в чистом дейтерии, смесях H₂+D₂, D₂+T₂, H₂(D₂)+He в диапазоне температур $20,4 \leq T \leq 1050$ К. На рис. 8 приведен схематический чертеж мишени для работы с водородом $20,4 \leq T \leq 300$ К^{16/}. Мишень представляет собой толстостен-

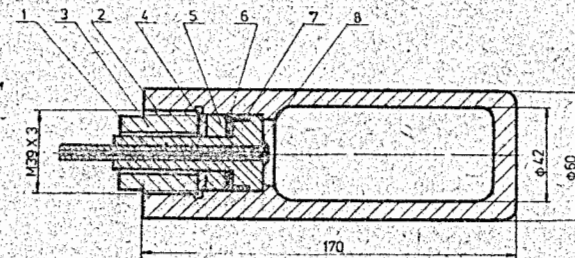


Рис. 8. Схема мишени: 1 - обтюратор, 2 - корпус мишени, 3 - поджимная гайка, 4, 6 - нажимные кольца, 5, 7 - медные прокладки, 8 - капилляр.

ный цилиндр 2, изготовленный из сплава ЭИ437Б, который при низких температурах обладает хорошим сочетанием прочности и пластичности. Предельное давление, при котором корпус мишени еще работает в области упругих деформаций, равно *:

$$P_y = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \cdot \frac{r_2^2 - r_1^2}{r_2^2} \quad (I)$$

где σ_s - предел текучести сплава ЭИ437Б, равный 60 кг/мм²; r_1, r_2 - внутренний и наружный радиус мишени.

* Ильшина А.А., Огибалов П.М. Упругопластическая деформация полых цилиндров. МГУ, М., 1960.

При $r_1 = 21$ мм, $r_2 = 30$ мм мишень, согласно (1), работает в упругом режиме при давлениях до 1770 ат. Давление, разрушающее мишень, определяется из выражения

$$P_{раз.} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s \ln \frac{r_2^2}{r_1^2} \quad (2)$$

При указанных размерах давление разрушения равно 2470 ат.

Попытка использовать набор уплотнений, обычно применяемых в технике высоких давлений (тефлон, медь), оказалась неудачной, так как при помещении мишени в жидкий азот происходила ее разгерметизация из-за различия в коэффициентах термического расширения тефлона, медных прокладок и корпуса мишени.

Для обеспечения герметичности мишени в указанном диапазоне температур нами была предложена следующая последовательность операций.

После сборки мишень подвергается упрочняющему старению при температуре 750°C в течение 40 ч. (в процессе старения происходит диффузионная сварка уплотняющего медного кольца 4 с обтюратором 1 и корпусом мишени 2). Медная прокладка 5, помещенная между кольцами 4 и 6, является источником дополнительных напряжений из-за большого коэффициента термического расширения при проведении диффузионной сварки. Во время старения (~40 ч.) в мишени поддерживается давление водорода 80±100 ат для того, чтобы исключить окисление ее внутренней поверхности. По окончании термообработки мишень подвергается дегазации в течение 8 часов при температуре 750°C, чтобы предотвратить возможность водородного охрупчивания при низких температурах. Охлаждение и термостатирование мишени осуществляется с помощью криостата. Заполнение мишени водородом (дейтерием) производится через вентиль высокого давления 1/1.

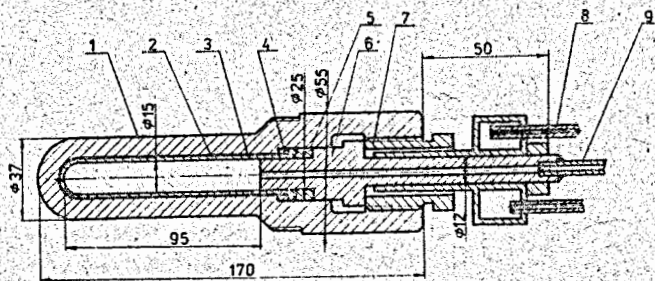


Рис. 9. Чертеж мишени: 1 — корпус мишени, 2 — вкладыш из ЭИ437Б, 3 — ампула из золота, 4, 5 — медные уплотнения, 6 — обтюратор, 7 — нажимная гайка, 8 — радиатор, 9 — капилляр из ЭИ702.

На рис. 9 приведен схематический чертеж мишени, предназначенной для работы с изотопами водорода при давлениях до 1000 ат и температуре до 1050 К. В основу разработанной и созданной нами мишени легла идея использования многослойных "защитных" покрытий.

Корпус мишени представляет собой толстостенный цилиндр 1 из сплава ЭИ638, в который помещен вкладыш 2 из того же материала. Вкладыш 2 вставлен внутрь ампулы из золота 3 с толщиной стенки 0,4 мм. Уплотнение между оболочкой из золота и корпусом 1, а также между вкладышем 2 и корпусом 1 осуществляется с помощью медных прокладок 4 и 5. Прокладки 4 и 5 через обтюратор 6 поджимаются гайкой 7.

Детали 1, 2, 6 предварительно были термически обработаны по следующей схеме. Производилась их выдержка в течение 8 ч. при $T = (1400 \pm 10)$ К, после чего температура понижалась до 1270 К, при такой температуре они выдерживались в течение 4 часов. По окончании этой процедуры проводилось алитирование, а затем эти детали подвергались старению при $T = 1020$ К в течение 16 часов с последующим охлаждением на воздухе. Для уменьшения проникновения водорода (дейтерия) через обтюратор 6 производится его охлаждение с помощью радиатора 8.

Подсоединение мишени к вентилю высокого давления с гидравлическим приводом осуществляется с помощью капилляра 9 с наружным диаметром 6 мм и толщиной стенки 2 мм, изготовленного из сплава ЭИ702. Рабочий объем мишени, согласно условиям экспериментов по исследованию мезонного катализа в смеси $D_2 + T_2$, составляет 18 см³, а толщина стенки и внутренний диаметр равны 10 мм и 18 мм, соответственно. При таких размерах корпус мишени работает в режиме упругих деформаций в диапазоне давлений до 1300 ат при температуре 1050 К. Давление, при котором происходит разрыв мишени, согласно (2), составляет 2500 ат. Вышеописанная мишень является составной частью установки, позволяющей проводить исследования процесса мезонного катализа в течение длительного времени. На рис. 10 приведен общий вид установки. Она, кроме мишени, включает в себя: вентиль высокого давления 1/1, емкостной датчик давления и систему термостатирования мишени. Мишень 1 через капилляр подсоединена к вентилю высокого давления 2, выполняющему одновременно роль несущего элемента. Датчик давления 3 подсоединен непосредственно к вентилю 2, чтобы уменьшить "паразитный" объем, создаваемый капилляром. Нагрев мишени осуществляется с помощью электрического нагревателя 6. Для теплоизоляции мишени вокруг нее расположены экраны 5, 7 из листовой нержавеющей стали и полированной меди. В целях радиационной безопасности вся установка помещена внутрь объема, ограниченного вакуумным кожухом 4.

Для измерения давления газа, находящегося в мишени в малых количествах ($V_M = 18$ см³) и обладающего высокой степенью чистоты по примесям, а также учитывая то, что содержимым мишени может являться три-

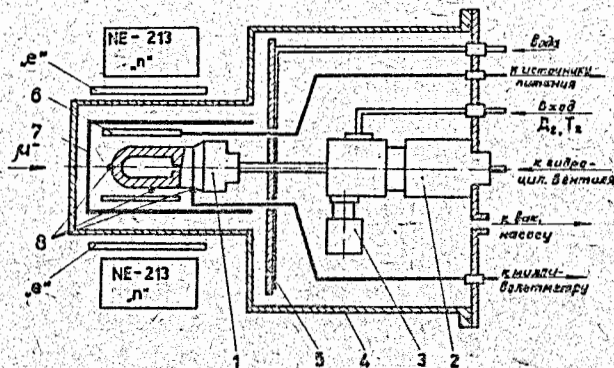


Рис.10. Общий вид установки: 1 - мишень, 2 - вентиль высокого давления с гидравлическим приводом, 3 - емкостный датчик давления, 4 - вакуумный кожух, 5 - тепловой экран, охлаждаемый водой, 6 - электрический нагреватель, 7 - тепловые экраны, 8 - термопары, "е" - детекторы электронов, "н" - детекторы нейтронов.

тиф высокой активности, нами разработан емкостный датчик давления. Принцип работы датчика основан на изменении емкости при изменении зазора между пластинами конденсатора под действием газа, находящегося в его объеме. Конструкция датчика приведена на рис.11. Одна пластина конденсатора укреплена на днище сосуда высокого давления I, а другая - на фланце 6. Если давление газа внутри цилиндра I равно P, то на его днище действует сила $F = \pi r_1^2 P$, вызывающая удлинение сосуда -

$$l_p = l_0 \left(1 + \frac{1}{E} \frac{r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} P \right)$$

где r_1 , r_2 - внутренний и наружный радиус цилиндра, l_0 - длина внутренней полости цилиндра, E - модуль Юнга. Удлинение цилиндра приводит к изменению зазора между пластинами конденсатора на величину

$$d = \frac{l_0}{E} \frac{r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} P,$$

а следовательно, и к изменению емкости конденсатора

$$\Delta C = 0,88 \frac{S}{d - \frac{l_0}{E} \frac{r_1^2}{(r_2^2 - r_1^2)} P},$$

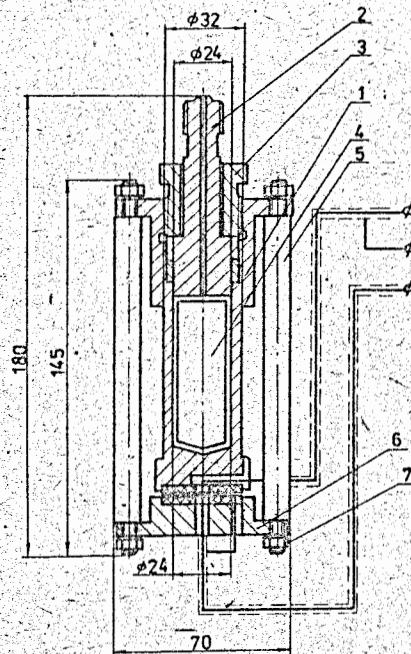


Рис.11. Емкостный датчик: 1 - корпус датчика из ЭИ437Б, 2 - обтюратор, 3 - нажимная гайка, 4 - металлический вкладыш, 5 - зазор между пластинами, 6 - фланец, 7 - крепежные гайки.

где S - площадь пластины конденсатора, d - расстояние между пластинами.

При начальном зазоре, равном 0,07 мм, изменение давления на I ат приводит к изменению емкости на 0,05 пФ. Для того, чтобы исключить влияние теплового расширения на величину зазора между обкладками конденсатора, все детали датчика изготовлены из одного и того же сплава ЭИ437Б. При проведении измерений наблюдается повторяемость показаний датчика, так как корпус его для выбранных размеров $r_1 = 24$ мм и $r_2 = 32$ мм в диапазоне давлений до 1500 ат работает в упругом режиме (согласно (1)). На рис.12 приведена зависимость емкости датчика от давления газа.

Для уменьшения "паразитного" объема датчика до 0,5 см³ внутри его помещен металлический вкладыш 4 с зазором менее 0,1 мм.

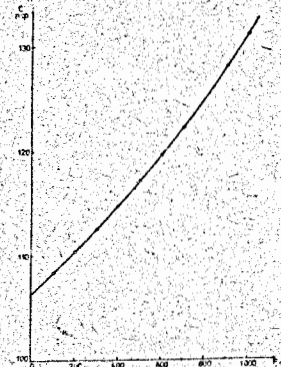


Рис.12. Зависимость емкости датчика от давления газа.

На созданной нами установке были проведены имитационные опыты с дейтерием. Результаты этих экспериментов свидетельствуют о том, что применение алитирования внутренней поверхности мишени и использование оболочки из золота позволили уменьшить поток дейтерия через многослойную стенку мишени в экстремальных условиях ($P = 1000$ ат, $T = 1050$ К) более чем в 100 раз (по сравнению с незащищенным сплавом ЭИ698) и достичь уровня, удовлетворяющего требованиям экспериментов по исследованию мюонного катализа в смеси $D_2 + T_2$ при высоких давлениях и температурах.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации:

1. Впервые разработана и создана мишень для работы с изотопами водорода (H_2 , D_2 , T_2) при давлениях до 1000 ат и температурах до 1050 К.
2. Разработана и создана установка для исследования мюонного катализа реакций ядерного синтеза в смесях $H_2 + D_2$ и в чистом дейтерии в диапазоне температур $20,4 \text{ К} \leq T \leq 300 \text{ К}$ и давлений до 1500 ат.
3. Впервые получены важные характеристики процессов взаимодействия изотопов водорода (проникновения, диффузии и растворимости) с различными материалами в диапазоне температур до 1050 К и давлений до 1000 ат.
4. Впервые проведены исследования целого ряда "защитных" покрытий карбопрочных сплавов в широком интервале давлений ($P \sim 1000$ ат) и температур ($600 \text{ К} \leq T \leq 1050 \text{ К}$). Разработана технология их нанесения.
5. Разработан и создан вентиль высокого давления до 10 кбар с гидравлическим приводом.
6. Разработан и создан емкостный датчик давления, позволяющий с высокой точностью производить измерения давления в диапазоне от 50 ат до 1500 ат.
7. Разработана и создана установка для исследования взаимодействия изотопов водорода с различными материалами при высоких давлениях ($P \sim 1000$ ат) и температурах ($T \sim 1050 \text{ К}$).

В период с 1987 по 1988 гг. с использованием разработанной и созданной нами аппаратуры высокого давления на фазотроне ОИЯИ выполнены эксперименты, целью которых являлось:

1. Измерение скорости образования мюонных молекул дейтерия в диапазонах давлений $400 \text{ ат} \leq P \leq 1500 \text{ ат}$ и температур $20,4 \text{ К} \leq T \leq 300 \text{ К}$.
2. Измерение характеристик процесса перехвата мюонов от $d\mu$ -атомов к ядрам ${}^4\text{He}$.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Быстрицкий В.М., Грановский В.Б., Куц В.А., Столупин В.А., Чибисов А.Н. Вентиль высокого давления до 10 кбар. - Дубна, 1985. - 3 с. (Препринт/Объед. ин-т ядерн.исслед.: I3-85-835).
2. Быстрицкий В.М., Возняк Я., Грановский В.Б., Джелепов В.П., Захаров А.П., Зинов В.Г., Канаев А.И., Лонци Э., Мельник Ю.П., Столупин В.А., Шарапов В.М. Проникновение изотопов водорода через жаропрочный сплав ЭИ698 при высоких температурах и давлениях: - Дубна, 1986. - 7 с. (Препринт/Объед. ин-т ядерн.исслед.: PI3-86-161).
3. Быстрицкий В.М., Грановский В.Б., Джелепов В.П., Захаров А.П., Канаев А.И., Куц В.А., Мельник Ю.П., Столупин В.А., Шарапов В.М. Исследование проникновения изотопов водорода через нержавеющие стали Х18Н10Т и Х13М2БФР. - Дубна, 1987. - 8 с. (Препринт/Объед. ин-т ядерн.исслед.: PI3-87-525).
4. Быстрицкий В.М., Возняк Я., Грановский В.Б., Джелепов В.П., Захаров А.П., Зинов В.Г., Канаев А.И., Куц В.А., Лонци Э., Мельник Ю.П., Столупин В.А., Шарапов В.М. Исследование проникновения водорода и дейтерия через двойную оболочку (Au + сплав ЭИ698) при высоких температурах и давлениях. - Дубна, 1986. - 6 с. (Препринт/Объед. ин-т ядерн.исслед.: PI3-86-162).
5. Быстрицкий В.М., Вошедченко Б.М., Грановский В.Б., Джелепов В.П., Захаров А.П., Зинов В.Г., Канаев А.И., Князев Е.В., Куц В.А., Мелешко Е.В., Мельник Ю.П., Столупин В.А., Шарапов В.М. Исследование влияния алитирования поверхности на проникновение водорода через стенку мишени при высоких температурах и давлениях. - Дубна, 1988. - 6 с. (Препринт/Объед. ин-т ядерн.исслед.: I3-88-586).
6. Быстрицкий В.М., Грановский В.Б., Джелепов В.П., Зинов В.Г., Куц В.А., Столупин В.А., Уткин В.А., Чибисов А.Н. Мишень для работы с изотопами водорода при давлениях до 1500 ат в диапазоне температур от 20,4 до 300 К. - Дубна, 1987. - 6 с. (Препринт/Объед. ин-т ядерн.исслед.: I3-87-704).
7. Архипов А.П., Быстрицкий В.М., Грановский В.Б., Джелепов В.П., Зинов В.Г., Куц В.А., Моркулов Д.Г., Столупин В.А., Хан Дор Ир. Мишень для работы с тяжелыми изотопами водорода при давлениях до 1000 ат и температурах до 1050 К. - Дубна, 1988. - 6 с. (Препринт/Объед. ин-т ядерн.исслед.: PI3-88-554).