

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

4550/2-80

22/9-80

13-80-403

С.Г.Сазонов, В.Т.Толмачев

ДЕЙТЕРИЕВАЯ
ТРЕКОЧУВСТВИТЕЛЬНАЯ МИШЕНЬ
В ВОДОРОДНОЙ ПУЗЫРЬКОВОЙ КАМЕРЕ

1980

Сазонов С.Г., Толмачев В.Т.

13-80-403

Дейтериевая трекочувствительная мишень
в водородной пузырьковой камере

Рассматривается возможность использования дейтериевой мишени в водородном окружении. Целью данной работы является выбор рабочих параметров системы дейтерий - водород и формулирование основных требований к конструкции мишени. Приведен расчет необходимой толщины стенок мишени. Произведена оценка оптических искажений, связанных с конвекцией водорода вокруг мишени. Приведена принципиальная схема дейтериевой мишени в водородной камере и получены основные соотношения для расчета элементов расширительного устройства мишени. Результаты данной работы показывают теоретическую возможность технической реализации трекочувствительной мишени с выбранными параметрами режима и могут являться основой для разработки конструкции.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1980

Sazonov S.G., Tolmachev V.T.

13-80-403

Deuterium Track-Sensitive Target in
a Hydrogen Bubble Chamber

The possibility of deuterium target applications in

Эксперимент по исследованию $\bar{d}d$ -взаимодействий с использованием установки "Людмила" требует для своего осуществления применения в качестве рабочей среды дейтерия в объеме всей камеры или хотя бы в ее части. В настоящее время в ряде лабораторий находят применение двухсредные системы, в которых часть объема, ограниченного упругой прозрачной коробкой, заполняется дейтерием или водородом, а остальной объем камеры - неон-водородной смесью^{1,2,3}. Такие системы позволяют проводить наиболее полный анализ взаимодействий. Помимо этого они обладают и рядом технологических достоинств. Из рассмотренных Р-Т диаграмм на рис.1 видно, что при определенных концентрациях неона в смеси начальные условия /Т - температура, Р - давление/ в обеих средах могут быть весьма близкими. При этом, что принципиально важно, одновременная чувствительность дейтерия или водорода достигается за счет расширения объема мишени, обусловленного прогибом стенок при сбросе давления в неон-водородной смеси.

Для осуществления наполнения объема камеры дейтерием или части его неон-водородной смесью необходимо создание комплекса внешних технологических систем, включающих: систему сжатия и очистки, хранилище, систему эвакуации дорожных продуктов. Кроме того, требуется переделка некоторых систем самой камеры. Для этого необходимо выполнение значительного объема строительномонтажных работ, а также большие финансовые затраты на

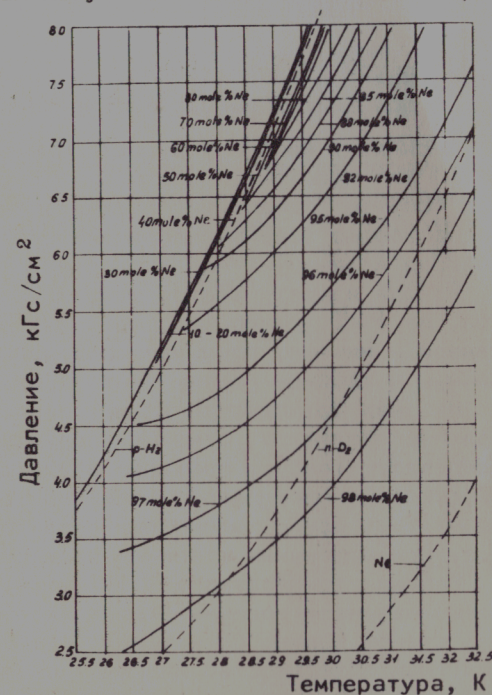


Рис.1. Р-Т диаграммы водорода, дейтерия и различных неон-водородных смесей.

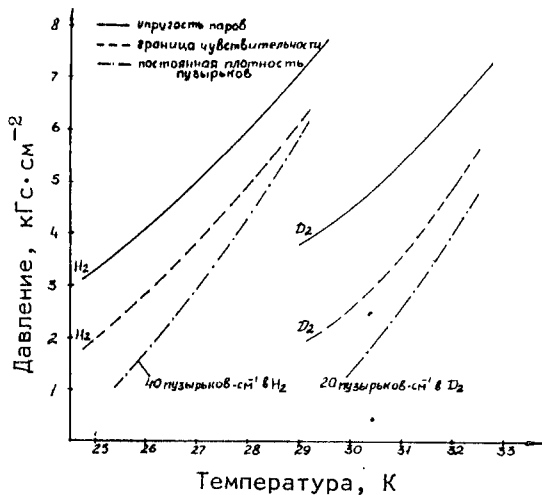


Рис. 2. P-T диаграммы водорода и дейтерия с зонами чувствительности.

приобретение дорогого продукта, и следовательно, все это не может быть выполнено достаточно быстро. По этой причине признано целесообразным предпринять попытку создания дейтериевой треко-чувствительной мишени в окружении водорода.

Целью данной работы является выбор рабочих параметров системы дейтерий-водород и формулирование основных требований к конструкции мишени.

Целью данной работы является выбор рабочих параметров системы дейтерий-водород и формулирование основных требований к конструкции мишени.

1. ВЫБОР РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ДЕЙТЕРИЙ-ВОДОРОД /МИШЕНЬ-КАМЕРА/

Поскольку кривые упругости паров дейтерия и водорода и границы их чувствительности не совпадают /рис.2/, в данном случае начальные параметры не могут быть одинаковы, как в хорошо зарекомендовавших себя системах водород-неон-водород и дейтерий-неон-водород.

Исходя из результатов работы [4] о росте трековых пузырьков, из P-T диаграмм рис.2, а также имея в виду прочность камеры и мишени, принимаем для дальнейшего рассмотрения приведенную в таблице группу параметров.

Не имея возможности комментировать и обосновывать все выбранные параметры, отметим следующее: существенная разница температур требует проверки осуществимости такого режима; обеспечение приемлемого качества треков в обеих жидкостях может быть осуществлено при различных минимальных давлениях, т.е. при различных степенях расширения обеих жидкостей.

Разница температур в 3,75° между водородом и дейтерием предопределяет толщину стенок мишени. Термическое сопротивление стенок должно быть таким, чтобы перепад температур между наружной поверхностью мишени и окружающим водородом был не более 0,2°. В противном случае возможно закипание водорода на поверхности мишени в цикле расширения. Кроме того, выбранная толщина стенок должна обеспечить необходимую жесткость мишени.

Таблица

Жидкость	D ₂	H ₂
Параметр		
Температура, К	31	27,25
Разница температур (T _{D₂} -T _{H₂}), К	3,75	
Давление P _p /равновесное/, кг·см ⁻²	5,4	5,25
Давление P _c /статическое/, кг·см ⁻²	5,9	5,9
Давление P _{min} /минимальное/, кг·см ⁻²	2,5	2,8
Разница минимальных давлений (P _{min} ^{H₂ - P_{min}^{D₂}), кг·см⁻²}	0,3	
Коэффициент роста пузырьков A, см·с ^{-1/2}	0,4	0,3
Плотность пузырьков, см ⁻¹	20	45

II. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕОБХОДИМОЙ ТОЛЩИНЫ СТЕНОК МИШЕНИ

Для того чтобы выбрать толщину стенок мишени, нужно определить температуры поверхностей стенок при заданных температурах в водороде и дейтерии и различной толщине стенки. Материал стенок - поликарбонат "Дифлон". Теплофизические коэффициенты данного материала не известны при нужных температурах, поэтому в расчетах приняты коэффициенты для полиметилметакрилата. В данном случае это можно оправдать тем, что известные коэффициенты материалов подобного класса весьма близки. Разница температур между водородом T_{H₂} и дейтерием T_{D₂} - общий температурный напор - T_{D₂} - T_{H₂} /рис.3/.

$$T_{D_2} - T_{ст.}^{D_2}; T_{ст.}^{H_2} - T_{H_2}; T_{ст.}^{D_2} - T_{ст.}^{H_2}$$

-частные температурные напоры, которые нас интересуют и могут быть найдены через общий:

$$T_{D_2} - T_{ст.}^{D_2} = (T_{D_2} - T_{H_2}) \cdot \frac{\kappa}{\alpha_{D_2}}$$

$$T_{ст.}^{D_2} - T_{ст.}^{H_2} = (T_{D_2} - T_{H_2}) \cdot \frac{\delta}{\lambda} \cdot \kappa$$

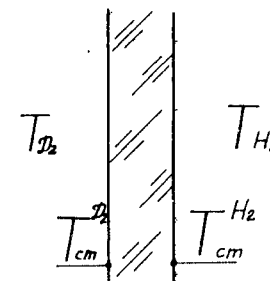


Рис. 3. Обозначение температур камеры и мишени.

$$T_{\text{ст.}}^{\text{H}_2} - T_{\text{H}_2} = (T_{\text{D}_2} - T_{\text{H}_2}) \cdot \frac{K}{\alpha_{\text{H}_2}}$$

α и K могут быть найдены как

$$\alpha = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda}{d}, \quad K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{D}_2}} + \frac{\delta}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{H}_2}}}$$

Nu - критерий Нуссельта:

$$\text{Nu} = c \cdot (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^n,$$

$\text{Gr} = g d^3 \beta \Delta T / \nu^2$ - критерий Грасгофа, $\text{Pr} = c \cdot \eta / \lambda$ - критерий Прандтля, c и n - функции $(\text{Gr} \cdot \text{Pr})^{1/5}$, где

α_{D_2} Вт.м ⁻² .град ⁻¹	- коэффициент теплоотдачи при свободной конвекции в дейтерии и водороде соответственно;
α_{H_2} Вт.м ⁻² .град ⁻¹	- коэффициент теплоотдачи при свободной конвекции в дейтерии и водороде соответственно;
K Вт.м ⁻² .град ⁻¹	- коэффициент теплопередачи;
λ_{H_2} Вт.м ⁻¹ .град ⁻¹	- коэффициент теплопроводности водорода, равный $1,35 \cdot 10^{-1}$;
λ_{D_2} Вт.м ⁻¹ .град ⁻¹	- коэффициент теплопроводности дейтерия $1,47 \cdot 10^{-1}$ /;
g м.с ⁻²	- ускорение свободного падения $9,8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ /;
C_{H_2} Дж.кг ⁻¹ .град ⁻¹	- коэффициент удельной теплоемкости водорода $15 \cdot 10^3$ /;
C_{D_2} Дж.кг ⁻¹ .град ⁻¹	- коэффициент удельной теплоемкости дейтерия $8 \cdot 10^3$ /;
η_{H_2} кг.с ⁻¹ .м ⁻¹	- коэффициент динамической вязкости водорода $8 \cdot 10^{-6}$ /;
η_{D_2} кг.с ⁻¹ .м ⁻¹	- коэффициент динамической вязкости дейтерия $2 \cdot 10^{-5}$ /;
ρ_{H_2} кг.м ⁻³	- плотность водорода 60 /;
ρ_{D_2} кг.м ⁻³	- плотность дейтерия 148 /;
d м	- характерный линейный размер /ширина/ $0,15$ /;
β_{H_2} град ⁻¹	- коэффициент термического объемного расширения водорода $13 \cdot 10^{-3}$ /;
β_{D_2} град ⁻¹	- коэффициент термического объемного расширения дейтерия $8 \cdot 10^{-3}$ /;
$\lambda_{\text{ст.}}$ Вт.м ⁻¹ .град ⁻¹	- коэффициент теплопроводности стенки при температуре $28 \text{ К} = 1,0 \cdot 10^{-1}$ /;

δ м
 $\nu = \eta / \rho$

- толщина стенки;
- коэффициент кинематической вязкости /м².с⁻¹ /;
 ΔT К - частный температурный напор между средой и стенкой.

Поскольку ΔT и δ подлежат определению, решение будем искать методом последовательных приближений. Второе приближение оказывается достаточным. По результатам расчетов построены зависимости частных температурных напоров от толщины стенки /рис.4/. На основании этих зависимостей выбираем толщину стенки мишени 12 мм ; при этом температура стенки со стороны водорода будет на $0,15^\circ$ выше температуры определяющего водорода, что удовлетворяет ранее заданным требованиям.

III. ОПТИЧЕСКИЕ ДИСТОРСИИ, ВЫЗЫВАЕМЫЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТЬЮ СРЕДЫ

Тепловой поток через стенки мишени будет вызывать конвекцию водорода в зоне мишени. Это может привести к искажению треков. Необходимо произвести оценку величины возможных искажений. Рассмотрением этого вопроса занимался D.V.Thomas¹⁶. Для жидкого водорода им была получена следующая зависимость:

$$\delta = 45,6 \cdot N^{7/8} \cdot L^{3/2}$$

где N Вт.см⁻² - тепловой поток;
 L см - длина пути световых лучей в турбулентной области.
В нашем случае N составляет $3 \cdot 10^{-3}$ Вт.см⁻². Зависимость δ от величины L приведена на рис.5. Как видно, при имеющей место глубине погружения мишени и, следовательно, длине пути световых лучей в турбулентной жидкости 250 мм величина погрешности составляет около 30 мкм и может быть принята как допустимая.

IV. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НЕОБХОДИМОЙ СТЕПЕНИ РАСШИРЕНИЯ ДЕЙТЕРИЯ В МИШЕНИ

Как мы уже отмечали ранее, для обеспечения приемлемого качества треков в мишени необходимо иметь минимальное давление

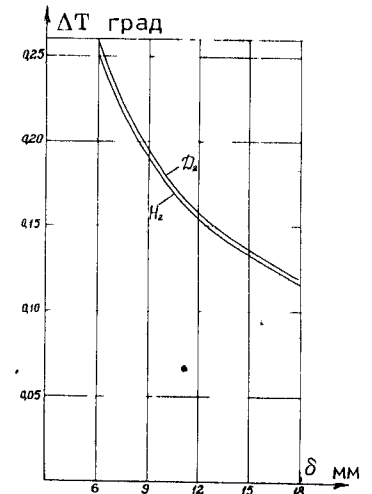


Рис.4. Зависимости перепада температур на стенке и окружающей жидкости от толщины стенки мишени.

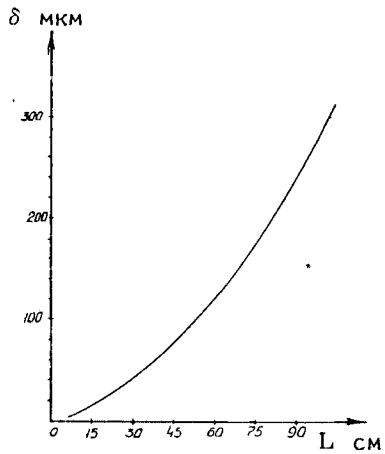


Рис.5. Зависимость поперечного искажения треков от глубины хода светового луча в турбулентной жидкости при фиксированном тепловом потоке.

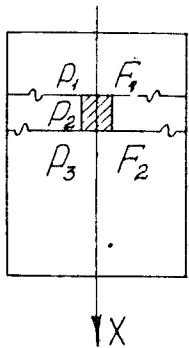


Рис.6. Принципиальная схема РУМ.

дейтерия, которое на $0,3 \text{ кг.см}^{-2}$ меньше, чем в водороде. Отсюда следует, что мишень должна быть снабжена расширительным устройством /РУМ/. РУМ могут быть выбраны различных типов. Возможно использование устройств, аналогичных применяемым на камерах с приводом и системой управления. Нам представляется такой путь нерациональным ввиду его сложности.

В /7/ предложены различные варианты обеспечения трековой чувствительности камеры и мишени с кинематической связью расширительных устройств. Предполагается использовать для создаваемой мишени РУМ, связанное гидравлической кинематической связью с системой расширения пузырьковой камеры. Рассмотрим следующую схему РУМ и определим основные ее характеристики, обеспечивающие выбранные параметры режима /рис.6/: P_1 - давление в мишени, P_2 - опорное давление; P_3 - давление в камере; F_1 и F_2 - площади мембран.

Условие равновесия такой системы:

$$\Sigma X = 0, \text{ то есть}$$

$$P_1 F_1 + P_2 F_2 - P_2 F_1 - P_3 F_2 = 0, \quad /1/$$

$$P_1 = P_2 + \frac{F_2}{F_1} (P_3 - P_2). \quad /2/$$

В предварительных расчетах принимается, что жесткость мембран незначительна. Пусть требуемый перепад давления для обеспечения чувствительности водорода и дейтерия соответственно ΔP_{H_2} и ΔP_{D_2} , примем, что $(F_1 - F_2)$ - величина постоянная, так же, как и P_2 .

Условие равновесия при расширении:

$$P'_1 = P_2 + \frac{F_2}{F_1} (P'_3 - P_2).$$

/3/

Вычитая из /2/ уравнение /3/, получим

$$P_1 - P'_1 = P_2 + \frac{F_2}{F_1} (P_3 - P_2) - P_2 - \frac{F_2}{F_1} (P'_3 - P_2),$$

$$\Delta P_{D_2} = \frac{F_2}{F_1} \cdot \Delta P_{H_2}.$$

Отсюда

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{\Delta P_{D_2}}{\Delta P_{H_2}}$$

и опорное давление

$$P_2 = \frac{P_1 - \frac{\Delta P_{D_2}}{\Delta P_{H_2}} \cdot P_3}{1 - \frac{\Delta P_{D_2}}{\Delta P_{H_2}}}.$$

Для нашего случая имеем

$$\Delta P_{D_2} = 3,4 \quad \text{и} \quad \Delta P_{H_2} = 3,1 \quad / \text{см. таблицу} /,$$

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{3,4}{3,1} = 1,1,$$

$$P_2 = \frac{5,9 - 1,1 \cdot 5,9}{1 - 1,1} = \frac{-0,58}{-0,1} = 5,8 \text{ кг.см}^{-2}.$$

Таким образом, мы получили, что при заданных статических давлениях в мишени и камере отношение эффективных площадей мембран должно быть 1,1 и опорное давление без заметной погрешности может быть принято $P_2 = 5,9 \text{ кг.см}^{-2}$.

Считая далее, что геометрия и размеры мишени заданы требованиями физической задачи, определим необходимую степень расширения дейтерия и в зависимости от этого - связь между эффективной площадью подвижного элемента РУМ и его ходом. Начальный объем мишени

$$V_H = l \cdot b \cdot h.$$

Для обеспечения заданного сброса давления $\Delta P_{D_2} = 3,4 \text{ кг.см}^{-2}$ необходимо изменение первоначального объема согласно формуле

$$\Delta V = \beta \cdot V_H \cdot \Delta P.$$

При расширении жидкостей в камере и мишени перепад давления на стенках мишени будет расти от 0 до $0,3 \text{ кг.см}^{-2}$ вследствие

работы РУМ. Следовательно, стенки мишени будут прогибаться внутрь, уменьшая начальный объем. При выборе параметров РУМ этот эффект необходимо компенсировать. Считая, что форма прогиба стенок близка к цилиндрической, изменение объема за счет прогиба стенок будет равно

$$\Delta V_1 = 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot b \cdot l \cdot w,$$

и тогда РУМ должно обеспечивать изменение объема:

$$\Delta V_n = \Delta V + \Delta V_1,$$

здесь и ранее l - длина мишени, b - ширина мишени, h - высота мишени, β - адиабатический коэффициент сжимаемости, w - прогиб стенки:

$$w = \frac{0,1422 \cdot P \cdot b^4}{E \cdot \delta^3 \cdot (1 + 2,21 K^3)},$$

δ - толщина стенки, E - модуль упругости, $K = b/l$. $F_{эфф.}$ - эффективная площадь подвижного элемента РУМ и S - его ход должны быть связаны условием

$$F_{эфф.} = \frac{\Delta V_n}{S} = \frac{\beta \cdot l \cdot b \cdot h \cdot \Delta P + b \cdot l \cdot w}{S} = \frac{l \cdot b [\beta \cdot \Delta P \cdot h + w]}{S}.$$

При $l = 1000$ мм, $b = 150$ мм, $h = 60$ мм, $\delta = 12$ мм $\Delta V_n = 93$ см³ и $F_{эфф.} = 93/S \cdot$ см². Величины $F_{эфф.}$ и S выбираются исходя из прочностных и конструктивных соображений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты показывают теоретическую возможность технической реализации трековувствительной мишени с выбранными параметрами режима и могут являться основой для разработки конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Horlitz G. et al. Nucl. Instr. & Meth., 1969, v.68, 2, p.213.
2. Leutz H., Williams P.R. RL-73-026, Chilton, April 1973.
3. Fisher C.M. RL-73-53, Chilton, May 1973.
4. Wolff S. DESY, B-1-1, Hamburg, Februar 1969.
5. Малков М.П. и др. Справочник по физико-техническим основам криогеники. "Энергия", М., 1973.
6. Thomas D.V. CERN, 67-26, v.1, August 1967.
7. Козубский Э.В. и др. Пузырьковая камера с двумя следочувствительными объемами. Авторское свидетельство СССР №661459, G01 5/06 от 9.03.77 г. Бюлл. ОИПОТЗ, 1979, №17, с.190. Рукопись поступила в издательский отдел 10 июня 1980 г.