

†  
ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

6207/2-80

22/12-80

8-80-592

Ю.Т.Борзунов, Л.Б.Голованов, А.Г.Зельдович,  
В.Л.Мазарский, А.П.Цвинев, В.Ф.Чумаков

НЕМЕТАЛЛИЧЕСКАЯ МИШЕНЬ  
С ЖИДКИМ ВОДОРОДОМ  
В ИМПУЛЬСНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

*Направлено в ПТЭ*

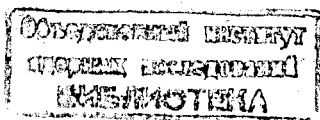
1980

В физике высоких энергий для регистрации треков частиц используются стримерные камеры. Работа их основана на том, что в местах прохождения частиц в электрическом поле напряженностью 20-30 кВ/см возникают стримеры - центры начала развития разрядов. Эти светящиеся точки образуют трек, который и фотографируется. Для того, чтобы разряд не развился до пробоя, электрическое поле подается импульсно в течение 20-30 нс. При изучении взаимодействия налетающих частиц с протонами в стримерную камеру вводят жидководородную мишень /1/.

Сильное импульсное электрическое поле, в котором находится мишень с жидким водородом, налагает на конструкцию и материал мишени особые требования:

1. Все детали мишени, находящиеся в чувствительном объеме стримерной камеры, должны быть сделаны из диэлектриков, т.к. в противном случае возможны пробои и искажения электрического поля.
2. Величина электрического поверхностного сопротивления диэлектриков должна сохраняться в определенных пределах во избежание появления поверхностных разрядов и свечения, которые ухудшают качество фотографий треков.
3. При подаче высокого напряжения необходимо обеспечить вакуум в теплоизоляционном пространстве мишени не хуже 1,3 сПа. Ухудшение вакуума приводит к электрическим пробоям между внутренним сосудом с жидким водородом и вакуумным кожухом.
4. В связи с тем, что мишень работает во взрывоопасных условиях, в которых не исключены электрические пробои и разрушение сосудов, что может привести к аварии, количество водорода в установке должно быть минимальным, а к системе обеспечения мишени водородом и к системе предохранительных устройств предъявляются особые требования.
5. Как и всякая криогенная мишень, мишень для стримерной камеры должна иметь стенки внутреннего сосуда и вакуумного кожуха минимальной толщины.

Принципиальная схема стримерной камеры, жидководородной мишени и системы обеспечения жидким водородом показана на рис. 1. Пучок частиц /2/ из ускорителя направляется в жидководородную мишень /1/, в которой налетающие частицы взаимодействуют с протонами водорода. Продукты взаимодействия /6/ вылетают из мишени в чувствительный объем стримерной камеры /3/. В это время высокое напряжение кратковременно подается



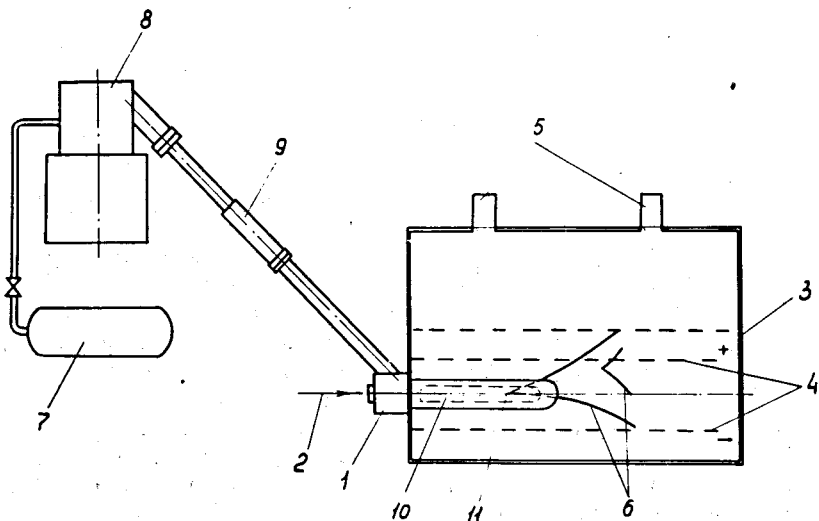


Рис.1. Схема стримерной камеры с жидководородной мишенью. 1 - жидководородная мишень; 2 - пучок частиц из ускорителя; 3 - стримерная камера; 4 - высоковольтные электроды; 5 - фотоаппараты; 6 - вторичные продукты взаимодействия; 7 - ресивер; 8 - холодильная газовая машина; 9 - криогенный трубопровод; 10 - внутренний сосуд мишени с жидким водородом; 11 - точка взаимодействия частицы с протоном водорода.

на электроды камеры /4/ и светящиеся треки фотографируются фотоаппаратами /5/. Стримерная камера с мишенью находится в магнитном поле /магнит на рис.1 не показан/, что помогает определить заряд и массу пролетающих через камеру частиц.

При заполнении мишени жидким водородом газ из ресивера /7/ поступает в холодильную газовую машину /ХГМ/ /8/, там конденсируется и самотеком поступает по криогенному трубопроводу /9/ в мишень. Испарившийся в мишени водород по тому же трубопроводу поступает в ХГМ, где реконденсируется и затем снова стекает в мишень. Объем ресивера рассчитывается из условий, что давление заполнения системы газообразным водородом не должно превышать 0,07 МПа. Это давление определяется прочностью внутреннего сосуда мишени. При работе установки, когда мишень заполнена жидким водородом, давление в системе не должно быть ниже атмосферного. С учетом объема мишени и длины криогенного трубопровода объем ресивера был принят равным 0,5 м<sup>3</sup>

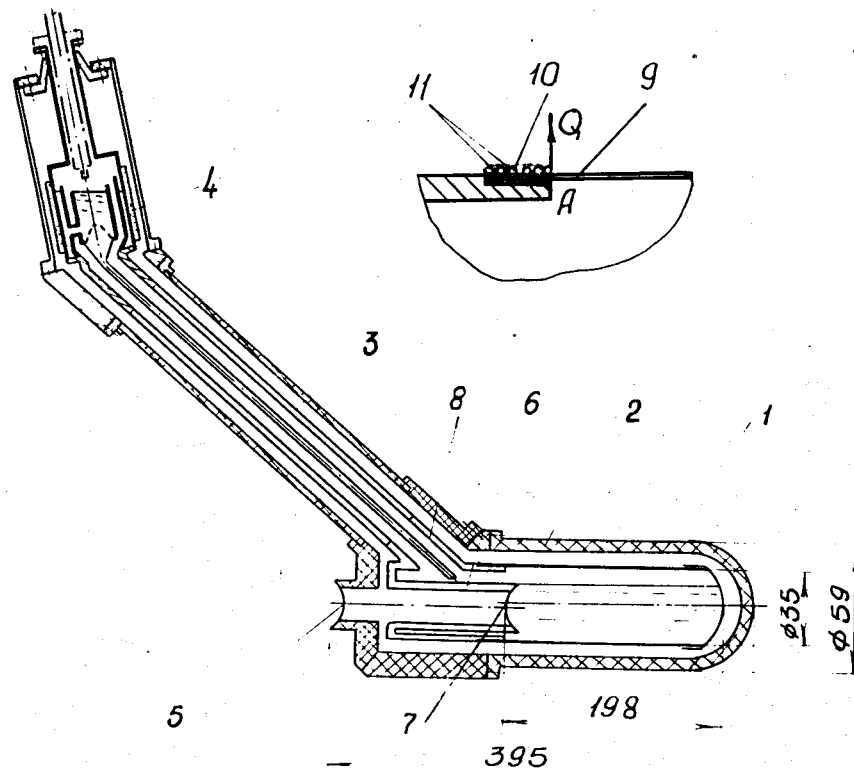


Рис.2. Схема жидководородной мишени. 1 - внутренний сосуд; 2 - вакуумный кожух; 3 - горловина внутреннего сосуда; 4 - адсорбент; 5 - окно вакуумного кожуха; 6 - вытеснитель; 7 - окно вытеснителя; 8 - переходная втулка; 9 - лавсановый цилиндр; 10 - бандаж; 11 - клей.

Основными элементами мишени /рис.2/ являются внутренний сосуд /1/, в котором находится криогенная жидкость, и вакуумный кожух /2/, защищающий мишень от теплопритока из окружающей среды. Внутренний сосуд состоит из тонкостенной оболочки, изготовленной из лавсановой пленки толщиной 100 мкм, переходной втулки /8/ и вытеснителя /6/. Вытеснитель ограничивает пространство для жидкого водорода рабочей части мишени, имеющей минимальное количество вещества стенок. Толщина пленки окна вытеснителя /7/ равна 80 мкм. Съемная часть вакуумного кожуха мишени в зоне чувствительного объема стримерной камеры сделана из пенистого органического материала. На входе пучка

вакуумный кожух имеет окно /5/, толщина которого составляет 100 мкм. Основной отличительной особенностью жидководородной мишени является то, что часть ее, находящаяся в электрическом поле, сделана из диэлектрических материалов: внутренний сосуд изготовлен из лавсана, вакуумный кожух - из пенопласта, горловина внутреннего сосуда /3/ сделана из стеклопластика, а в качестве конструкционного материала, необходимого для соединения элементов мишени, использован капролон.

Изготовление внутреннего сосуда из лавсана связано с двумя основными технологическими операциями: формованием доньшек и склеиванием как отдельных элементов, так и всего сосуда. Окна вакуумного кожуха и вытеснителя, а также доньшко тонкостенной оболочки внутреннего сосуда изготовлены формованием с использованием одного из видов холодной штамповки: вытяжки с подогревом без утонения стенок /2/.

Для склеивания сосудов использовались композиции на эпоксидной основе, такие, как ВТ-10 и "Аралдит". К клеевым соединениям мишени предъявлялись чрезвычайно высокие требования. Это вызвано тем, что клеевые швы работают при криогенных температурах, испытывают при охлаждении сосуда большие градиенты температур, несут силовую нагрузку от давления в сосуде и, что самое главное, должны оставаться при этом вакуумно-плотными, т.к. внутри сосуда - избыточное давление, а снаружи - диффузионный вакуум.

Одним из наиболее опасных мест является клеевое соединение внахлестку тонкостенного лавсанового цилиндра /9/ с переходной втулкой /8/ - рис.2. Известно, что клеевые швы имеют достаточную прочность при работе на сдвиг /срез/ и практически не выдерживают усилий на отрыв. В нашем случае, при повышении давления во внутреннем сосуде мишени, тонкостенная оболочка деформируется, увеличиваясь в диаметре, и тем самым создаются условия, при которых пленка отдирается от втулки. Усилие отрыва можно определить из выражения /4/

$$Q = \left| \frac{p}{\beta} \left( 1 - \frac{\mu}{2} \right) \right|;$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{3(1-\mu^2)}{R^2 \cdot \delta^2}}$$

где Q - усилие отрыва, Н/м; p - давление внутри сосуда, МПа;  $\mu$  - коэффициент Пуассона; R - радиус цилиндра, м;  $\delta$  - толщина тонкостенной оболочки, м.

Для мишени, изображенной на рис.2, при p=0,22 МПа;  $\mu = 0,5$ ; R =  $1,75 \cdot 10^{-2}$  м и  $\delta = 1 \cdot 10^{-4}$  м отрывное усилие значительно превосходит допустимое и равное 177 Н/м. Чтобы не происходило разрушения, клеевой шов бандажуется /10/ капроновой нитью и заливается клеем /11/.

Было показано /2/, что лучшим из существующих в настоящее время материалов для вакуумного кожуха является пенопласт. Вакуумный кожух из пенопласта имеет минимальное количество вещества на пути частиц, что является одним из основных требований, предъявляемых к мишеням. Но пенопласты обладают и существенным недостатком. В вакуумном кожухе из пенопласта трудно, не прибегая к дополнительным мерам, получить необходимый теплоизоляционный вакуум. Причиной этому - большая газопроницаемость. При расчете на прочность необходимо учитывать, что вакуумный кожух мишени в рабочих условиях нагружен внешним давлением и работает на устойчивость, а в аварийных ситуациях должен выдерживать определенное внутреннее давление. Для изготовления вакуумных кожухов использовались пенопласты из полистирола и полиметилакрила. Для уменьшения газопроницаемости внешняя поверхность вакуумного кожуха из пенополистирола покрывалась тонким слоем эпоксида.

В таблице приведены давления, при которых работают внутренний сосуд и вакуумный кожух. Также даны давления испытания и давления, при которых сосуды мишени разрушаются.

Таблица

Давление, МПа	раб.	исп.	разруш.	Примечание
Внутренний сосуд /внутр.давлен./	0,18	0,22	0,5	T=77 К
Вакуумный кожух /внешн.давлен./	0,11	0,14	0,35	T=300 К

Так как мишень работает в электрическом поле, то для теплоизоляции не могут быть использованы эффективные традиционные пути уменьшения теплопритока радиацией, а именно: размещение многослойной изоляции с металлизированными экранами, металлизация поверхностей сосудов и др. Поэтому в мишенях, работающих внутри стримерных камер, теплоприток радиацией составляет 90% от общего теплопритока.

Получение необходимого изоляционного вакуума в мишени осложняется рядом причин: большой газопроницаемостью водорода через лавсановую пленку при T=300 К /3/, невозможностью разместить адсорбционный насос вблизи рабочего объема мишени, большим газоотделением поверхностей сосудов и сложностью определения герметичности внутренней лавсановой оболочки. При тщательном проведении специальных технологических операций во время подготовки мишени к работе удалось достигнуть и про-

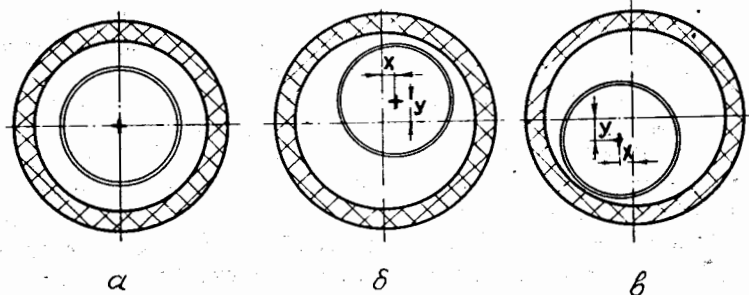


Рис.3. Положение оси внутреннего сосуда относительно вакуумного кожуха: а - первоначальное положение внутреннего сосуда, б - положение внутреннего сосуда при охлаждении, в - окончательное монтажное положение внутреннего сосуда с учетом предстоящего смещения при охлаждении.

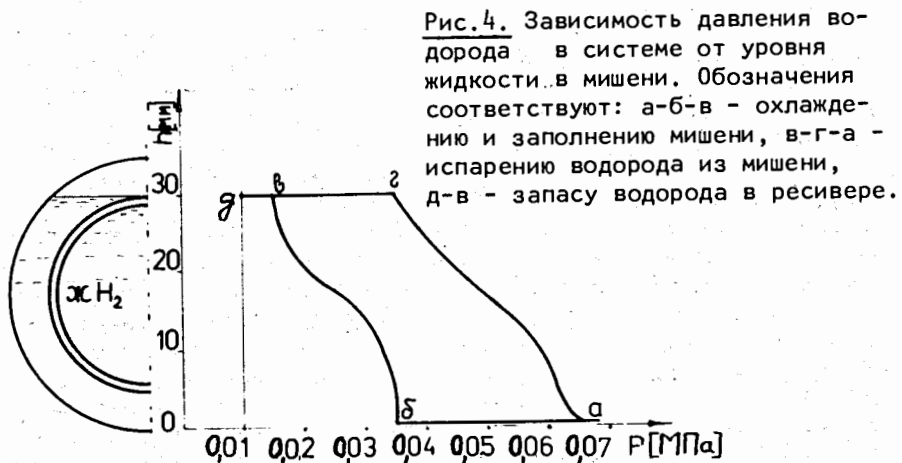


Рис.4. Зависимость давления водорода в системе от уровня жидкости в мишени. Обозначения соответствуют: а-б-в - охлаждению и заполнению мишени, в-г-а - испарению водорода из мишени, д-в - запасу водорода в ресивере.

должительное время поддерживать за счет работы адсорбента /4/ /рис.2/ и криооткачки давление в вакуумном кожухе мишени в пределах  $1,3 \pm 0,13$  сПа.

Использование вакуумного кожуха из пенопласта снижает теплоприток к внутреннему сосуда на 10% по сравнению с кожухом, изготовленным из нетеплоизоляционного материала. Опыты показали, что размещение в вакуумном кожухе мишени 20 слоев бума-

ги СВР-50 уменьшает теплоприток на 20%. В рабочей мишени размещение стеклотумаги для уменьшения теплопритока нецелесообразно, т.к., с одной стороны, она малоэффективна, а с другой - увеличивает количество вещества на пути частиц. Общий теплоприток к мишени составляет 35 Вт.

Скорость охлаждения внутреннего сосуда мишени специально не ограничивалась, а определялась временем захлаживания всей системы, которое зависит от холодопроизводительности ХГМ, массы охлаждаемых частей установки и теплопритока к ним. В данной установке период от пуска ХГМ до заполнения мишени водородом составил 120 мин.

Большие трудности возникли из-за необходимости соосного размещения внутреннего сосуда и вакуумного кожуха. Сложность заключалась в том, что при охлаждении в результате температурных деформаций внутренний сосуд смещается, нарушая соосность. Рассчитать перемещение внутреннего сосуда трудно из-за сложной пространственной геометрии и разнородности используемых материалов. Для получения соосности сосудов в рабочем состоянии был применен способ, заключающийся в следующем. Первоначально, "на тепле" внутренний сосуд /рис.3а/ разместили соосно. После этого мишень охладил и измерили отклонения "X" и "Y" /в результате температурной деформации/ центра окон внутреннего сосуда относительно оси вакуумного кожуха /рис.3б/. Затем мишень отеплили и внутренний сосуд установили симметрично тому положению относительно оси кожуха, в котором он находился при охлаждении /см. рис.3в/.

При проведении физических экспериментов с применением жидководородной мишени необходимо знать с большой достоверностью уровень водорода в мишени. Прямое наблюдение за уровнем водорода в мишени невозможно, так как она находится внутри стримерной камеры. Использование различного типа датчиков для прямого измерения уровня недопустимо, так как внутрь мишени нельзя ввести ни провода, ни импульсные металлические трубки. Поэтому наличие водорода было предложено определять двумя косвенными методами: по давлению водорода в системе и по "выбиванию" частиц при взаимодействии их с водородом. Для первого метода была найдена зависимость уровня жидкости в мишени от давления водорода в системе /рис.4/. Эта зависимость снята при объеме ресивера  $0,5 \text{ м}^3$  и начальном давлении 0,07 МПа.

Определенные неприятности во время комплексных методических пусков были связаны со свечением поверхности мишени. Поверхностное сопротивление диэлектриков, из которых изготовлена мишень, должно быть в определенных пределах. Нарушение этих условий может вызвать разряд, ухудшающий качество фотографий. Свечение удалось ликвидировать аэрозолем "Антистатик", которым была обработана поверхность мишени.

### Характеристики мишени

1. Количество жидкого водорода в мишени - 225 см<sup>3</sup>
2. Длина внутреннего сосуда, заполненного жидким водородом - 198 мм
3. Диаметр рабочей части мишени - 23 мм
4. Количество водорода по оси мишени - 1,37 г/см<sup>2</sup>
5. Количество материала стенок мишени с кожухом из полиметилметакрилата по направлению пучка:
  - на входе (C<sub>5</sub>H<sub>4</sub>O<sub>2</sub>) - 0,024 г/см<sup>2</sup>
  - на выходе (C<sub>5</sub>H<sub>4</sub>O<sub>2</sub>) - 0,013 г/см<sup>2</sup>
  - + (C<sub>5</sub>H<sub>8</sub>O<sub>2</sub>) - 0,049 г/см<sup>2</sup>
6. Точность определения количества водорода вдоль оси мишени - 3,6%.



Рис.5. Следы частиц, полученные на спектрометре РИСК при облучении мишени с жидким водородом пучком  $\pi$ -мезонов с энергией 25 ГэВ на ускорителе ИФВЭ.

Разработка и создание первых в ОИЯИ криогенных мишеней, работающих внутри стримерной камеры, были выполнены в ЛВЭ в период с 1975 по 1979 гг. Первые комплексные методические испытания проведены на камере установки "Резонанс" в марте 1979 года. Продолжительная работа мишени с набором статистики проводилась на спектрометре РИСК в ИФВЭ начиная с сентября 1979 года. На рис.5 показана фотография следов частиц, полученная при облучении мишени с жидким водородом пучком  $\pi$ -мезонов с энергией 25 ГэВ.

Авторы выражают свою глубокую благодарность сотрудникам криогенного отдела ЛВЭ конструкторам Т.Н.Борзуновой, А.И.Калмыковой и В.И.Костырко, механикам М.В.Левину и Ю.П.Павлову, токарям Н.И.Никонову и С.В.Королеву, которые принимали активное участие в создании мишени.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Голованов Л.В. ЭЧАЯ, 1977, том. 8, вып.5.
2. Борзунов Ю.Т. и др. ОИЯИ, 8-8991, Дубна, 1975.
3. Голованов Л.В., Стефанов С.М., Чолаков В.Д. ОИЯИ, 13-12888, Дубна, 1979.
4. Бояршинов С.В. Основы строительной механики машин. "Машиностроение", М., 1973.

Рукопись поступила в издательский отдел  
4 сентября 1980 года.