

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P8 - 5212

С 344.4

Б-823



Ю.Т. Борзунов, Л.Б. Голованов,  
В.Л. Мазарский, А.П. Цвинев

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ПРЕЦИЗИОННАЯ УСТАНОВКА  
С ЖИДКОВОДОРОДНОЙ МИШЕНЬЮ

1970

P8 - 5212

Ю.Т. Борзунов, Л.Б. Голованов,  
В.Л. Мазарский, А.П. Цвинец

ПРЕЦИЗИОННАЯ УСТАНОВКА  
С ЖИДКОВОДОРОДНОЙ МИШЕНЬЮ

8528 / 258  
Среднеазиатский институт  
ядерных исследований  
Библиотека

В ядерной физике для изучения свойств элементарных частиц широко используют жидководородные мишени<sup>1/1</sup>, которые "обстреливают" частицами, летящими от ускорителя. Одним из основных параметров элементарных частиц является полное поперечное сечение взаимодействий. Оно определяется по разности количества частиц, находящихся в пучке до и после прохождения мишени, т.е. степенью поглощения их водородом. Точность определения полного поперечного сечения зависит от точности определения количества водорода на пути частиц, пролетающих через мишень. В Объединенном институте ядерных исследований в Дубне создана установка, позволяющая продолжительное время поддерживать количество водорода на пути частиц с высокой точностью — 0,05%. Общий вид установки показан на рис. 1, схема — на рис. 2.

Установка включает в себя две мишени, одну рабочую (2), заполненную жидким водородом, другую — пустую, для фоновых измерений (на рис. 2 фоновая мишень не показана). Пополнение рабочей мишени водородом осуществляется самотеком из промежуточного сосуда емкостью 50 литров (3), расположенного над ней. 50 литров жидкого водорода хватает на 50 часов непрерывной работы установки. Мишени и промежуточный сосуд установлены на передвижной ферме, позволяющей поочередно устанавливать мишени вдоль пучка частиц. Заполнение промежуточного сосуда и мишени жидким водородом осуществляется из переносных 100- и 50-литровых сосудов Дьюара (1)<sup>2/с</sup> помощью сифона (4). Вентили, контрольно-измерительные приборы и вспомогательное оборудование, необходимые для подготовки установки к работе и поддер-

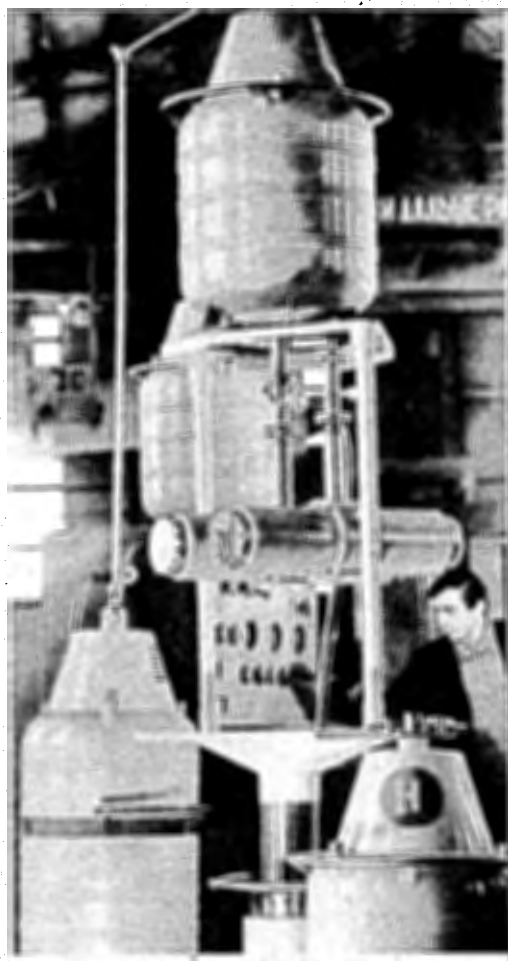


Рис. 1. Общий вид установки с водородной мишенью.

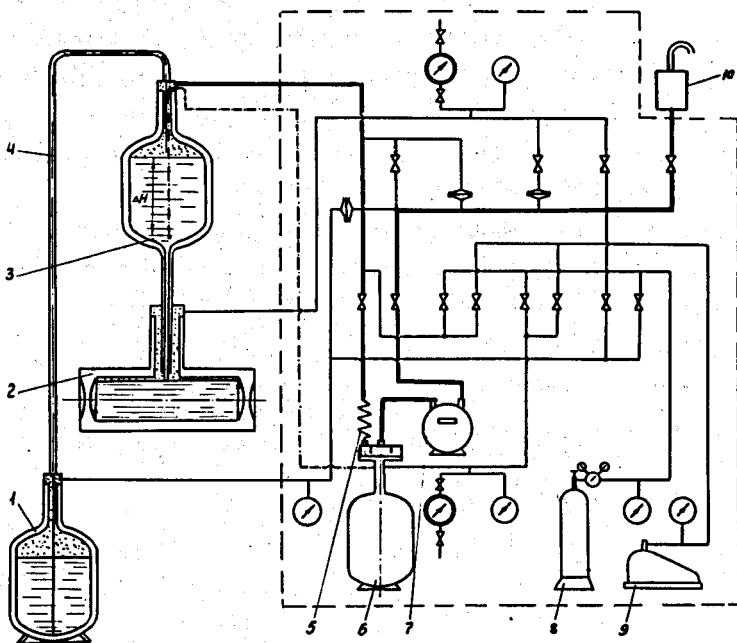


Рис. 2. Схема прецизионной установки с жидководородной мишенью: 1 - сосуд Дьюара; 2 - мишень; 3 - промежуточный сосуд; 4 - сифон; 5 - змеевик-нагреватель; 6 - стабилизатор давления; 7 - газовый счётчик; 8 - баллон с редуктором; 9 - вакуумный насос; 10 - огнепламяпреградитель. Контрольно-измерительные приборы и вентили, изображенные внутри пунктирной линии, размещены на пульте управления, остальные элементы установки - за пультом. Жирной линией показан путь испарившегося водорода от установки при рабочем состоянии мишени. Штрих-пунктирной линией показана трубка стабилизатора давления для компенсации падения уровня в промежуточном сосуде.

жания рабочего режима, размещены на пульте. Связь пульта с мишенью и промежуточным сосудом осуществляется с помощью гибких сифонных шлангов, позволяющих располагать пульт в удобном для работы месте.

Основным элементом установки является мишень (рис. 3). Она состоит из внутреннего цилиндрического сосуда (1) длиной  $\approx 500$  мм, вакуумного кожуха (2) и многослойной изоляции (3) между ними. Для уменьшения количества материала на пути частиц в торце мишени установлены окна из лавсановой пленки толщиной 125 мк (4,5). Крепление окон к внутреннему сосуду и вакуумному кожуху осуществляется механически с помощью прижимных фланцев (6). Поддержание изоляционного вакуума порядка  $1 \cdot 10^{-5}$  мм рт.ст. осуществляется с помощью активированного угля<sup>7/</sup>, прикрепленного к холодной поверхности мишени. Первоначальная откачка осуществляется через вентиль (8), расположенный на кожухе. Заливка мишени водородом и выход испарившегося водорода происходят через горловину мишени (9).

Основным требованием, предъявляемым к установке, является стабильное поддержание с высокой точностью, около 0,05%, количества водорода на пути частиц.

Количество водорода определяется по уравнению

$$q = L \cdot \gamma, \quad (1)$$

где  $L$  - длина мишени;  $\gamma$  - плотность водорода.

Отсюда видно, что для точного определения количества водорода необходимо:

1. Точно знать среднюю длину внутреннего сосуда мишени.
2. Поддерживать постоянную плотность в рабочей части мишени, которая в основном зависит от величины давления над кипящей жидкостью, от степени неоднородности при кипении водорода и от ряда других факторов.

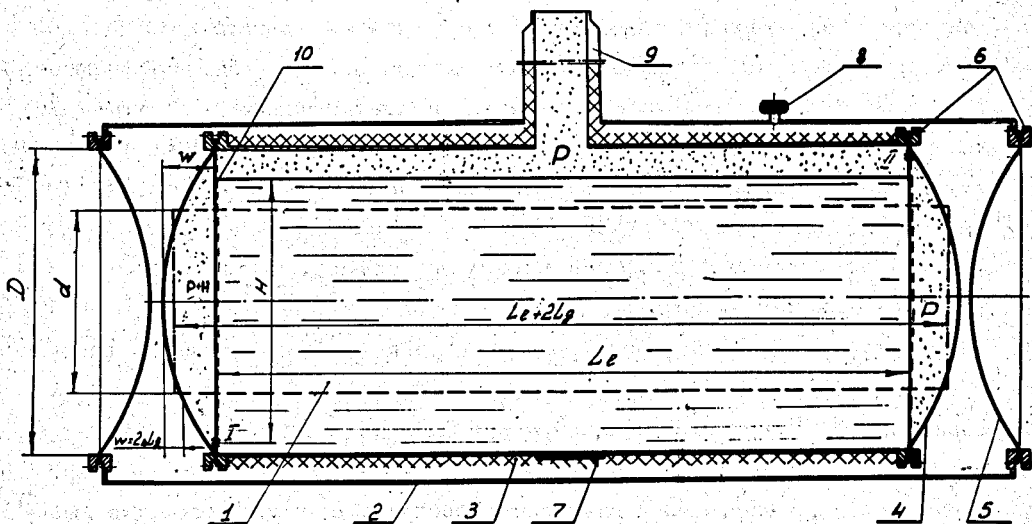


Рис. 3. Схема жидководородной цилиндрической мишени: 1 - внутренний сосуд; 2 - вакуумный кожух; 3 - многослойная изоляция; 4,5 - лавсановые окна (несушие); 6 - прижимные фланцы; 7 - адсорбент; 8 - вентиль; 9 - горловина мишени; 10 - лавсановое окно (ограничивающее).

Уменьшение влияния прогиба лавсановых окон  
внутреннего сосуда мишени при определении  
количества водорода на пути частиц

По одну сторону окон внутреннего сосуда мишени находится водород при атмосферном давлении, по другую — изоляционный вакуум. Лавсановое окно воспринимает перепад давлений, равный одной атмосфере, под действием которого пленка прогибается. Прогиб (рис. 3) достигает значительной величины от 10 до 15 мм в зависимости от толщины пленки, диаметра окон мишени и давления внутри нее. В результате прогиба количество водорода на пути элементарных частиц, пролетающих через мишень в центре, больше, чем на пути частиц, пролетающих у края окна. Для уменьшения ошибки, связанной с прогибом пленки, при определении длины внутреннего сосуда, окна сделаны из двух пленок — одной несущей (4), другой — ограничивающей (10). Несущая пленка толщиной около 125 мк выдерживает перепад давлений в одну атмосферу, имеет сферическую форму и отделяет водород от вакуума. Ограничивающая пленка толщиной 15 мк отделяет жидкий водород от газообразного, является почти плоской и выдерживает только перепад давлений, равный высоте столба жидкого водорода. Для того чтобы ограничивающая пленка не прогибалась, в ней сделано отверстие I или II диаметром 0,3+0,5 мм для выравнивания давления между пленками и внутренним сосудом. Диаметр отверстия выбирался таким образом, чтобы попавшая через него жидкость успевала испариться от теплопритока к окну. Так как плотность газообразного водорода, находящегося в равновесии с жидким, в 50 раз меньше, чем плотность жидкого водорода, то и ошибки от разной длины мишени при такой конструкции окон уменьшаются в 50 раз. Лавсан обладает большим коэффициентом линейного расширения, чем нержавеющая сталь, из которой сделан внутренний сосуд, поэтому он при охлаждении натягивается, и ограничивающая жидкий водород пленка становится плоской. Незначительный прогиб пленки возможен только в результате давления столба жидкого водорода. Для того чтобы исключить влияние этого прогиба, в ограничивающих пленках сделаны отверстия — с одной стороны мишени



в верхней части пленки (II), с другой - в нижней - (I). При расположении отверстия внизу давление между пленками будет больше, чем среднее давление в мишени, на величину, равную половине высоты столба жидкости в мишени. При расположении отверстия сверху давление между пленками будет на ту же величину меньше, чем среднее давление в мишени. Таким образом, при расположении отверстий на разной высоте ограничивающие пленки будут прогибаться в одну и ту же сторону (на рис. 3 показано пунктирными линиями), сохраняя при этом постоянное количество водорода по всему сечению мишени.

#### Защита рабочей зоны мишени от пузырей

В результате теплопритока к внутреннему сосуду из окружающей среды водород в мишени кипит. Пузыри газообразного водорода поднимаются в жидкости, создавая неоднородную плотность в рабочей зоне мишени (рабочая зона определяется диаметром пучка частиц). Чтобы избежать этого, внутрь мишени вставлена обечайка, которая защищает рабочую зону от попадания в нее пузырей. От пузырей, образующихся у краев лавсановых окон, рабочий объем защищен цилиндрическим отбойником, приклеенным к ограничивающей пленке.

#### Поддержание постоянного давления в мишени

Для поддержания постоянной плотности водорода в мишени необходимо над кипящей жидкостью поддерживать постоянное давление, которое может меняться при изменении барометрического давления, а также при изменении высоты столба жидкого водорода в промежуточном сосуде по мере его расхода (см. рис. 2). Давление в мишени определяется давлением над жидкостью в промежуточном сосуде и высотой ее столба.

Поддержание постоянного давления над кипящей жидкостью в промежуточном сосуде осуществляется с помощью стабилизатора/6/, который состоит из двух камер, разделенных мембраной. К нижней камере подсоединен замкнутый теплоизолированный объем с задающим давлением, через верхнюю камеру проходит испарившийся водород от промежуточного сосуда. Если задающее давление в стабилизаторе выше, чем давление в промежуточном сосуде, то мембрана под действием задающего давления прогибается и создает сопротивление газу, проходящему через рабочую камеру стабилизатора. В этом случае давление в промежуточном сосуде над кипящей жидкостью начинает возрастать до тех пор, пока не сравняется с задающим. Такая конструкция стабилизатора позволяет поддерживать постоянное давление над кипящей жидкостью в промежуточном сосуде с точностью  $\pm 0,5$  мм рт.ст. Давление же в мишени определяется давлением в промежуточном сосуде и высотой столба жидкого водорода, поэтому при уменьшении количества жидкости в промежуточном сосуде давление в мишени будет падать. Для того чтобы компенсировать падение уровня в промежуточном сосуде и тем самым поддерживать постоянное давление в мишени, в промежуточный сосуд введена трубка, запаянный конец которой доходит до дна, а другой подсоединен к объему стабилизатора с задающим давлением (на рис. 2 трубка показана штрих-пунктирной линией). Стабилизатор и трубка заполняются газообразным водородом до давления, которое необходимо поддерживать в мишени. Жидкий водород при заполнении промежуточного сосуда конденсируется в трубке стабилизатора. Уровень жидкости в трубке будет равен уровню ее в промежуточном сосуде/3/. Так как часть газа из объема стабилизатора сконденсировалась в трубке, задающее давление в стабилизаторе упало. При падении же уровня жидкости в промежуточном сосуде жидкость в трубке испаряется, и давление в стабилизаторе увеличивается.

Внутренний диаметр трубки выбирается таким образом, чтобы при падении уровня жидкости в промежуточном сосуде на величину  $\Delta H$  задающее давление в стабилизаторе возрастало на величину  $\Delta P$ , равную падению столба жидкости (тогда давление в мишени будет постоянным).

Внутренний диаметр трубки стабилизатора определяется по формуле:

$$d = \sqrt{\frac{4V_0 g}{RT_0}},$$

где:  $V_0$  - объем сосуда стабилизатора с задающим давлением;  $T_0$  - температура газа в сосуде с задающим давлением;  $R$  - газовая постоянная водорода,  $g$  - ускорение силы тяжести.

Газ, задающий давление в стабилизаторе, поддерживается при постоянной температуре с помощью теплоизоляции. При суточном колебании температуры в помещении  $\pm 5^\circ\text{C}$ , температура газа в стабилизаторе колеблется в пределах  $\pm 0,2^\circ\text{C}$ .

Стабилизатор давления и компенсация изменения уровня водорода в промежуточном сосуде позволяют поддерживать давление в мишени с точностью  $\pm 1$  мм рт.ст.

#### Определение количества водорода в мишени на пути частиц

Количество водорода на пути частиц определяется по уравнению (1).

В мишени данной конструкции частицы проходят через жидкий и газообразный водород, поэтому уравнение (1) примет вид

$$G = L_\ell \gamma_\ell + 2L_g \gamma_g, \quad (2)$$

а с учётом точностей определения линейных размеров мишени и плотности водорода оно будет:

$$G = (L_\ell \pm \Delta L_\ell)(\gamma_\ell \pm \Delta \gamma_\ell) + 2(L_g \pm \Delta L_g)(\gamma_g \pm \Delta \gamma_g), \quad (3)$$

где:  $L_\ell$  (см) - средняя длина цилиндрической части мишени, заполненной жидким водородом;  $\Delta L_\ell$  (см) - величина отклонения от средней длины цилиндрической части мишени;  $L_g$  (см) - средняя величина прогиба лавсанового окна внутреннего сосуда мишени в рабочей зоне диаметром  $d$  (см. рис. 3);  $\Delta L_g$  (см) - отклонение от средней ве-

личины прогиба лавсановых окон;  $\gamma_{\ell}$  (г/см<sup>3</sup>) - плотность жидкого водорода в мишени;  $\gamma_g$  (г/см<sup>3</sup>) - плотность газообразного водорода, равновесного с жидким водородом в мишени;  $\Delta\gamma_{\ell}, \Delta\gamma_g$  (г/см<sup>3</sup>) - абсолютные ошибки в определении плотности жидкого и газообразного водорода, связанные с колебанием давления над кипящей жидкостью, точностью измерения температуры и точностью определения параконцентрации водорода.

#### Определение длины цилиндрической части мишени $L_{\ell}$

Длина цилиндрической части мишени измеряется микрометром с точностью 0,01 мм при температуре около 18°C. После проведения ряда измерений между торцами по уплотнительным поверхностям внутреннего сосуда мишени определяется максимальная ( $L_{\text{макс.}}$ ) и минимальная ( $L_{\text{мин.}}$ ) длина мишени в двух диаметрально противоположных точках и берется их среднее значение.

$$\text{Средняя длина мишени} \quad L_{\ell_0} = \frac{L_{\text{макс.}} + L_{\text{мин.}}}{2}$$

Отклонение от средней длины в рабочей части мишени

$$\Delta L_{\ell} = \frac{L_{\text{макс.}} - L_{\text{мин.}}}{2} \cdot \frac{d}{D},$$

где  $d$  - рабочий диаметр мишени (определяется размером пучка) 70 мм;  
 $D$  - диаметр окон внутреннего сосуда мишени, 100 мм.

Для одной из изготовленных мишеней было измерено  $L_{\text{макс.}} = 500,04$  мм,  
 $L_{\text{мин.}} = 499,98$  и определено  $L_{\ell_0} = 500,01$  мм.  $\Delta L_{\ell} = 0,002$  см.

Длина мишени при температуре жидкого водорода (20,4°K) определяется по уравнению:

$$L_{\ell} = L_{\ell_0} \cdot 10^{-5} \left[ \left( \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 10^5 \right)_{290^{\circ}\text{K}} - \left( \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 10^5 \right)_{20^{\circ}\text{K}} \right],$$

где  $\left( \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 10^5 \right)_{290} = 288$  и  $\left( \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 10^5 \right)_{20} = -1,1$  - величины относительных

удлинений при нагревании нержавеющей стали от 0°K до 290°K и от 0°K до 20°K соответственно /4/.

Подставляя численные значения, получаем, что длина мишени при охлаждении от комнатной температуры до температуры кипения жидкого водорода уменьшается на 1,49 мм и имеет  $L_{\ell} = 49,852$  см.

Определение средней величины прогиба лавсанового окна внутреннего сосуда мишени

Лавсановое окно в результате перепада давлений принимает сферическую форму (см. рис. 3). Радиус сферы лавсановой пленки определяется по уравнению:

$$R = \frac{W}{2} + \frac{D^2}{8W},$$

где  $W$  - величина прогиба лавсановой пленки;  $D$  - диаметр окна внутреннего сосуда.

Величина прогиба лавсановой пленки  $W$  измеряется при перепаде давления 1 атм. и температуре пленки, равной  $77^{\circ}\text{K}$  (для пленки толщиной 125 мк и диаметром 100 мм прогиб равен 10 мм).

Величина прогиба в рабочей части мишени определяется по уравнению:

$$W_{\text{раб.}} = R - \sqrt{R^2 - \frac{d^2}{4}},$$

где  $d$  - диаметр рабочей части мишени (70 мм);  $R$  - радиус сферы лавсановой пленки (130 мм).

Для данной мишени  $W_{\text{раб.}} = 5$  мм.

Тогда средняя величина прогиба лавсанового окна будет равна

$$L_g = \left( W - \frac{W_{\text{раб.}}}{2} \right), \quad L_g = 0,75 \text{ см.},$$

а максимальное отклонение от средней величины прогиба лавсановых окон в пределах рабочего диаметра мишени будет:

$$\Delta L_g = \pm \frac{W_{\text{раб.}}}{2}, \quad \Delta L_g = 0,25 \text{ см.}$$

## Определение плотности жидкого и газообразного водорода

Плотность жидкого и газообразного водорода была взята по данным NBS /5,6/ (см. рис. 4,5,6). Величины плотности жидкого и газообразного параводорода при давлении 780 мм рт.ст. (давление, при котором находится водород в мишени) равны  $\gamma_{\ell} = 0,07068 \text{ г/см}^3$  и  $\gamma_g = 0,00137 \text{ г/см}^3$ .

Зависимость изменения величины плотности жидкого и газообразного водорода от изменения давления, температуры и параконцентрации водорода

Зависимость изменения величины плотности жидкого и газообразного водорода от изменения давления, температуры, параконцентрации водорода (см. таблицу 1) были определены по данным NBS /5,6/ (см. рис. 4,5,6). Полученные данные являются усредненными для диапазона температур 20–21°K.

Таблица 1

Изменяемый параметр	Изменение плотности		Примечание
	жидкого	газообразного	
давление	$4,92 \cdot 10^{-6} \frac{\text{г/см}^3}{\text{мм рт.ст.}}$	$1,43 \cdot 10^{-6} \frac{\text{г/см}^3}{\text{мм рт.ст.}}$	для параводорода
температура	$11,6 \cdot 10^{-4} \frac{\text{г/см}^3}{\text{град.}}$	$3,7 \cdot 10^{-4} \frac{\text{г/см}^3}{\text{град.}}$	для параводорода
параконцентрация	$2,65 \cdot 10^{-6} \frac{\text{г/см}^3}{\% (\text{p-H}_2)}$	$8 \cdot 10^{-8} \frac{\text{г/см}^3}{\% (\text{p-H}_2)}$	при давлении 760 мм рт.ст.

Давление в мишени поддерживается с точностью  $\pm 1$  мм рт.ст. Температура водорода может быть измерена с точностью 0,01°, а его параконцентрация определяется с точностью до 1%.

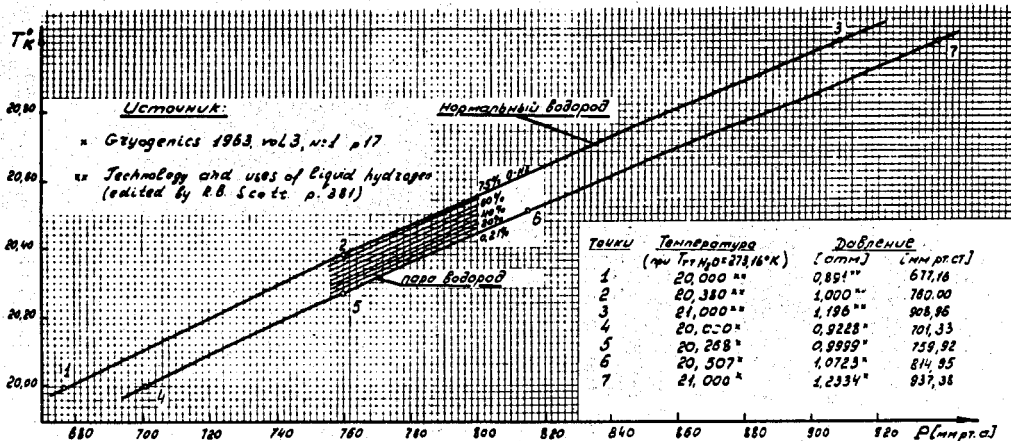


Рис. 4. Зависимость давления насыщенных паров нормального водорода и параводорода от температуры.

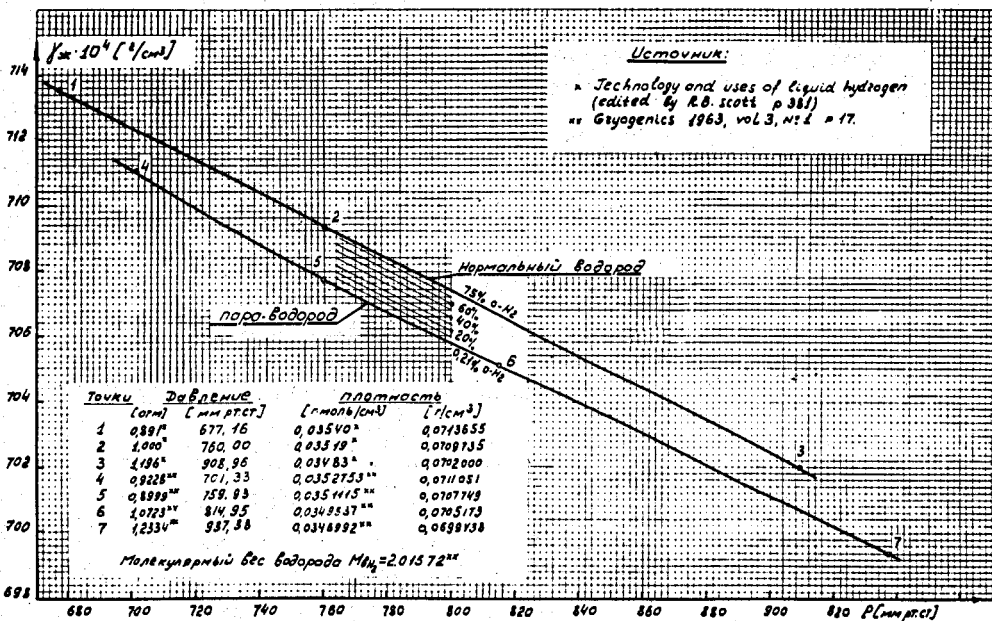


Рис. 5. Зависимость плотности от давления жидких нормального водорода и параводорода, равновесных с паром.

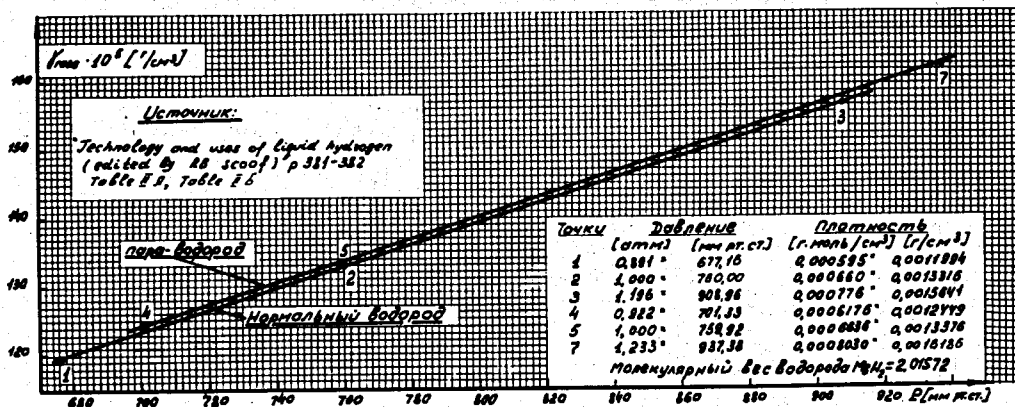


Рис. 6. Зависимость плотности от давления газообразных нормального водорода и параводорода, равновесных с жидкостью.

Учитывая точность измерения параметров водорода в мишени и зависимость плотности его от изменения этих параметров (см. таблицу 1), находим, что ошибка при измерении плотности жидкого водорода составляет  $\Delta \gamma_{\ell} = 19,6 \cdot 10^{-6} \text{ г/см}^3$ , а ошибка при измерении плотности газообразного водорода составляет  $\Delta \gamma_{\text{г}} = 4,2 \cdot 10^{-6} \text{ г/см}^3$ . После упрощения уравнение 3 примет вид:

$$G = L_{\ell} \cdot \gamma_{\ell} + 2L_{\text{г}} \cdot \gamma_{\text{г}} \pm (L_{\ell} \cdot \Delta \gamma_{\ell} + \Delta L_{\ell} \cdot \gamma_{\ell} + 2L_{\text{г}} \gamma_{\text{г}} + 2\Delta L_{\text{г}} \gamma_{\text{г}}).$$

Подставляя численные значения, получаем:

$$G = 3,525 \pm 0,00171 \text{ г/см}^2.$$

Относительная ошибка измерения количества вещества на пути частиц составит 0,05%.



## Количество вещества лавсановых окон на пути частиц

На пути частиц находится 4 лавсановых окна толщиной 125 мк и 2 ограничивающие лавсановые пленки толщиной 15 мк. Общая толщина лавсана 530 мк, удельный вес  $1,38 \text{ г/см}^3$  [7]. Общее количество лавсана равно 0,07314 г, что составляет около 2% от количества водорода на пути частиц.

## Л и т е р а т у р а

1. A. Citzon et al., *Physical Review*, vol. 144, 1105 (1966).
2. Ю.Т. Борзунов, Л.Б. Голованов. "Криогенное, кислородное и автогенное машиностроение", 1969, №1.
3. Л.Л. Бевилогуа, Ф.К. Ланге. ПТЭ №5, 1960, стр. 144.
4. Russell B. Scott. *Cryogenics Engineering* 1959 p. 333.
5. H.M. Roder et al. *Cryogenics*, vol. 3, No 1. 1963, p. 16.
6. Russell, B. Scott. *Technology and Uses of Liquid Hydrogen*. 1964, p. 381.
7. В.В. Коршак. "Гетерогенные соединения". Изд. АН СССР, Москва, 1958.

Рукопись поступила в издательский отдел

2 июля 1970 года.