

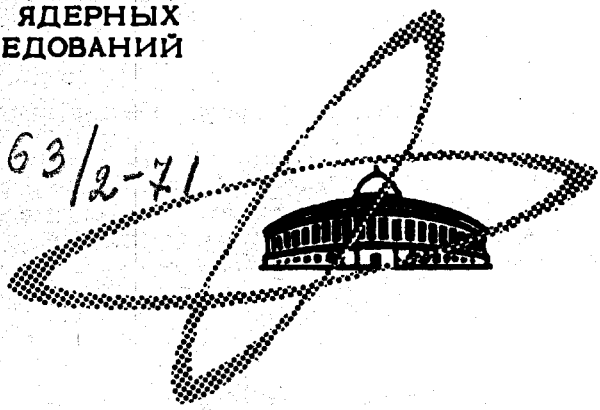
20/411-71

5-262
ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

4263/2-71

P13 - 6058



В.Д. Бартнев, А.И. Валевич, Ю.К. Пилипенко,
В.В. Смелянский

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ПОЛУЧЕНИЕ
СТРУЙНОЙ МИШЕНИ
ИЗ СКОНДЕНСИРОВАННОГО ВОДОРОДА
В ВАКУУМЕ

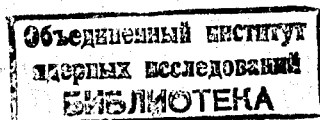
1971

P13 - 6058

В.Д. Бартенов, А.И. Валевич, Ю.К. Пилипенко,
В.В. Смелянский

ПОЛУЧЕНИЕ
СТРУЙНОЙ МИШЕНИ
ИЗ СКОНДЕНСИРОВАННОГО ВОДОРОДА
В ВАКУУМЕ

Направлено в ПТЭ



Введение

Как сообщалось ранее /1,2/, при изучении протон-протонного и протон-дейтронного рассеяния использовалась газовая струйная мишень, установленная на внутреннем пучке ускорителя.

Настоящая работа является продолжением развития методики струйных мишеней и направлена на улучшение параметров струи.

Опыт работы со струйной газовой мишенью показывает, что ее возможности ограничиваются ввиду следующих обстоятельств:

- а) относительно большая ширина струи (3-4) см приводит к увеличению ошибок в определении углов эмиссии вторичных частиц;
- б) недостаточная плотность мишени увеличивает необходимое время работы на ускорителе;
- в) в камеру ускорителя впускается большое количество газа.

Количество газа, впускаемого за цикл в вакуумную камеру ускорителя, равно:

$$G = F v \rho \Delta t = \frac{\pi}{4} d v \gamma \Delta t ,$$

где F - сечение струи, v - скорость потока, ρ - плотность газа, Y - количество вещества на пути пучка по диаметру струи, d - диаметр струи, Δt - время существования струи.

Из уравнения видно, что при данном количестве вещества на пути пучка Y расход газа возрастает пропорционально скорости потока и диаметру струи. Если ширина пучка значительно меньше ширины струи, то большая часть газа расходуется бесполезно, не попадая в зону пучка.

Количество выпускаемого газа - очень важный параметр, т.к. определяет производительность откачивающего криогенного насоса, длительность его работы без отепления для удаления осадка. Что особенно важно, доля газа, не попавшего в ловушку насоса и рассеявшегося по камере ускорителя, резко возрастает при увеличении количества выпускаемого газа. Это ведет к порче вакуума, а следовательно, к возникновению фона, из-за взаимодействия пучка с молекулами рассеянного газа, что мешает измерениям. На основании вышесказанного очевидно, что уменьшение ширины струи и ее скорости приведет к сокращению количества выпускаемого газа, что существенно улучшит условия работы. С другой стороны, для лучшей коллимации струи энергию молекул газа надо полнее переводить в кинетическую, т.е. разгонять поток до сверхзвуковых скоростей. Выход может быть найден в переходе от сверхзвуковой струи газа к потоку более медленно движущихся капелек метастабильной жидкости или твердых частичек. Мишени такого типа были предложены К.Д. Толстовым ^{/3/}. Мы приводим некоторые результаты наших исследований по изучению возможностей создания струйных мишеней из

^{x/} Очевидно, что после истечения из сопла жидкость будет вскипать, образуя газовую и твердую фазы.

сконденсированного газа в виде потока капелек метастабильной жидкости или твердых частичек.

Некоторые способы получения струйных сконденсированных мишеней

1. Жидкий водород, находящийся в объеме при температуре 14°K (у тройной точки, чтобы уменьшить долю пара при истечении в вакуум), подается к соплу с помощью холодного запорного клапана, установленного непосредственно перед ним. Такая схема ненадежна и небезопасна. С одной стороны, клапан, работающий при температурах жидкого водорода, может оказаться невакуумно-плотным из-за поломки или из-за отложений льда твердого водорода в месте уплотнения клапана. Это приведет к вытеканию большого количества водорода в камеру ускорителя. С другой стороны, возможны закупорки льдом выходного отверстия клапана или сопла в конце цикла истечения, что потребует удаления водорода, отогрева относительно массивных элементов водородного тракта (таких, как клапан).

2. Имеется другой способ получения струи сконденсированного газа: охлаждать, конденсировать, и, если требуется, замораживать такое количество газообразного водорода, которое будет впущено в камеру ускорителя в течение одного цикла. При этом порция газообразного водорода, впускаемого в мишень, будет дозироваться с помощью электромагнитного клапана, работающего при комнатных температурах. В этом случае количество водорода, накопленное в водородном тракте мишени, будет минимальным.

Такая схема работы технологически проста, но требует тщательного регулирования температуры охлаждения импульсно подаваемого к

сопла водорода. Сопло должно работать при температуре, которая немного выше температуры замерзания водорода $13,95^{\circ}\text{K}$. Если все же замерзание водорода произойдет, то сопло и часть подводящей линии могут быть прогреты в течение нескольких секунд, т.к. их масса мала. Этот способ был принят в наших опытах.

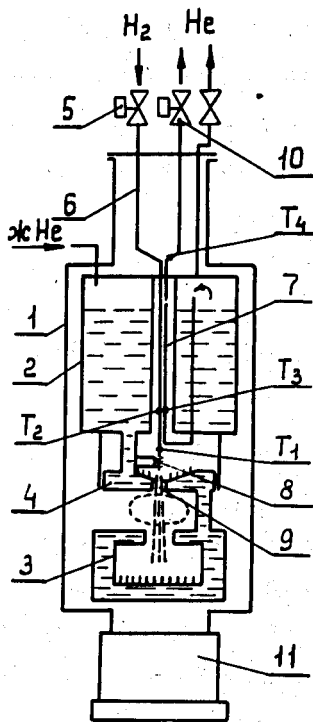


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 - вакуумная камера, 2 - объем жидкого гелия, 3 - ловушка нижнего крионасоса, 4 - верхний крионасос, 5 - клапан подачи газообразного водорода, 6 - водородный капилляр, 7 - теплообменник, 8 - переохладитель с нагревателем, 9 - коллиматор, 10 - клапан выхода испаряющегося гелия, 11 - вакуумный диффузионный насос; $T_1 + T_4$ - платиновые термометры сопротивления.

Схема экспериментальной мишени показана на рис. 1. Сжатый водород под давлением $1 + 20$ ат с помощью электромагнитного клапана (5) подается в теплообменник (7), где охлаждается потоком испаряющегося из крионасоса гелия, затем поступает в переохладитель с встроенным нагревателем (8). Переохладитель установлен непосредственно перед соплом или коротким капилляром диаметром $0,3 + 0,5$ мм. В переохладителе водород конденсируется или замораживается в зависимости от его температуры. Мы исследовали два режима работы.

В первом режиме поступающий водород сразу вымерзал в переохладителе и капилляре, блокируя его выходное отверстие, выполняя роль холодного запорного клапана. Затем, в нужный момент, импульсно включали нагреватель переохладителя, и подплавившийся водород вылетал в вакуумную камеру (1) в виде очень мелких капелек жидкости и кусочков льда. Вакуум в экспериментальной камере между циклами поддерживался 10^{-5} тор. Ухудшения вакуума в момент вымораживания водорода практически не наблюдалось. Для того, чтобы исключить влияние газового объема водородного капилляра до переохладителя в момент выдавливания плавящегося водорода, на нем был поставлен дополнительный переохладитель, используемый как отсекающий клапан. Переохладители хорошо "открывались" и "закрывались" с помощью нагревателей. На рис. 2 показана очередность подачи электрических импульсов на катушку электромагнитного клапана и нагреватели основного и дополнительного переохладителей. Схема с двумя переохладителями работала, но результаты были визуально такие же, как в предыдущем случае, т.е. дополнительный переохладитель не оказывал существенного влияния на форму струи. Точность появления струи во времени (по порче вакуума) была не хуже чем $0,1$ сек. Расход газообразного водорода составлял $60 \text{ см}^3/\text{цикл}$ при длительности открытия клапана (5) в момент намораживания в основном переохладителе $\Delta t = 200$ мсек. Струя имела

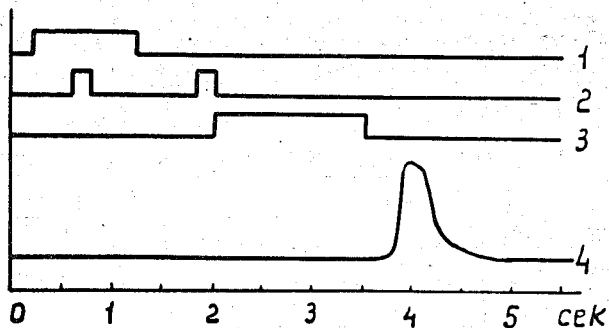


Рис. 2. Схема подачи импульсов на клапан газообразного водорода и нагреватели переохладителей. 1 - нагреватель дополнительного переохладителя, 2 - клапан подачи газообразного водорода, 3 - нагреватель основного переохладителя, 4 - вакуум в камере.

угол расходимости примерно 60° . В некоторых случаях в конце истечения из капилляра появлялся стерженек твердого водорода длиной 10 + 20 мм, который отламывался в момент начала следующего истечения.

Во втором режиме работы температура переохладителя поддерживалась с помощью постоянно включенного нагревателя такой, при которой вымораживания водорода не происходило. При давлении водорода 12 ат удалось (очень нестабильно) получать стерженьки твердого водорода 0,5 мм и длиной 50 + 80 мм. При еще более высокой температуре переохладителя струя появлялась примерно через 60 + 80 мсек после открытия водородного клапана и выглядела, как влажный пар. По-видимому, это были капельки метастабильной жидкости или твердые частички, образовавшиеся из них. Струя исчезала в момент закрытия клапана. Расходимость струи была, как и ранее, около 60° и практически не зависела от того, какое использовалось сопло: игла для инъекции ϕ 0,3 мм длиной 10 мм или расширяющееся сопло с диаметром шейки 0,35 мм и диаметром на выходе 1,5 мм.

Возможно, что преимущество сопла можно было бы установить, исследовав фоновые условия мишени, обуславливаемые порчей вакуума в камере ускорителя.

Коллимация струи

Для того, чтобы собрать струю в слабо расходящийся пучок, сразу за соплом был установлен коллиматор (9, рис. 1). Коллиматор изготавливался из фторопласта, чтобы уменьшить оседание на нем частиц твердого водорода. Исследовались различные диаметры и длины коллиматоров. В окончательных наших опытах мы приняли коллиматоры с внутренним диаметром 5+6 мм и длиной 30+40 мм. Расходимость струи на выходе из коллиматора уменьшилась до $5 \cdot 10^0$ (рис. 6). В случае газовой струи коллимацию осуществить невозможно. В лучшем случае удается срезать частично периферические слои струи, что связано с режимом уменьшением доли используемого газа.

Поддержание температурного режима

Стабильность работы мишени в большой степени зависит от точности поддержания температурного режима. Задача осложняется тем, что процесс охлаждения водорода носит нестационарный характер: водород подается импульсно.

Охлаждение газа в основном происходит в теплообменнике (7) за счет холода паров испаряющегося гелия. Окончательное охлаждение водорода на несколько градусов (а иногда только снятие теплопритока с элементов конструкции, чтобы предотвратить нагревание водорода) производится в переохладителе (8) за счет холода жидкого гелия на участке 1-2 см в непосредственной близости от выходного среза сопла или капилляра. Это необходимо, чтобы уменьшить возможность замерзания водорода где-либо в трубке предварительного теплообменника.

Теплообменник выполнен в виде двух медных трубок, спаянных между собой на длине 420 мм: гелиевая трубка ϕ 5x3 м, водородный капилляр ϕ 1,6/0,8. На трубке и капилляре намотаны малоинерционные платиновые термометры сопротивления ($T_1 + T_4$), залитые эпоксидной смолой для обеспечения хорошего теплового контакта со стенками трубок в вакууме.

Большую роль в работе теплообменника играет его теплоемкость. Нам не удавалось поддерживать необходимый температурный режим теплообменника, регулируя количество охлаждающего гелия. Водород часто замерзал в капилляре. Тогда было предложено осуществить импульсную подачу холодного гелия в теплообменник с помощью электромагнитного клапана (10), работающего синхронно с клапаном подачи водорода. В момент закрытия клапана теплообменник начинает заметно прогреваться из-за теплопритока извне. После подачи охлаждающего гелия он вновь начинает остывать. На рис. 3 показана очередность команд на клапаны. Увеличивая величину задержки Δt_3 , можно наблюдать, как струя становится все более видимой, а затем исчезает из-за замерзания водорода.

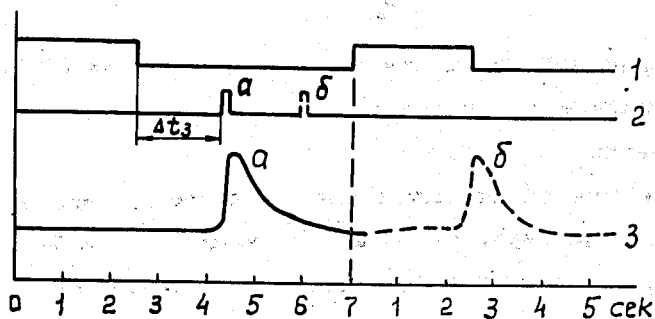


Рис. 3. Схема подачи импульсов на клапаны газообразного водорода и испаряющегося гелия. 1- клапан испаряющегося гелия, 2 - клапан газообразного водорода, 3 - вакуум в камере, а - режим получения струи в момент подачи газообразного водорода, б (пунктир) - получение струи в режиме "самозапуска".

В некоторых наших опытах мы получали струю в режиме "самозпуска". Это достигалось следующим образом. В момент, когда температура теплообменника была низка, в нем намораживался водород (импульс "б" на кривой 2). Затем при следующем прогреве теплообменника появлялась очень хорошо видимая струя (импульс "б" на кривой 3). Время появления струи с большой точностью совпадало с временем начала подачи гелия в теплообменник. Интересно отметить, что в этом случае струя обычно выглядела более плотной, чем при ее непосредственном образовании в момент подачи водорода (3а).

Во время подачи водорода температура холодного конца теплообменника резко возрастала с 5° до 14°K , а затем снова понижалась. Абсолютная точность измерения температур теплообменника невелика ($\pm 2^{\circ}$), т.к. термометры надо было сделать миниатюрными и малоинерционными. Термические деформации, возникающие при изготовлении и работе термометров, требовали индивидуальной калибровки каждого термометра. Конструкция экспериментальной установки не позволяла это сделать. Показания термометров записывались быстродействующими потенциометрами.

Вакуум

Величина, до которой ухудшается вакуум в момент истечения, и скорость его восстановления имеют принципиальное значение для работы мишени и ускорителя.

На рис. 4 показано теплосодержание жидкого и твердого водорода в зависимости от температуры сопла ^{/5,6/}. В случае адиабатического расширения газа теплосодержание расходуется на кинетическую энергию поступательно движущейся струи Δi_c и на образование пара $\Delta i_{исп.}$.

$$m \Delta i = m_c \Delta i_c + m_{п} \Delta i_{исп.} = A \left(\frac{c_{кс}^2}{2g} m_{кс} + \frac{c_{пс}^2}{2g} m_{пс} \right) + (m_{пс} + m_{пд}) r_{пар.}$$

$$m_c = m_{kc} + m_{pc}; \quad m_{\Pi} = m_{pc} + m_{pd}; \quad m = m_{kc} + m_{pc} + m_{pd}.$$

Здесь m , m_c , m_{Π} , m_{kc} , m_{pc} , m_{pd} - количество газа: общее, струи, пара, конденсата струи, пара диффузного; $r_{\text{пар}}$ - скрытая теплота испарения;

c_{kc} , c_{pc} - скорости конденсата и пара струи; A - термический эквивалент работы.

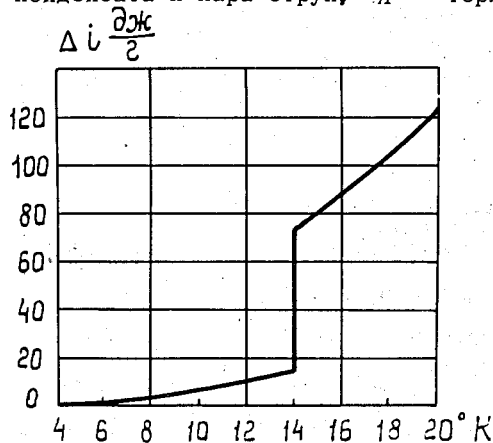


Рис. 4. Теплосодержание жидкого и твердого водорода в зависимости от температуры.

Рассмотрим, на что расходуется теплосодержание вытекающего в вакуум жидкого водорода в следующих предельных случаях: 1 - пар в струе отсутствует ($m_{pc} = 0$), испарение жидкого водорода идет на образование диффузного пара ($m_{\Pi} = m_{pd}$); Π - кинетическая энергия конденсированной составляющей струи мала, т.к. мала ее скорость ($c_{kc} = 10 + 20$ м/сек).

В расчетах табл. 1 приняты температура жидкого водорода перед соплом 14°K , температура струи в момент входа в горловину крионасоса $4,2^{\circ}\text{K}$. Доля диффузного пара от количества впускаемого водорода (12%) определена экспериментально по ухудшению вакуума в момент цикла. Длительность струи 150 мсек, скорость потока перед соплом $v = 0$, диаметр струи 10 мм, $\Delta i_{14^{\circ}-4,2^{\circ}} = 730$ дж/г (см.рис.4), $r_{\text{пар}} = 453$ дж/г.

Таблица 1

	I	II
1	2	3
1 Количество водорода, выпускаемого в вакуум, m (г/цикл)	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$(30 \text{ см}^3/\text{цикл})$
2 Количество диффузного пара $m_{\text{пд}}$ (г/цикл)	$3,6 \cdot 10^{-4}$	
3 Количество пара струи $m_{\text{пс}}$ (г/цикл)	0	$7,4 \cdot 10^{-5}$
4 Количество конденсата струи $m_{\text{кс}}$ (г/цикл)	$2,44 \cdot 10^{-3}$	$2,37 \cdot 10^{-3}$
5 Доля пара $(m_{\text{пс}} + m_{\text{пд}}) / m$	0,12	0,155
6 Скорость конденсата струи $c_{\text{кс}}$ (м/сек)	186	20
7 Скорость пара струи $c_{\text{пс}}$ (м/сек)	-	500
8 Разность теплосодержаний водорода $m \Delta i_{14^\circ - 4,2^\circ}$	0,206 (100%)	
9 Кинетическая энергия конденсата струи $A \frac{c_{\text{кс}}^2}{2g} m_{\text{кс}}$ (дж)	0,043 (21%)	$4,65 \cdot 10^{-4} \approx 0$
10 Кинетическая энергия пара струи $A \frac{c_{\text{пс}}^2}{2g} m_{\text{пс}}$ (дж)	0	0,009 (4,4%)
11 Количество тепла, расходуемое на испарение водорода $(m_{\text{пс}} + m_{\text{пд}}) r_{\text{пар}}$ (дж)	0,163 (79%)	0,197 (95,6%)
12 Плотность струи ρ (г/см ³)	$1,1 \cdot 10^{-6}$	10^{-5}

Из таблицы видно, что на кинетическую энергию струи расходуется только небольшая часть общего запаса теплосодержания. Затвердевание и охлаждение твердого водорода до гелиевых температур в основном идет за счет испарения части жидкости: 12+15%. В случае температуры жидкого водорода перед соплом 20°К эта цифра вырастает до 21%. Если из сопла

выдавливает твердый водород при $13,95^{\circ}\text{K}$, то количество пара уменьшится до 3%. Ухудшение вакуума определяется количеством диффузного пара ($m_{\text{пд}}$) и поэтому его желательно уменьшать, соответственно увеличивая количество пара в струе ($m_{\text{пс}}$). Как указывалось ранее^{14/} и проверено повторно, струя, попавшая в ловушку насоса, захватывается практически полностью. Кинетическая энергия струи вновь переходит в тепловую в момент торможения о дно ловушки крионасоса и воспринимается жидким гелием.

Диффузная составляющая пара распространяется по вакуумной камере и затем откачивается насосами. Скорость откачки определяется из уравнения

$$P = P_0 e^{-\frac{\Sigma Q t}{V}}$$

при $P \gg P_{\text{пред}}$. Здесь P_0 - начальное давление, ΣQ - производительность насосов, V - объем вакуумной камеры, $P_{\text{пред}}$ - предельное значение вакуума, t - время.

В нашей экспериментальной установке постоянная времени откачки была равна

$$\frac{\Sigma Q}{V} = \frac{900}{150} = 6 \text{ сек}^{-1}$$

Типичная осциллограмма изменения вакуума в момент цикла показана на рис. 5. В случае газовой струи вакуум восстанавливается быстрее, чем в случае струи из сконденсированного газа. Это объясняется тем, что на выходе из сопла иногда оседают твердые частички, возгонка пара с которых происходит относительно медленно.

Мы не наблюдали какого-либо изменения вакуума, когда на горловину крионасоса (ϕ 50 мм) установили майларовый цилиндр высотой 80 мм, как бы приблизив ловушку вплотную к выходному сечению коллиматора. Это можно объяснить тем, что газ, который приводит к ухудшению вакуума, рассеивается в зазоре между соплом и коллиматором. В связи

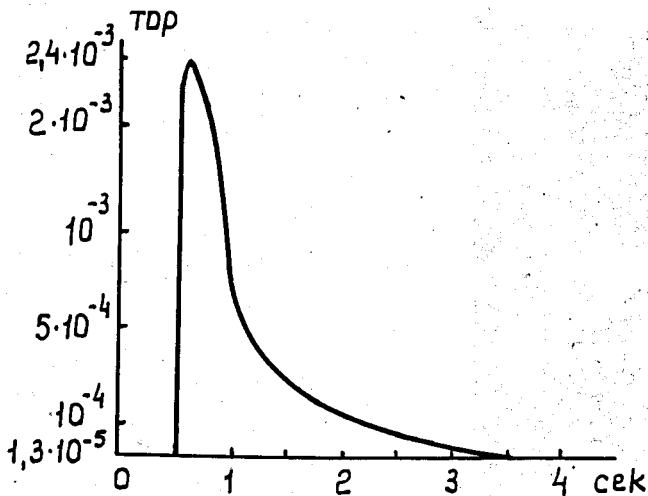


Рис. 5. Изменение вакуума в момент прохождения струи ($P_{H_2} = 3,5$ атм, длительность открытия клапана равнялась 150 мсек, расход водорода $30 \text{ см}^3/\text{цикл}$). Вакуум измерялся с помощью датчика ММ-13М-4, откалиброванного на воздухе.

с этим сопло было помещено в камеру верхнего крионасоса (4), соединяющегося с вакуумной камерой через канал с коллиматором (9), рис. 1. Амплитуда порчи вакуума осталась прежней, восстановление вакуума стало происходить быстрее.

Индикация струи и ее параметры

Струя снималась камерой "Конвас" со скоростью съемки 32 кадра в секунду (рис. 6). Для привязки появления струи ко времени у струи была установлена неоновая лампочка - отметчик времени закрытия и открытия клапана подачи водорода.

Было замечено, что видимая струя появляется через некоторое время после подачи водорода. Исчезновение струи происходит одновременно к закрытием клапана. Струя не видна в тот момент, когда теплообменник наиболее холодный. Установлено, что время существования невидимой струи уменьшается при увеличении расхода водорода. На фотографиях второй и третьей струи, выпущенных вслед за первой с интервалом

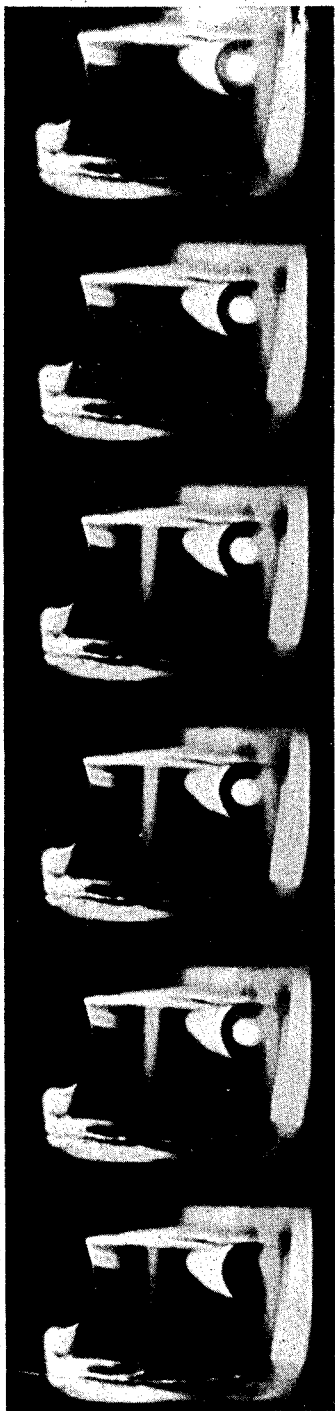


Рис. 6. Струя водорода в вакуумной камере ($P_{H_2} = 6$ атм, длительность открытия клапана равнялась 150 мсек, скорость съемки 32 кадра в сек). Лампочка указывает длительность подачи электрического импульса для открытия клапана. Видимая ширина струи 8 мм. Наличие струи на последнем кадре объясняется механической задержкой закрытия клапана (25 мсек).

0,5-0,7 сек, наблюдалась примерно та же картина. По-видимому, это явление связано с процессом образования конденсированной или даже твердой пленки на внутренней поверхности капилляра, на что расходует-ся значительная часть водорода, поступающего в первый момент.

При длительности открытия клапана подачи водорода 75 мсек наблюдалось усиление струи от первого к третьему импульсу, а при больших длительностях (150 мсек) - наоборот, ослабление. Первое можно объяснить тем, что уменьшается вымораживание водорода, вызванное переохлаждением теплообменника, а второе - перегревом теплообменника из-за большого количества пропущенного водорода ($\Sigma \Delta t = 150 \times 3 = 450$ мсек). То есть для уменьшения доли времени, когда струя невидима, целесообразно делать ее более длительной (≈ 200 мсек), исходя из ограничений, вызванных "фоном" от порчи вакуума.

Для сравнения в табл. 2 приводятся некоторые параметры газовой струи и струи из сконденсированного газа.

Таблица 2

	Время подачи, мсек	Количество выпускаемого H_2 , см ³ /цикл	Ширина струи на расстоянии 30 мм от сопл. устр-ва	Количество вещества, г/см ²
Газовая струя	75+100	80+100	30+40	10^{-7}
Струя из сконденсированного газа	150	30+50	8+13	$1,1 \cdot 10^{-6}$ х/

х/ При расчетах количества вещества на пути пучка T_e была принята равной 14°К и скорость сконденсированной струи - 186 м/сек (см. табл. 1).

В ы в о д ы

1. Охлаждая импульсно подаваемый в теплообменник водород, можно получать в вакууме струю из сконденсированного газа. В ряде случаев удалось получить стерженьки твердого водорода ϕ 0,5 мм и длиной 50+80 мм.

2. Фторопластовый коллиматор с внутренним диаметром 5-6 мм и длиной 30+40 мм, установленный после сопла, собирает сконденсированную струю в пучок с малым углом расходимости. Видимая ширина струи 8+13 мм на расстоянии 30 мм от коллиматора, что почти в 4 раза меньше ширины газовой струи.

3. Ориентировочная плотность сконденсированной струи $\approx 10^{-6}$ г/см³. Количество впускаемого газа при этом сократилось в 2-3 раза.

Авторы благодарят А.Г. Зельдовича и В.А. Никитина за ценные замечания при обсуждении работы.

Авторы благодарят А.А. Демина, Г.Г. Хорева, Н.Д. Рылова за помощь в изготовлении экспериментальной установки, Н.И. Баладикова и эксплуатационный персонал ожижителей за бесперебойное снабжение жидким гелием.

Л и т е р а т у р а

1. В.Д. Бартенев и др. Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Москва, 1968 г., ВИНТИ, М., 1970, 534.
2. В.Д. Бартенев и др. Труды Международной конференции по аппаратуре в физике высоких энергий. Дубна, Д-5805, 1971, том 1, 16.
3. К.Д. Толстов. Препринт ОИЯИ, 1698, Дубна, 1964.
4. L.S.Zolin and other. Forming and Trapping of a Gaseous Hydrogen Jet in a Vacuum, Cryogenics, June 1968, 143.

5. М.П. Малков и др. Справочник по физико-техническим основам глубокого охлаждения. Госэнергоиздат, Москва, 1963, 119, 120.
6. Б.Н. Есельсон и др. Свойства жидкого и твердого водорода. Издательство стандартов, Москва, 1969, 124-128.

Рукопись поступила в издательский отдел
11 октября 1971 года.