

С 344.4
3-793

Судоженик, 1968, 4/х-67
к. 8, №3, Р.143-148

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P13 - 3425



Л.С. Золин, В.А. Никитин, Ю.К. Пилипенко

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ФОРМИРОВАНИЕ И УЛАВЛИВАНИЕ
ГАЗОВОЙ ВОДОРОДНОЙ СТРУИ В ВАКУУМЕ

1967.

P13 - 3425

Л.С. Золин, В.А. Никитин, Ю.К. Пилипенко

ФОРМИРОВАНИЕ И УЛАВЛИВАНИЕ
ГАЗОВОЙ ВОДОРОДНОЙ СТРУИ В ВАКУУМЕ

Направлено в Cryogenics

5290/1 нр.

§ 1. Постановка задачи

В настоящее время на ускорителе заряженных частиц широким фронтом ведется исследование взаимодействий элементарных частиц. Большой интерес представляет изучение взаимодействия нуклонов. В качестве водородной мишени используется либо чистый водород (в жидком или газообразном состоянии), либо полиэтилен, как наиболее богатое водородом соединение. В частности, на синхротроне ОИЯИ проведен ряд работ на внутреннем пучке протонов с использованием тонкой полиэтиленовой мишени^{/1/}. Количество водорода в мишени составляет $7 \cdot 10^{-6}$ г/см². Количество углерода в 6 раз больше. Продукты взаимодействия первичного пучка с углеродом создают фон, который значительно затрудняет изучение взаимодействия протонов с протонами. Малая толщина мишени наталкивает на мысль о возможности использования газовой струи из чистого водорода для проведения исследований на внутреннем пучке ускорителя. Подробные расчеты необходимой плотности водорода в струе были сделаны К.Д. Толстовым^{/2/}. На ускорителях со слабой фокусировкой широкий класс экспериментов может быть выполнен, если плотность струи будет $10^{-6} - 10^{-4}$ г/см³. На ускорителе с жесткой фокусировкой плотность тока во внутреннем пучке в 50–100 раз выше. Наименьшая допустимая плотность мишени оказывается 10^{-7} г/см³. Таким образом, возникает задача создания газовой струи в высоком вакууме. Струя должна быть хорошо сформирована и иметь четкие границы, так как обычно требуется точечный источник.

В настоящее время опубликован ряд экспериментальных работ по формировке газовых струй в вакууме. Е.С. Боровик и др.^{/3/} с помощью сопла Лавали

создавали сверхзвуковую струю углекислого газа в вакууме. Струя имела расходимость 40° . На расстоянии 130 мм от сопла газ попадал на конденсатор, охлаждаемый жидким азотом. Давление в камере сохранялось на уровне 10^{-5} тор. Плотность газа в струе на выходе из сопла была $1,24 \cdot 10^{15}$ молекул/см³ или $3 \cdot 10^{-8}$ г/см³. Эти авторы проделали аналогичные опыты с водородом. Струя конденсировалась поверхностью, охлаждаемой жидким гелием^{/4/}. Была достигнута такая же молекулярная плотность.

Н.И. Ющенкова^{/5/} изучала истечение в вакуум паров кипящего диффузионного масла. Давление паров на входе в сопло 4 тор. Показано, что профиль струи и другие газодинамические характеристики удовлетворительно согласуются с расчетными величинами, полученными с помощью известных методов газовой динамики.

Очень интересная работа выполнена Е. Бекером и др.^{/6/}. Описывается установка, в которой водородная струя формируется с помощью трех соосных сопел. Сопла между собой разделены камерами с промежуточной откачкой. Последовательное обрезание периферических слоев газового потока позволяло получить на выходе из последнего сопла хорошо коллимированную сверхзвуковую струю. Газообразный водород подводился к первому соплу Лавала по теплообменнику, охлаждаемому жидким водородом. Начальное давление 0,1–0,9 ат. Плотность газа струи в вакуумной камере была 10^{11} – 10^{14} молекул/см³. Плотность потока менялась в пределах 10^{16} – 10^{19} молекул/см²·сек. Была измерена также скорость потока, которая оказалась 700 м/сек. Форму струи характеризуют следующие цифры: диаметр отверстия последнего сопла 0,8 мм. На расстоянии 44 мм от него струя имела полную ширину 4 мм. Откачка вакуумной камеры велась диффузионным насосом с производительностью 8000 литров в сек, что позволило поддерживать вакуум в экспериментальном объеме 10^{-5} тор.

Как видно из этого краткого обзора, ни одна из описанных установок не может быть применена для создания внутренней струи – мишени для работы на ускорителе. Во всех известных работах плотность газа в струе на 2 порядка меньше необходимой величины. Вместе с тем имеются удачные технические решения, позволяющие хорошо коллимировать сверхзвуковой поток и улавливать (конденсировать) отработанный газ.

§ 2. Расчет параметров сверхзвукового потока

Сделаем некоторые теоретические оценки интересующих нас параметров газового потока. Рассмотрим ламинарный поток идеального газа, подчиняющийся законам изэнтропического течения. Пусть в некотором сечении s^* достигается критическая скорость, равная скорости звука (число Маха $M = v^*/a$). Плотность ρ^* и давление p^* в критическом сечении s^* связаны с соответствующими параметрами ρ_0 и p_0 , относящимися к области с нулевой скоростью (к состоянию газа до сопла):

$$\rho^* = \left(\frac{2}{1+\gamma} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \rho_0$$

$$p^* = \left(\frac{2}{1+\gamma} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} p_0 \quad (1)$$

$$\gamma = c_p / c_v.$$

Если принять во внимание выражение для скорости звука в потоке

$$a = \sqrt{\frac{d p}{d \rho}} = \sqrt{\gamma g R T}, \quad (2)$$

то выписанные формулы позволяют рассчитать расход газа через критическое сечение s^* . Расход газа обычно задается производительностью насосов, обеспечивающих вакуум в камере наблюдения. Для заданного расхода

$$Q^* = \rho^* v^* s^* \quad (3)$$

можно вычислить критическое сечение сопла Лавала.

Для оценки угла расходимости струи, вытекающей в вакуум, необходимо знать число M на срезе сопла. Для любого сечения потока s существует зависимость

$$\frac{s}{s^*} = \frac{1}{M} \left[\left(\frac{\gamma-1}{2} M^2 + 1 \right) / \left(\frac{\gamma+1}{2} \right) \right]^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}. \quad (4)$$

Таким образом, если задано выходное сечение сопла s , то на его срезе по формуле (4) можно найти число M . Угол поворота 2-мерного потока.

вытекающего в вакуум, определяется числом M . Соответствующие аналитические выражения довольно сложны. Обычно в таких расчетах удобно пользоваться газодинамическими таблицами^{17,8/}. Несколько характерных цифр для идеального газа с $\gamma = 1,4$ приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1^{х)}

M	p/p_0	T/T_0	ρ/ρ_0	s^*/s	$v/v_{\text{пред}}$	θ°
1	0,52	0,83	0,63	1,00	0,40	130,4 ⁰
2,0	0,12	0,55	0,23	0,59	0,66	104 ⁰
3,0	0,027	0,35	0,076	0,23	0,80	80 ⁰
4,0	$0,65 \cdot 10^{-2}$	0,23	$0,27 \cdot 10^{-1}$	0,093	0,87	64 ⁰

v - скорость потока, $v_{\text{пред}}$ - предельная скорость течения газа, которая достигается в бесконечности, когда вся энергия газа перешла в его кинетическую энергию.

$$v_{\text{пред}} = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} g R T}. \quad (5)$$

Обратим внимание на последнюю строку в таблице. Сопло, у которого выходное сечение в 10 раз больше критического, позволяет получить сверхзвуковой поток с числом Маха $M=4$, и тем не менее этот поток в вакууме еще отклонится на угол $\theta = 64^\circ$. То есть для получения хорошо коллимированного потока необходимо брать сопла с очень малым отношением s^*/s . Если при этом пытаться соблюдать условие ламинарного течения, то необходимо использовать сопла с большой длиной, что приводит к существенному замедлению пограничного слоя

^{х)} Расчет угла расходимости θ сделан по формулам для двухмерного потока. Результаты для осесимметричного течения могут несколько отличаться от приведенных значений θ . Но это не меняет наших выводов.

за счет трения о стенки. По данным работ^{/9,10/} толщина пограничного слоя составляет (10–33) % от выходного диаметра сопла. Разрешение противоречия можно искать на пути применения нескольких соосных сопел, разделенных камерами с промежуточной откачкой, как это сделано в работе^{/8/}. Первое сопло Лавала создает сверхзвуковой поток, имеющий еще значительную расходимость. Последующие сопла – коллиматоры срезают периферический слой, который частично обусловлен турбулентностью и трением в пограничном слое.

§ 3. Конструкция экспериментальной установки

Описываемый прибор является моделью установки, формирующей газовую струю–мишень в вакуумной камере ускорителя. Наша задача заключается в получении струи водорода диаметром 1–2 см и плотностью порядка 10^{-7} г/см³. Давление в экспериментальном объеме должно быть 10^{-5} – 10^{-6} тор (такое же давление поддерживается в камере ускорителя). Струя газа должна впрыскиваться в камеру ускорителя каждые 7 сек. Принимая длительность струи равной 250 мсек и находя скорость струи по формуле (5), легко можно определить, что средняя производительность вакуумного насоса для откачки газа струи из экспериментального объема должна быть больше $2 \cdot 10^6$ л/сек. Отсюда видно, что откачку экспериментальной камеры с помощью диффузионных паромасляных насосов осуществить трудно. Задача может быть решена с помощью гелиевого конденсационного насоса. Известно^{/11,12/}, что скорость откачки криогенных конденсационных насосов равна 5–10 л/сек на см² поверхности и мало зависит от давления в насосе. Так как коэффициент аккомодации молекул близок к единице, представляется возможность улавливать струю, не давая газу рассеяться по камере, что позволяет иметь размеры охлаждаемой поверхности еще меньшими.

Принципиальная схема установки для формирования и улавливания водородной струи в вакууме изображена на рис. 1.

Сжатый водород ($P=10$ ат) из буферной емкости (3) через электромагнитный клапан (4) поступает в теплообменник–звеевик (5) к сопловому аппарату (8) и вытекает в экспериментальный объем (9). Формирование струи производится тремя соосными соплами (рис. 2) с камерами промежуточной откачки

между ними. Струя водорода после прохождения через рабочую область экспериментальной камеры попадает в гелиевый конденсационный насос, который состоит из сосуда для жидкого гелия (12) и медной ловушки (13). Ловушка выполнена в виде камеры емкостью 530 см^3 с горловиной диаметром 30 мм. Внутренняя поверхность ловушки покрыта ребрами (толщиной 2 мм, высотой 10 мм, шагом 4 мм) и имеет поверхность 770 см^2 . Экспериментальный объем (емкостью 200 л) и пространство между вторым и третьим соплами откачиваются с помощью диффузионных насосов ВА-5-4(14) и ВА-05-4(15). Пространство между первым и вторым соплами откачивается форвакуумным насосом РВН-20(16). Скорость откачки пространств между соплами невелика, так как каналы для откачек выполнены малых диаметров из-за конструктивных трудностей. Давление в экспериментальном объеме и в камерах промежуточных откачек замерялось вакуумметрическими лампами (21).

§ 4. Результаты эксперимента

Были измерены следующие величины:

1. Расход газа через сопло.
2. Распределение газа между камерами промежуточной откачки и экспериментальным объемом.
3. Пространственное распределение плотности газа в струе на расстоянии 300 мм от последнего сопла.
4. Некоторые величины, характеризующие работу конденсационного насоса: коэффициент захвата газа, тепловая нагрузка на насос, максимально возможное количество конденсируемого водорода, расход жидкого гелия.

Приводим методы и результаты измерений.

1. Расход водорода при каждом срабатывании клапана определялся падением давления в буферной емкости. В наших опытах давление перед клапаном было 10 ат. Расход за цикл (клапан открыт 30 мсек) составлял 180 см^3 водорода при нормальных условиях, если температура теплообменника-змеевика 300°К и 300 см^3 , если температура змеевика 78°К . Змеевик выполнен из трубки диаметром 2 мм и имеет объем 10 см^3 . Часть змеевика (5 см^3) погружена в жидкий азот. Расчеты показывают, что без учета охлаждения газа змеевик за-

полняется до давления, близкого к давлению перед клапаном через 6 мсек. В оставшееся время (24 мсек) через клапан поступает еще некоторое количество газа, обусловленное охлаждением газа в змеевике и истечением его через сопло (таблица 1). Расчеты, а также проверка по балансу вытекающего газа показывают, что газ успеваеt охладиться в змеевике до температуры азота прежде, чем клапан закроется. После закрытия клапана давление в змеевике начинает снижаться по мере истечения газа через сопло

$$dG = - (V_1 \rho_1 + V_2 \rho_2) \frac{dp}{p} - \frac{1}{R} \left(\frac{V_1}{T_1} + \frac{V_2}{T_2} \right) dp = B dp, \quad (6)$$

где V_1, T_1 и V_2, T_2 - объемы и температуры теплой и холодной частей змеевика.

Критический весовой расход газа через сопло равен

$$Q = \phi s^* \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{1}{\gamma - 1}} \sqrt{\frac{2\gamma K}{(\gamma + 1) R T_2}} \quad p = \phi A p. \quad (7)$$

T_2 и p - температура и давление газа перед соплом.

$dQ = \phi A dp$, где $\phi = \frac{Q_{\text{эксп}}}{Q_{\text{теор}}}$ - коэффициент истечения.

Заменяя переменные в уравнении (6) p на Q , получаем

$$dG = - \frac{B}{\phi A} dQ. \quad (8)$$

Количество газа, вытекающее через сопло за время dt , равно

$$dG = Q dt. \quad (9)$$

Из уравнений (8,9) имеем

$$\frac{dQ}{Q} = - \frac{\phi A}{B} dt$$

из условия $t = 0, Q = Q_0$, находим весовой расход газа через сопло в зависимости от времени:

$$Q = Q_0 \exp \left(- \frac{\phi A}{B} t \right).$$

Принимая во внимание, что $Q_{\text{теор}} = A p$, а количество газа, содержащееся в змеевике

$$G_{\text{ЗМ}} = V p = \frac{V_1 p}{R T_1} + \frac{V_2 p}{R T_2} = G_{\text{ЗМ}}^{T_1} + G_{\text{ЗМ}}^{T_2},$$

имеем

$$Q = Q_0 \exp \left(- \frac{\phi Q_{\text{теор}}}{G_{\text{ЗМ}}^{T_1} + G_{\text{ЗМ}}^{T_2}} t \right), \quad (10)$$

где $G_{\text{ЗМ}}^{T_1}$ и $G_{\text{ЗМ}}^{T_2}$ — количество газа в теплой и холодной частях змеевика.

Переходя от весовых величин к объемным, получаем

$$V = V_0 \exp \left(- \frac{\phi V_{\text{теор}}}{V_{\text{ЗМ}}^{T_1} + V_{\text{ЗМ}}^{T_2}} t \right). \quad (11)$$

Сравним теоретический расход через сопло в начальный момент времени после закрытия клапана с экспериментальным.

$$v = \frac{s^*}{\rho} \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{1}{\gamma - 1}} \sqrt{\frac{2 \gamma g}{(\gamma + 1) R T_2}}, \quad (12)$$

T_2 и ρ — температура и плотность газа перед соплом.

Экспериментальный расход может быть найден из уравнения (11) с учетом кривых пространственного распределения плотностей в струе (рис. 3 и 4). По кривым можно оценить отношения расходов газа через 220 мсек после открытия клапана к расходам в начальный момент времени $\frac{V_{220}}{V_{30}}$. Эти величины определяются как отношение объемов под соответствующими кривыми. Результаты расчетов представлены в таблице 1.

2. Сопла 2 и 3 не должны сильно искажать струю, сформированную соплом 1, т.е. расстояния между соплами и их диаметры должны быть выбраны так, чтобы доля газа, попадающая в камеры промежуточной откачки, была невелика. В таблице 1 приведены данные распределения газа по камерам. Распределение газа по камерам определялось последовательным выключением насосов и изменением давления в экспериментальном объеме компрессионным манометром.

3. Для измерения формы струи и ее плотности мы не могли воспользоваться традиционными методами измерений в стационарных потоках (трубки Пито и др.)

в силу импульсного режима работы установки. Поэтому был применен следующий метод. На пути струи устанавливалась гребенка из легких лавсановых лепестков (концы лепестков совпадали с осью струи). Мгновенная фотография фиксировала отклонение лепестка от положения равновесия в любой заданный момент времени относительно момента открытия электромагнитного клапана. Простые формулы позволяют вычислить плотность газа в потоке и его скорость. При расчете предполагалось, что каждая молекула, попавшая на лепесток, передает ему весь свой импульс. Масса газа dm , попадающая на элемент лепестка $d\ell$ за время t , равна

$$dm = \delta \rho v t d\ell,$$

где δ - ширина лепестка; ρ - плотность газа; v - скорость потока. Принимаем, что плотность струи вдоль лепестка изменяется линейно

$$\rho = \frac{\rho_0}{\ell_0} \ell.$$

После подстановки и интегрирования получаем:

$$m = \frac{\rho_0 \delta v \ell^2 t}{2 \ell_0}. \quad (13)$$

Лепесток испытывает со стороны набегающего потока силу

$$\frac{d(mv)}{dt} = \frac{\rho_0 \delta v \ell^2}{2 \ell_0} = \frac{q\ell}{2}, \quad (14)$$

где q - распределенная сила (отнесенная к единице длины), действующая на конце лепестка длиной ℓ .

В уравнении (14) опущен член, определяющий усилие на лепесток из-за статического давления в потоке, так как статическое давление значительно меньше динамического.

Второе необходимое равенство получаем из баланса вытекающего через сопло газа, отнесенного к критическому сечению сопла и сечению струи в месте установки гребенки.

$$(1-k) dQ = 2\pi l d\rho v = 2\pi \frac{v \rho_0 l^2 d\rho}{\rho_0},$$

где k - коэффициент, учитывающий долю газа, попадающего в камеры промежуточной откачки.

После интегрирования получаем

$$Q = \frac{2\pi v \rho_0 l^3}{3(1-k)\rho_0}. \quad (15)$$

Используя равенства (14 и 15), можно вычислить скорость потока и его плотность. Сила, действующая на лепесток $\frac{q l}{2}$, определялась по величине прогиба лепестка под действием струи.

Экспериментально оцененная скорость потока превышает свое расчетное предельное значение примерно в 3 раза^{х)}, что соответственно во столько же раз приводит к занижению плотности газа в центре струи.

Коэффициент истечения для первого сопла равен около 0,3, откуда видно, что диаметр эффективного критического сечения в 2 раза меньше геометрического. Это несколько больше, чем сообщалось в работах /9,10/.

Результаты расчетов и измерений даны в таблице 1.

Т а б л и ц а 1

Давление перед клапаном 11 атм. Длительность работы клапана 30 мсек. Сечение сопла - $2,8 \cdot 10^{-3}$ см². Схема соплового аппарата дана на рис. 2. Диаметр третьего сопла в данном опыте 5 мм

1	2	3	4	5
Температура газа перед соплом (°К)	300	300	78	78
Объем тепловой части змеевика (300°К) (см. ³)	10	-	5	-

х) Ошибка в измерениях скорости потока, по-видимому, объясняется тем, что при обработке экспериментальных данных была принята упрощенная модель взаимодействия потока с лепестками.

1	2	3	4	5
Объем холодной части эмеевика (78°K) (см ³)	-	-	5	-
Время заполнения эмеевика газом до давления 11 атм (мсек)	-	6	-	18
Количество водорода, накапливаемое в эмеевике (см ³)	-	110	-	267
Количество водорода, выпускаемое за цикл (см ³)	180	166	300	353
Доля газа, откачиваемая камерами промежуточной откачки k (%)	32	-	22	-
Отношение расхода V_{220} / V_{30} (время отсчитывается от момента открытия клапана)	0,43	-	0,4	-
Коэффициент расхода $\phi = V_{\text{эксп}} / V_{\text{теор}}$	0,236	-	0,342	-
Экспериментальный и теоретический расходы газа через сопло при t = 30 мсек (см ³ /сек)	487	2060	1390	4050
Экспериментальная и предельная скорости потока (м/сек)	10000	2920	3260	1490
Плотность газа в центре струи, вычисленная по экспериментальным и предельным скоростям потока (г/см ³)	$3,6 \cdot 10^{-8}$	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$0,85 \cdot 10^{-7}$	$1,9 \cdot 10^{-7}$

Кривые на рис. 3 и 4 дают профиль струи, измеренный на расстоянии 300 мм от третьего сопла. Каждая точка на кривой получена усреднением отклонений, измеренных по нескольким фотографиям.

4. Предварительное охлаждение газа, поступающего к сопловому аппарату, позволяет не только увеличить плотность газа в струе, но существенно облегчить условия работы гелиевого конденсационного насоса, уменьшая тепловую нагрузку на насос. Количество тепла, вносимое струей водорода, составляет 4000 дж/г без предварительного охлаждения и 1130 дж/г - в случае предварительного охлаждения до температуры жидкого азота. Расчеты показывают (таблица 2), что в результате больших тепловых нагрузок на стенках ловушки может возникнуть градиент температур в несколько десятков градусов, что приведет к резкому

уменьшению коэффициента захвата газа. Это обстоятельство очень важно, если учесть, что упругость паров водорода в области гелиевых температур сильно зависит от температуры^{x)} (таблица 3).

Т а б л и ц а 2

Характеристика гелиевого конденсационного насоса и результаты его обследования: диаметр камеры насоса - 120 мм, внутренний объем камеры - 530 см³, поверхность камеры - 770 см², диаметр горловины камеры - 30 мм, расстояние от третьего сопла до горловины насоса - 150 мм

Измеряемая величина	Без охлаждения змеевика	С охлаждением змеевика
1. Температура газа перед соплом (°К)	300	78
2. Количество водорода, впускаемое в экспериментальный объем (см ³ /цикл)	122	234
3. Расход водорода после третьего сопла в момент закрытия клапана $t = 30$ мсек $(1-k) V_{\text{эксп}}$ (см ³ /сек)	330	1080
4. Разность теплосодержаний водорода $(i_{300} - i_{4,2})$ (дж/г)	4000	1130
5. Средняя тепловая нагрузка на гелиевый конденсационный насос (длительность струи 500 мсек) (вт)	88	47,6
6. Тепловая нагрузка на насос в момент закрытия клапана $t = 30$ мсек (вт)	119	122
7. Удельная средняя тепловая нагрузка на насос (вт/см ²) (площадь струи 3,14 см ²)	28	15,2
8. Удельная тепловая нагрузка на насос в момент закрытия клапана (вт/см ²)	38	39
9. Средняя разность температур на медной стенке толщиной 2 мм (град)	6,0	3,3

x) Значительное улучшение вакуума в экспериментальном объеме можно получить, если работать при пониженном давлении над поверхностью жидкого гелия в конденсационном насосе.

1	2	3
10. Мгновенная разность температур на медной стенке толщиной 2 мм в момент закрытия клапана (град)	8,2	8,4
11. Количество водорода струи, не попадающее в конденсационный насос	2,0	0,6
12. Количество водорода, захватываемое ловушкой насоса (от количества водорода попавшего в ловушку) (%)	-	$2 \cdot 10^{-3}$

Т а б л и ц а 3 /13/

Зависимость давления паров водорода от температуры

T (°K)	P (тор)
3,6	$5,5 \cdot 10^{-9}$
4,2	$3,5 \cdot 10^{-7}$
4,5	$1,8 \cdot 10^{-6}$
7,2	$2 \cdot 10^{-2}$
8,0	$9,5 \cdot 10^{-2}$
9,0	$4,7 \cdot 10^{-1}$

Интересно отметить, что в нашем случае удельные тепловые нагрузки на гелиевый конденсационный насос (отнесенные к сечению струи $3,14 \text{ см}^2$) составляли $15-39 \text{ вт/см}^2$, что в $10^2-4 \cdot 10^3$ раз больше, чем это наблюдалось в работе Е.С. Боровика и др. /4/. Удовлетворительная работа конденсационного насоса может быть объяснена тем, что молекулы газа захватываются в ряде последовательных столкновений с внутренней поверхностью ловушки гелиевого насоса. В результате получается сравнительно равномерное распределение улавливаемого газа по поверхности, что позволяет значительно повысить длительность работы насоса.

Для определения коэффициента захвата газа насосом из соплового аппарата в ловушку была опущена трубка диаметром 18 мм. Так как диаметр трубки в

2 раза меньше диаметра горловины ловушки, то несконденсированный газ мог свободно проникать в экспериментальный объем. При цикличности срабатывания клапана 4 и 8 сек давление в экспериментальном объеме в момент открытия клапана увеличивалось с $1 \cdot 10^{-5}$ до $2 \cdot 10^{-5}$ тор. Это указывает, что лишь $10^{-3}\%$ от попавшего в конденсационный насос газа вытекает из него. Следовательно, ухудшение вакуума в установке в процессе формирования струи может происходить только за счет периферических слоев потока, которые не попадают в конденсационный насос. Для изучения этого явления мы брали сигнал с ионизационной манометрической лампы на осциллограф. Это дало возможность записывать давление в измерительной камере в процессе истечения газа из соплового аппарата. Характерные зависимости давления от времени приведены на рис. 5. Отсчет времени начинается от момента срабатывания клапана. Полученные кривые показывают, что 0,6–2% газа не попадает в конденсационный насос, что можно рассматривать как характеристику степени коагуляции струи.

Очень важной характеристикой насоса является предельно допустимое количество конденсируемого газа. Опыт показывает, что гелиевая ловушка сохраняет приблизительно постоянный коэффициент захвата в течение 350–400 циклов. Затем вакуум в экспериментальном объеме быстро падал. Количество водорода, улавливаемое за это время, составляло 90 л газа при нормальных условиях или 90 см^3 льда, то есть можно считать, что твердый водород занимает свыше 20% объема гелиевой ловушки.

Испаряемость жидкого гелия в насосе в результате теплоточка составила 1,3 л/час, расход жидкого гелия при работе с циклом в 9 сек – 4,7 л/час.

В ы в о д ы

1. Три соосных сопла, разделенных камерами промежуточной откачки, позволяют сформировать в вакууме газовую водородную струю. Предварительное охлаждение водорода до температуры жидкого азота приводит к увеличению плотности струи в 10 раз.

2. Струя на расстоянии 300 мм от соплового аппарата имеет следующие параметры: полуширина на полувысоте 1 см, плотность в центре 10^{-7} г/см^3 (в случае температуры эмеевика 78°K).

3. Улавливание струи может быть осуществлено с помощью гелиевого конденсационного насоса. В нашем случае от 0,6 до 2% газа, вытекающего из соплового аппарата, не попадало в гелиевую ловушку и рассеивалось в экспериментальном объеме.

4. Гелиевый конденсационный насос обладает хорошим коэффициентом захвата, только $10^{-3}\%$ от попавшего в насос газа не улавливается ловушкой.

Л и т е р а т у р а

1. В.А. Никитин, А.А. Номофилов, В.А. Свиридов, Л.Н. Струнов, М.Г. Шафранова. ПТЭ № 6, 18 (1963).
2. К.Д. Толстов. Препринт ОИЯИ 1698, Дубна 1964.
3. Е.С. Боровик, Ф.И. Бусол, В.Б. Юферов, Е.И. Скибенко. ЖТФ, 33, в.8, 973 (1963).
4. Е.С. Боровик, Ф.И. Бусол, В.Ф. Юферов, Е.И. Скибенко. ЖТФ вып. 8, 285 (1965).
5. Н.И. Юшенкова. Сборник "Проблемы энергетики". Москва, АН СССР, 343 (1959).
6. E. W. Becker, R. Klingelhöfer, P. Lohse. Zeitschrift für Naturforschung, band 17 a, heft 5, 432 (1962).
7. Л.Г. Лойцянский. Механика жидкости и газа. Физматгиз, 1959.
8. А. Ферри. Аэродинамика сверхзвуковых течений. Изд-во технико-теоретической литературы. Москва, 1953.
9. Ф.И. Бусол, Е.И. Скибенко, В.Б. Юферов. ЖТФ, т. 36, в. 12, 2154 (1966).
10. Г.Н. Абрамович. Прикладная газовая механика. ГИТТЛ, Москва, 1953.
11. Б.Г. Лазеров, Е.С. Боровик, Н.Ф. Федорова, Н.М. Цин. Водородный конденсационный насос. Украинский физический журнал т. 2, № 2, 182 (1957).
12. Е.С. Боровик, Б.Г. Лазеров, И.Ф. Михайлов. Водородный конденсационный насос с автономным ожижителем. Атомная энергия т. 7, № 2, 117 (1959).
13. М.П. Малков, И.Б. Данилов, А.Г. Зельдович, А.Б. Фрадков. ^{15. Лютис}Справочник по физико-техническим основам глубокого охлаждения. Госэнергоиздат, Москва, 1963.

Рукопись поступила в издательский отдел

3 июля 1967 г.

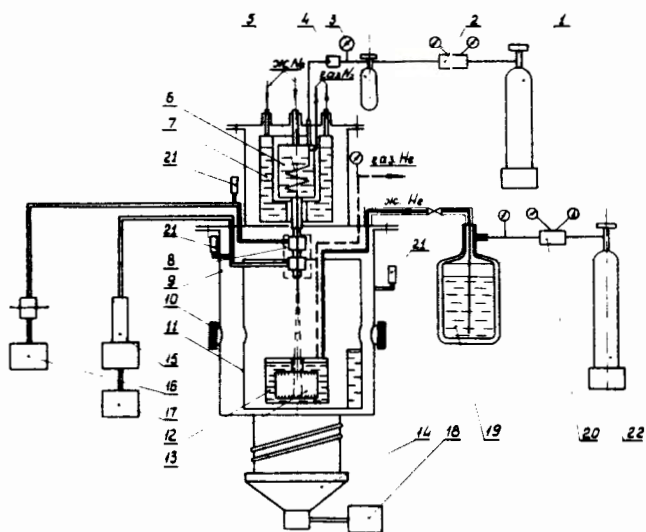


Рис. 1. Схема установки для формирования и улавливания газовой волоконной струи в вакууме: 1 - баллон водородный; 2 - редуктор; 3 - буферная емкость; 4 - электромагнитный клапан; 5 - смесовик; 6 - ванна жидкого азота; 7 - экранирующий бачок; 8 - сопловой аппарат; 9 - вакуумный кожух экспериментального объема; 10 - смотровое окно; 11 - азотный экран с ванной жидкого азота; 12 - гелиевый бачок; 13 - ловушка; 14 - диффузионный насос ВА-5-4; 15 - диффузионный насос ВА-05-4; 16 - вакуумный насос РВН-20; 17 - вакуумный насос ВН-2; 18 - вакуумный насос ВН-1; 19 - дьюар жидкого гелия; 20 - редуктор; 21 - вакуумметрическая лампа; 22 - баллон гелиевый.

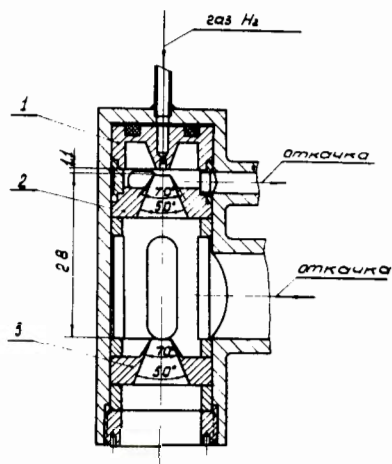


Рис. 2. Сопловой аппарат установки. 1. Первое сопло $d_{кр} = 0,6$ мм.
2. Второе сопло $d = 3,00$ мм. 3. Третье сопло $d = 3,5$ мм.

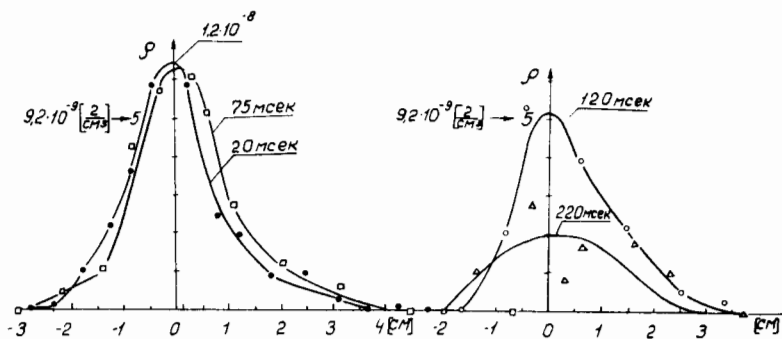


Рис. 3. Распределение плотности в струе. Различные кривые относятся к разным моментам времени измерения относительно времени открытия электромагнитного клапана. Температура змеевика 300°K .

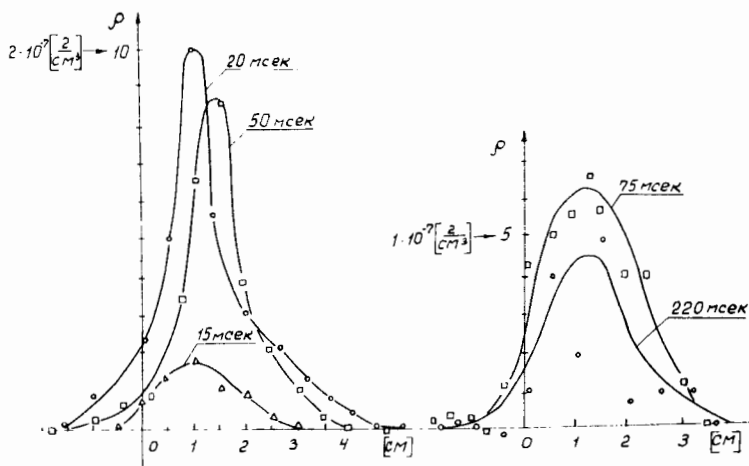


Рис. 4. Распределение плотности в струе. Различные кривые относятся к разным моментам времени измерения относительно времени открытия электромагнитного клапана. Температура змеевика $78^{\circ}K$.

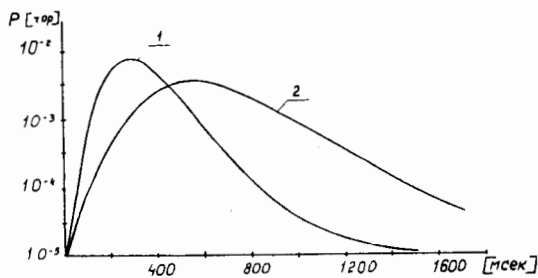


Рис. 5. Давление в экспериментальном объеме как функция времени. Начало отсчета совпадает с моментом открытия клапана.
1. Температура змеевика $300^{\circ}K$. 2. Температура змеевика $78^{\circ}K$.