

П - 938



**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

**ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ**

**8 - 6264**

**Е.И.Дьячков**

**СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ  
ВОДОРОДНОЙ ПУЗЫРЬКОВОЙ КАМЕРЫ  
С ДЪЮАРНОЙ СИСТЕМОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ.**

**НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ  
И РАБОТЫ КРИОГЕННЫХ ПУЗЫРЬКОВЫХ КАМЕР**

**Специальность 05.260 - приборы экспериментальной физики**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук**

**(Диссертация написана на русском языке)**

**Дубна 1972**

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований.

- Научный руководитель: - доктор технических наук, профессор  
А.Г.ЗЕЛЬДОВИЧ
- Официальные оппоненты: - доктор физико-математических наук, профессор  
А.Н.ГОРБУНОВ,  
- доктор физико-математических наук  
В.Т.СМОЛЯНИН,  
- доктор физико-математических наук, профессор  
М.И.СОЛОВЬЕВ,  
- доктор технических наук, профессор  
А.Б.ФРАДКОВ.
- Ведущее предприятие - Институт теоретической и экспериментальной физики (ИТЭФ, Москва )

Автореферат разослан " " \_\_\_\_\_ 1972 г.  
Защита диссертации состоится " " \_\_\_\_\_ 1972 г.  
на заседании Ученого совета Лаборатории высоких энергий  
Объединенного института ядерных исследований ( ЛВЭ ОИЯИ )  
г.Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Учёный секретарь Совета  
кандидат физико-математических  
наук

/С.В.МУХИН/

8 - 6264

Е.И.Дьячков

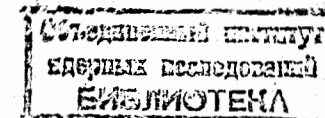
СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ  
ВОДОРОДНОЙ ПУЗЫРЬКОВОЙ КАМЕРЫ  
С ДЪЮАРНОЙ СИСТЕМОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ.

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ  
И РАБОТЫ КРИОГЕННЫХ ПУЗЫРЬКОВЫХ КАМЕР

Специальность 05.260 - приборы экспериментальной физики

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

(Диссертация написана на русском языке)



Диссертация является обобщением комплекса научно-методических и экспериментальных работ, выполненных автором совместно с группой сотрудников Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований в период с 1957 по 1970 годы. Основным звеном этого комплекса является создание и исследование систем 100-сантиметровой водородной пузырьковой камеры с дьюарной системой теплоизоляции. Камера была запущена в конце 1964 г. и в течение 5 лет оставалась крупнейшей в СССР действующей водородной пузырьковой камерой. Камера облучалась на синхрофазотроне ОИЯИ в пучках  $\Pi^-$ - мезонов с импульсом 5 Гэв/с. Всего на ней получено более 600 000 4-кадровых рабочих стереофотографий.

Диссертация состоит из введения, шести глав и выводов.

Первая глава содержит обоснование и описание устройства, а также основные характеристики 100-см водородной пузырьковой камеры с дьюарной системой теплоизоляции ( 100-см ВПК ).

Камера I ( рис. I ) вместе с дьюаром 4 помещена в магнитное поле электромагнита МС-12. Рабочий объём камеры имеет освещенную область  $95 \times 35 \times 30 \text{ см}^3$ . Среднее магнитное поле составляет 18550 эрстед.

Масштаб фотографирования в среднем равен 1 : 10. Точность восстановления пространственных координат по  $\chi < 0,1 \text{ мм}$ . Ложная кризисна следов для задержки света после прохождения частиц до 2-х мсек составляет  $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}$ . Рабочие задержки были менее 2 мсек.

Питание камеры жидким водородом осуществляется из ожигителя дроссельного типа В0-1 с максимальной производительностью 70 литров жидкого водорода в час.

Цикличность камеры 8 + 11 сек. Успешно опробован режим работы камеры с двумя циклами через 400 мсек.

Фотографирование камеры осуществляется четырьмя объективами "Руссар-плазмат Т2" на две перфорированные плёнки шириной 80 мм. Базы фотографирования равны 500 и 310 мм. Освещение камеры производится тремя импульсными лампами ИФК-50. В качестве отражательной системы применён стеклянный призматический растр.

Корпус камеры и её фланец изготовлены из отливки стали марки Х18Н12М3Т. Химический состав отливки: С = 0,12%, Si = 0,46%,

Mn = 1,34%; S = 0,013; P = 0,033%; Cз = 17,00%; Ni = 11,90%  
Ti = 0,55%; Mo = 3,00%. Наружная и внутренняя оболочки дьюара камер  
сварены из листовой стали марки IX18H9T. Были проведены меха-  
нические испытания материалов камеры при температуре 293°K, 77°K  
и 20°K. Испытания включали проверку прочностных и пластических  
свойств при растяжении и определение ударной вязкости на изгиб.  
Показано, что материалы удовлетворяют предъявляемым требованиям.

Вторая глава включает анализ систем теплоизоляции криогенных  
пузырьковых камер. На примере 100-см ВПК подробно рассмотрен но-  
вый тип теплоизоляции криогенных пузырьковых камер - дьюарная те-  
плоизоляция, предложенная автором и впервые реализованная нами на  
100-см ВПК.

Показано, что в камере с дьюарной теплоизоляцией простран-  
ство, окружающее корпус камеры, может находиться под избыточным дав-  
лением, благодаря чему существенно снижаются требования к герметич-  
ности камеры; повышается безопасность работы, поскольку практиче-  
ски исключена возможность попадания воздуха из помещения в указан-  
ное пространство; возможно улучшение термостатирования рабочего  
объема камеры путем охлаждения стекла-иллюминатора снаружи с по-  
мощью местных конвекционных токов газа. В случае разгерметизации  
камеры с дьюарной теплоизоляцией криогенная жидкость вытекает в  
охлажденный дьюар; при этом аварийной ситуации не возникает вооб-  
ще или она в значительной мере ослаблена.

Корпус 100-см ВПК (рис.1) подвешен к крышке 7 и размещен в  
дьюаре 4 - теплоизолированном сосуде с двойными стенками. Прост-  
ранство, окружающее корпус камеры 1 и заключенное во внутренней  
подости дьюара 4, находится под небольшим избыточным давлением  
( $\sim 1,15 \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup>) газообразного водорода. Теплоизоляция корпуса  
камеры осуществляется: со стороны дна и боковых стенок - автоном-  
ной теплоизолированной системой - дьюаром 4, со стороны крышки 7 -  
неподвижным достаточно высоким ( $\sim 1$  м) столбом газообразного во-  
дорода.

Изложены рекомендации по конструированию дьюара для камеры.  
Описан предложенный автором и осуществленный нами для 100-см ВПК  
дьюар нового типа - с гибкой внутренней оболочкой, опираю-  
щейся через изоляционный материал на жесткую внешнюю оболочку.

Такая конструкция ( рис.1 ) позволяет рациональным путём снизить теплоприток к камере теплопроводностью по внутренней оболочке. Приведены результаты испытаний и эксплуатации дьюара.

Дана методика детального расчёта теплопритоков к криогенной камере с дьюарной системой теплоизоляции. Расчётные и экспериментальные теплопритоки к 100-см ВПК хорошо согласуются. Экспериментально показано, что изотермические поверхности в столбе газообразного водорода, находящемся в световом конусе 100-см ВПК, имеют плоский вид.

В третьей главе после анализа систем изменения давления криогенных пузырьковых камер подробно изложена система изменения давления (СИД) 100-см ВПК ( дано обоснование основных параметров, описано устройство, а также приведены результаты исследования новых элементов и СИД в целом ).

Основные новые элементы СИД 100-см ВПК ( рис.2 ): а) объём в пространстве над низкотемпературным поршнем 1 в процессе работы камеры не изменяется и заполнен вытеснителем 2, что позволяет в значительной мере уменьшить тепловыделения из-за необратимости процессов расширения - сжатия рабочего тела в этом объёме; б) для расширения используется удерживающий клапан 4, что даёт возможность производить расширение без противодействия за счёт внутренней энергии сжатой рабочей жидкости камеры; в) безоткатное торможение движущихся масс СИД осуществляется в конце расширения путем соударения с подвижным демпфером - массой 5.

Проанализированы различные виды уплотнения низкотемпературного поршня. Описан новый вид целевого уплотнения низкотемпературного поршня. Уплотнение состоит из ряда тонких неразрезанных колец, изготовленных из фторопласта 4 и плотно насаженных на поршень. Приведена технология изготовления уплотнения. Экспериментально получено, что утечки через такое уплотнение за цикл камеры невелики, а продуктов износа образуется при работе значительно меньше, чем в случае использования кожаных манжет.

Представлены конструкции и экспериментальные данные по работе герметичных уплотнений поршня, содержащих перекатывающиеся мембраны.

Дана методика расчёта процессов торможения в СИД путем

соударения движущихся масс. Показано, что расчётные и экспериментальные характеристики резино-металлических демпферов близки.

Четвертая глава посвящена исследованию термодинамических циклов водородной пузырьковой камеры.

Приведено влияние на необратимость процессов расширения-сжатия в циклах камеры некоторых неравновесных процессов: трения, теплообмена, загрязнения рабочей жидкости.

Описана аппаратура, применявшаяся для исследования циклов 100-см ВПК.

Для анализа циклов построена  $p$ - $v$ - $T$  диаграмма для жидкого пара-водорода в метастабильном состоянии (рис. 3). Показано, что рассчитанные изоэнтропы близки к экспериментальным, полученным из циклов 100-см ВПК.

Изложены результаты экспериментального исследования циклов 100-см ВПК в диапазоне температур 26-28,3°K, которые, в основном, сводятся к следующему:

1) впервые экспериментально исследованы циклы с большой продолжительностью процесса расширения и цикла в целом. При замедлении процесса расширения обнаружено следующее: длительность процесса при минимальном давлении в камере  $p_{min}$  в конце расширения увеличивается пропорционально уменьшению скорости расширения (например, рис. 4); процесс расширения, изображенный в  $p$ - $v$  диаграмме, не изменяется (степень расширения  $\epsilon = \frac{v_2 - v_1}{v_1}$ , где  $v_2$  и  $v_1$  - соответственно объём рабочего тела камеры в  $i$  точке цикла и в точке 1 - перед расширением); необходимая полная степень расширения в цикле  $\epsilon_{max}$  для достижения одинакового перегрева не меняется. В этих исследованиях продолжительность и скорость процесса расширения изменялась не более, чем в два раза. Таким образом, экспериментально впервые показано, что замедление процесса расширения может оказаться целесообразным как с термодинамической точки зрения, так и с точки зрения обеспечения высокого качества камеры как физического прибора.

2) Обнаружено, что при каждой температуре перед расширением  $T_1$  имеет место некий критический перегрев  $(\Delta T_p)_{кр}$  (например, рис. 5). В циклах, создающих перегрев больше критического, с

увеличением перегрева резко возрастает удельная индикаторная работа в цикле  $\ell$  ( $\ell = \frac{\oint p dv}{V_1} = \oint p d\epsilon$ ) и необходимая степень расширения в цикле  $\epsilon_{max}$ . При  $T_1 = 28,3^\circ K$   $(\Delta T_p)_{кр} \approx 1,8^\circ K$ ; при  $T_1 = 27,4^\circ K$   $(\Delta T_p)_{кр} \approx 2,2^\circ K$ .

3) Получено, что при изменениях объёма камеры, обеспечивающих степень расширения водорода в перегретой области около 0,35%, работа  $\ell \approx 0,1$  Дж/ц.л. и достигается перегрев  $\Delta T_p$ : при  $T_1 = 28,3^\circ K$   $\Delta T_p \approx 1,3^\circ K$ ; при  $T_1 = 27,4^\circ K$   $\Delta T_p \approx 1,4^\circ K$ ; при  $T_1 = 26,2^\circ K$   $\Delta T_p \approx 1,6^\circ K$ . Для циклов, в которых создается перегрев  $\Delta T_p < 0,5\%$ , процессы расширения и сжатия близки к изэнтропическим (например, рис. 6).

4) Из  $p$ - $v$  диаграмм циклов получен коэффициент адиабатической сжимаемости жидкого пара-водорода.

5) Экспериментально получено, что время восстановления в циклах обратно пропорционально величине переохлаждения жидкости перед расширением и индикаторной работе в цикле, что находится в согласии с теорией.

6) Сравнение динамического тепловыделения с индикаторной работой  $\ell$  в циклах 100-см ВПК показало, что тепловыделения, не отраженные индикаторной работой  $\ell$ , составляют около 20%.

Пятая глава посвящена вопросам обеспечения чистоты систем криогенной камеры и, в первую очередь, чистоты её оптических систем. В этой связи математически и экспериментально исследована термическая и концентрационная диффузия примесей.

Показано, что в процессе работы камеры имеет место непрерывное поступление газообразных примесей в пространство, окружающее иллюминатор корпуса камеры. Благодаря градиентам концентрации и температуры примеси диффундируют к иллюминатору и, вымерзая на его поверхности, приводят к появлению фона на фотографиях. Известные ранее способы борьбы с загрязнениями не позволяли обеспечить рациональным образом длительную работу камеры без появления фона. Описан предложенный нами новый способ защиты от загрязнений отвердевшими газами поверхностей сосудов, окруженных неконденсирующимся газом, а также низкотемпературная пузырьковая камера, в которой применение указанного способа позволяет надёжно защитить иллюминатор от поступления к его поверхности вымерзающих примесей.



Сущность способа заключается в том, что около защищаемой поверхности организуется поток чистого неконденсирующегося газа ( для ВПК-водорода ). Чистый газ перемещается в направлении, противоположном направлению диффузии примесей ( вверх к крышке дьюара ).

Приведены экспериментальные результаты по уровню фона, появляющегося на фотографиях 100 см ВПК при различных способах подготовки камеры к работе. Экспериментально получено, что количество вымерзающих примесей, дающее заметный фон, составляет около 70 нсм<sup>3</sup> на 1 м<sup>2</sup> поверхности иллюминатора, а толщина слоя примесей при этом равна около 10<sup>-1</sup> мкм.

В соответствующих разделах теоретически и экспериментально исследована концентрационная и термическая диффузия примесей в потоке газа применительно к криогенной камере. Вначале математически рассмотрены соответствующие вопросы по диффузии для одномерного потока бинарной смеси в отсутствии внешних сил. Выведены формулы для определения плотности потока молекул, а также концентрации молекул одной из компонент в различных сечениях потока при заданных граничных условиях. Полученное уравнение для плотности потока N<sub>1</sub> молекул первого компонента бинарной газовой смеси в направлении z для условий работы криогенной камеры и установившегося состояния записывается в виде

$$N_1 = (n_1) \frac{(D_{12})_1 (T_1 - T_2) W (n_{10})_1 \left[ \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^W - \frac{(n_{10})_2}{(n_{10})_1} \right]}{T_1 H \left[ 1 - \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^W \right]} \quad (1)$$

Здесь

$$W = \left\{ \frac{\vartheta_1 T_1 H}{(D_{12})_1 (T_1 - T_2)} - [\alpha(\infty)] n_{10} \rightarrow 0 \bar{R}_{T_1 - T_2}^{\text{эксп}} \right\} \quad (2)$$

В этих уравнениях ( n )<sub>1</sub> - общее число молекул в единице объёма смеси в сечении 1, где z = 0; ( D<sub>12</sub> )<sub>1</sub> - коэффициент концентрационной диффузии для бинарной смеси 1-2 в сечении 1; T<sub>1</sub> и T<sub>2</sub> - соответственно температуры газовой смеси в сечении 1 и в сечении 2 ( z = H ); ( n<sub>10</sub> )<sub>1</sub> и ( n<sub>10</sub> )<sub>2</sub> - соответственно концентрации молекул первого компонента в смеси в сечениях 1 и 2; ϑ<sub>1</sub> - скорость потока газовой смеси в сечении 1; H - расстояние между сечениями 1 и 2;

[ α(∞) ] n<sub>10</sub> → 0 - термодиффузионная постоянная бинарной смеси для модели твердых шаров при n<sub>10</sub>, стремящейся к нулю.

$\bar{R}_{T_1 - T_2}^{\text{эксп}}$  - среднее значение отношения термодиффузионных постоянных бинарной смеси, определенное экспериментально для интервала температур T<sub>1</sub> и T<sub>2</sub>.

При рассмотрении диффузии в многокомпонентных смесях показано, что в ряде случаев ( диффузия примесей ) для решения можно использовать уравнения, полученные для бинарной смеси. На основе полученных формул дана методика решения задачи о диффузии примесей применительно к криогенной камере и определения необходимой скорости потока газа, ограничивающей количество диффундирующих примесей к иллюминатору камеры на заданном уровне. Показано хорошее согласие эксперимента с расчётом по диффузии примесей к иллюминатору 100-см ВПК. Из номограммы ( рис.7 ), построенной по уравнению (1), видно, что даже при сравнительно высокой концентрации азота ( примесей ) в сечении 1 ( у крышки дьюара ) ( n<sub>10</sub> )<sub>1</sub> достаточно иметь поток газа, обладающий небольшой скоростью ϑ<sub>1</sub>, чтобы количество азота ( примесей ), диффундирующего к сечению 2 ( плоскость иллюминатора ), было снижено на несколько порядков. Продувка водородом внутренней полости дьюара 100-см ВПК с объёмной скоростью 0,5 нм<sup>3</sup>/час, что соответствует средней линейной скорости потока в сечении 1 ϑ<sub>1</sub> = 1,4 · 10<sup>-4</sup> м/сек, обеспечивает работу камеры без появления фона в течение 24 суток.

В этой главе рассмотрены также вопросы очистки водорода от примесей и вопросы защиты оптических поверхностей корпуса камеры от пыли. Фильтрация водорода в 100-см ВПК осуществляется фторопластовыми фильтрами с размерами пор 1 мкм, фильтрами с фильтрующим элементом из ткани ФПП и фильтрами из пористой бронзы с размерами пор 40-70 мкм.

Предложенные и осуществленные на 100-см ВПК меры и устройства надёжно обеспечивают защиту оптических систем камеры от загрязнений. В одном из этапов эксплуатации камеры она проработала в течение 1,5 лет без разборки. При этом было произведено 7 пусков и сделано более 600 000 рабочих циклов, однако загрязнений, которые требовали бы разборку камеры, не появилось.

В шестой главе рассмотрены вопросы термостатирования, некоторые виды оптических искажений, а также вопросы технологии работы криогенной пузырьковой камеры.

Показано, что в камере с дьюарной теплоизоляцией при наличии газа под избыточным давлением снаружи корпуса удаётся компенсировать 97-98% теплопритока с помощью радиатора-теплообменника, размещенного по периферии снаружи иллюминатора и тем самым обеспечить термостатирование камеры с горизонтальным расположением иллюминатора практически без температурных градиентов в рабочем объёме. Описаны и проанализированы разработанные нами различные модификации систем термостатирования 100-см ВПК. Системы обеспечивают независимую стабилизацию температуры и давления в рабочем объёме и во внутренней полости дьюара с высокой точностью, а также компенсируют утечки из камеры. Термостатирование осуществляется жидким водородом, поступающим из охладителя непосредственно в теплообменники, размещенные снаружи и внутри корпуса камеры.

Дана методика математической оценки ошибок в поправках на смещения и на радиус кривизны следов заряженных частиц, обусловленных нестабильностями температуры и давления в столбе газообразного водорода, через который ведется фотографирование в камере с дьюарной теплоизоляцией. Показано, что величины этих ошибок для 100-см ВПК пренебрежимо малы.

Проанализированы тепловые напряжения в иллюминаторе при его охлаждении. Выведена формула для расчёта допускаемой скорости охлаждения при квазистационарном режиме. Формулой учитываются температурные градиенты на поверхностях иллюминатора.

В этой главе изложены элементы технологической схемы, системы обеспечения безопасной работы, вопросы технологии 100-см ВПК.

Основные выводы сводятся к следующему.

1. Спроектирован, налажен и пущен в эксплуатацию комплекс систем 100-сантиметровой водородной пузырьковой камеры с дьюарной теплоизоляцией: камера, система изменения давления, криогенные и технологические системы. Камера выдерживает длительную непрерывную работу. Всего на ней получено более 600 000 рабочих стереофотографий.

2. Предложена, разработана и исследована на 100-см ВПК новая система теплоизоляции криогенных пузырьковых камер- дьюарная теплоизоляция. В этой связи: а) предложен, осуществлен и исследован дьюар нового типа - с гибкой внутренней оболочкой,

опирающейся через изоляционный материал на жесткую внешнюю оболочку; б) разработана методика детального расчёта теплопритоков к камере с дьюарной теплоизоляцией; расчётные данные по теплопритокам в 100-см ВПК хорошо согласуются с экспериментальными. в) Экспериментально показано, что изотермические поверхности в световом конусе столба газообразного водорода в 100-см ВПК имеют плоский вид. г) Дана методика математической оценки оптических искажений, обусловленных нестабильностью давления и температуры газа, находящегося во внутренней полости дьюара. Показано, что величина этих искажений в 100-см ВПК мала.

3. Предложены, разработаны и исследованы на 40 см ВПК и 100-см ВПК новые системы изменения давления криогенной пузырьковой камеры, содержащие новые решения: поршневого устройства, целевого уплотнения низкотемпературного поршня, способа остановки движущихся частей, устройства для расширения.

4. Проведены исследования термодинамических циклов пузырьковой камеры. В связи с этим: а) построена  $p$ - $V$ - $T$  диаграмма для жидкого пара-водорода в метастабильной области. б) Впервые экспериментально на 100-см ВПК исследованы циклы, отличающиеся продолжительностью процесса расширения и цикла в целом. Обнаружено, что при замедлении процесса расширения ( в определенных пределах ) увеличивается длительность процесса при минимальном давлении, а необратимость процесса расширения не изменяется. б) Из экспериментального исследования циклов на 100-см ВПК обнаружено существование критических перегревов, получены зависимости индикаторной работы и степени расширения от величины перегрева, выявлены предельные перегревы, получен коэффициент адиабатической сжимаемости жидкого пара-водорода.

5. Предложены, разработаны и исследованы новые способы и устройства, надёжно обеспечивающие чистоту оптических поверхностей криогенной пузырьковой камеры. При этом теоретически и экспериментально исследована концентрационная и термическая диффузия примесей в потоке газа применительно к криогенной камере; получены расчётные формулы; показано хорошее согласие эксперимента с расчётом по диффузии примесей к иллюминатору 100-см ВПК.

6. Предложены, разработаны и исследованы новые системы



термостатирования криогенной пузырьковой камеры, включающие радиатор, размещенный снаружи камеры и несущий основную тепловую нагрузку. Математически получена формула для расчёта допустимой скорости охлаждения иллюминатора при квазистационарном режиме. Оработана удобная технологическая схема 100-см ВПК, выработаны технологические приёмы.

7. Дьярная система теплоизоляции, система термостатирования, включающая радиатор, основные элементы технологической схемы, технологические приёмы, системы обеспечения чистоты, впервые реализованные на 100-см ВПК, внедрены ОВК ЛВЭ ОИЯИ при нашем содействии на 2-метровой водородной камере "Людмила".

Диссертация основана на следующих опубликованных работах автора:

#### К главе I

1. Cryogenics, 6, № 3, 158 (1966) (совместно с Н.И.Баландиком, В.А.Белушкиным, Л.Б.Головановым, А.Г.Зельдовичем, Ю.К.Пилипенко).
2. Nucl. Instr. and Methods, 20, II4 (1963) (совместно с А.В.Белоговым, А.А.Белушкиной, Р.Винавером, В.Н.Виноградовым, В.В.Глаголевым, А.Г.Зельдовичем, Н.К.Зельдович, Э.В.Козубским, Р.М.Лебедевым, М.Малы, Н.Н. Мельниковой, А.М.Моисеевым, И.С.Сайтовым, Ю.А.Турбиным, Е.П.Устенко, И.В.Чувило, Ю.А.Шишовым).
3. Депонированная публикация ОИЯИ, БЗ-2481, Дубна, 1965 (совместно с Р.М.Лебедевым, Ю.А.Шишовым).

#### К главе II

1. Авторское свидетельство № 153486. Бюллетень, № 3, 1963.
2. а) Monastberichte DAW zu Berlin, Band 7, Heft 10-11, s.812, 1965.  
б) Доклад на У Интернациональной конференции по физике и технике низких температур, Дрезден, 1965 (а) и б) совместно с А.Г.Зельдовичем).
3. а) Пузырьковые камеры. ОИЯИ, I3-4446, стр.121, Дубна, 1969.  
б) Доклад 5.9 на Рабочем совещании по технике пузырьковых камер, Дубна, 1969. (а) и б) совместно с Л.Б. Головановым и А.Г. Зельдовичем).

4. а) Monastberichte DAW zu Berlin, Band 7, Heft 10-11, s.812, 1965.  
б) Доклад на У Интернациональной конференции по физике и технике низких температур, Дрезден, 1965 (а) и б) совместно с Л.Б.Головановым и А.Г.Зельдовичем).
5. Препринт ОИЯИ, 8-3316, Дубна, 1967 (совместно с Н.Г.Анищенко, В.А.Белушкиным, А.А.Белушкиной, В.А.Васильевым, Л.Б.Головановым, А.Г.Зельдовичем, Н.К.Зельдович, Ю.К.Пилипенко, Ю.А.Шишовым).

#### К главе III

1. Авторское свидетельство № 155566. Бюллетень, № 13, 1963.
2. а) Monastberichte DAW zu Berlin, Band 7, Heft 10-11, s.813, 1965.  
б) Доклад на У Интернациональной конференции по физике и технике низких температур, Дрезден, 1965.
3. а) Пузырьковые камеры. ОИЯИ, I3-4446, стр.219, Дубна, 1969.  
б) Доклад 8.10 на Рабочем совещании по технике пузырьковых камер, Дубна, 1969.
4. Авторское свидетельство № 135544. Бюллетень, № 3, 1961 (совместно с А.В.Белоговым и А.Г.Зельдовичем).
5. Доклад ГИО на X Всесоюзном совещании по физике и технике низких температур, Москва, 1963 (совместно с А.В. Белоговым и А.Г. Зельдовичем).
6. а) Physics and Techniq. of Low Temp, Prague, p.226, 1964.  
б) Доклад 5 на III Интернациональной конференции по физике и технике низких температур, Прага, 1963 (а) и б) совместно с А.В.Белоговым и А.Г.Зельдовичем).
7. Препринт ОИЯИ, № 2254, Дубна, 1965 (совместно с А.В.Белоговым, А.Г.Зельдовичем, А.М.Моисеевым, М.Д.Шафрановым).
8. X Международная конференция по физике высоких энергий. Атомиздат, т.2, стр.490, 1966 (совместно с А.В.Белоговым, А.Г.Зельдовичем, А.М.Моисеевым, М.Д.Шафрановым).

#### К главе IV

1. а) Пузырьковые камеры. ОИЯИ, I3-4446, стр.89, 1969. б) Доклад 5.1 на Рабочем совещании по технике пузырьковых камер, Дубна, 1969.

2. а) Пузырьковые камеры. ОИЯИ, 13-4446, стр.93, 1969. б) Доклад 5.2 на Рабочем совещании по технике пузырьковых камер, Дубна, 1969.

К главе У.

1. Авторское свидетельство № 283422. Бюллетень, № 31, 1970 ( совместно с А.Г.Зельдовичем ).  
 2. Авторское свидетельство № 309 329. Бюллетень, № 22, 1971 ( совместно с А.Г.Зельдовичем ).  
 3. Депонированная публикация ОИЯИ, Б2-8-6164, Дубна, 1971.

К главе VI.

1. а) Monastberichte der DAW zu Berlin, Band 7, Heft 10-11, S. 812, 1965. б) Доклад на У Интернациональной конференции по физике и технике низких температур, Дрезден, 1965 (а) и б) совместно с А.Г.Зельдовичем ).  
 2. а) Пузырьковые камеры. ОИЯИ, 13-4446, стр.117, Дубна, 1969. б) Доклад 5.8 на Рабочем совещании по технике пузырьковых камер, Дубна, 1969. (а) и б) совместно с А.Г.Зельдовичем ).  
 3. а) Monastberichte der DAW zu Berlin, Band 7, Heft 10-11, S. 811, 1965. б) Доклад на У Интернациональной конференции по физике и технике низких температур, Дрезден, 1965. (а) и б) совместно с А.Г.Зельдовичем и Н.К.Зельдович ).  
 4. Доклад 12 на секции "Техника охижения" УШ Всесоюзного совещания по физике низких температур, Киев, 1961 ( совместно с Л.Б.Головановым ).  
 5. Доклад 2 на секции "Техника охижения" УШ Всесоюзного совещания по физике низких температур, Киев, 1961 ( совместно с Н.И.Баландиковым, А.В. Белоноговым, Л.П.Белоноговой, В.А.Белушкиным, А.А.Белушкиной, Л.Б.Головановым, А.Г.Зельдовичем, Н.К.Зельдович, Л.Г.Орел, Д.К.Пилипенко ).

Рукопись поступила в издательский  
 отдел  
 4 февраля 1972 года

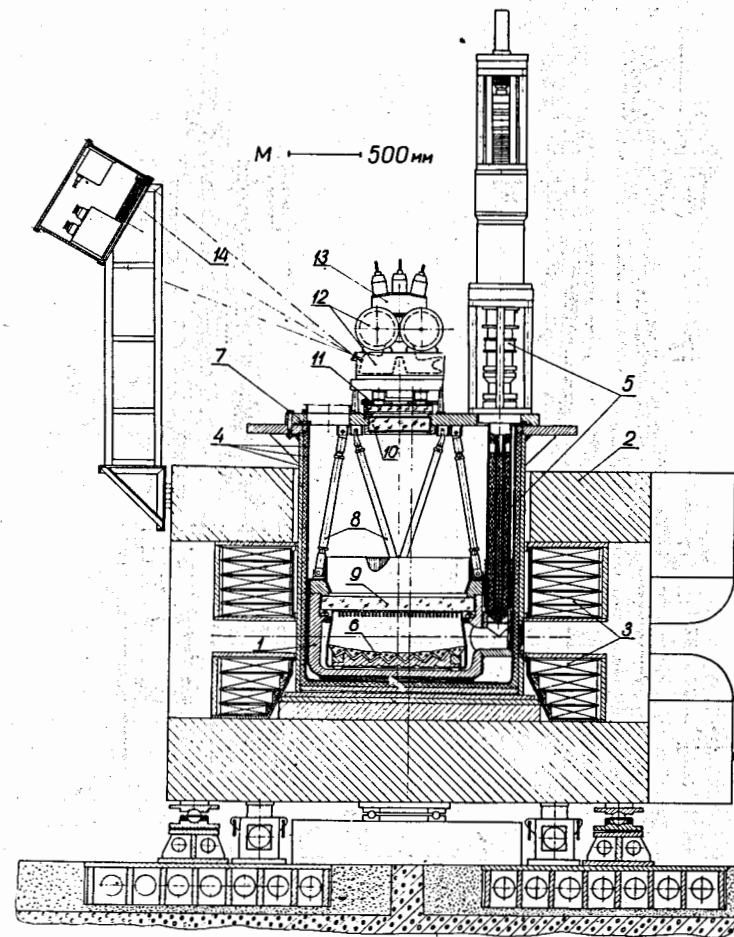


Рис.1. 100-см водородная пузырьковая камера ОИЯИ  
 1 - Корпус камеры; 2,3- электромагнит МС-12; 4-дверь камеры; 5- система изменения давления камеры; 6-растр; 7- крышка двери; 8- подвеска; 9-стекло-иллюминатор корпуса камеры; 10-защитный иллюминатор; 11-иллюминатор двери; 12-фотоаппарат; 13-осветитель; 14- маркировочный щит.

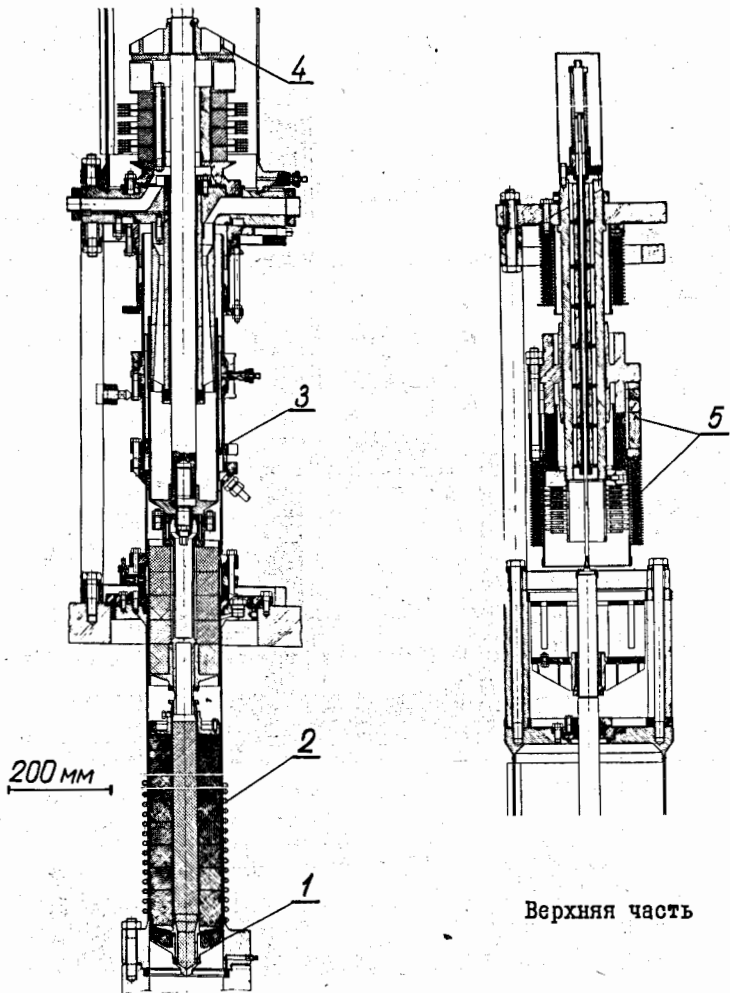


Рис.2. Система изменения давления 100-см. ВПК

- 1- Низкотемпературный поршень; 2-вытеснитель;  
 3- поршень для сжатия; 4-удерживающий клапан;  
 5- подвижный демпфер - масса.

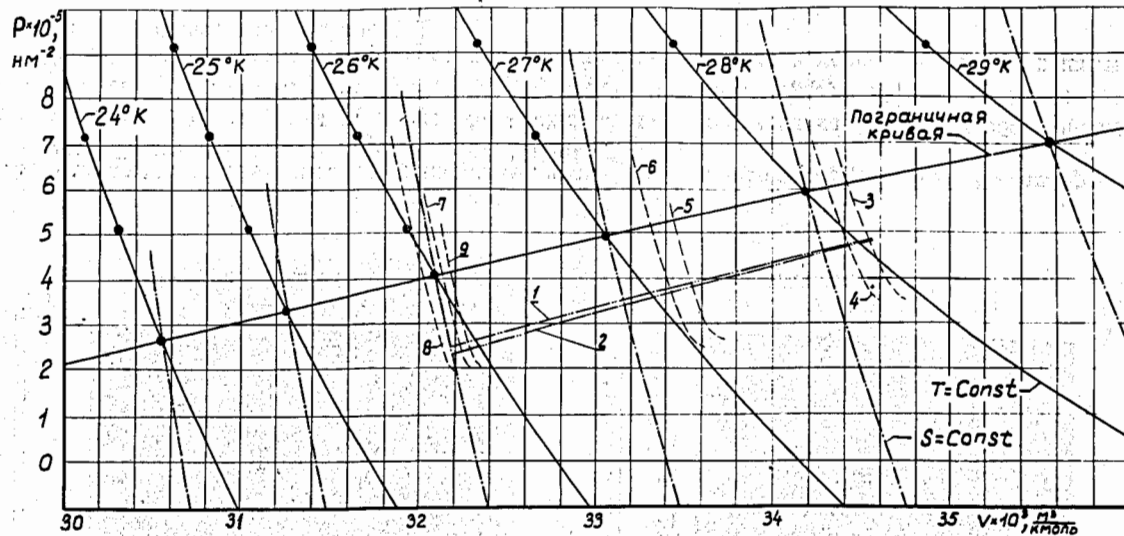


Рис.3.  $P-v-T$  диаграмма для жидкого пара-водорода.

Область перегретого состояния рассчитана по уравнению Ван-дер-Ваальса с переменными коэффициентами  $\alpha$  и  $\beta$ .

1,2 - границы чувствительности к релятивистским частицам ( 2- получена на 100-см ВПК; 1- по данным других авторов - см. диссертацию );

3-9 - условные процессы расширения ( см. диссертацию ).

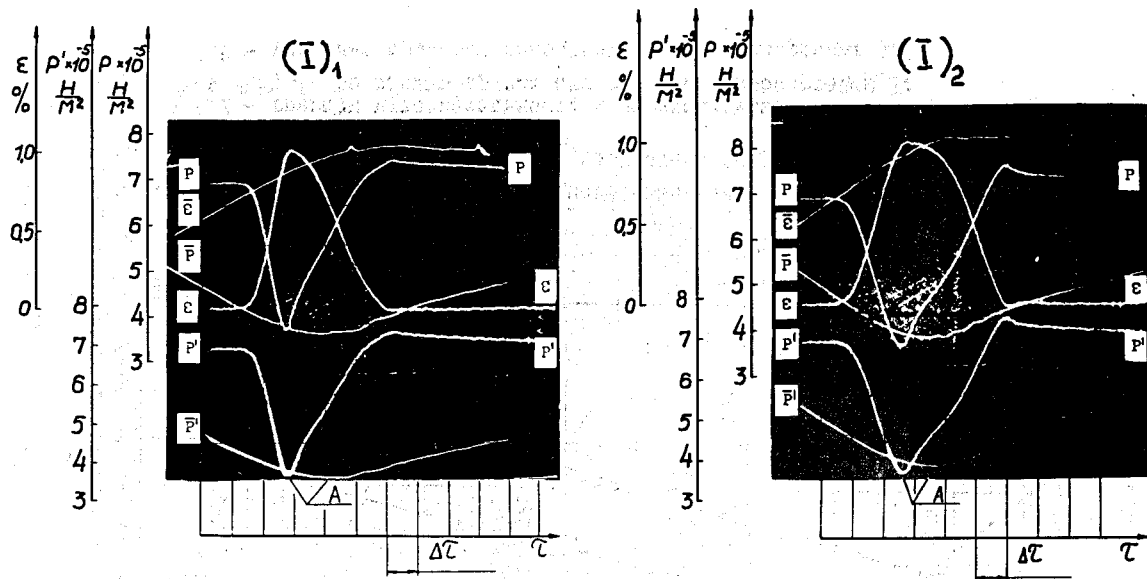


Рис.4. Осциллограммы зависимостей давления в камере  $P$  и степени расширения  $\varepsilon$  от времени  $\tau$  для циклов  $(\bar{I})_1$  и  $(\bar{I})_2$  100-см ВПК.  
 В цикле  $(\bar{I})_2$  скорости процесса расширения меньше, чем в цикле  $(\bar{I})_1$ . В обоих циклах  $T_I = 28,3^{\circ}K$ ,  $P_I = 6,9 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ ,  $P_{\min} = 3,7 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ ,  $\varepsilon_{\max} = 1\%$ ,  $\Delta\tau = 25 \text{ мсек.}$   
 Видно, что длительность процесса при минимальном давлении в конце расширения в цикле  $(\bar{I})_2$  больше, чем в цикле  $(\bar{I})_1$ .

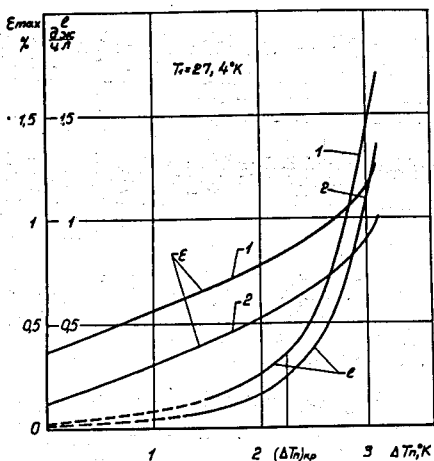


Рис.5. Степень расширения  $\epsilon_{\max}$  и удельная индикаторная работа  $\ell$  в зависимости от создаваемого перегрева  $\Delta T_{\text{п}}$  в циклах 100-см ВПК.  
 Кривые 1 относятся к циклам, в которых  $P_1 = 6,8 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ ;  
 Кривые 2 - к циклам, в которых  $P_1 = 5,8 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ .

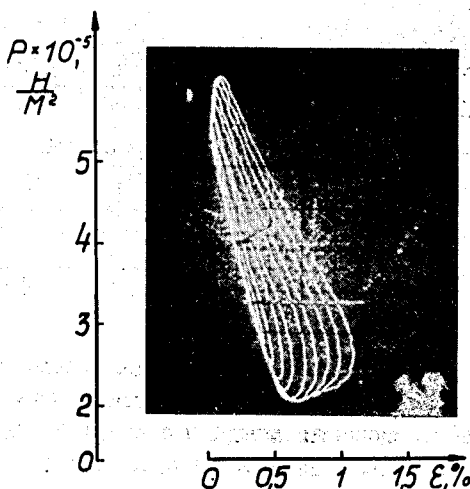


Рис.6. Осциллограмма зависимостей давления в камере  $P$  от степени расширения  $\epsilon$  для циклов 100-см ВПК при различных максимальных степенях расширения  $\epsilon_{\max}$ .  
 В циклах  $T_1 = 26,2^\circ \text{К}$ ,  $P_1 = 5,2 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ . Видно, что при  $\epsilon_{\max} < 0,5\%$  индикаторная работа  $\ell$  в циклах мала.



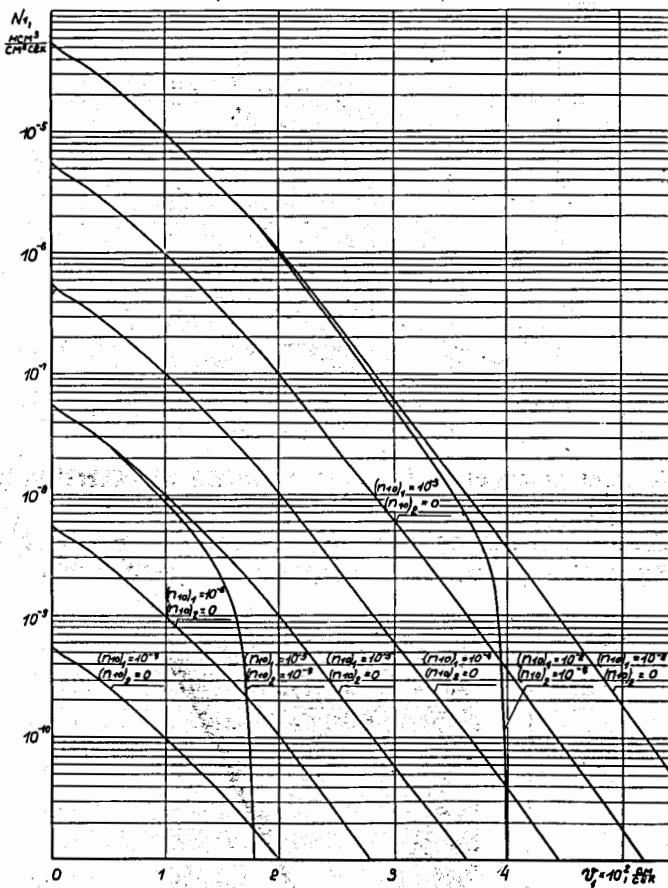


Рис.7. Номограмма зависимостей удельного количества диффундирующего азота  $N_4$  в одномерном потоке смеси азот-водород в зависимости от скорости потока в сечении I  $v_1$  при различных концентрациях азота в сечениях I и 2  $(n_{10})_1$  и  $(n_{10})_2$ .  
 Рассчитана по уравнению (I) для условий работы 100-см ВПК ( см. диссертацию ).