



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 96-37

ФТО

Е.Н.Ардашев, В.И.Киреев¹, В.Х.Маляев, Г.Я.Митрофанов,
А.М.Моисеев, А.В.Плескач, А.И.Попов, Г.И.Селиванов, А.А.Широков,
Ю.В.Хренов¹, В.Т.Толмачев¹, Е.П.Устенко¹

**ГЕЛИЕВАЯ СИСТЕМА ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ
ЖИДКОВОДОРОДНОЙ БЫСТРОЦИКЛИРУЮЩЕЙ
ПУЗЫРЬКОВОЙ КАМЕРЫ**

Направлено в *ПТЭ*

¹ ОИЯИ, Дубна

Протвино 1996

Аннотация

Ардашев Е.Н. и др. Гелиевая система термостатирования жидководородной быстроциклирующей пузырьковой камеры: Препринт ИФВЭ 96-37. – Протвино, 1996. – 25 с., 12 рис., 3 табл., библиогр.: 9.

Для стабилизации режима жидководородной быстроциклирующей пузырьковой камеры создана двухконтурная гелиевая система термостатирования, позволяющая предельно возможно уменьшить количество жидкого водорода и за счет этого локализовать взрывоопасную зону границами вакуумного кожуха. Точность поддержания температуры, обеспечиваемая системой в динамическом режиме, составляет $\pm 0,005\text{K}$ и давления $\pm 0,01$ атм. Расход жидкого гелия не превышает 60 л/сутки.

Abstract

Ardashev E.N. et al. Helium Refrigeration System of Liquid Hydrogen Rapid Cycling Bubble Chamber: IHEP Preprint 96-37. – Protvino, 1996. – p. 25, figs. 12, tables 3, refs.: 9.

Double – loop helium refrigeration system is developed to stabilize working conditions of the liquid hydrogen rapid cycling bubble chamber which allows to reduce to minimum the used amount of liquid hydrogen and thus to localize a dangerous zone by the inside of the vacuum tank. At operating conditions this system is maintaining the temperature with the precision of $\pm 0.05\text{ K}$ and the internal pressure with the precision of ± 0.01 bar. Expenditure of liquid helium is equal to 60 l/day.

Введение

В настоящей работе описывается система термостатирования быстроциклирующей жидководородной пузырьковой камеры (БЦПК) [1]. Эта система предназначена для автоматического поддержания заданных величин давления и температуры с высокой точностью.

Являясь вершинным детектором гибридного спектрометра, камера должна быть плотно окружена регистрирующей электронной аппаратурой [2], некоторые элементы которой находятся под высоким напряжением. Реализация последней во взрывозащищенном исполнении крайне нежелательна, так как это связано с внесением на пути частиц дополнительной массы вещества, ухудшающей фоновые условия для работы регистрирующей аппаратуры и прежде всего детекторов триггерной системы.

Таким образом, условия эксперимента накладывают жесткие ограничения на количество жидкого водорода, допустимое вне области рабочего объема БЦПК. Оптимальным решением в этом случае является сведение его к минимуму, при котором граница взрывоопасной зоны будет совпадать с контуром вакуумного кожуха камеры. Такая мера позволяет снять требование взрывозащищенности электрооборудования, окружающего камеру.

Система термостатирования камеры в традиционном исполнении обычно достаточно инерционна в тепловом отношении и потому обеспечивает эффективный съем только усредненной во времени тепловой нагрузки. Но специфика постановки физического эксперимента на пучке частиц от ускорителя предопределяет необходимость работы камеры в быстроциклирующем режиме кратковременными сериями с числом расширений, достигающим 50. Поскольку необратимое тепловыделение в основном связано с динамическим режимом работы, то отсюда вытекает дополнительное требование к системе термостатирования: она должна быть способна поддерживать заданный температурный режим с хорошей точностью не только в среднем, но и в пределах временного интервала, ограниченного каждой серией

расширений. Это соответственно повышает требования к точности поддержания среднеинтегральной температуры в рабочем объеме камеры.

1. Принцип функционирования системы термостатирования

На рис.1 представлена упрощенная схема системы термостатирования быстроциклирующей пузырьковой камеры [1], которая включает в себя систему питания хладагентом и собственно систему стабилизации режима, состоящую из трех подсистем. Две подсистемы предназначены для обеспечения заданного температурного режима, а третья служит для поддержания статического давления в рабочем объеме камеры. Одна из двух подсистем поддержания заданного температурного режима снимает теплопритоки, поступающие по тепловым мостам силовых элементов механизма расширения, а другая служит для отвода тепла из рабочего объема камеры.

Каждая из подсистем состоит из конденсационного бачка, охлаждаемого гелием, и одного или нескольких теплообменников, соединенных с этим бачком.

Гелиевый теплообменник, охлаждающий конденсационный бачок и конденсирующий в нем избыточную паровую фазу водорода, образует первичный контур охлаждения. Теплообменник камеры, соединенный с конденсационным бачком и заполненный водородом, образует вторичный контур, который работает в термосифонном режиме. Двухконтурная система охлаждения позволяет использовать для термостатирования жидководородной пузырьковой камеры жидкий гелий, несмотря на резкое различие его термодинамических параметров с водородом, и создать условия для работы теплообменников камеры в изотермическом режиме.

Жидкий азот, используемый в системе термостатирования, служит для предварительного охлаждения силовых тепловых мостов механизма расширения, зеркального перископа, части радиационного экрана и для предварительного охлаждения корпуса камеры во время ее захолаживания. Каждый из соответствующих азотных теплообменников соединен с азотной ванной, размещенной в верхней части вакуумного кожуха.

2. Система питания гелием

Как уже указывалось в [1], для ограничения взрывоопасной зоны границами вакуумного кожуха в качестве хладагента для системы термостатирования был использован жидкий гелий.

Следует заметить, что с точки зрения съема тепла возможности жидкого гелия и жидкого водорода соизмеримы. Так, для съема 1 Вт при 29К с помощью жидкого водорода необходимо 4,6 л в сутки, а для съема той же мощности жидким гелием на том же температурном уровне требуется 4,4 л в сутки хладагента.

Питание теплообменников жидким гелием осуществляется непрерывно из 100-литрового сосуда Дьюара, находящегося в непосредственной близости от камеры и соединенного с ней стационарным сифоном с вакуумной суперизоляцияй.

Стационарный сифон, изображенный на рис.2, имеет специальную конструкцию, которая позволяет 1 раз в сутки пополнять стационарный дьюар, не нарушая подачи из него жидкого гелия в систему термостатирования камеры.

Сифон имеет три подсоединения: одно подсоединение к системе термостатирования камеры через горловину вакуумного кожуха, другое – к стационарному дьюару, третье служит для подсоединения гибкого сифона от транспортного дьюара. Жидкий гелий (как это видно из рис.2) во время пополнения стационарного дьюара поступает по центральной трубке $\varnothing 6 \times 0,5$ мм сифона, не доходящей до дна дьюара на 10 мм.

Подача жидкого гелия из стационарного дьюара на камеру осуществляется по коаксиальной трубке, охватывающей центральную трубку заполнения. В нижней части трубки заполнения находится клапан, который с помощью пружины закрывает линию заполнения. Открытие клапана осуществляется с помощью струны [3], которая, работая на растяжение, сжимает пружину и открывает клапан. Узел открытия клапана, к которому другим концом присоединена струна, находится в теплой зоне.

Во время работы камеры в стационарном дьюаре поддерживается избыточное давление, обычно $0,20 \div 0,25$ ати. Этого перепада давления оказывается достаточно, чтобы обеспечить бесперебойное питание теплообменников конденсационных бачков. Давление в стационарном дьюаре задается двумя стабилизаторами давления, один из которых находится на линии подачи в этот дьюар газообразного гелия и открывается при понижении давления в дьюаре, другой – на линии сброса гелия из дьюара в обратный поток и открывается при повышении давления в дьюаре. Гибкий переливной сифон постоянно подсоединен одним своим концом к горловине стационарного. Перед подсоединением к транспортному дьюару гибкий сифон продувается гелием из стационарного до появления на выходе жидкой фазы.

Температура гелия на входе в теплообменники конденсационных бачков измеряется с помощью конденсационного термометра, пролонгированного в область сухого пара. На рис.3 приводится участок диаграммной ленты с записью давления в булльбе конденсационного термометра. Видно, что имеют место пульсации температуры. Представляется, что это реальные пульсации, поскольку расход гелия по поплавковому расходомеру также имеет ярко выраженный пульсирующий характер. Это явление может объясняться нестационарным характером течения кипящего гелия по протяженному трубопроводу.

Испаряемость стационарного сифона была измерена с помощью контрольных весов, на которых находился дьюар во время передавливания гелия. При этом теплоприток составил $1,5$ Вт/м (длина сифона $1,8$ м). Характеристику сифона можно также контролировать по температуре гелия после сифона. Из предположения, что теплоприток по всей длине сифона постоянен и воспринимается гелием без потерь (скорость жидкого гелия $\sim 0,03$ м/с), нами была получена следующая зависимость температуры гелия после сифона от величины теплопритока к нему:

$$T_{\text{вых}} = \frac{qL - \rho \cdot r \cdot G_{\text{He}}}{C_p \cdot \rho \cdot G_{\text{He}}} + T_0,$$

где $T_{\text{вых}}$ – температура гелия после сифона (на входе в теплообменники бачков); q – погонный теплоприток к стационарному сифону (Вт/м); L – длина сифона (м); G_{He} – расход жидкого гелия по сифону; r – теплота испарения; ρ – плотность жидкого гелия; C_p – теплоемкость газообразного гелия; T_0 – температура кипения жидкого гелия (4,2К).

Приведенная зависимость справедлива для случая, когда жидкостный участок течения гелия меньше длины стационарного сифона, т.е. когда выражение в числителе имеет положительное значение. Этот случай характерен для наших условий. В другом случае (когда жидкостный участок течения занимает всю длину сифона) теплоприток к сифону будет определять паросодержание (долю пара) на выходе из последнего. Приведенная зависимость позволяет по измеренной температуре определить теплоприток к стационарному питающему сифону.

Расход жидкого гелия определялся по изменению уровня в стационарном, питающем дьюаре. Уровень измерялся с помощью сверхпроводящего уровнемера, разработанного и изготовленного в ОИЯИ.

В установившемся режиме работы камеры расход газообразного гелия был незначителен. Это объясняется тем, что тепловыделение от измерителя уровня, а также теплопритоки от сифона и клапана вызывают испарение такого количества гелия, которое достаточно для переадавливания жидкого гелия в систему термостатирования камеры фактически без расхода газообразного гелия из баллона. В этом случае реальный расход жидкого гелия на камеру выражается соотношением

$$G_{\text{He}} = \left(1 - \frac{\rho''}{\rho'}\right) G,$$

где G – расход, определенный по падению уровня в рабочем дьюаре; ρ'' – плотность равновесного пара гелия; ρ' – плотность равновесной жидкости.

3. Стабилизация температуры

На рис.4 приведена схематично приведена подсистема для отвода тепла из рабочего объема камеры, состоящая из охлаждаемого гелием конденсационного бачка и соединенного с ней теплообменника.

Расход гелия через теплообменник конденсационного бачка регулируется с помощью регулирующего вентиля. Контур регулирования, включающий в себя пневмопреобразователь, регулятор и регулирующий вентиль, поддерживает в бачке задаваемое равновесное давление и, следовательно, определяет температуру кипения жидкого водорода в теплообменнике камеры, входящем во вторичный контур. Газообразный гелий после теплообменника идет на охлаждение радиационного экрана камеры, после которого, пройдя подогреватель, поступает на регулирующий вентиль, расположенный в теплой зоне.

Внутри рабочего объема камеры размещены теплообменник вторичного контура, который опускной и подъемной трубками связан с конденсационным бачком (соответственно с его нижней и верхней частями), и бульба конденсационного термометра.

Непосредственно на выходе из теплообменника установлена бульба конденсационного термометра, которая играет роль индикатора расхода. Внутренний теплообменник камеры размещен на вытеснителе из лексана, расположенном между встречно движущимися мембранами [4], обеспечивая тем самым эффективный теплообмен в зоне узла изменения объема. Этот теплообменник (см. рис.5) выполнен фрезерованием прямоугольных каналов сечением $6 \times 3 \text{ мм}^2$, расположенных на боковых поверхностях вытеснителя. Каналы закрыты клиновидным листом лексана толщиной 1,5 мм сверху и 4 мм внизу, посаженным на поверхность вытеснителя на клею. В верхней и нижней частях теплообменника находятся коллекторы сечением 50 мм^2 каждый.

Контроль работы этого контура осуществляется с помощью конденсационного термометра, чувствительный элемент которого (бульба) находится в рабочем объеме камеры. Каждый из водородных контуров защищен от превышения давления с помощью предохранительного клапана, настроенного на 12 ати, дистанционно управляемого вентиля, заведенного параллельно на контактный манометр (10 ати), и ручного вентиля.

Для обеспечения работы теплообменника камеры в изотермическом режиме необходимо, чтобы теплообменник бачка, отдавая тепло газообразному гелию, изменяющему свою температуру в диапазоне от 7 до 29К (перекрывая и тройную точку водорода), не допускал намораживания водорода на его поверхности, с одной стороны, и расслоения жидкого водорода в бачке, с другой стороны. Для этого теплообменник расположен в верхней части бачка (см. рис.6) и выполнен в виде толстостенного стакана из меди, дно которого имеет ребра, образующие развитую поверхность, на которой конденсируется водород. На наружной поверхности медного стакана напаян медный змеевик, по которому циркулирует гелий. Он поступает в верхнюю часть стакана при температуре около 7К, а выходит снизу в плоскости дна при $T \sim 29\text{К}$. Толщина стенки стакана 7 мм, дна – 12 мм. Эффективность теплообменника составляет 0,99 при нагрузке 10 Вт, т.е. величина недорекуперации при рабочей нагрузке не превышает 0,2К. Медный стакан припаян к обечайке бачка, выполненной из нержавеющей стали. Внутри бачка в его верхней части установлен конический отражатель для исключения попадания конденсата на поверхность бульб конденсационных указателей уровня. Конденсационные указатели уровня служат для настройки емкостных датчиков уровня, которыми оснащены конденсационные бачки.

Для полной минимизации взрывоопасной зоны необходимо также до предела уменьшить жидкостный объем бачка. Минимальный диаметр бачка определяется необходимостью размещения в нем двух конденсационных термометров, емкостного датчика измерения уровня, входных и выходных трубок для каждого из теплообменников вторичного контура, а также габаритами гелиевого (первичного)

теплообменника, осуществляющего теплообмен между водородом бачка и холодным гелием. Минимальный уровень жидкого водорода в бачке определяется условием недопустимости захвата паровой фазы входной трубкой теплообменника, а также вскипания водорода. Удовлетворить этим требованиям можно, если падение давления при входе в опускающую трубку будет меньше гидростатического давления столба жидкости [5]:

$$h_{yp.} \geq \frac{V_0^2(1 + \xi)}{2g},$$

где V_0 – скорость циркуляции жидкости; ξ – коэффициент сопротивления на входе в теплообменник; $h_{yp.}$ – уровень жидкого водорода в бачке; g – ускорение свободного падения.

Расчет режима циркуляции жидкого водорода во вторичном контуре был проведен по методике, изложенной в работе [6].

На рис.7 приведен результат расчета скорости циркуляции жидкости (V_0) в зависимости от тепловой нагрузки (Q) теплообменника для нескольких значений внутренних диаметров опускающей и подъемной трубок (их сечения принимались одинаковыми). На этом же графике приведена зависимость истинного объемного паросодержания от тепловой нагрузки. Видно, что для трубки каждого диаметра существует предельная тепловая нагрузка, превышение которой ведет к полному прекращению естественной циркуляции. Приведенные расчетные зависимости позволяют выбрать размер трубки для проведения обвязки теплообменников. Основываясь на этих расчетах, для исполнения теплообменников в нашем случае была выбрана трубка с внутренним диаметром 4 мм ($\varnothing 5 \times 0,5$ мм). При этом запас по Q взят достаточно большим, чтобы обеспечить необходимую производительность теплообменника в режиме захлаживания камеры от температуры жидкого азота до температуры жидкого водорода.

Другая подсистема, снимающая теплоприток по тепловым мостам силовых элементов конструкции, аналогична описанной выше. Единственное ее отличие в том, что конденсационный бачок соединен независимыми линиями не с одним, а с четырьмя теплообменниками, которые снимают теплопритоки, по следующим тепловым мостам: штокам (путем охлаждения торцев каждого из поршней) и конусам подвески камеры. В отличие от использованных ранее способов охлаждения подвижных массивных элементов расширительного механизма, в БЦПК тепло, поступающее по штокам приводов, снимается полностью за счет размещения теплообменников непосредственно на движущихся устройствах [7]. При этом одновременно обеспечивается и охлаждение мембраны (см. рис.5). Этот теплообменник выполнен в теле поршня в виде вертикальных каналов, объединенных по периферийной части поршня кольцевым коллектором. Подвод и отвод жидкого водорода к теплообменнику осуществляется с помощью упругих нержавеющей трубок указанного выше сечения. Каждый из четырех теплообменников соединен с бачком независимыми линиями. Таким образом, эта система снимает статические теплопритоки за пределами рабочей зоны, упреждая попадание их в рабочий объем камеры, что

позволяет существенно уменьшить тепловую дилорсию в области фотоафиро- вания. В соответствии с принятой конструкцией подвеска камеры осуществляется за конические обечайки. Для уменьшения тепловой нагрузки водородных теплооб- менников камеры предварительное охлаждение этих обечаек производится жидким азотом.

Теплообменник предварительного охлаждения конической обечайки представля- ет собой П-образный полый профиль, приваренный к обечайке. С целью уменьше- ния теплопритока к камере этот теплообменник необходимо было разместить на конусе как можно дальше от камеры. Однако приближение этого теплообменника к теплomu концу моста имеет предел, обуславливаемый необходимостью соблюдения двух условий: немерзание зоны контакта с теплой стенкой вакуумного кожуха и отсутствие на ней конденсата (т.е. температура в этой зоне должна быть вы- ше точки росы). Ширина теплообменника, размещаемого на конусе, выбирается из условия полного сьема притекающего тепла (Q_{N_2} и Q_{H_2}) в режиме пузырькового кипения.

На рис.8 представлены результаты расчета теплопритоков к азотному (Q_{N_2}) и водородному (Q_{H_2}) теплообменникам в зависимости от расположения азотного теплообменника при фиксированной длине конической обечайки; на нижнем графи- ке приведена зависимость температурного напора в зоне контакта теплой стенки вакуумного кожуха с конической обечайкой от места расположения азотного те- плообменника. Для наглядности стенка вакуумного кожуха на рис.8 изображена условно. Основываясь на этих расчетах, было выбрано место расположения азотно- го теплообменника, которое удовлетворяет условию не только немерзания, но и незапотевания при температуре окружающей среды $+20^{\circ}C$ и относительной влаж- ности в помещении $\varphi = 60\%$ [8]. Таким образом, азотный теплообменник, находясь на расстоянии 100 мм от теплого конца конуса, создает максимальную разницу между температурой окружающей среды ($+20^{\circ}C$) и температурой стенки вакуум- ного кожуха (температурный напор), равную $7^{\circ}C$, что соответствует минимальной температуре стенки, равной $T_{cm} = T_{oc} - \Delta T_{max} = 13^{\circ}C$, которая выше точки росы при $\varphi = 60\% - T_{m.p.}^{\varphi=60} = 12^{\circ}C$. При этом теплоприток к водородному теплообменнику конуса при обеспечении условия незапотевания составляет 1 Вт.

Для выбранного диаметра трубки (опускной и подъемной) максимальная ско- рость циркуляции может достигать $V_0 = 0,42$ м/с (см. рис.7). В этом случае уровень водорода из условия его немерзания должен быть

$$h_{yp} \geq \frac{V_0^2(1 + \xi)}{2g} = \frac{0,42(1 + 0,5)}{2 \cdot 9,8} \geq 0,014 \text{ м.}$$

Обычно уровень в бачках поддерживается порядка $50 \div 60\%$ от максимального, т.е. $25 \div 30$ мм.

4. Стабилизация давления

На рис.9 приведена упрощенная схема стабилизации давления рабочей среды.

Для стабилизации давления в рабочем объеме БЦПК использован принцип демпфирования рабочей среды, осуществляемый с помощью дополнительного вспомогательного объема с жидким водородом. Этот функционально независимый объем играет роль стабилизатора давления. По своему устройству и принципу действия система стабилизации давления аналогична описанным системам поддержания температурного режима. Основным узлом ее является заполняемый жидким водородом бачок-конденсатор, снабженный гелиевым теплообменником. Бачок через трубку $\varnothing 4 \times 0,5$ мм, оканчивающуюся тонким капилляром, сообщается с рабочим объемом камеры. При повышении давления жидкий водород из рабочего объема вытесняется в эту трубку в направлении бачка-конденсатора, где его паровая фаза находится в равновесном состоянии с жидкостью. Основным условием работы такой системы поддержания давления является наличие некоторого теплопритока к бачку-конденсатору, что в криогенной системе легко выполняется. В этом случае статическое давление в камере поддерживается путем изменения расхода гелия через теплообменник бачка.

Капилляр является ключевым местом соприкосновения системы стабилизации с рабочим объемом камеры. Размещен он на входе в камеру и представляет собой отрезок нержавеющей трубки с внутренним диаметром 0,24 мм и длиной 6,1 мм. Так как капилляр является наиболее тонким элементом системы и вместе с тем играет важную роль в работе быстроциклирующей камеры, то для предотвращения его забивки на линии связи рабочего объема с бачком-конденсатором установлен фильтр из пористой бронзы с размером пор 20 мкм. Более того, для исключения паразитного вскипания водорода в капилляре, он снабжен специальным теплообменником, охлаждаемым жидким гелием. При этом температура водорода в трубке перед капилляром контролируется конденсационным термометром и поддерживается на более низком уровне нежели температура насыщения, соответствующая нижнему давлению.

Режим быстрого циклирования камеры предъявляет определенные требования, предъявляемые к конструктивным особенностям капилляра. Эти требования исходят из того обстоятельства, что капилляр имеет двойное назначение. С одной стороны, он, обладая гидравлическим сопротивлением, препятствует свободному перетеканию жидкости, частично изолируя на время серии расширений рабочий объем от внешних устройств. Роль капилляра в этот период сводится к тому, чтобы не допустить значительного повышения давления в рабочем объеме к концу серии циклов расширения. Такое повышение давления может быть вызвано как натеканием жидкого водорода через капилляр в рабочий объем камеры, так и необратимым тепловыделением во время работы камеры в режиме быстрого циклирования. С другой стороны, капилляр должен обеспечивать достаточно хорошую связь рабочего объема с бачком стабилизатора давления, т.е. иметь проходное сечение, достаточное для полного восстановления давления в рабочем объеме камеры в периоды времени, разделяющие отдельные серии расширений.

При этом время выравнивания давления должно быть небольшим, чтобы обеспечить необходимую миграцию жидкости. Так как система термостатирования

достаточно инерционна и ее реакция альтернативна по отношению к изменению давления, вызванного перетеканием жидкости, то очевидно должен быть предусмотрен некоторый резерв времени для завершения переходного процесса до начала очередной серии расширений. Время выравнивания давления, таким образом, должно удовлетворять соотношению

$$t_{выр} \ll (T_{уск} - \frac{N_s}{f}),$$

где $T_{уск}$ – период срабатывания ускорителя; N_s – число расширений камеры в серии; f – частота работы камеры.

Перетекание жидкости через капилляр во время работы камеры в серии носит в значительной мере односторонний характер, что вызвано несимметричным по отношению к равновесному состоянию изменением давления во время циклов расширения камеры. Поэтому за время между циклами серии в общем случае успеет вытечь через капилляр только часть натекшей через него жидкости и к концу следующего цикла в камере к оставшейся части жидкости добавится новая порция жидкости, натекшей через капилляр, что приведет к дополнительному повышению давления. Таким образом, повышение давления к концу серии при прочих равных условиях является функцией числа циклов. Очевидно, что по мере увеличения числа срабатываний камеры в серии, давление в камере будет возрастать и в пределе достигнет такой равновесной величины (без учета необратимого тепловыделения), когда количество водорода, вытекающее во время паузы, станет равно количеству жидкого водорода, натекающему в течение рабочего цикла. Из этого условия для определения предельного равновесного повышения давления нами было получено следующее выражение:

$$\Delta P_{N_s \rightarrow \infty} = 0,58(P_в - P_н) \left(\frac{T_u}{1/f - T_u} \right)^2,$$

где $P_в$ – верхнее давление в камере; $P_н$ – нижнее давление в камере; T_u – длительность процесса расширения-сжатия (рабочего цикла камеры).

Таблица 1.

	ΔP (атм)		
	$T_u = 3 \text{ мс}$	$T_u = 4 \text{ мс}$	$T_u = 5 \text{ мс}$
f=20 Гц	0,01	0,019	0,031
f=30 Гц	0,024	0,046	0,078
f=50 Гц	0,078	0,156	0,28

Полученная асимптотическая величина повышения давления (ΔP) позволяет оценить возможности использования капилляра при работе камеры в режиме быстрого циклирования. Эти оценки приведены в таблице 1; при этом снижение давления во время осуществления рабочего цикла принималось равным $P_в - P_н = 4,3$ атм.

Повышение давления к концу серии при конечном числе срабатываний камеры определяется путем последовательного расчета процесса миграции рабочей жидкости от цикла к циклу. Расчет проводился по методике, изложенной в работе [9].

На рис.10 приведены результаты расчетов зависимостей повышения давления в конце серии расширений (ΔP) и интервалов времени выравнивания давления ($t_{\text{выр}}$) от числа срабатываний камеры в серии (N_s) для капилляров разных диаметров. Во всех случаях частота срабатываний камеры принималась равной 30 Гц, а длительность цикла – 5 мс. Необратимое тепловыделение при этом не учитывалось. Длина капилляра была выбрана из соображения обеспечения достаточной тепловой изоляции двух рабочих сред, находящихся при разных температурах по обе стороны от капилляра. При существующем общем для капилляров всех диаметров пределе повышения давления (при $N_s \rightarrow \infty$) каждый из капилляров характеризуется своей скоростью нарастания давления в зависимости от числа расширений камеры.

На основании этих расчетов было отдано предпочтение капилляру $\varnothing 0,24$ мм, как обеспечивающему хорошую миграцию жидкости и незначительное повышение давления к концу серии.

На рис.11 приведены результаты расчетов повышения давления в конце серии при использовании капилляров указанных выше размеров в зависимости от числа срабатываний камеры для нескольких значений удельного необратимого тепловыделения (U) в камере. При рабочей длительности вывода пучка 1 с и частоте работы камеры 30 Гц ($N_s = 30$) [2] повышение давления, соответствующее $U = 0,1 \div 0,2$ Дж/(л·цикл), составит $\sim 0,07 \div 0,09$ атм, что приведет к повышению нижнего давления к концу серии на такую же величину и, как следствие, вызовет уменьшение плотности треков на $5 \div 6\%$. Это вполне допустимо, поскольку соизмеримо с флуктуацией плотности одновозрастных треков.

Газожидкостный гелиевый теплообменник, охлаждающий жидкий водород перед капилляром, выполнен из медной трубки с внутренним диаметром 0,5 мм. Диаметр навивки теплообменника 11,4 мм; число витков 9. Теплообменник воспринимает тепло от жидкого водорода через медный цилиндр $\varnothing 13$ мм (см. рис.9), расположенный концентрично с зазором относительно охлаждаемой трубки $\varnothing 4 \times 0,5$ мм. В своей нижней части медный цилиндр за пределами теплообменника переходит в цилиндр меньшего диаметра ($\varnothing 8$ мм), который на длине 20 мм имеет хороший контакт с трубкой (внутренний диаметр её 3 мм), подводящей жидкий водород к капилляру. Расход жидкого гелия через теплообменник капилляра в рабочем режиме составляет 1,0 л/сут.

5. Термоизоляция

Термическая изоляция корпуса камеры от окружающей среды обеспечивается высоковакуумной откачкой изоляционного пространства и размещением между теплой стенкой вакуумного кожуха и камерой замкнутого радиационного экрана, имеющего температуру жидкого азота или близкую к ней (см. рис.12).

Собственно корпус камеры и большая часть конусов подвески окружены радиационным экраном, охлаждаемым парами гелия, выходящими из теплообменников бачков-конденсаторов.

Нижняя часть этого экрана частично охвачена конструкцией крепления зеркал перископической системы освещения и фотографирования рабочего объема камеры [1], которая охлаждается жидким азотом.

Циркуляция жидкого азота через теплообменник перископической системы осуществляется в режиме естественной циркуляции по медной трубке $\varnothing 6 \times 1$ мм. Кроме того, жидкий азот из азотной ванны в режиме естественной циркуляции поступает на два теплообменника, охлаждающих начальные участки конических обечаек подвески камеры.

В верхней части вакуумного кожуха размещена азотная ванна с центральным отверстием для выхода коммуникаций. К азотной ванне по ее периметру в нижней части крепится с помощью бандаж медный экран, защищающий от радиационного теплопритока бачки-конденсаторы, их обвязку и прочие коммуникации. Экран выполнен разъемным по вертикали с перекрытием стыков.

В сборе азотная ванна, экраны, охлаждаемые жидким азотом и отходящими парами гелия, а также детали зеркального перископа, находящиеся при температуре жидкого азота, образуют единый замкнутый радиационный экран. Измеренное распределение температур определенных точек радиационного экрана представлено на рис.12. Свободное пространство в центральном отверстии (азотной ванны) заполнено суперизоляцией. Расход жидкого азота составляет 49 л/сутки.

Откачка вакуумного кожуха осуществляется с помощью диффузионного насоса ALCATEL-6150 производительностью 600 л/с, предварительное разрежение в котором создается форвакуумным насосом. Вакуумный кожух камеры гибким сильфонным рукавом $\varnothing 150$ мм и длиной 2600 мм соединен с ресивером емкостью 300 л. Общий объем вакуумного пространства, таким образом, составляет 800 л. Откачка вакуумного кожуха осуществляется через бустерную емкость, для того чтобы максимально удалить паромасляный диффузионный насос от криогенной зоны камеры. При таком исполнении системы откачки удалось избежать появления масляной вуали на оптических элементах камеры, находящихся при криогенных температурах.

При указанной величине объема вакуумного пространства аварийный разлив всего количества жидкого водорода, содержащегося в камере, приведет к превышению давления в вакуумном кожухе над атмосферным всего лишь на 0,65 атм, тогда как конструкционная прочность сосудов имеет десятикратный запас. При этом усредненное по всей поверхности понижение температуры вакуумного кожуха после разлива жидкого водорода составит около 30 градусов. Приведенные данные убедительно иллюстрируют целесообразность и эффективность использования жидкогелиевой системы термостатирования на водородной установке, работающей совместно с аппаратурой невзрывозащищенного исполнения.

6. Рабочие параметры системы термостатирования

Качество работы системы термостатирования определяется точностью поддержания таких основных параметров, как температура и давление, с одной стороны, и точностью локализации пузырька в пространстве камеры, с другой.

Точность поддержания температуры в течение длительного сеанса составила $\pm 0,005K$. Точность поддержания статического давления в конденсационной бачке, соединенной с камерой капилляром, составила $\pm 0,01$ атм. Нестабильность статического давления в рабочем объеме камеры меньше, чем в бачке, за счет демпфирующего эффекта капилляра и, следовательно, итоговая точность поддержания статического давления в рабочем объеме камеры была лучше чем $\pm 0,01$ атм [1].

В таблице 2 приведено распределение полной тепловой нагрузки на водородном уровне между конденсационными бачками, ее структура, а также те же данные для рабочего объема и для теплопритоков по тепловым мостам (штокам и конусам).

Таблица 2.

	Полная тепловая нагрузка на водородном уровне (Вт)			Тепловая нагрузка рабочего объема камеры (Вт)		Теплоприток по тепловым мостам (Вт)
	Статическая	Динамическая	Σ	Статическая	Динамическая	Статический
Бачок I	5,3	0,35*	5,65	-	0,35*	4,9
Бачок II	1,2	-	1,2	0,8	-	-
Бачок III	0,4	-	0,4	-	-	-
Σ	6,9	0,35	7,25	0,8	0,35	4,9

* - при работе камеры с частотой 30 Гц и с количеством расширений в серии 30.

В таблице 3 в качестве примера приведены варианты выбора режимов работы конденсационных бачков, обеспечивающих типовые статический и динамический режим работы быстроциклирующей камеры.

Таблица 3.

	Статический режим $T = 29,3K$ $P = 8,3$ атм		
	Давление в бачке (атм)	Давление в бульбе конденсационного термометра р.о. камеры (атм)	Статическое давление в р.о. камеры (атм)
Бачок I	7,3	7,3	8,3
Бачок II	6,9		
	Динамический режим $T = 29,3K$ $P = 8,3$ атм $f=40$ Гц $N_s = 45$		
Бачок I	4,0	7,3	8,3
Бачок II	6,9		

Для оценки суммарной точности локализации пузырьков в БЦПК на пленках одного из сеансов были проведены измерения треков пучковых частиц и вторичных частиц из взаимодействий. Разброс измеренных центров пузырька относительно фитированных прямых (рассеянное магнитное поле в зоне БЦПК пренебрежимо мало) оказался $\delta = (5 \pm 1)$ мкм, что согласуется с проведенными ранее оценками [1].

Заключение

1. Для быстроциклирующей жидководородной пузырьковой камеры, являющейся вершинным детектором гибридного спектрометра, впервые реализована жидкогелиевая двухконтурная система термостатирования, позволяющая локализовать взрывоопасную зону в пределах границ вакуумного кожуха камеры и благодаря этому разместить регистрирующую электронную аппаратуру невзрывозащищенного исполнения в непосредственной близости от рабочего объема.

2. Испытания системы термостатирования в ряде длительных физических сеансов показали, что она способна в широком диапазоне температур обеспечивать стабильную работу камеры в управляемом прерывисто циклическом режиме с частотой 40 Гц при количестве расширений в серии 45 и глубине захода в метастабильную область, соответствующей плотности пузырьков трека 130 см^{-1} (при $T_{\text{раб}} = 29,3\text{K}$) и 150 см^{-1} (при $T_{\text{раб}} = 29,8\text{K}$).

3. Разработанная система термостатирования дает возможность поддерживать выбранный температурный режим камеры с точностью $\pm 0,005\text{K}$ и давление в рабочем объеме с точностью $\pm 0,01$ атм.

4. Конструктивно система термостатирования выполнена так, что она позволяет предельно возможно уменьшить искажения треков, обусловленные термическими свиями, и обеспечивает рабочие условия, при которых отклонение треков от прямой линии в пределах рабочего объема камеры не превышает 5 мкм.

В заключение авторы выражают благодарность сотруднику ОИЯИ В.И.Дацкову за помощь в изготовлении сверхпроводящего датчика измерения уровня жидкого гелия.

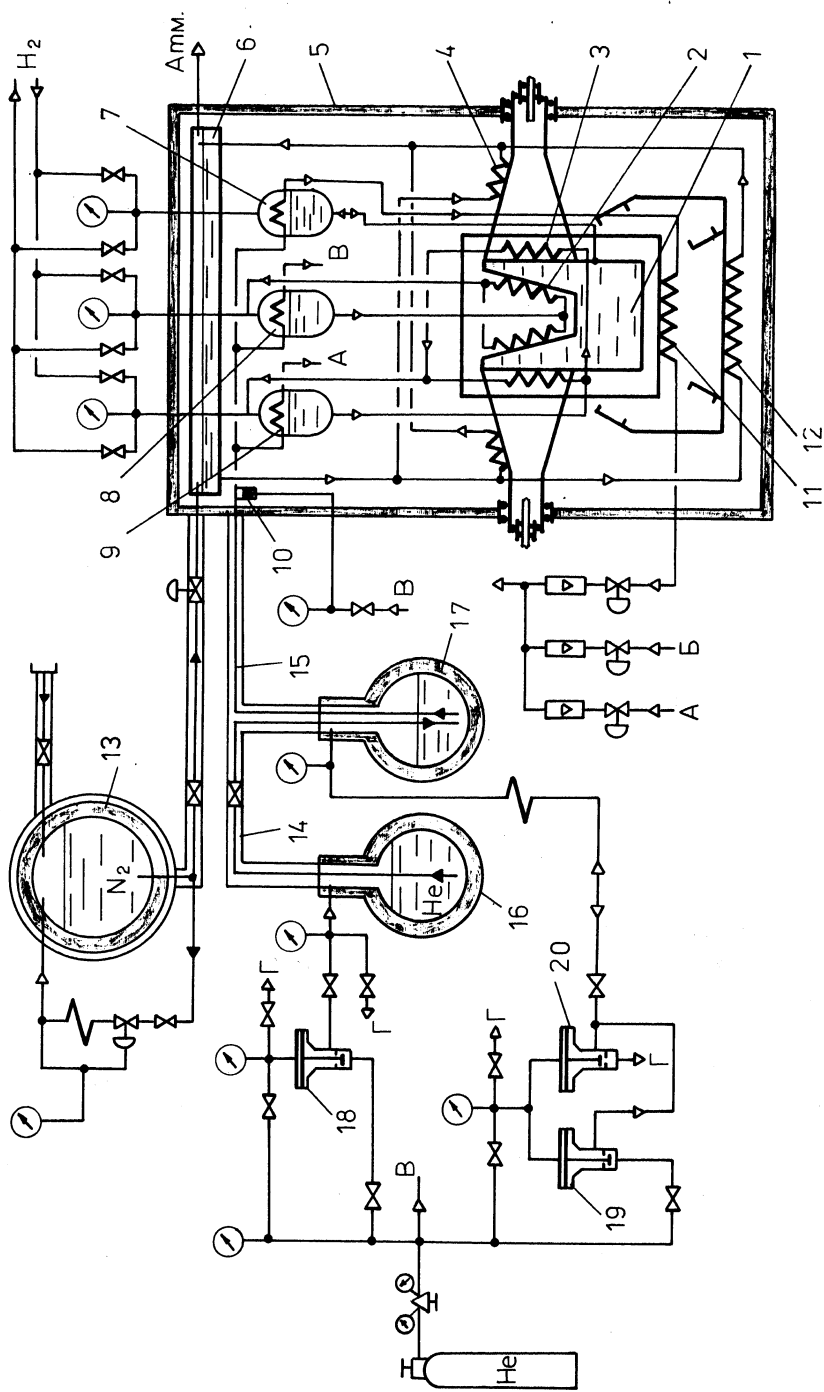


Рис. 1. Упрощенная схема системы термостабирирования быстроциклирующей пузырьковой камеры: 1 – рабочий объем камеры; 2 – внутренний теплообменник; 3,4 – внешние теплообменники; 5 – вакуумный кожух; 6 – азотная ванна; 7 – бачок-конденсатор стабилизации давления в камере; 8, 9 – бачки-конденсаторы термосифонной теплообменной системы; 10 – гелиевый конденсационный термометр; 11 – гелиевый теплообменник радиационного экрана; 12 – азотный теплообменник зеркального перископа; 13 – емкость с жидким азотом; 14 – гибкий переливной сифон; 15 – стационарный сифон; 16 – транспортный сифон; 17 – стационарный дьюар; 18,19,20 – стабилизаторы давления.

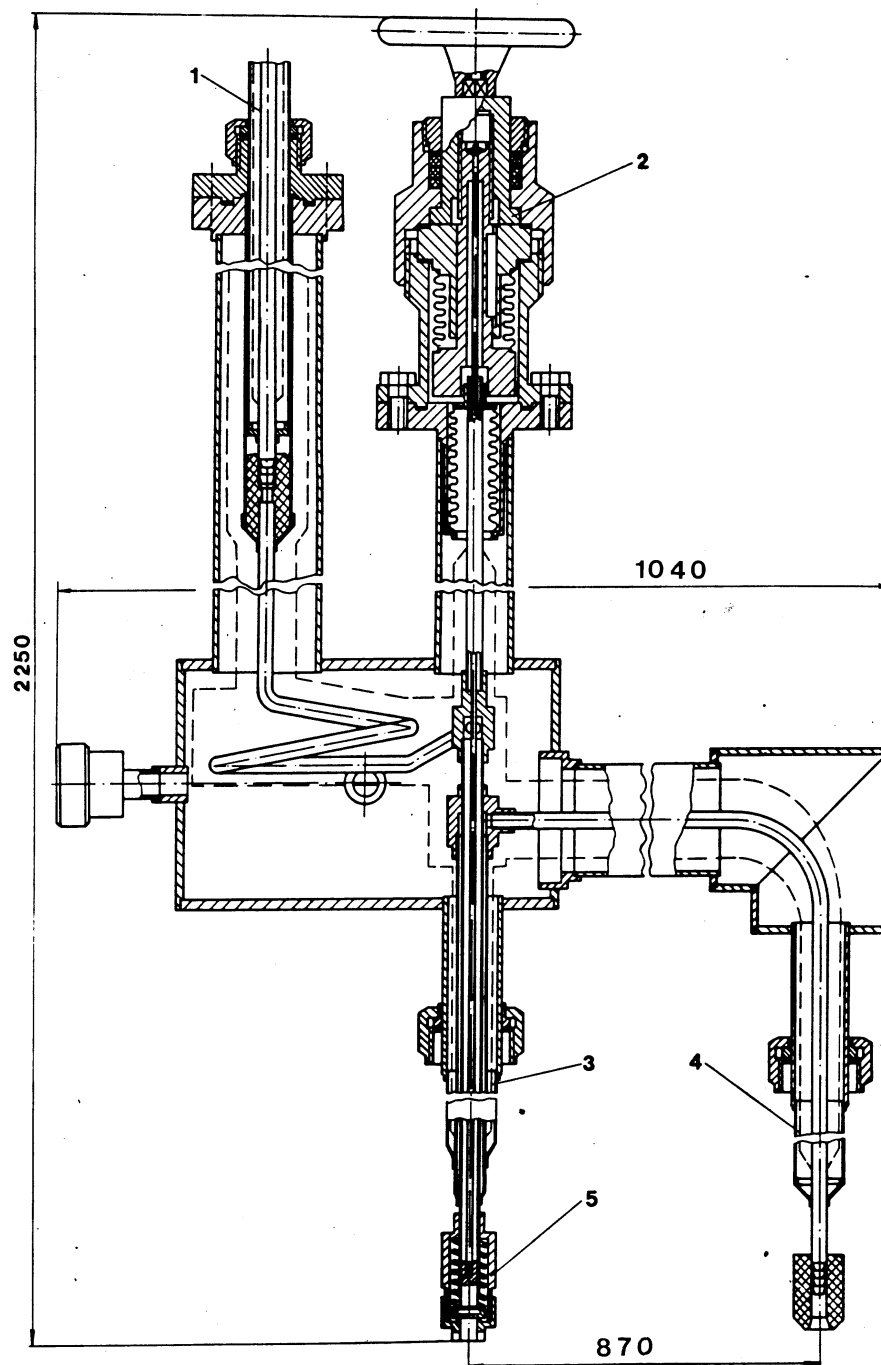


Рис. 2. Сифон стационарный питающий: 1 – подключение гибкого сифона от транспортного дьюара; 2 – узел управления запорным клапаном; 3 – подключение к стационарному дьюару; 4 – подключение к коллектору гелиевого контура системы термостатирования; 5 – запорный клапан.

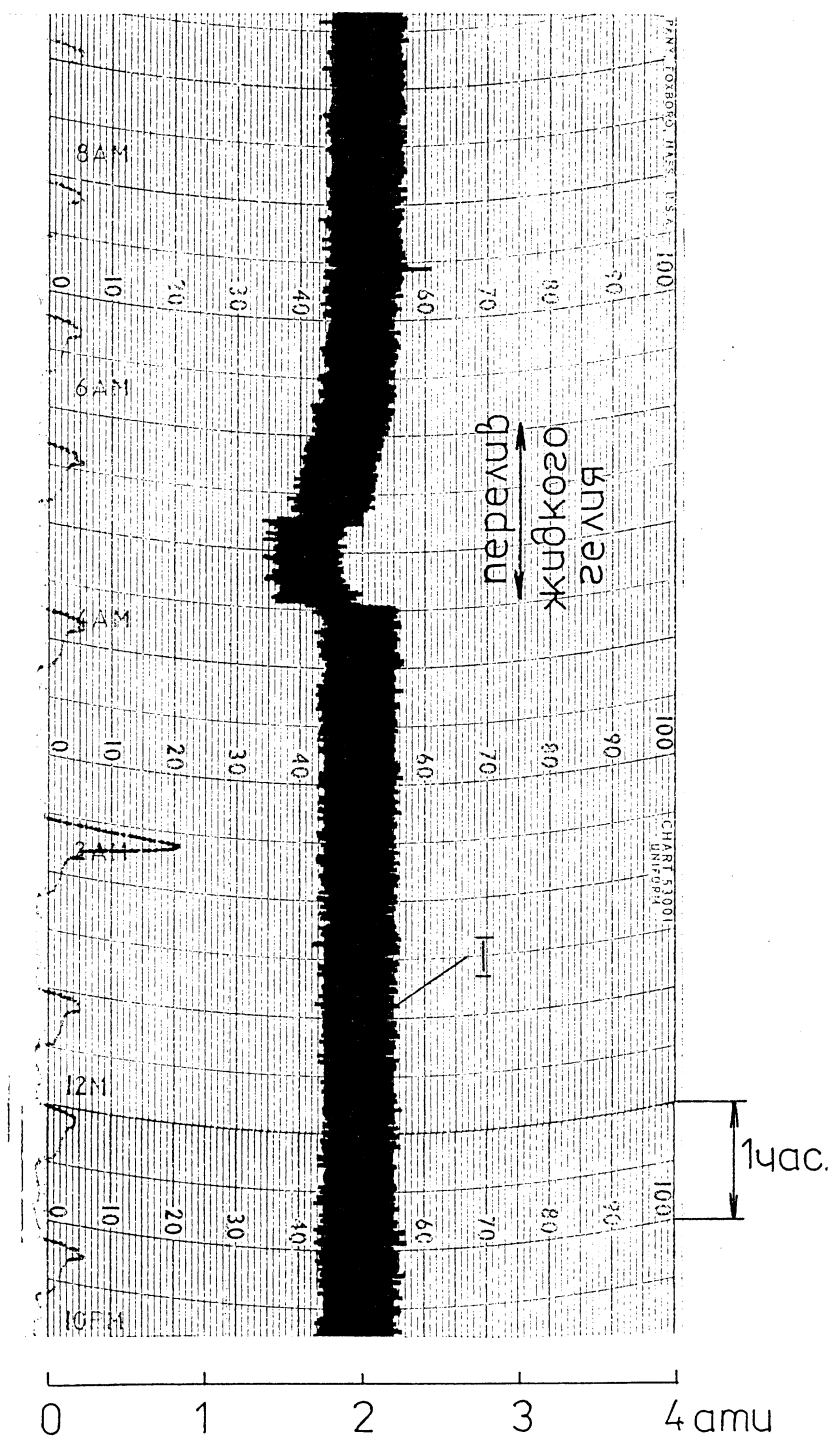


Рис. 3. Участок диаграммной ленты с записью температуры гелия на входе в конденсационные бачки: 1 – давление в бульбе конденсационного термометра.

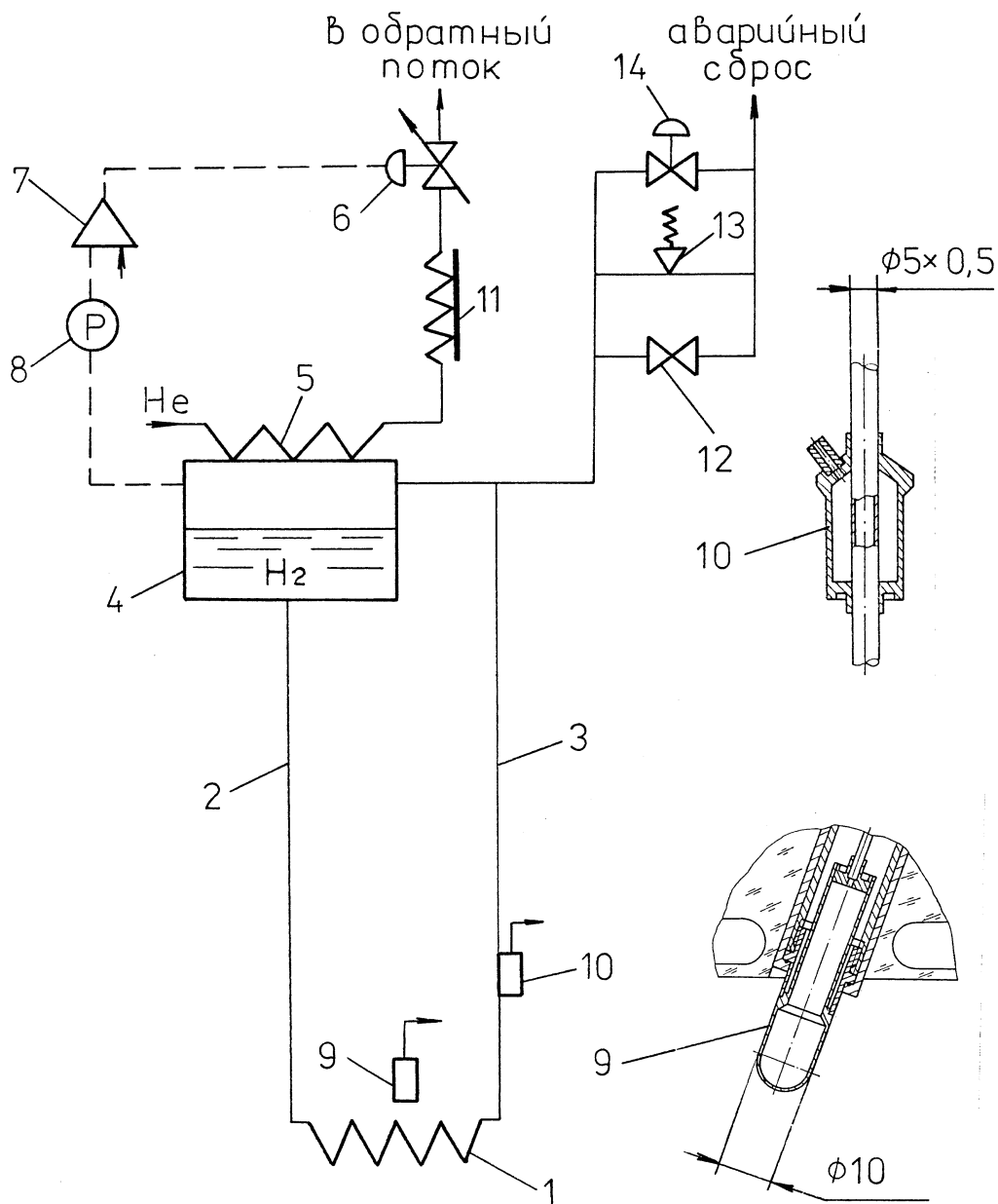


Рис. 4. Схема стабилизации температуры: 1 – теплообменник вторичного контура (внутри рабочего объема камеры); 2 – опускная трубка; 3 – подъемная трубка; 4 – конденсационный бачок; 5 – теплообменник первичного контура; 6 – регулирующий вентиль; 7 – пневморегулятор; 8 – пневмопреобразователь; 9 – бульба конденсационного термометра рабочего объема камеры; 10 – бульба конденсационного индикатора расхода; 11 – радиационный экран; 12 – ручной вентиль; 13 – предохранительный клапан; 14 – дистанционно управляемый вентиль.

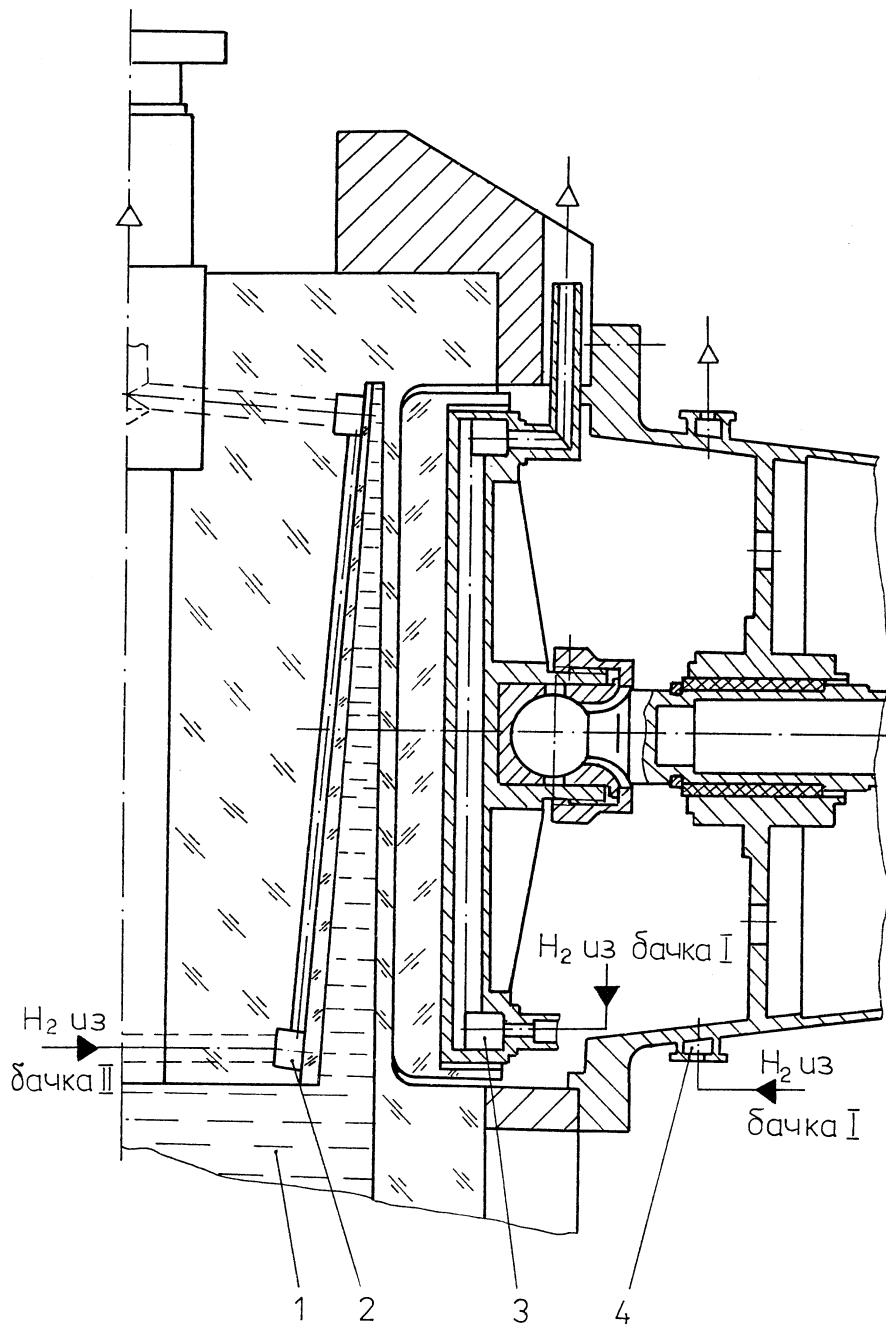


Рис. 5. Водородные теплообменники корпуса камеры: 1 – рабочий объем камеры; 2 – внутренний теплообменник (теплообменник рабочего объема камеры); 3 – поршневой теплообменник; 4 – конусный теплообменник.

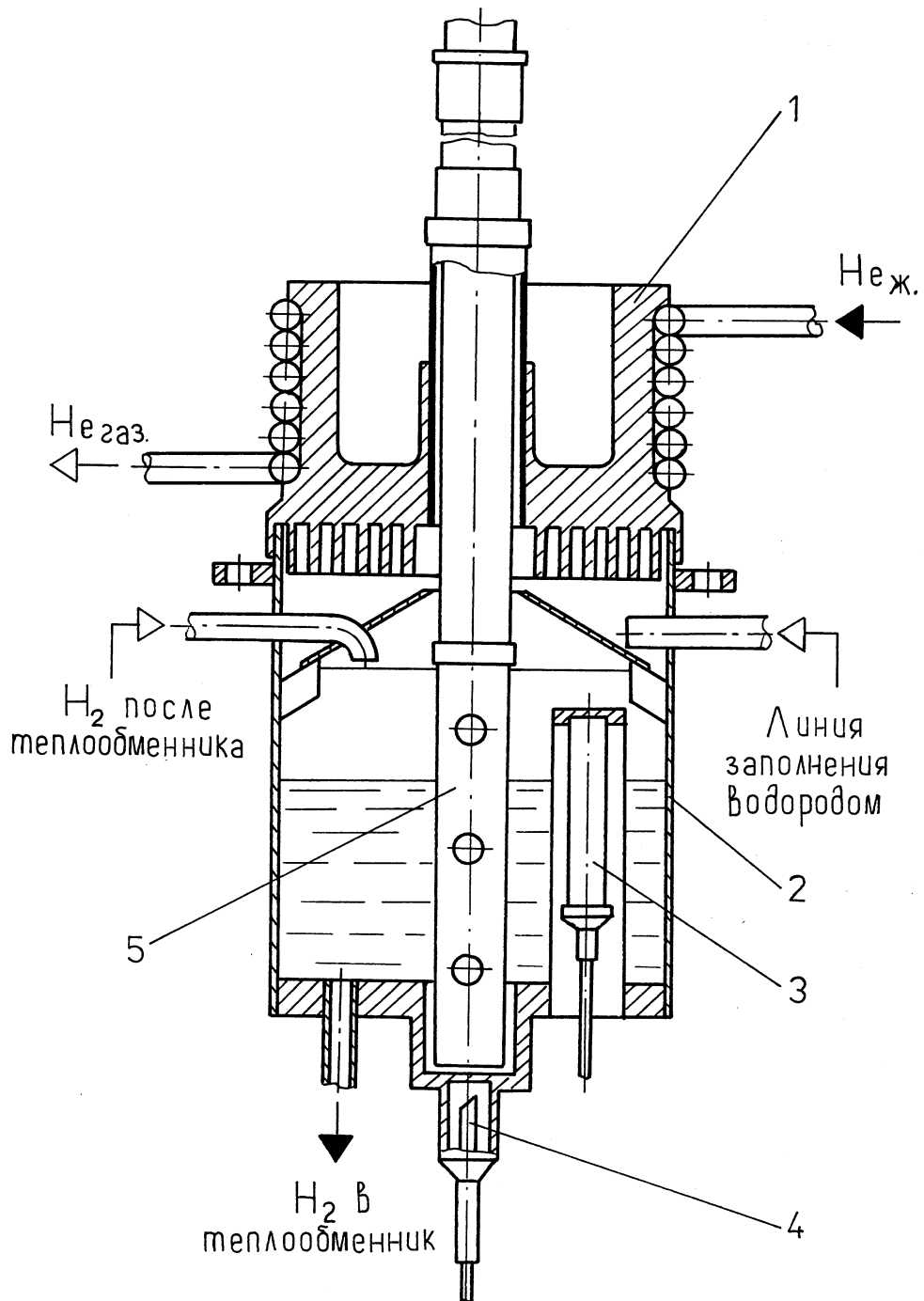


Рис. 6. Конденсационный бачок: 1 – теплообменная головка; 2 – бачок; 3 – бульба конденсационного указателя верхнего уровня; 4 – бульба указателя нижнего уровня; 5 – датчик уровня емкостного типа.

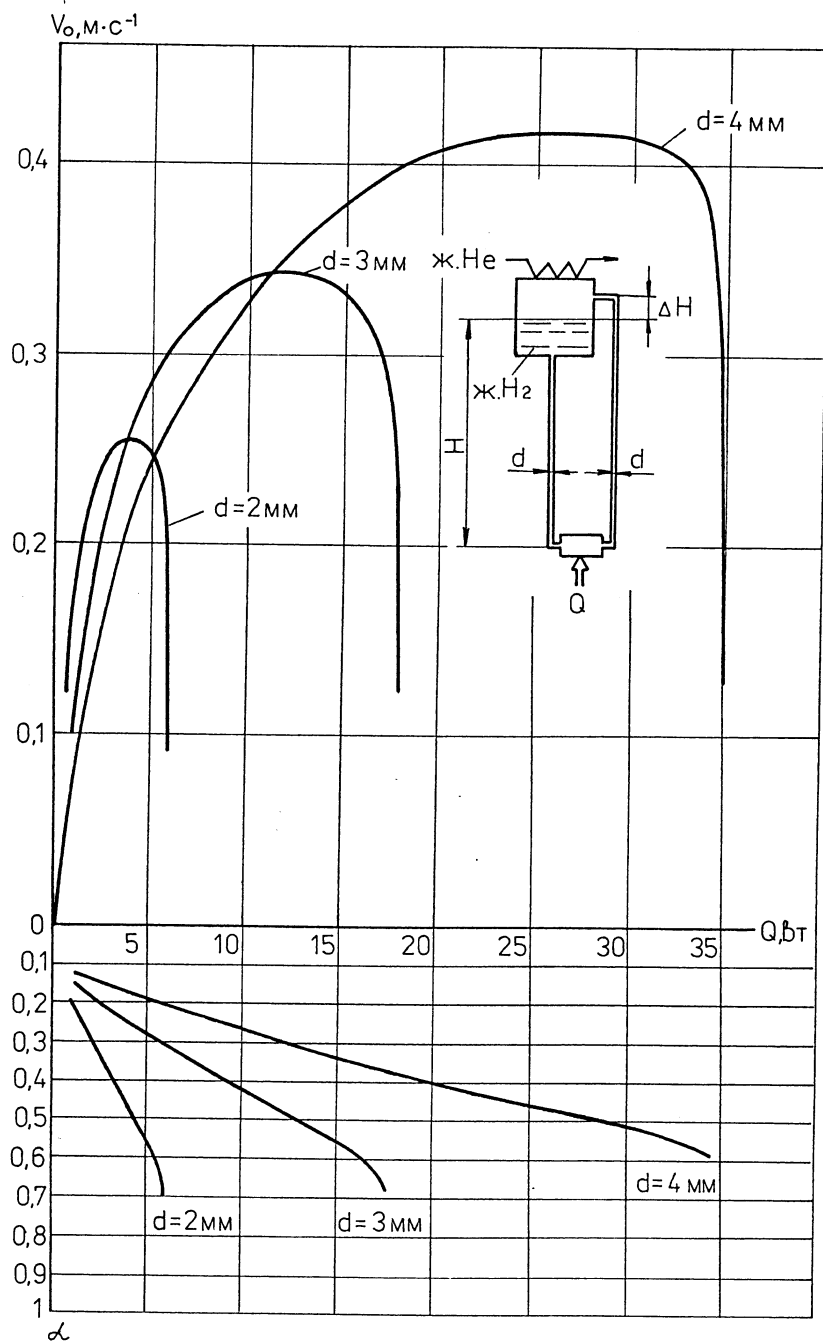


Рис. 7. Результаты расчета вторичного контура термостатирования, работающего в термосифонном режиме: Q – нагрузка теплообменника; V_0 – скорость циркуляции; α – истинное паросодержание в подъемной трубке; d – диаметр опускной и подъемной трубок.

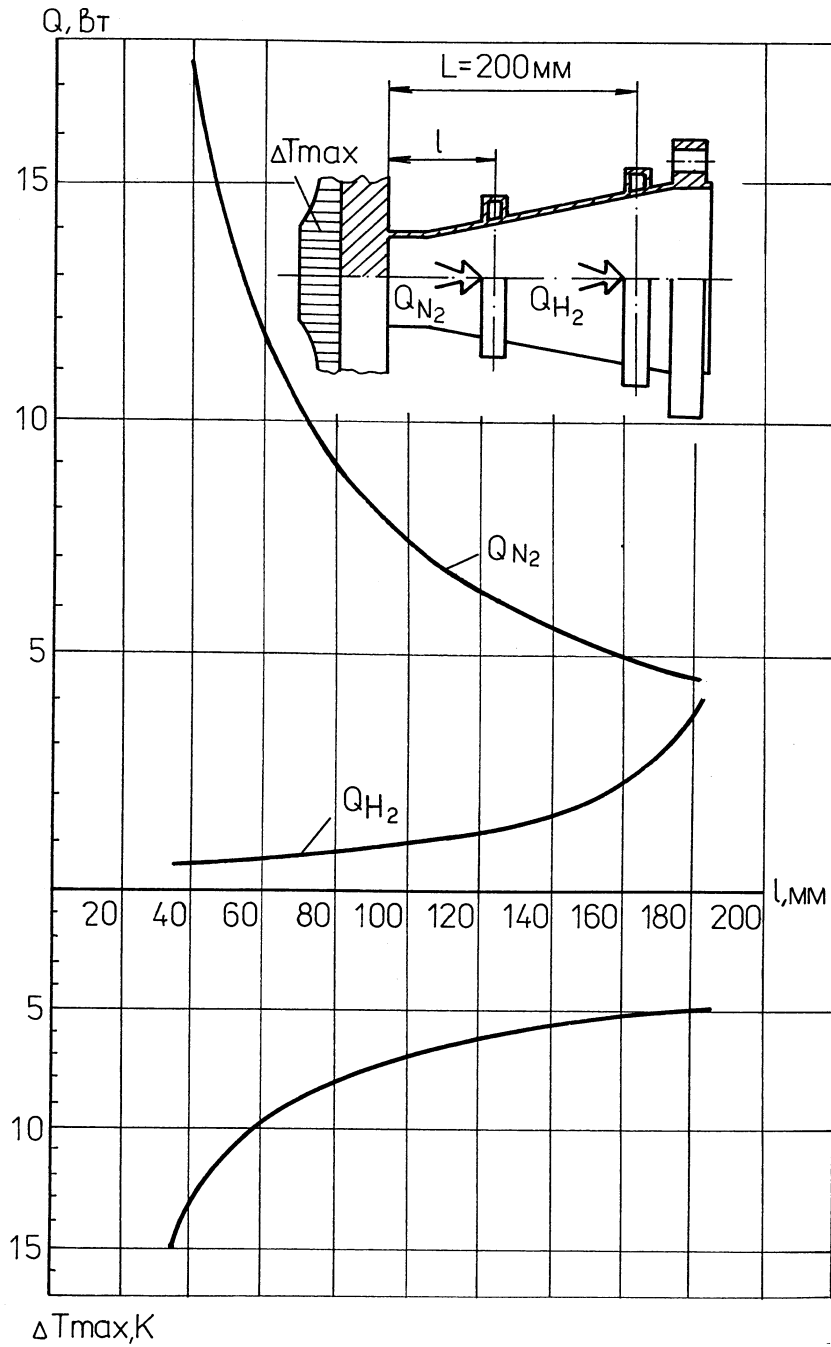


Рис. 8. Результаты теплового расчета узла подвески корпуса камеры: Q_{N_2} – теплоприток к азотному теплообменнику; Q_{H_2} – теплоприток к водородному теплообменнику; ΔT_{max} – максимальная разница между температурами окружающей среды и стенки вакуумного кожуха.

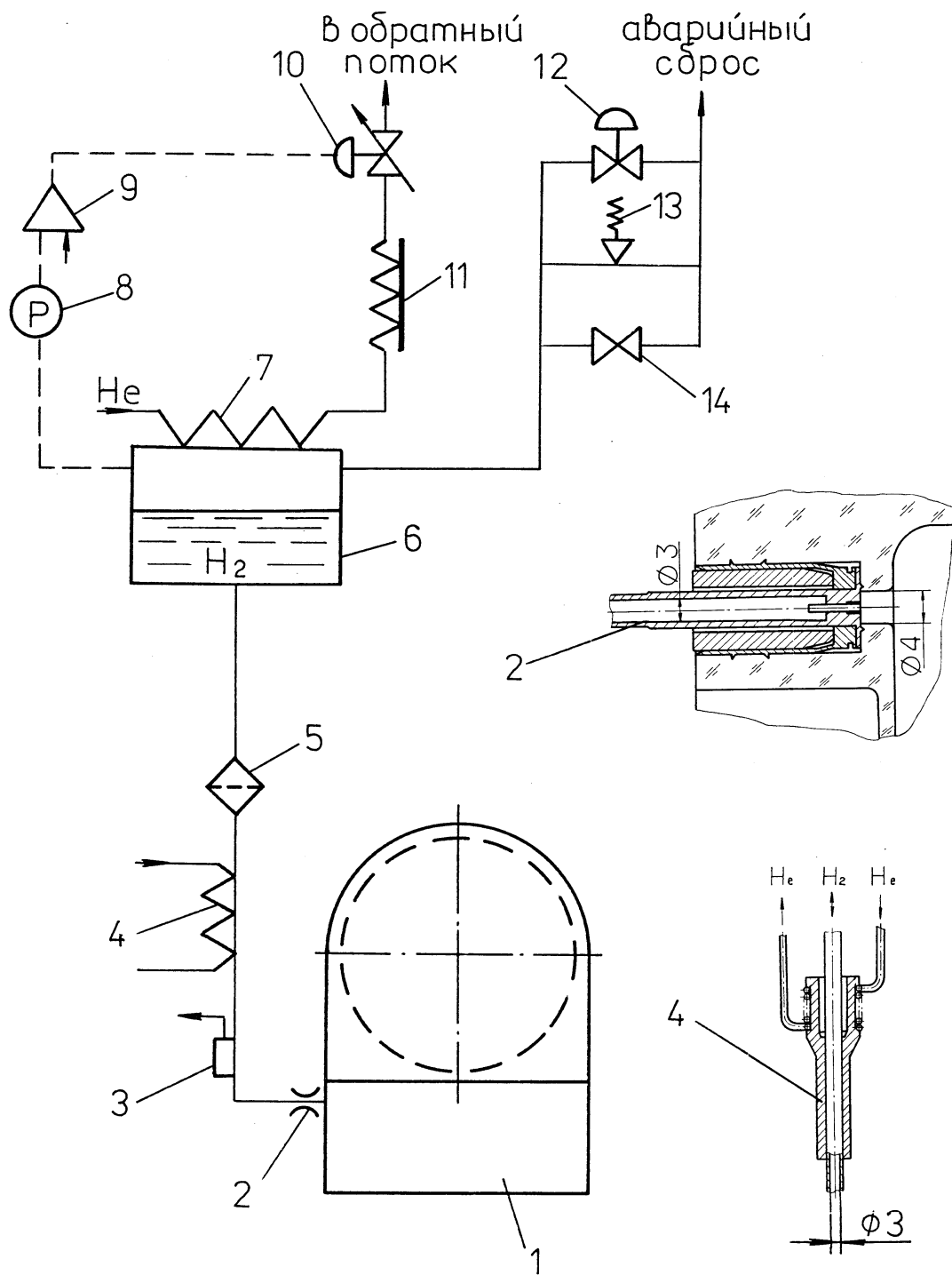


Рис. 9. Схема стабилизации давления: 1 – рабочий объем камеры; 2 – капилляр; 3 – булба конденсационного термометра; 4 – теплообменник капилляра; 5 – фильтр; 6 – конденсационный бачок; 7 – теплообменник бачка; 8 – пневмопреобразователь; 9 – пневморегулятор; 10 – регулирующий вентиль; 11 – радиационный экран; 12 – дистанционно-управляемый вентиль; 13 – предохранительный клапан; 14 – ручной вентиль.

Рис. 10. Зависимость повышения давления (ΔP_s) в конце серии и времени выравнивания ($t_{выр}$) давления от диаметра капилляра (d) и числа расширений в серии (N_s).

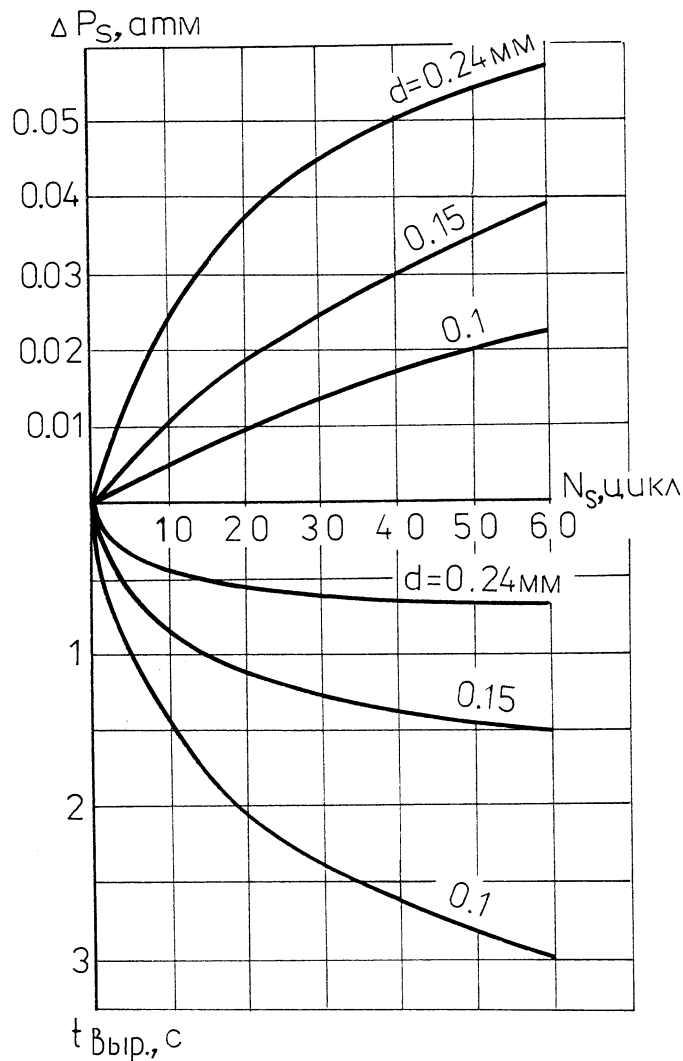
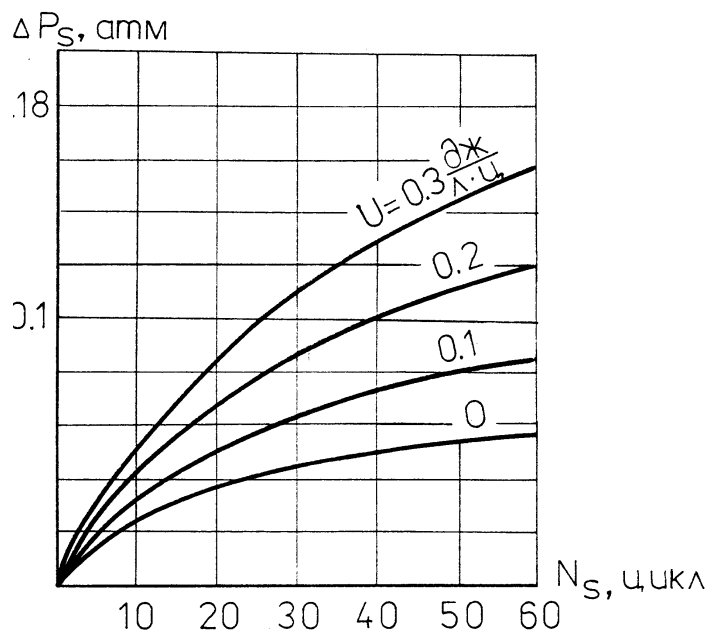


Рис. 11. Зависимость повышения давления (ΔP_s) в конце серии от числа расширений в серии (N_s) и величины динамического тепловыделения (U) для $d = 0,24$ мм.



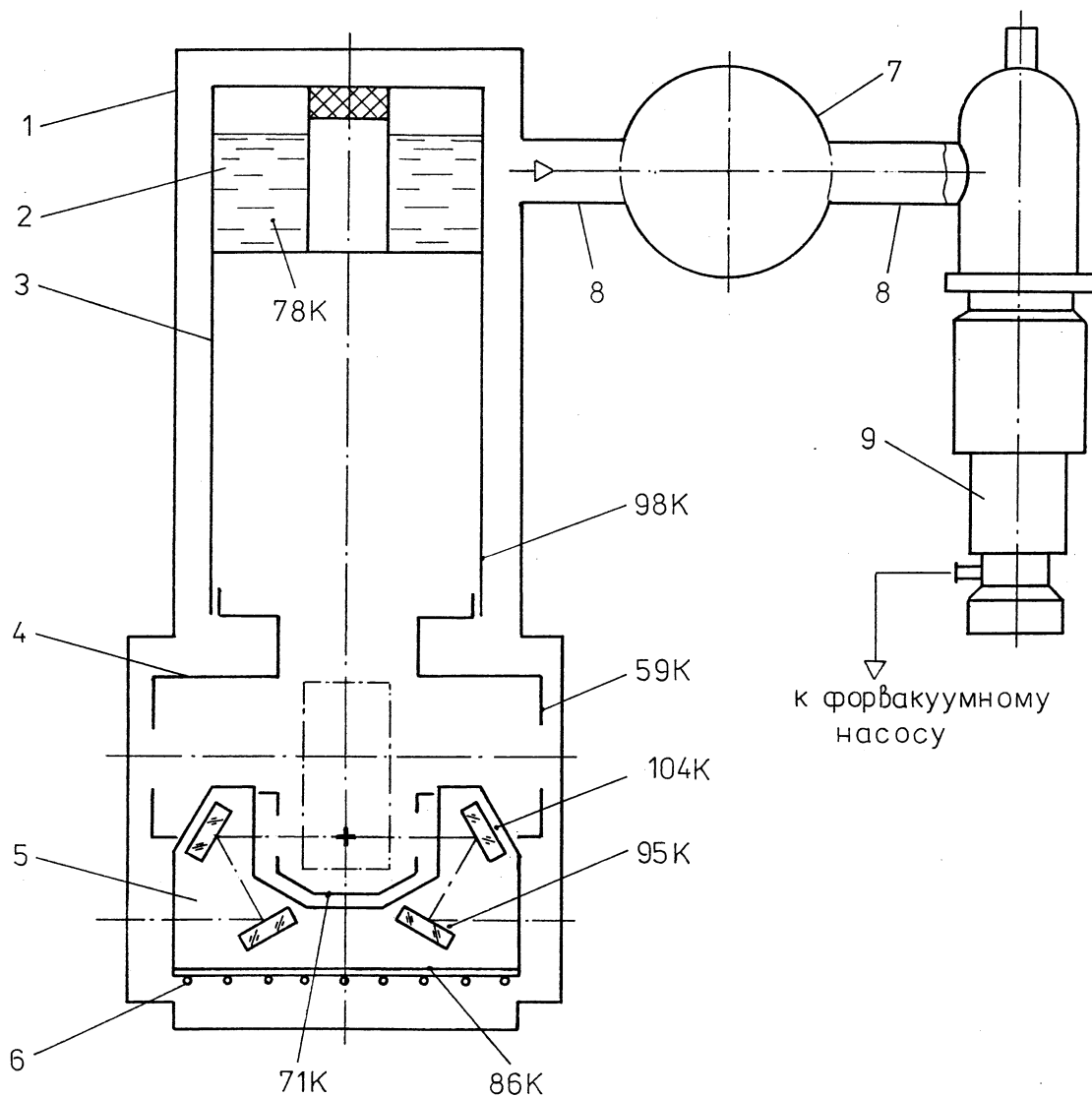


Рис. 12. Схема экранирования криогенных частей камеры и откачки вакуумного кожуха:
 1 – вакуумный кожух; 2 – азотная ванна; 3 – азотный экран; 4 – гелиевый экран;
 5 – перископическая система; 6 – азотный теплообменник; 7 – бустерная емкость;
 8 – вакуумпровод; 9 – диффузионный насос с азотной ловушкой и шибером.

Список литературы

- [1] Ardashev E.N., Boguslavsky I.V., Gramenitsky I.M. et al. // Instr. and Meth., 1995, A356, p.210.
- [2] Андришчин А.Н., Ардашев Е.Н., Бабинцев В.В. и др. – Препринт ИФВЭ 84-3, Серпухов, 1984.
- [3] Белушкин В.А., Готвянский Н.В. – А.С. N 201858, бюллетень ОИПОТЗ, 1967, N 18, с.159.

- [4] Плескач А.В., Якубов Ю.Р. Пузырьковая камера: А.С. N1062625, бюллетень ОИПОТЗ, 1983, N 47, с.186.
- [5] Кутепов А.М., Стерман Л.С., Стюшин Н.Г. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании. – М., Высшая школа, 1986.
- [6] Плескач А.В. – Препринт ИФВЭ 96-28, Протвино, 1996.
- [7] Плескач А.В., Филиппов А.И., Османов Ю.Б. и др. Термостатирование штока поршня криогенной пузырьковой камеры: А.С. N225340, бюллетень ОИПОТЗ, 1968, N27, с.55.
- [8] Разделение воздуха методом глубокого охлаждения / Под ред. В.И.Епифановой и Л.С.Аксельрода. – М., Машиностроение, 1973.
- [9] Плескач А.В. – Препринт ИФВЭ 96-27, Протвино, 1996.

Рукопись поступила 29 апреля 1996 г.

Ардашев Е.Н. и др.

Гелиевая система термостатирования жидководородной быстроциклирующей пузырьковой камеры.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы \LaTeX .

Редактор М.Л.Фоломешкина.

Технический редактор Н.В.Орлова.

Подписано к печати 30.04.96. Формат $60 \times 84/8$. Офсетная печать.

Печ.л. 3.1. Уч.-изд.л. 2.4. Тираж 170. Заказ 685. Индекс 3649.

ЛР №020498 17.04.97.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142284, Протвино Московской обл.

