

КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ
КАФЕДРА КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И РАДИОСПЕКТРОСКОПИИ

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО КУРСУ
«ОСНОВЫ ВАКУУМНОЙ И КРИОГЕННОЙ ТЕХНИКИ»

ОСНОВЫ ГЕЛИЕВОГО ТЕЧЕЙСКАНИЯ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

Клочков А.В.

Тагиров М.С.

2013 г.

УДК 533.1; 533.17; 533.5; 533.59; 533.56; 533.57

Методическое пособие к лабораторной работе «Основы гелиевого течеискания» для бакалавров по направлению «Радиофизика», обучающихся по профилям "Физика магнитных явлений" и "Квантовая радиофизика и квантовая электроника" Института Физики, а также по профилям, в учебные планы которых включены курсы по вакуумной или криогенной технике.

Составители: Клочков А.В.

Тагиров М.С.

Рецензент: д.ф.-м.н., проф. Скирда В.Д.

Институт Физики

Казанского (Приволжского) федерального университета, 2013

Содержание

1. Введение.....	4
2. Принцип действия гелиевого течеискателя.....	8
3. Устройство гелиевого течеискателя ПТИ-10.....	15
4. Порядок работы с гелиевым течеискателем ПТИ-10.....	27
5. Практические упражнения.....	36
6. Вопросы для подготовки.....	43
7. Литература.....	44
8. Приложение 1. Справочная информация.....	45
9. Приложение 2. Оценка величины течи.....	46
10. Приложение 3. Градуировочная характеристика высоковакуумного датчика ПТИ-10.....	47
11. Приложение 4. Методические рекомендации к процессу течеискания.....	48

1. Введение

Целью работы является изучение принципов масс-спектрометрического (гелиевого) способа проверки на герметичность вакуумных систем с использованием гелиевого течеискателя ПТИ-10, его устройства, получение навыков работы с ним.

Гелиевый течеискатель ПТИ-10 (рисунок 1) является одной из наиболее удачных моделей в линейке гелиевых течеискателей отечественного производства (ПТИ-6, ПТИ-7, ПТИ-10 и ПТИ-14). Благодаря большим размерам масс-спектрометрической камеры ПТИ-10 обладает рекордной чувствительностью даже по сравнению с современными зарубежными аналогами. Устройство течеискателя ПТИ-10 позволяет наглядно понять принципы работы гелиевого течеискания, поскольку конструкция прибора открывает доступ ко всем наиболее важным элементам. Изучение принципов работы данного прибора позволит досконально понять особенности данного метода течеискания для последующего применения полученных знаний при работе с современными автоматизированными течеискателями.

Гелиевые течеискатели являются одним из основных инструментов для поиска течей в вакуумных системах и блоках криогенных установок. Фактически, гелиевый течеискатель является необходимым инструментом в любой лаборатории высокого вакуума или лаборатории низких температур. Течеискатель ПТИ-10 является универсальным прибором, рассчитанным на все виды контроля герметичности с применением гелия-4^{*} в качестве пробного газа.

^{*} Далее по тексту имеется ввиду только изотоп ^4He .

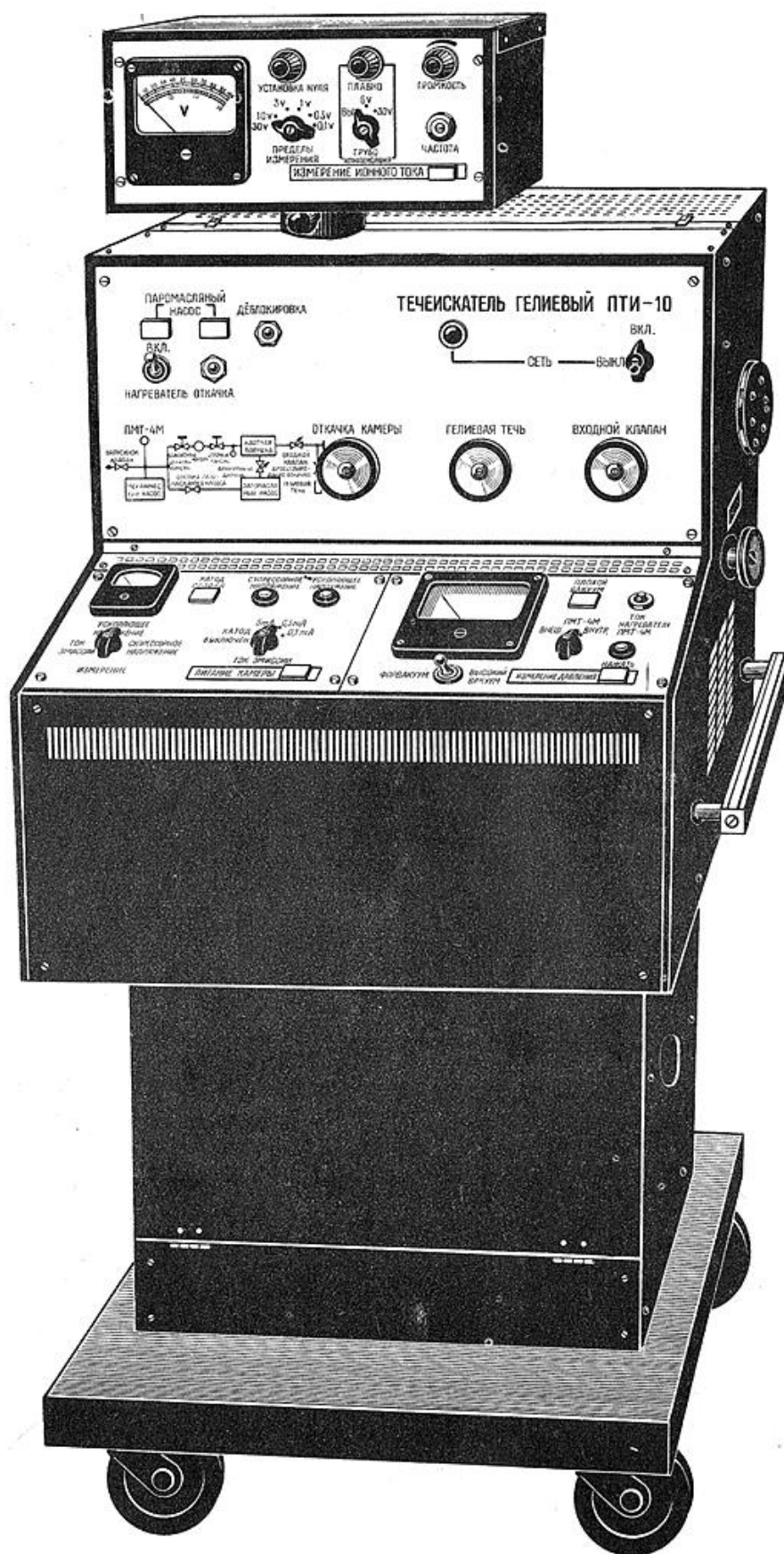


Рисунок 1 - Внешний вид течеискателя гелиевого ПТИ-10.

Основной характеристикой течеискателя является порог чувствительности - минимальная величина течи, которую может зарегистрировать прибор. Стандартная единица измерения величины течи – мбар·л/с. Основные единицы измерения течи и давления приведены в приложении 1. Оценочные соотношения между уровнем течи и геометрическим размером отверстия приведены в приложении 2.

Известны следующие основные методы течеискания:

Опрессовка – создание в проверяемом объеме избыточного давления газа и поиск течи по выходу газа при погружении объема в жидкость, нанесения пенящейся жидкости на поверхность вакуумной системы. Данный метод является самым грубым и позволяет определить неплотности порядка 10^{-3} мбар·л/с.

Манометрические методы – реализуются путем контроля величины давления в объеме: при откачке (регистрируется предельный вакуум без и при смачивании места течи легколетучей жидкостью или сравнивается предельный вакуум в объеме и вакуум, который может создать насос); при натекании газа в отсеченную от насоса установку (измеряется скорость роста давления в установке при присоединенном и отключенном испытываемом объеме). Чувствительность данного метода составляет около 10^{-5} мбар·л/с.

В **газоаналитических методах** производится качественный анализ воздуха, поступающего через течь в вакуум, на наличие в нем пробного газа. Индикаторами пробного газа могут служить: *газоразрядная трубка* (выявляется наличие в спектре линий излучения пробного газа); *масс-спектрометр* (так называемый «гелиевый» течеискатель, пробный газ – гелий); индикаторы водорода и галогеносодержащего пробного газа (*водородный и галогенный методы*); *искровой течеискатель* (при приближении электрода высокочастотного трансформатора к месту течи

образуется направленный разряд, появление которого связано с понижением давления воздуха в месте течи и улучшением условий электрического пробоя газового промежутка). Чувствительность данных методов самая высокая и достигает величин порядка 10^{-12} мбар·л/с.

Люминесцентный метод использует проникновение раствора люминофора в капиллярные течи. Проверяемый объект длительное время выдерживается в растворе люминофора. После удаления люминофора с поверхности объекта заполненные капилляры легко обнаруживаются в виде точек или полос при облучении ртутно-кварцевыми лампами. Люминофор – люмоген – дает желтое или красное свечение, которое легко отличить от ложных сигналов зеленоватого свечения, возникающего от воздушных пузырьков в стекле, или голубого свечения жировых поверхностных загрязнений. Чувствительность данного метода около 10^{-9} мбар·л/с. Однако, применимость ограничивается погружением всей вакуумной системы в люминофор.

Радиоизотопный метод обнаружения течей состоит в том, что испытуемые объекты в течение некоторого времени выдерживаются в атмосфере радиоактивного газа. После удаления радиоактивного газа и тщательной очистки поверхности от радиоактивных загрязнений излучающими остаются только негерметичные приборы. Метод применяется для автоматической проверки на герметичность малогабаритных полупроводниковых приборов. Чувствительность данного метода около 10^{-11} мбар·л/с.

Как видно масс-спектрометрический метод поиска течей является самым чувствительным методом на данный момент.

2. Принцип действия гелиевого течеискателя

Течеискатель (далее по тексту подразумевается только гелиевый течеискатель ПТИ-10) представляет собой высокочувствительный магнитный масс-спектрометр, настроенный на регистрацию гелия.

Он обеспечивает возможность проведения любых видов испытаний на герметичность: поиск мест течей в откачанных, а также в заполненных гелием объемах и проверку их общей герметичности.

При проведении испытаний на герметичность вакуумным методом предварительно откачанный испытуемый объем соединяется с масс-спектрометрической камерой течеискателя и обдувается гелием или помещается в чехол, заполненный гелием. Течь индицируется по увеличению сигнала масс-спектрометра, вызываемому повышением парциального давления гелия в масс-спектрометрической камере.

Объекты, не допускающие откачки внутренней полости, испытываются в специальных вакуумных камерах (барокамерах), методами чехла или щупа. При испытаниях барокамерным методом в объекты должен быть введен гелий. Течеискатель присоединяется непосредственно к барокамере либо к линии предварительного разрежения ее откачной установки.

Для обнаружения мест течей методами чехла или щупа гелий также вводится внутрь испытуемого объекта. Негерметичность изделий, помещенных в чехол, устанавливается по повышению парциального давления гелия в чехле, газ из чехла отбирается в течеискатель с помощью щупа. При испытаниях по методу щупа подозреваемые в негерметичности участки поверхности обследуются снаружи специальным устройством - щупом, всасывающим газ, соединенным с течеискателем гибким вакуумным трубопроводом. Приближение всасывающего сопла щупа к наружному отверстию течи, из которого вытекает гелий, сопровождается увеличением

сигнала течеискателя, обусловленным повышением содержания гелия в потоке газа, поступающего в течеискатель.

Основным элементом течеискателя является масс-спектрометрическая камера, содержащая ионный источник и приемник ионов. Камера, помещается между полюсами постоянного магнита (рисунок 2).

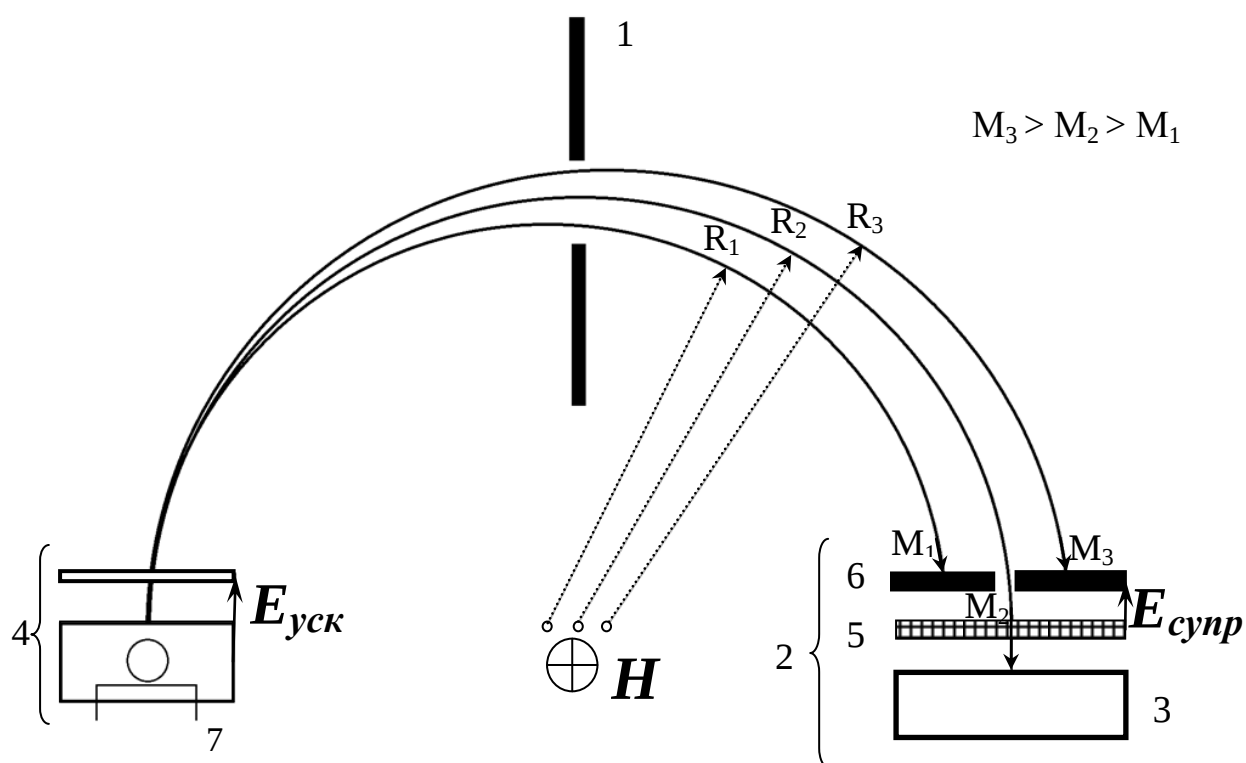


Рисунок 2 - Схема масс-спектрометрической камеры. Показаны траектории ионов различной эффективной массы ($M_3 > M_2 > M_1$). 1 - диафрагма; 2 - приемник ионов; 3 - коллектор; 4 - источник ионов; 5 - супрессорная сетка коллектора ионов; 6 - входная диафрагма коллектора ионов; 7 - катод.

Накаленный вольфрамовый катод (7 на рисунке 2) ионного источника эмитирует электроны, которые ускоряются электрическим полем, приложенным между катодом и коробкой ионизатора. Магнитное поле, действующее вдоль направления движения электронов, фокусирует поток электронов в узкий пучок, поступающий в коробку ионизатора через отверстие, расположенное под катодом. В камере ионизации электроны сталкиваются с молекулами газа, поступающего в течеискатель из проверяемого объема или щупа, и вызывают их ионизацию. Образовавшиеся ионы вытягиваются из камеры ионизации ускоряющим электрическим полем, действующим в направлении, перпендикулярном электронному пучку. Поток ионов через выходную диафрагму источника поступает в анализатор.

В анализаторе (анализатором называется область масс-спектрометрической камеры, в которой ионы движутся от источника к приемнику ионов) происходит пространственное разделение ионов по массам под действием постоянного магнитного поля, направленного перпендикулярно направлению движения ионов и заставляющего их двигаться по круговым траекториям.

В соответствии с законом сохранения энергии, скорость, приобретаемая заряженной частицей (в нашем случае ионом гелия) определяется:

$$\frac{mV^2}{2} = eU \quad (1)$$

следовательно

$$V = \sqrt{\frac{2eU}{m}} \quad (2)$$

Сила, действующая на ион в магнитном поле – сила Лоренца:

$$ma = eVH \quad (3),$$

где a нормальное ускорение, определяющееся:

$$a = \frac{V^2}{R} \quad (4)$$

Тогда можно определить радиус траектории движения частицы:

$$R = \frac{mV}{eH} \quad (5),$$

подставляя значение для скорости частицы из (2), получим

$$R = \sqrt{\frac{2Um}{eH^2}} \quad (6)$$

или

$$R = \frac{144}{H} \sqrt{MU} \quad (7)$$

R - радиус траектории движения иона, см;

H - напряженность магнитного поля, Э;

U - ускоряющая ионы разность потенциалов, В;

M - эффективная масса иона, равная отношению его массового числа к числу зарядов;

m - масса иона;

V - скорость движения иона;

e - заряд электрона;

a - центростремительное ускорение.

В магнитном поле происходит разделение ионного пучка, выходящего из источника, на отдельные пучки, содержащие ионы с одинаковым отношением массы к заряду. Изменяя ускоряющее напряжение при неизменной напряженности магнитного поля, можно менять радиус траектории движения ионов данной массы.

Анализатор масс-спектрометрической камеры течеискателя - 180-ти градусного типа. Траектория движения ионов в нем от ионного источника к приемнику ионов имеет вид полуокружности. Анализатор данного типа обладает фокусирующим действием: ионы определенной массы, выходящие из источника расходящимся пучком, вновь собираются в узкий сходящийся пучок в плоскости входной диафрагмы (6 на рисунке 2) приемника. Радиус траектории ионов, попадающих в отверстие входной диафрагмы приемника, составляет 3,5 см.

Изменением ускоряющего ионы напряжения осуществляется настройка камеры на "пик гелия", при которой в приемник ионов направляются ионы гелия (пример - траектория R_2 для ионов с эффективной массой M_2 на рисунке 2).

Приемник ионов (2 на рисунке 2) состоит из входной диафрагмы, принимающей ионы электрода-коллектора и супрессорной системы.

Супрессорная система, состоящая из двух сеток, служит для задержания рассеянных ионов, случайно попавших во входную диафрагму приемника. Между сетками супрессорной системы создается тормозящее ионы электрическое поле, пропускающее к коллектору ионы гелия, обладающие полным запасом энергии, задерживающее рассеянные ионы, потерявшие часть своей энергии в результате соударения со стенками камеры или нейтральными молекулами газа, случайно попавшие на рабочую траекторию.

Коллектор ионов соединен с входом электрометрического каскада усилителя постоянного тока. Изменения ионного тока регистрируются выходным прибором блока измерения ионного тока, звуковым и световым индикаторами.

Для обеспечения высокой чувствительности регистрации предусмотрена компенсация фоновых сигналов, дающая возможность регистрировать сигналы, вызываемые течами, на чувствительных шкалах выходного прибора блока измерения ионного тока. Выбор рабочей шкалы осуществляется в соответствии с уровнем флуктуаций фонового сигнала течеискателя и необходимой чувствительностью испытаний.

Для контроля чувствительности течеискателя служит калиброванная гелиевая течь.

Рабочее давление в масс-спектрометрической камере обеспечивается откачной системой, состоящей из вакуумного и паромасляного насосов и азотной ловушки, защищающей камеру от замасливания. Высокий вакуум в масс-спектрометрической камере необходим для того, чтобы длина свободного пробега ионов была существенно больше геометрических размеров камеры, а также для уменьшения фонового сигнала.

3. Устройство гелиевого течеискателя ПТИ-10

Течеискатель состоит из двух основных частей: вакуумной системы и электронной схемы. Вакуумная система течеискателя состоит из масс-спектрометрической камеры с постоянным магнитом, паромасляного насоса, вакуумного насоса, семи клапанов, калиброванной гелиевой течи, азотной ловушки, вакуумного датчика и термопарного манометрического преобразователя. Схема вакуумной системы приведена на рисунке 3, внешний вид вакуумной системы приведен на рисунке 4.

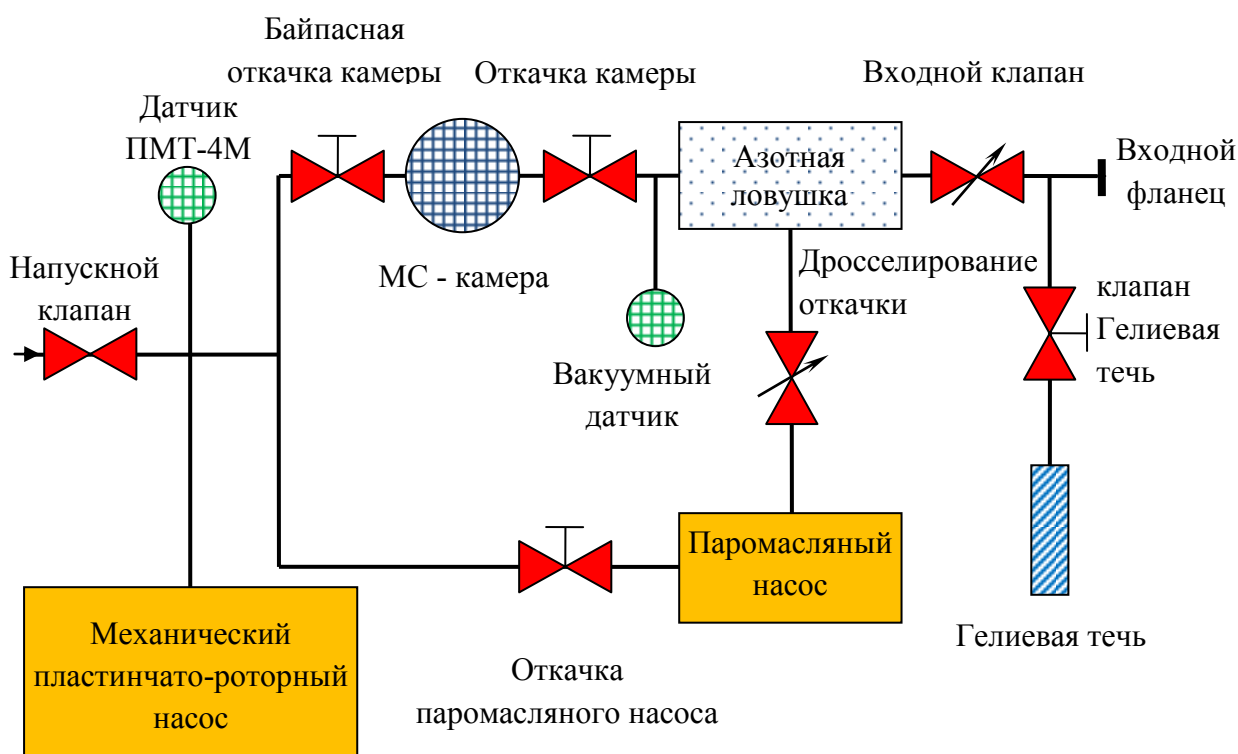


Рисунок 3 - Схема вакуумной системы гелиевого течеискателя ПТИ-10.

Электронная схема течеискателя состоит из блока измерения ионного тока с выносным электрометрическим каскадом, блока питания камеры, блока измерения давления, блока питания вакуумных клапанов, панели управления и щита с кабелями.

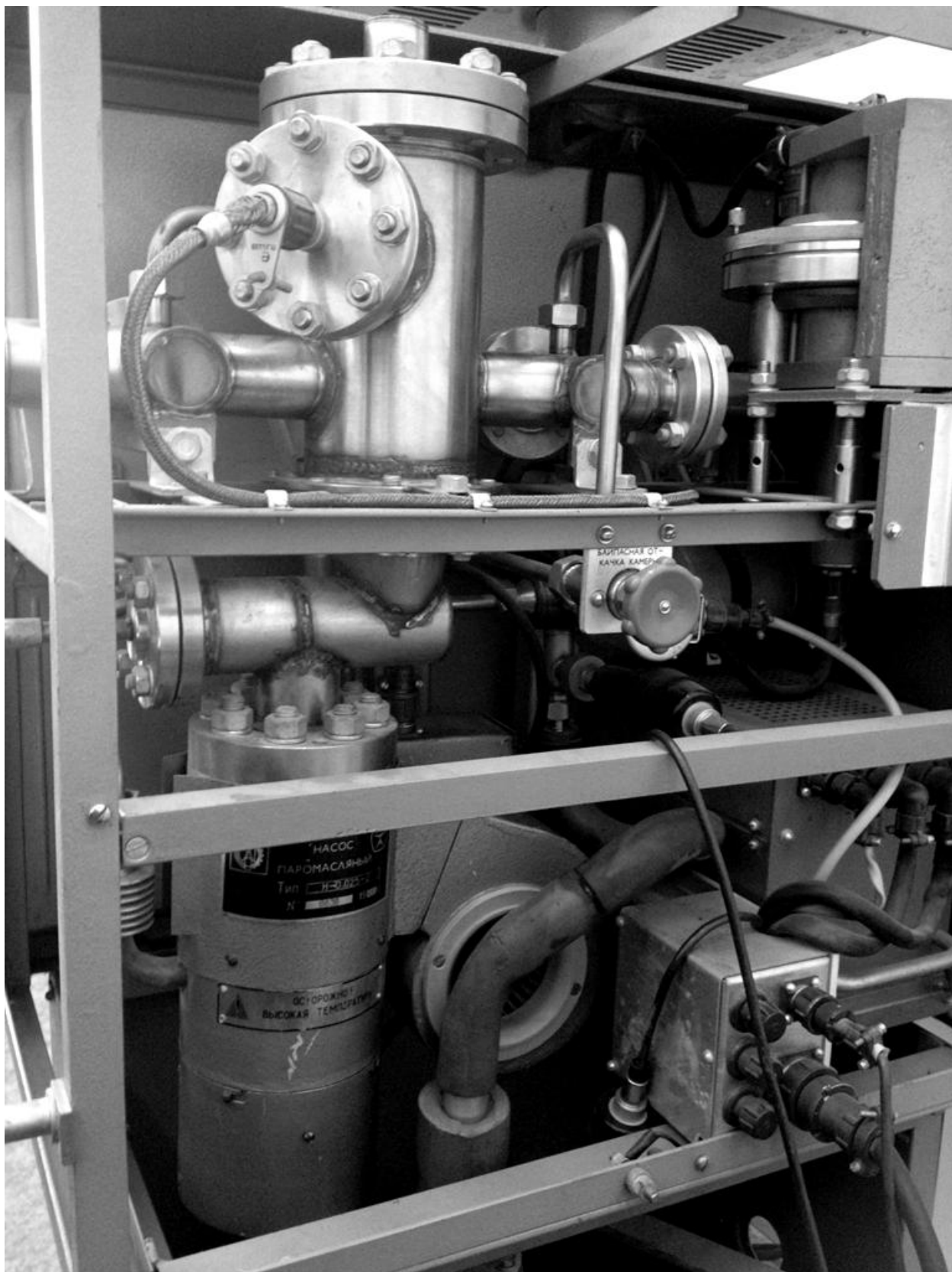


Рисунок 4 - Внешний вид вакуумной системы.

Масс-спектрометрическая камера

Масс-спектрометрическая камера (рисунок 5) представляет собой корпус со съемной крышкой, выполненный из нержавеющей стали и уплотняемый индиевой прокладкой с помощью шести винтов.

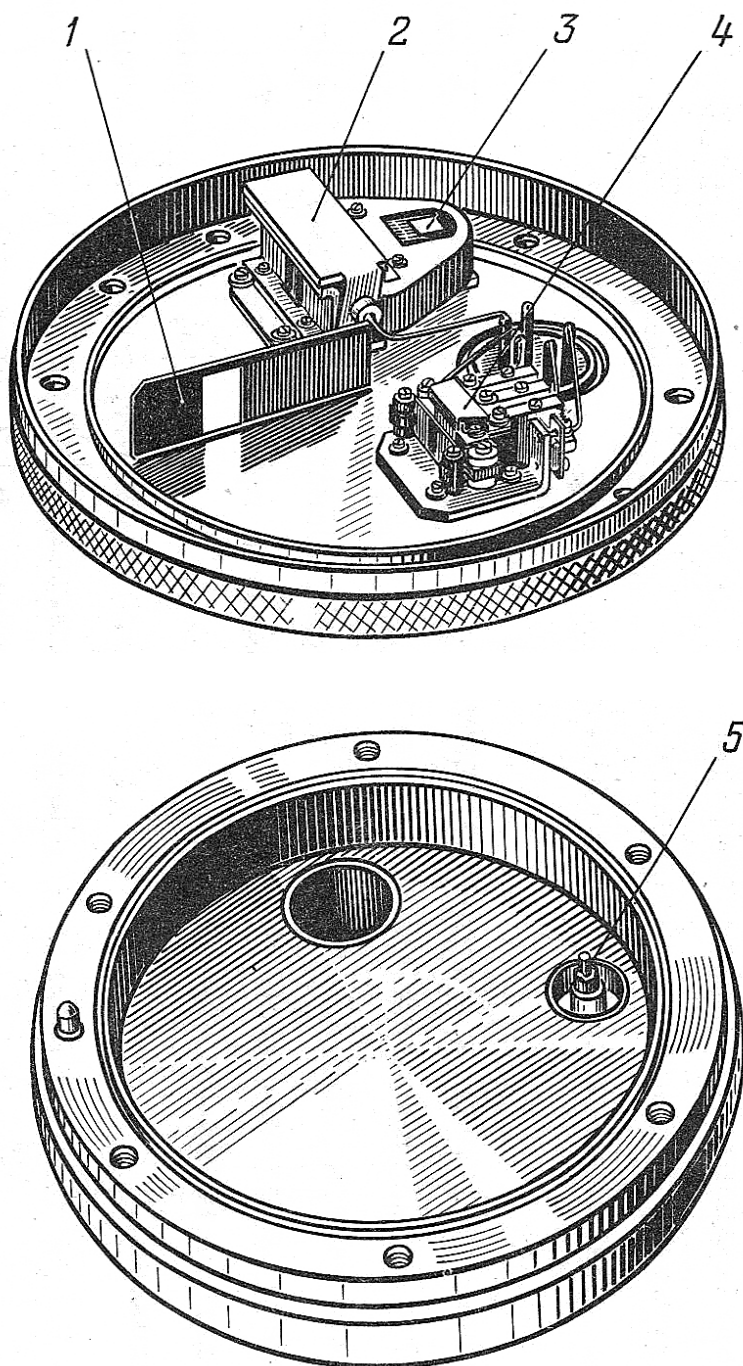


Рисунок 5 - Масс-спектрометрическая камера. 1 - диафрагма, 2 - приемник ионов, 3 - коллектор, 4 - источник ионов, 5 - коллекторный ввод.

Индиевое уплотнение, примененное в камере, обеспечивает легкую разборность и малое газовыделение. Два винта на крышке служат для отжима крышки при ее снятии. Диаметр индиевой проволоки, применяемой в качестве прокладки - 1,5 мм. Все детали масс-спектрометрической камеры расположены на съемной крышке, что обеспечивает удобство ее разборки и промывки, смены катода. Основными рабочими элементами камеры являются: ионный источник и приемник ионов.

Ионный источник содержит катод, коробку ионизатора, смонтированные на керамической пластине, и диафрагму. Катод представляет собой спираль из вольфрамовой проволоки. Увеличенное изображение источника ионов показано на рисунке 6.

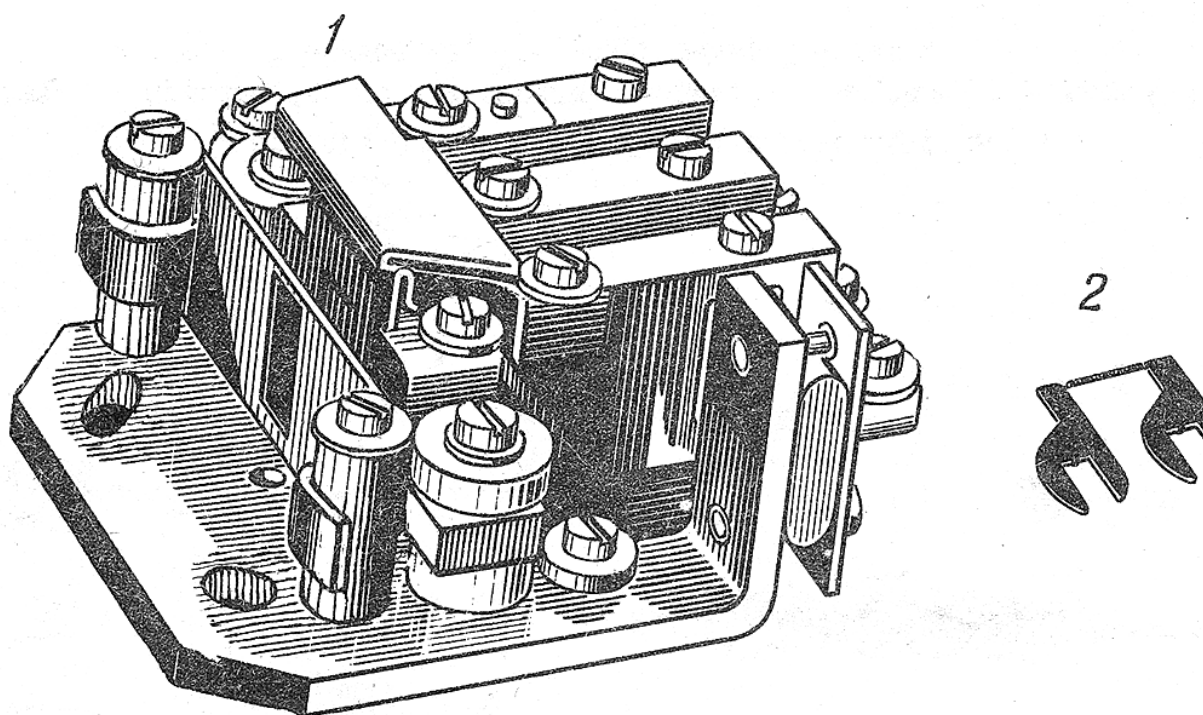


Рисунок 6 - Ионный источник (1) и катод (2).

Приемник ионов содержит входную диафрагму, супрессор, состоящий из 2-х сеток, и коллектор ионов. Источник и приемник ионов расположены под углом 180° друг к другу.

Конструкция всех узлов камеры (источник, приемник) разборная, обеспечивает возможность периодической чистки и промывки.

Подача питания осуществляется через штепсельную вилку со стеклоэмалевым изолятором, вваренную в крышку камеры.

На рисунке 7 показана схема электрическая принципиальная масс-спектрометрической камеры.

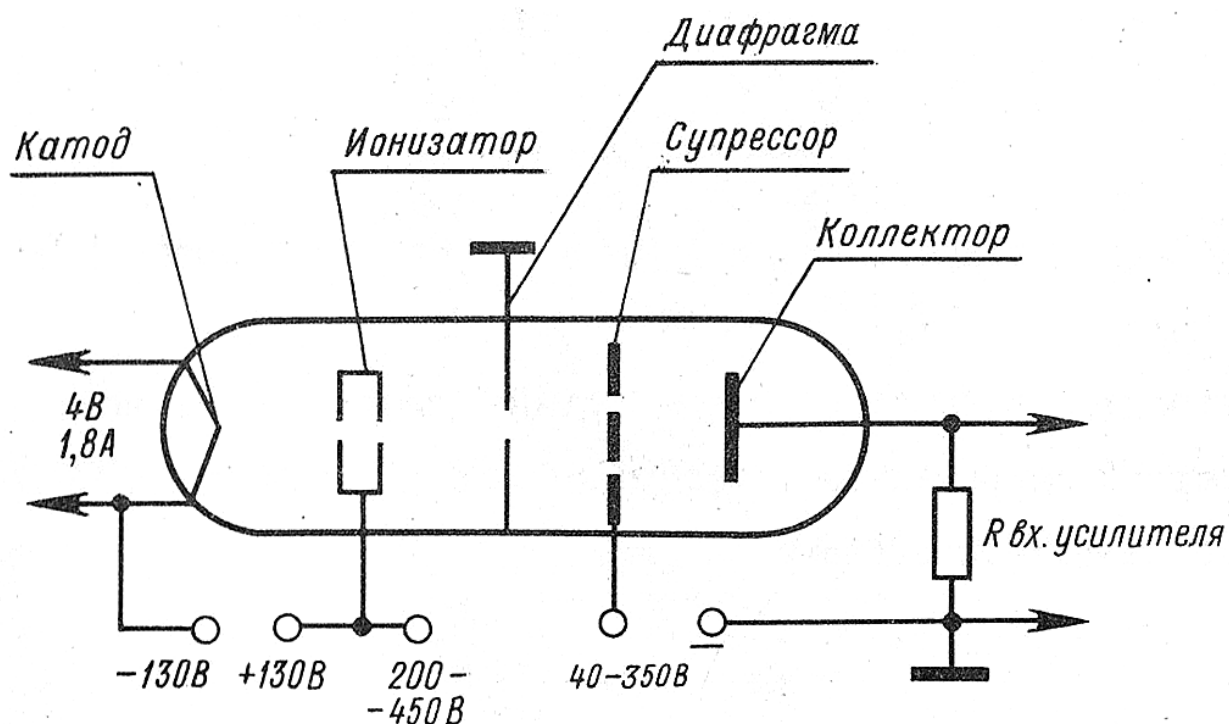


Рисунок 7 - Схема электрическая принципиальная масс-спектрометрической камеры.

Выносной электрометрический каскад усилителя постоянного тока соединяется с коллектором ионов через ввод, уплотненный в корпусе камеры.

Масс-спектрометрическая камера размещена в постоянном магните. Межполюсное расстояние в магнитной системе - 31 мм. Средняя напряженность магнитного поля в зазоре 1700 Э.

Для создания форвакуума в течеискателе используется пластинчатороторный вакуумный насос. Разрежение, создаваемое насосом, порядка 10^{-2} мм.рт.ст. Для создания в системе высокого вакуума используется паромасляный насос с воздушным охлаждением, создавая разрежение порядка 10^{-6} мм.рт.ст.

Для защиты масс-спектрометрической камеры и испытываемых объектов от замасливания над паромасляным насосом установлена ловушка, охлаждаемая жидким азотом.

Краткая характеристика и назначение клапанов

Вакуумная система течеискателя содержит 7 клапанов. Каждому клапану в соответствии с его назначением и принципом действия дано наименование (принципиальная схема вакуумной системы приведена на рисунке 3).

"ВХОДНОЙ КЛАПАН" - дросселирующий сильфонный клапан с ручным управлением, предназначен для регулировки потока газа, поступающего из изделия или щупа в масс-спектрометрическую камеру.

Клапан "ОТКАЧКА КАМЕРЫ" - ручной сильфонный клапан, соединяет масс-спектрометрическую камеру с откачной системой течеискателя. Наличие этого клапана обеспечивает возможность изоляции камеры во время размораживания ловушки и вскрытия ее в работающем течеискателе.

Клапан "ДРОССЕЛИРОВАНИЕ ОТКАЧКИ" - дросселирующий сильфонный клапан с ручным управлением, предназначен для увеличения чувствительности течеискателя путем уменьшения скорости откачки.

Клапан "ОТКАЧКА ПАРОМАСЛЯНОГО НАСОСА" - сильфонный клапан с электромагнитным приводом, предназначен для изоляции высоковакуумного объема течеискателя (паромасляный насос, азотная ловушка, камера) от вакуумного насоса при его запуске и выключении, а также при байпасной откачке камеры.

Клапан "ОТКАЧКА ПАРОМАСЛЯНОГО НАСОСА" автоматически закрывается при отключении питания, что обеспечивает защиту вакуумной системы течеискателя от выхода из строя при внезапном отключении сетевого напряжения (изоляция высоковакуумного объема от

форвакуумного). Открывается клапан кнопкой "ПАРОМАСЛЯНЫЙ НАСОС - ОТКАЧКА", расположенной на панели управления.

Клапан "БАЙПАСНАЯ ОТКАЧКА КАМЕРЫ" - ручной сильфонный клапан, предназначен для байпасной откачки камеры вакуумным насосом после ее вскрытия для смены катода, чистки, промывки в работающем течеискателе.

Клапан "ГЕЛИЕВАЯ ТЕЧЬ" - сильфонный клапан с ручным управлением, открывается при калибровке течеискателя по гелиевой течи.

"НАПУСКНОЙ КЛАПАН" - клапан с электромагнитным управлением, предназначен для автоматического напуска атмосферного воздуха в вакуумный насос. Клапан закрыт, когда подано напряжение питания, открывается при его снятии. Подача напряжения питания на клапан осуществляется автоматически при включении течеискателя.

Гелиевая течь

Гелиевая течь "ГЕЛИТ - 1" представляет собой устройство, дающее непрерывный неизменный по величине поток гелия. Действие течи "ГЕЛИТ-1" основано на диффузии гелия сквозь мембрану, изготовленную из плавленого кварца.

Гелиевая течь встроена в вакуумную систему и предназначена для определения чувствительности течеискателя в процессе его регулировки и эксплуатации. Расположение гелиевой течи за дросселирующим входным клапаном течеискателя обеспечивает возможность оценки реальной чувствительности испытаний при рабочем положении клапана. Для калибровки течеискателя на входном фланце устанавливается заглушка или изолируется присоединительная коммуникация. Входной клапан при этом полностью открывается.

Откачка гелиевой течи насосами течеискателя может быть осуществлена только при запуске его (на входном фланце заглушка). В работающем течеискателе откачка гелиевой течи должна производиться внешними насосами.

Величина потока встроенной гелиевой течи "ГЕЛИТ-1" имеет пределы 5×10^{-8} - 5×10^{-7} мбар•л/с.

Манометрические преобразователи

Для индикации давления в высоковакуумном объеме и в форвакуумной линии вакуумная система течеискателя содержит два манометрических преобразователя.

Преобразователь манометрический тепловой термопарный ПМТ-4М (типа Пирани) предназначен для индикации давления в форвакуумной линии.

Магнитный электроразрядный манометрический преобразователь - вакуумный датчик, предназначенный для индикации давления в высоковакуумном объеме, присоединен к азотной ловушке, градуировочная характеристика приведена в приложении 3.

Диапазон давлений, индицируемых преобразователем ПМТ-4М, от 1×10^{-3} до 1×10^{-1} мм.рт.ст.

Диапазон давлений, индицируемых вакуумным датчиком, от 1×10^{-6} до 1×10^{-3} мм.рт.ст. Вакуумный датчик, кроме этого, является датчиком вакуумной блокировки.

Блок измерения ионного тока с выносным электрометрическим каскадом

Блок измерения ионного тока содержит электрометрический усилитель постоянного тока, стрелочный, акустический и световой индикаторы, схемы питания усилителя, акустического и светового индикаторов и схему компенсации фоновых сигналов.

С выхода усилителя постоянного тока сигнал снимается на стрелочный прибор. Шкала стрелочного прибора проградуирована в единицах напряжения и имеет пределы измерения в соответствии с положением переключателя "ПРЕДЕЛЫ ИЗМЕРЕНИЯ": "0,1 V", "0,3 V", "1 V", "3 V", "10 V", "30 V".

Для компенсации фоновых сигналов течеискателя в цепь обратной связи усилителя вводится в обратной фазе, по сравнению с сигналом, регулируемое напряжение, снимаемое с резистора. Для обеспечения более плавной регулировки напряжения компенсации весь диапазон разбит на 2 поддиапазона: от 0 до 6 В и от 0 до 30 В, которые устанавливаются переключателем "КОМПЕНСАЦИЯ ГРУБО". Плавная регулировка напряжения компенсации осуществляется резистором "КОМПЕНСАЦИЯ ПЛАВНО".

Блок питания камеры

Блок питания камеры содержит источник питания катода ионного источника со схемами стабилизации тока эмиссии и ограничения пускового тока, а также источники ускоряющего, супрессорного и ионизирующего напряжений.

Для снижения чувствительности течеискателя при индикации грубых течей предусмотрена возможность ступенчатого изменения тока эмиссии: 5, 0,5 и 0,1 мА. Установка нужной величины тока эмиссии и выключение накала катода ионного источника осуществляется переключателем "ТОК ЭМИССИИ".

4. Порядок работы с гелиевым течеискателем ПТИ-10

Расположение органов управления

Ниже указывается расположение и назначение органов управления и присоединения течеискателя.

Панель управления:

пакетный выключатель "СЕТЬ" - "ВКЛ." - "ВЫКЛ." - для включения и выключения течеискателя;

кнопка "ПАРОМАСЛЯНЫЙ НАСОС - ОТКАЧКА" - для открытия клапана "ОТКАЧКА ПАРОМАСЛЯНОГО НАСОСА";

тумблер "НАГРЕВАТЕЛЬ" - для включения нагревателя паромасляного насоса;

кнопка "ДЕБЛОКИРОВКА" - для включения накала катода ионного источника после срабатывания вакуумной блокировки;

ручки трех клапанов, назначение которых описано в разделе 3 (рисунок 8).



Рисунок 8 - Вакуумные вентили на панели управления.

Блок измерения ионного тока (рисунок 9):

ручка резистора "УСТАНОВКА НУЛЯ" - для установки электрического нуля усилителя;

переключатель "ПРЕДЕЛЫ ИЗМЕРЕНИЯ" - для переключения предела измерения выходного прибора;

переключатель "КОМПЕНСАЦИЯ ГРУБО" - для включения компенсирующего напряжения;

ручка резистора "КОМПЕНСАЦИЯ ПЛАВНО" - для плавной регулировки компенсирующего напряжения;

ось резистора "ЧАСТОТА" - для регулировки уровня срабатывания акустического индикатора;

ручка резистора "ГРОМКОСТЬ" - для регулировки громкости акустического индикатора.



Рисунок 9 - Панель управления блока измерения ионного тока.

Блок питания камеры (рисунок 10):

ось резистора "УСКОРЯЮЩЕЕ НАПРЯЖЕНИЕ" - для плавной регулировки ускоряющего напряжения;

ось резистора "СУПРЕССОРНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ" - для плавной регулировки супрессорного напряжения;

переключатель "ТОК ЭМИССИИ" - для включения накала катода ионного источника и ступенчатой регулировки тока эмиссии;

переключатель "ИЗМЕРЕНИЕ" - для включения выходного прибора блока в одну из измерительных цепей "СУПРЕССОРНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ - УСКОРЯЮЩЕЕ НАПРЯЖЕНИЕ - ТОК ЭМИССИИ".



Рисунок 10 - Блок питания камеры.

Блок измерения давления (рисунок 11):



Рисунок 11 - Блок измерения давления.

переключатель "ПМТ-4М - "ВНЕШ. - ВНУТР." - для подключения измерительной цепи к внешнему или внутреннему преобразователю ПМТ-4М;

кнопка "ТОК НАГРЕВАТЕЛЯ ПМТ-4М - НАЖАТЬ" - для измерения тока нагревателя;

ось резистора "ТОК НАГРЕВАТЕЛЯ ПМТ-4М - для плавной регулировки тока нагревателя;

тумблер "ФОРВАКУУМ - ВЫСОКИЙ ВАКУУМ" - для коммутации выходного прибора из схемы измерения давления преобразователем ПМТ-4М в схему измерения давления вакуумным датчиком.

Запуск течеискателя

Выключатель "СЕТЬ" установить в положение "ВКЛ.". При этом должны начать работать вакуумный насос и вентилятор паромасляного насоса, а также должны загореться индикаторы включения сетевого напряжения на лицевых панелях блока измерения ионного тока, блока питания камеры и блока измерения давления. Вход течеискателя соединен с испытуемым объектом, отсеченным от течеискателя дополнительным вакуумным вентилем.

Откачать объем до давления $(3 - 5) \cdot 10^{-2}$ мм рт.ст. (по верхней шкале выходного прибора блока измерения давления, рисунок 11).

Нажать (и отпустить) кнопку клапана "ОТКАЧКА ПАРОМАСЛЯНОГО НАСОСА" на панели управления, при этом должен загореться индикатор "ПАРОМАСЛЯНЫЙ НАСОС - ОТКАЧКА". Откачать объем паромасляного насоса до давления $(3 - 5) \cdot 10^{-2}$ мм рт.ст.

Открывая последовательно клапаны "ДРОССЕЛИРОВАНИЕ ОТКАЧКИ", "ОТКАЧКА КАМЕРЫ", "ВХОДНОЙ КЛАПАН" и "ГЕЛИЕВАЯ ТЕЧЬ", откачать всю вакуумную систему течеискателя до давления $(3 - 5) \cdot 10^{-2}$ мм рт.ст.

Закрыть клапаны "ОТКАЧКА КАМЕРЫ", "ДРОССЕЛИРОВАНИЕ ОТКАЧКИ" и "ГЕЛИЕВАЯ ТЕЧЬ" и "ВХОДНОЙ КЛАПАН".

Клапан "БАЙПАСНАЯ ОТКАЧКА КАМЕРЫ" открывается только после вскрытия камеры в работающем течеискателе. В процессе работы течеискателя он всегда закрыт.

Тумблер "ПАРОМАСЛЯНЫЙ НАСОС - НАГРЕВАТЕЛЬ" (на панели управления) установить в верхнее положение, при этом должен загореться световой сигнал "ПАРОМАСЛЯНЫЙ НАСОС"

Через 30 - 40 минут залить в азотную ловушку жидкий азот через воронку, имеющуюся в комплекте течеискателя и открыть клапан "ДРОССЕЛИРОВАНИЕ ОТКАЧКИ". Тумблер "ФОРВАКУУМ - ВЫСОКИЙ ВАКУУМ" установить в положение "ВЫСОКИЙ ВАКУУМ". Откачать вакуумную систему течеискателя до давления $(1 - 3) \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст., соответствующего 5 - 20 делениям средней шкалы стрелочного прибора блока измерения давления (рисунок 11).

Открыть клапан "ВХОДНОЙ КЛАПАН" и "ГЕЛИЕВАЯ ТЕЧЬ" (на входе течеискателя установлена заглушка) и откачать гелиевую течь до давления, соответствующего 5-20 делениям средней шкалы блока измерения давления. Закрыть клапан "ГЕЛИЕВАЯ ТЕЧЬ" и "ВХОДНОЙ КЛАПАН".

Открыть клапан "ОТКАЧКА КАМЕРЫ", откачать камеру до давления, соответствующего 3 делениям (не более!) средней шкалы стрелочного прибора блока измерения давления (рисунок 11).

Отрегулировать нуль усилителя блока измерения ионного тока на всех шкалах, устанавливая переключатель "ПРЕДЕЛЫ ИЗМЕРЕНИЯ" последовательно в положения "30V", "10V", "3V", "1V", "0,3V" и "0,1V", и резистором "УСТАНОВКА НУЛЯ" установить стрелку прибора блока измерения ионного тока на нуль. Переключатель "ПРЕДЕЛЫ ИЗМЕРЕНИЯ" вернуть в положение "30V".

Нажать кнопку "ДЕБЛОКИРОВКА".

ВНИМАНИЕ! ПЕРЕД ВКЛЮЧЕНИЕМ НАКАЛА КАТОДА ИОННОГО ИСТОЧНИКА НЕОБХОДИМО ПРОВЕРИТЬ, ОТКРЫТ ЛИ КЛАПАН "ОТКАЧКА КАМЕРЫ". ВКЛЮЧЕНИЕ НАКАЛА КАТОДА ИОННОГО ИСТОЧНИКА ПРИ ЗАКРЫТОМ КЛАПАНА "ОТКАЧКА КАМЕРЫ" ПРИВОДИТ К СГОРАНИЮ КАТОДА.

Подать накал на катод ионного источника масс-спектрометрической камеры. Для этого переключатель "ИЗМЕРЕНИЕ" установить в положение "ТОК ЭМИССИИ" и переключатель "ТОК ЭМИССИИ" - в положение "0,5 мА". Через 10 - 20 с. стрелка выходного прибора блока питания камеры должна отклониться на середину шкалы.

Проверить величину ускоряющего и супрессорного напряжений. Величина ускоряющего напряжения порядка 400 В. Величина супрессорного напряжения, в зависимости от величины остаточного фона, может лежать в широких пределах от 40 до 100 В и более.

Ускоряющее и супрессорное напряжения контролируются выходным прибором блока питания камеры в соответствующих положениях переключателя "ИЗМЕРЕНИЕ".

Окончательная регулировка ускоряющего напряжения, подстройка супрессорного напряжения и корректировка расположения магнитной системы производится по сигналу от гелиевой течи.

Выключение течеискателя

Для выключения течеискателя необходимо: закрыть клапаны "ГЕЛИЕВАЯ ТЕЧЬ" и "ВХОДНОЙ КЛАПАН"; переключатель "ПРЕДЕЛЫ ИЗМЕРЕНИЯ" установить в положение "30 V";

переключатель "ТОК ЭМИССИИ" установить в положение "КАТОД ВЫКЛЮЧЕН";

закрыть клапан "ОТКАЧКА КАМЕРЫ"; сифоном (толстостенной медной трубкой с герметичной пробкой) удалить жидкий азот из азотной ловушки;

выключить накал нагревателя паромасляного насоса (тумблер "ПАРОМАСЛЯНЫЙ НАСОС - НАГРЕВАТЕЛЬ" установить в нижнее положение);

через 30 мин после охлаждения паромасляного насоса и отогрева азотной ловушки закрыть клапан "ДРОССЕЛИРОВАНИЕ ОТКАЧКИ", проверить, что все остальные вакуумные клапана в системе закрыты и выключить напряжение питающей сети, установив выключатель "СЕТЬ" в положение "ВЫКЛ.", при этом автоматически открывается электромагнитный клапан напуска атмосферы в форвакуумный насос

5. Практические упражнения

Упражнение 1. Настройка на "пик гелия"

Целью данного упражнения является получение практических навыков настройки масс-спектрометрической камеры гелиевого течеискателя на "пик гелия" путем варьирования ускоряющего напряжения, а также оптимальной настройки течеискателя на максимальную чувствительность. Настройка на максимальную чувствительность осуществляется поиском баланса между ускоряющим и супрессорным напряжением с целью подавления фонового сигнала.

Запустить течеискатель и привести в рабочее положение, как описано в главе "*Запуск течеискателя*". На входе течеискателя установлена заглушка. Переключатель "ТОК ЭМИССИИ" установить в положение "КАТОД ВЫКЛЮЧЕН", закрыть клапан "ОТКАЧКА КАМЕРЫ". Медленно открывать "ВХОДНОЙ КЛАПАН" не допуская роста давления выше 50 делений средней шкалы стрелочного прибора блока измерения давления (рисунок 11). Открыть "ВХОДНОЙ КЛАПАН" до конца.

Открыть клапан "ГЕЛИЕВАЯ ТЕЧЬ". При этом гелий из гелиевой течи попадает в масс-спектрометрическую камеру.

Открыть клапан "ОТКАЧКА КАМЕРЫ", откачать камеру до давления, соответствующего 3 делениям (не более!) средней шкалы стрелочного прибора блока измерения давления (рисунок 11). В случае срабатывания защиты и появления сигнала "ПЛОХОЙ ВАКУУМ" перед последующим включением катода нажать кнопку "ДЕБЛОКИРОВКА". Переключатель "ПРЕДЕЛЫ ИЗМЕРЕНИЯ" установить в положение "30 V". Подать накал на катод ионного источника масс-спектрометрической камеры. Для этого переключатель "ИЗМЕРЕНИЕ" установить в положение "ТОК ЭМИССИИ" и переключатель "ТОК ЭМИССИИ" - в положение "0,5 мА". Через 10 - 20 с.

стрелка выходного прибора блока питания камеры должна отклониться на середину шкалы.

Записать первоначальные значения ускоряющего и супрессорного напряжений. Ускоряющее и супрессорное напряжения контролируются выходным прибором блока питания камеры в соответствующих положениях переключателя "ИЗМЕРЕНИЕ".

Выбирая удобные для отсчета шкалы выходного прибора блока измерения ионного тока, закрывая и открывая клапан "ГЕЛИЕВАЯ ТЕЧЬ", произвести предварительную регулировку ускоряющего и супрессорного напряжений в следующем порядке:

открыть клапан "ГЕЛИЕВАЯ ТЕЧЬ" и после установления сигнала резистором "УСКОРЯЮЩЕЕ НАПРЯЖЕНИЕ" настроиться на "пик гелия" - максимальное отклонение стрелки выходного прибора блока измерения ионного тока;

закрыть клапан "ГЕЛИЕВАЯ ТЕЧЬ" (если сигнал не спадает - значит это не "пик гелия", открыть еще раз клапан "ГЕЛИЕВАЯ ТЕЧЬ" и настроиться на "пик гелия");

резистором "СУПРЕССОРНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ" настроиться на минимальное значение фонового сигнала;

Открывая и закрывая клапан "ГЕЛИЕВАЯ ТЕЧЬ", резисторами "УСКОРЯЮЩЕЕ НАПРЯЖЕНИЕ" и "СУПРЕССОРНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ" добиться максимальной разности между величиной сигнала, соответствующего "пику гелия", и фоновым сигналом.

В ходе выполнения упражнения записывать значения ускоряющего напряжения, супрессорного напряжения, величины фонового значения и сигнала от гелиевой течи. Результаты представить в виде таблицы.

Упражнение 2. Определение минимального потока гелия, регистрируемого течеискателем и цены деления выходного прибора

Целью данного упражнения является калибровка гелиевого течеискателя по сигналу встроенной калиброванной течи, а также определение минимального потока гелия, регистрируемого течеискателем. Поскольку, чувствительность течеискателя зависит от степени загрязнения масс-спектрометрической камеры, данная процедура является неотъемлемой частью поиска течей в реальных вакуумных и криогенных системах.

Запустить течеискатель и привести в рабочее положение, как описано в главе "Запуск течеискателя". Настроить течеискатель на "пик гелия" (см. упражнение 1).

Переключатель "ПРЕДЕЛЫ ИЗМЕРЕНИЯ" установить в положение "30 V".

Открыть клапан "ГЕЛИЕВАЯ ТЕЧЬ". Выбрав удобную для отсчета шкалу выходного прибора блока измерения ионного тока, определить установившееся значение величины сигнала от гелиевой течи (α_{T0}).

Закрыть клапан "ГЕЛИЕВАЯ ТЕЧЬ" и определить величину фоновой сигнала ($\alpha_{\Phi 0}$).

Определить минимальный поток гелия $Q_{\text{мин}0}$ регистрируемый течеискателем, по формуле (8):

$$Q_{\text{мин}0} = \frac{Q_T}{\alpha_{T0} - \alpha_{\Phi 0}} \alpha_{\Phi 0} \quad \text{мбар} \cdot \text{л/с}, \quad (8)$$

где Q_T - величина потока гелиевой течи (по маркировке на корпусе течи), мбар•л/с.

Цена деления выходного прибора блока измерения ионного тока
течеискателя соответствует:

$$S_{q0} = \frac{Q_T}{\alpha_{T0} - \alpha_{\Phi 0}} \quad \text{мбар} \cdot \text{л/с} \cdot \text{мВ}, (9)$$

Повторить измерения не менее трех раз, записать полученные значения
минимального потока гелия, регистрируемого течеискателем и цены деления
выходного прибора. Результаты представить в виде таблицы.

Упражнение 3. Проведение вакуумных испытаний на герметичность

Целью данного упражнения является отработка практических навыков поиска негерметичностей в вакуумных и криогенных системах и коммуникациях, порядка обдува испытуемых систем газообразным гелием, оценки величины найденных течей.

Перед выполнением данного упражнения следует ознакомиться с методическими рекомендациями, приведенными в приложении 4.

Вход течеискателя соединен с испытуемым объектом, отсеченным от течеискателя дополнительным вакуумным вентилем; испытуемый объект и все соединительные коммуникации предварительно откачаны;

Запустить течеискатель и привести в рабочее положение, как описано в главе "*Запуск течеискателя*". Настроить течеискатель на "пик гелия" (см. упражнение 1). Выключить катод.

Плавное открывание входной клапан течеискателя и дополнительный вакуумный вентиль на входе в испытуемый объект, соединить вакуумную систему течеискателя с испытуемым объектом. Убедиться, что вакуум в системе течеискателя достаточен (не более 20 - 30 делений средней шкалы выходного прибора блока измерения давления). Нажать кнопку "ДЕБЛОКИРОВКА".

Включить накал катода ионного источника (проверить, открыт ли клапан "ОТКАЧКА КАМЕРЫ").

Переключатель "ТОК ЭМИССИИ" на панели блока питания камеры установить в положение "0,5 мА". Ток эмиссии устанавливается через 10 - 20 с. после включения накала катода ионного источника.

Следует обратить внимание, что чувствительность испытаний не идентична чувствительности течеискателя, поэтому для оценки величины натекания испытуемых объектов необходимо определить цену деления выходного прибора блока измерения ионного тока в конкретных условиях проведения испытания, т.е. при присоединенном испытуемом объекте в выбранном режиме испытаний и откачки.

Открыть клапан "ГЕЛИЕВАЯ ТЕЧЬ". Выбрав удобную для отсчета шкалу выходного прибора блока измерения ионного тока, определить установившееся значение величины сигнала от гелиевой течи (α_T).

Закрыть клапан "ГЕЛИЕВАЯ ТЕЧЬ" и определить величину фоновый сигнала (α_ϕ). Определить минимальный поток гелия $Q_{\min}$ регистрируемый течеискателем, по формуле (10):

$$Q_{\min} = \frac{Q_T}{\alpha_T - \alpha_\phi} \alpha_\phi \quad \text{мбар} \cdot \text{л/с}, \quad (10)$$

где Q_T - величина потока гелиевой течи (по маркировке на корпусе течи), мбар•л/с

Цена деления выходного прибора блока измерения ионного тока течеискателя соответствует:

$$S_q = \frac{Q_T}{\alpha_T - \alpha_\phi} \quad \text{мбар} \cdot \text{л/с} \cdot \text{мВ}, \quad (11)$$

Приступить к поиску течей постепенно обдувая испытуемый объект гелием в направлении "сверху-вниз" и приближаясь от дальней точки испытуемого объекта к течеискателю.

Оценить величину натекания (размер течи) сравнивая сигнал от найденной течи в испытуемом объекте с калиброванной гелиевой течью.

Величина натекания оценивается по формуле (12):

$$Q = S_q \cdot (\alpha_G - \alpha_\Phi) \quad \text{мбар} \cdot \text{л/с}, \quad (12)$$

где S_q - цена деления наиболее чувствительной шкалы выходного прибора блока измерения ионного тока, мбар•л/с•мВ;

α_G - сигнал по стрелочному прибору блока измерения ионного тока, обусловленный натеканием гелия из испытуемого объекта, мВ;

α_Φ - фоновый сигнал течеискателя по стрелочному прибору блока измерения ионного тока, мВ.

Повторить оценку величины течи не менее трех раз, записать полученные значения величины течи, минимального потока гелия, регистрируемого течеискателем в режиме измерения и цены деления выходного прибора в режиме измерения. Результаты представить в виде таблицы. Сравнить полученные значения минимального потока гелия, регистрируемого течеискателем в режиме измерения и цены деления выходного прибора в режиме измерения с параметрами, полученными ранее при выполнении упражнения 2. Зарисовать схему подключения испытуемого объекта и отметить найденные течи на схеме.

6. Вопросы для подготовки

- основные методы поиска течей
- принцип гелиевого течеискания
- устройство течеискателя гелиевого ПТИ-10
- порядок работы с течеискателем гелиевым ПТИ-10
- для чего нужен высокий вакуум в масс-спектрометрической камере?
- чем обуславливается использование гелия-4 в качестве пробного газа?

7. Литература

- Вакуумная техника: справочник / К.Е. Демихов, Ю.В. Панфилов, Н.К. Никулин и др.; под общ. ред. К.Е. Демихова, Ю.В. Панфилова. 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 2009. - 590 с.
- Розанов, Леонид Николаевич. Вакуумная техника: учебник для вузов по спец. "Электронное машиностроение"/Л.Н. Розанов. - Изд. 3-е, перераб. и доп.-М.: Высшая школа, 2007. - 391 с.
- Шешин, Евгений Павлович. Вакуумные технологии : учеб. пособие / Е. П. Шешин. - Долгопрудный : Интеллект, 2009. - 501 с.
- Искусство криогеники. Низкотемпературная техника в физическом эксперименте, промышленных и аэрокосмических приложениях. Пер. с англ.: Учебно-справочное руководство / Г.Вентура, Л. Ризегари - Долгопрудный: Издательский Дом "Интеллект", 2011. - 336 с.
- Беляков В.П. Криогенная техника и технология. - М.: Энергоиздат, 1982. - 272 с.
- ПТИ-10 Течеискатель гелиевый. Паспорт прибора. 1980 г.

Справочная информация*Таблица перевода основных единиц измерения давления*

	Па (Н/м ²)	бар	мбар	мм рт.ст. (торр)	атм
Па (Н/м ²)	1	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$9,87 \cdot 10^{-6}$
бар	$1 \cdot 10^5$	1	1000	750	0,987
мбар	100	$1 \cdot 10^{-3}$	1	0,75	$9,87 \cdot 10^{-4}$
мм рт.ст. (торр)	133	$1,33 \cdot 10^{-3}$	1,33	1	$1,32 \cdot 10^{-3}$
атм	$1,01 \cdot 10^5$	1,013	1013	760	1

Таблица перевода основных единиц измерения величины течи

	мбар·л/с	мм.рт.ст.·л/с	Па·м ³ /с	см ³ /с [†]
мбар·л/с	1	0.75	0.1	0.99
мм.рт.ст.·л/с	1.33	1	0.133	1.32
Па·м ³ /с	10	7.5	1	~10
см ³ /с	1.01	0.76	0.101	1

[†] При Н.У. - нормальных условиях 0⁰С, 1 Атм.

Оценка величины течи

$$Q_T = \frac{\Delta(p \cdot V)}{\Delta t} = \frac{R \cdot T}{M} \cdot \frac{\Delta m}{\Delta t}$$

где

$R = 83.14$ мбар•л•моль⁻¹•К⁻¹;

T - температура, К;

M - молярная масса газа, г/моль;

Δm - масса, г.;

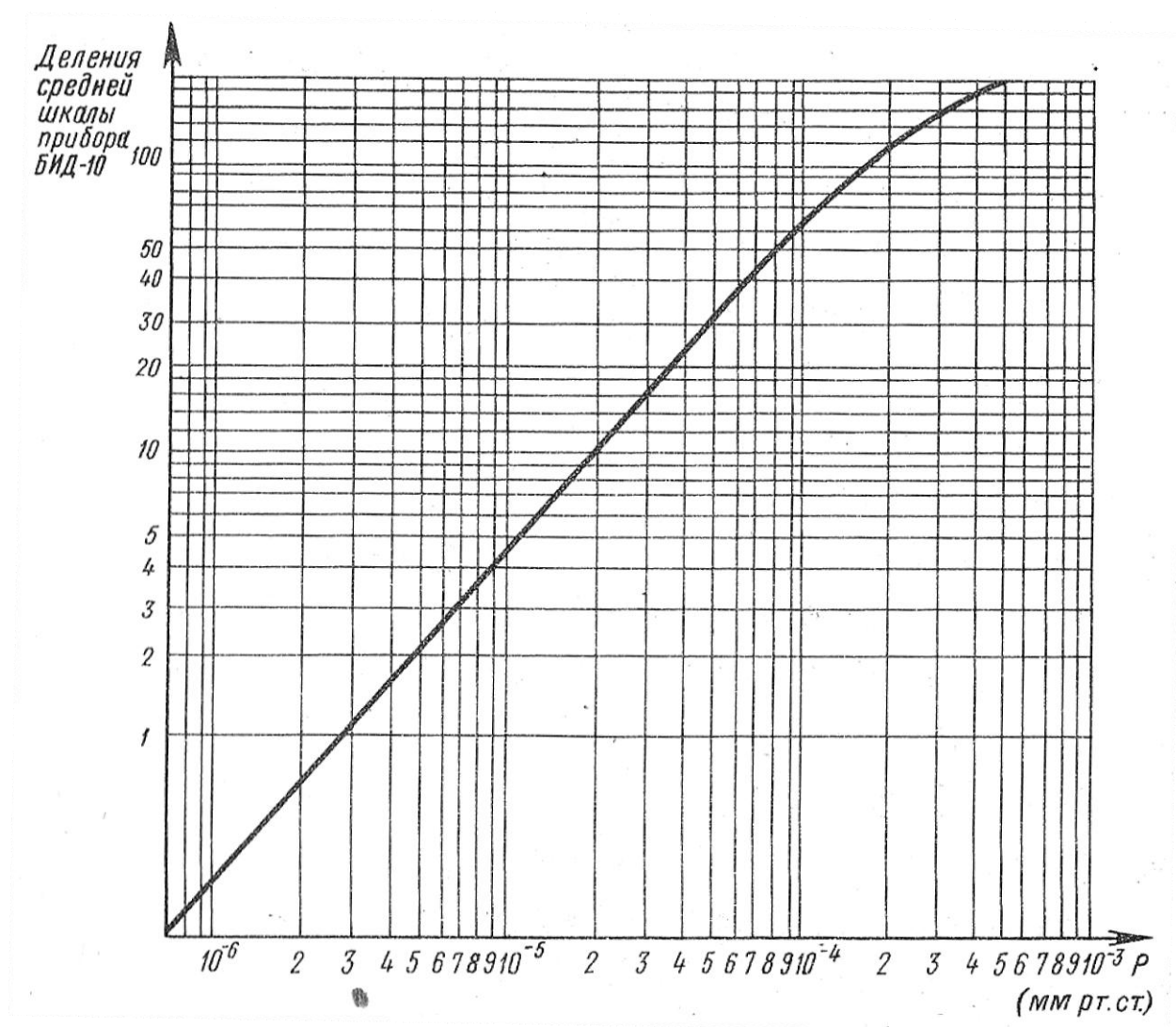
Δt - время, с.

Оценочное соотношение между уровнем течи и размером отверстия

Диаметр отверстия	Уровень течи, мбар·л/с
10^{-2} м = 1 см	10^{+4}
10^{-3} м = 1 мм	10^{+2}
10^{-4} м = 0,1 мм	10^0
10^{-5} м = 10 мкм	10^{-2}
10^{-6} м = 1 мкм	10^{-4}
10^{-7} м = 0,1 мкм	10^{-6}
10^{-8} м = 10 нм	10^{-8}

Градуировочная характеристика высоковакуумного датчика ПТИ-10

На рисунке представлена градуировочная характеристика высоковакуумного датчика гелиевого течеискателя ПТИ-10, зависимость показаний средней шкалы прибора блока измерения давления (рисунок 11) от давления в масс-спектрометрической камере прибора.



Методические рекомендации к процессу течеискания

Течеискатель обеспечивает контроль герметичности различных объемов и систем любыми методами с применением гелия в качестве пробного газа. При работе в условиях небольшой газовой нагрузки на течеискатель предусмотрено увеличение чувствительности дросселированием откачки.

Для индикации больших течей в течеискателе предусмотрена ступенчатая регулировка тока эмиссии ионного источника 5, 0,5 и 0,1 мА.

Чувствительность течеискателя не идентична чувствительности испытаний. Чувствительность испытаний определяется чувствительностью применяемого течеискателя, методом испытаний, схемой испытаний, длительностью и условиями подачи гелия на течь.

Основными методами испытаний являются: метод обдува и гелиевых чехлов, метод гелиевой камеры, метод барокамеры, метод накопления, метод щупа.

Выбор схемы испытаний определяется характеристикой испытуемого объекта к условиям его проверки, требуемой чувствительностью, имеющимися средствами откачки.

Независимо от размеров испытуемых объектов и соединительных коммуникаций, не допускается откачивать их от атмосферного давления насосами течеискателя.

Наибольшая чувствительность достигается в условиях, когда весь газовый поток линии, к которой подсоединен течеискатель, прокачивается через течеискатель.

Поэтому испытание объектов, поток газоотделения и натекания которых не превышает максимальный рабочий поток течеискателя, производится при отключенных средствах вспомогательной откачки и прокачке всего газового потока проверяемого объекта через течеискатель.

Для длительного сохранения высокой чувствительности течеискателя при возможном поступлении загрязнений из проверяемого объекта рекомендуется на входе его устанавливать ловушку, охлаждаемую жидким азотом (предотвращение загрязнения течеискателя).

Если объектом испытаний служит вакуумная система в целом, течеискатель предпочтительно присоединить к месту входа в вакуумный насос с тем, чтобы обеспечить обнаружение течей во всех участках системы с наибольшей чувствительностью и оперативностью. Препятствовать работе может большой уровень фона, определяемый загрязнением форвакуумной части испытываемой системы.

Для испытания объектов без собственных средств откачки могут быть рекомендованы схемы, представленные на рисунке 12 "а", "б".

Испытаниям по схеме рисунка 12 "а", как правило, подвергаются объекты небольшого объема с малым газоотделением.

При испытании объектов суммарный газовый поток которых не превышает максимального рабочего потока течеискателя, вспомогательный вакуумный насос целесообразно изолировать сразу после получения в объекте и соединительных коммуникациях предварительного разрежения и проводить испытания при полностью открытом входном дросселирующем клапане.

Схема, представленная на рисунке 12 "б", позволяет, как правило, обеспечить наиболее высокую чувствительность и оперативность испытаний

при изменении в широких пределах объема и газоотделения проверяемых объектов, длительности поступления гелия через течь. Эта схема обеспечивает максимальный отбор газа в течеискатель, малую постоянную времени и, тем самым, наибольшую реальную чувствительность поиска течей.

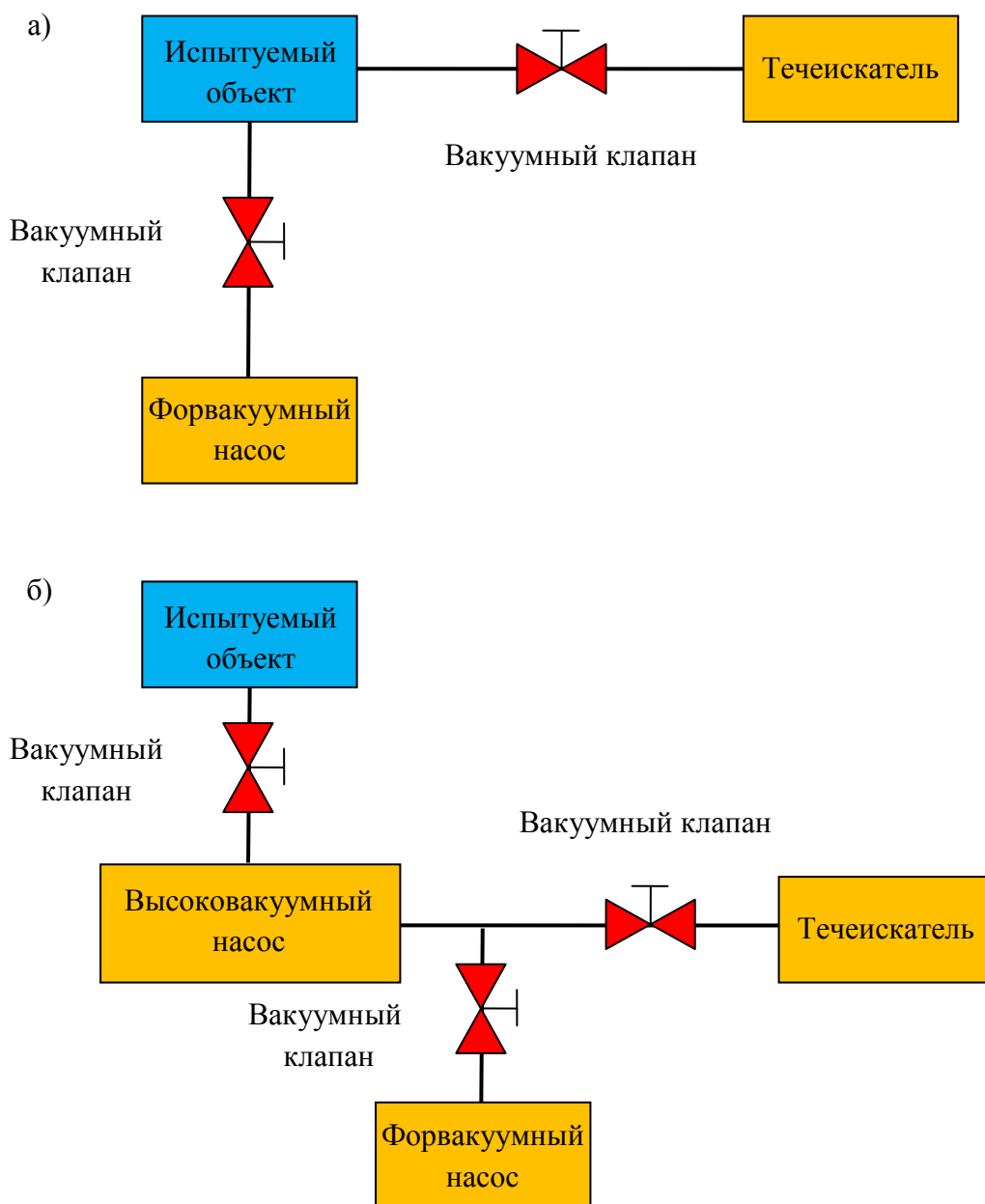


Рисунок 12 - Вакуумные схемы, применяемые при течеискании.