**РЕФЕРАТ**

**"Низкие температуры"**

2009

А) Температуры между нулем и нормальной точкой кипения жидкого воздуха

Новый способ получения низких температур предложил Р. Хильш. В прямую цилиндрическую трубку R из форсунки D вдувается воздух по касательной к стенке трубы. Вследствие того, что справа, вплотную к форсунке, вставлена диафрагма В, струя воздуха при открытой с двух сторон трубке движется только налево, описывая винтовую спираль. Эту диафрагму следует отрегулировать таким образом, чтобы некоторая часть воздуха выходила через нее направо. Этот воздух отдает большую часть своей кинетической энергии в виде тепла воздуху, движущемуся налево вдоль стенки трубки; кроме того, правая часть воздуха разрежается. В.результате этого она оказывается значительно более холодной, чем часть, текущая налево. Таким способом при начальном давлении в 10 атм можно получить температуру до – 40° С. Конечно, коэффициент полезного действия такой установки очень мал.

Б) Температура ниже нормальной точки кипения жидкого воздуха

В качестве охлаждающей среды в этой температурной области служат кипящие при атмосферном или более низких давлениях сжиженные газы: воздух, неон, водород, гелий. Промежуточные температуры между отдельными областями можно получать, используя адсорбционные криостаты. Однако возможность их применения очень ограничена, так как их мощность очень мала. Температурный интервал между жидким водородом и жидким гелием может быть заполнен, кроме того, с помощью гелиевого ожижителя Симона. Однако мощность этого аппарата невелика.

Термостаты для сжиженных газов в этих температурных областях необходимо прочно закрывать, так как в противном случае при понижении давления эти газы обычно начинают кипеть; кроме того, при очень низких температурах на кипящих газах будет конденсироваться воздух. В то время, когда не ведется откачка. Конечно, необходимо выпускать газ, образующийся в процессе испарения. Вентилем, открывающимся только под давлением изнутри, может служить резиновая трубка, прорезанная в продольном направлении.

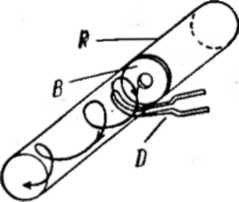
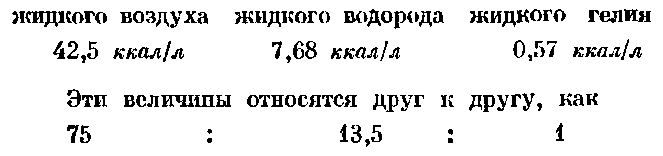


Схема охлаждения по Хильшу

При конструировании криостатов следует иметь в виду, что Теплота испарения 1 л жидкости составляет при нормальных точках кипения для



Отсюда видно, что при работе с жидким водородом и тем более с жидким гелием приток тепла извне должен быть уменьшен как можно сильнее.

Ниже речь будет идти главным образом о криостатах для жидкого гелия. Для жидкого водорода применимы те же принципы, в то время как для жидкого воздуха многое можно упростить.

Всегда применяют два сосуда Дьюара: внутренний, для. жидкого гелия, и внешний, заполненный жидким азотом. Так как через иенское или пирексовое стекло гелий диффундирует, то внутренний сосуд должен быть изготовлен из других сортов стекла. Теперь все больше переходят к цельнометаллическим конструкциям. При их правильном изготовлении расход гелия оказывается примерно «таким же, как в стеклянных сосудах. На рис. показан такой сосуд Дьюара, который легко самостоятельно изготовить в лабораторной мастерской. Внешняя оболочка состоит из латунной трубы без швов диаметром 9,5 см, с толщиной стенок 1,5 мм, внутренняя оболочка – из аналогичной трубы диаметром 8 см. Для уменьшения теплопроводности от теплого конца верхняя часть внутренней трубы изготовляется из листового нейзильбера толщиной 0,3 мм. Для соединения этой трубы с латунной их сначала приваривают в отдельных точках, а затем прочно пропаивают. Фальцованные швы значительно труднее сделать вакуумно-плотными. Стороны трубок, обращенные к вакууму, облицовываются алюминиевой фольгой. В качестве клея применяется бесцветный лак, например глипталь. В нижней части внутреннего сосуда помещена небольшая коробка для абсорбции газа, заполненная углем из кокосовых орехов. Все соединения, за исключением дна, пропаяны твердым припоем, пластинка дна – мягким. Сосуд откачивается при комнатной температуре до давления Ю-3 мм рт. ст. через вентиль без сальника. Для контроля давления служит маленький термоэлектрический вакуумметр. Тем же приемом, конечно, можно без особого труда сделать внешний сосуд для жидкого азота. После тщательного охлаждения внутреннего сосуда до температуры жидкого азота требуется еще около 1,5 л жидкого гелия для охлаждения до 4° К и 2,25 л для заполнения криостата. Если нет дополнительного притока тепла через измерительные приборы, а крышка омывается жидким азотом, то из криостата за час испаряется около 0,3 л жидкого гелия.

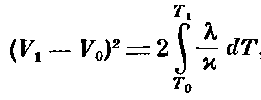
Для определения уровня жидкости внутри сосуда с большим успехом применяют американские угольные радиотехнические сопротивления. Бакелитовую оболочку этих сопротивлений удаляют или шлифовкой на станке, или вручную, медленно вращая сопротивление. Одноваттное сопротивление, имеющее при комнатной температуре величину 180 ом, при 4° К в парах гелия возрастает до 3600 ом, а в жидком гелии – до 4600 ом. При более низких температурах сопротивление еще больше. Не надо стремиться уменьшить выделяющееся при измерении джоулево тепло, так как изменение сопротивления вызывается изменением внешней теплопроводности. Три таких сопротивления укрепляют в сосуде на разной высоте: одно – на самом низком уровне, при котором еще можно работать, второе – па половинной высоте и третье –· в месте соединения внутренней трубы с ее тонкой частью.

Подводящие провода вводятся во внутреннюю часть через фланец между двумя резиновыми кольцами. Применяют эмалироианный провод и небольшое количество вакуумной смазки.

Весь сосуд Дьюара закрывается металлической крышкой. Лучше всего применять кольцеобразный спай по бортику, охватывающему трубку. Бортик легко запаивается и так же легко снова распаивается, если его окружить изолированной проволокой, которая нагревается током от понижающего трансформатора. Про-текапие припоя не может иметь места. Если крышка остается всегда теплой, то для пайки применяют сплав Вуда; если же крышка охлаждается, то лучше применять индиевооловянный припой.

Необходимо, конечно, следить за тем, чтобы все другие детали, которые ведут к измерительной аппаратуре, не проводили слишком много тепла. Трубки применяют тонкостенные и без швов, из плохо проводящих тепло материалов – нейзильбера или нержавеющей стали. Особенно хороши трубки из хромала, который, однако, как и нержавеющая сталь, поддается только твердой пайке. Можно применять также стеклянные трубки, спаянные с металлическими.

Влияние теплопроводности подводящих проводов можно значительно уменьшить. Для подачи напряжения и проводов, в которых идет ток силой до 10 ма, следует применять манганиновую проволоку толщиной от 0,15 до 0,25 мм. При более сильных токах цримевяют толстую проволоку для соединений, ведущих от деталей, находящихся при комнатной температуре, к медной шайбе, находящейся при температуре жидкого воздуха; такие же проволоки идут от измерительной аппаратуры, находящейся в жидком водороде или жидком гелии, почти до медной шайбы. Только на небольшом расстоянии от нее переходят к тонкой проволоке из возможно более чистой меди длиной от 5 до 10 см. Для ее расчета можно пользоваться следующей формулой



где Vi – V0 – разность потенциалов на проволоке, Ti – верхняя, a Tu – нижняя температура и л/к – отношение коэффициентов теплопроводности и электропроводности.

Токи силой до 200 б подводятся к измерительным приборам, установленным в жидком водороде, а в Институте низких температур Херршингера ток до 50 а подводится к измерительным приборам, установленным в жидком гелии!

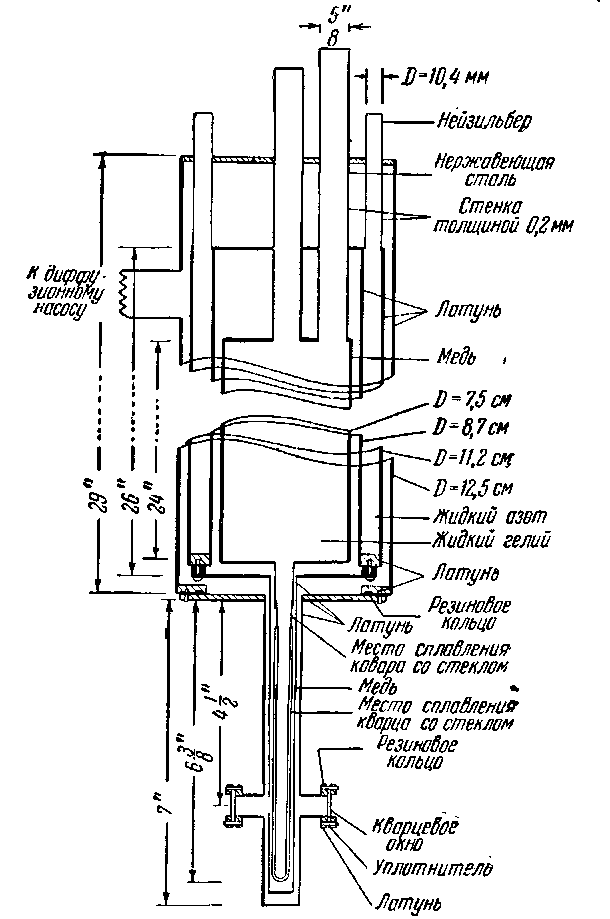
Остаточное сопротивление медного провода, обычно имеющегося в продаже, составляет примерно 2% от сопротивления при комнатной температуре; на рис показан ход кривых л, к и л/к. Если черев провод должен протекать ток /, то сопротив-' ление этого провода должно быть равным



Теплопроводность различных сплавов при низких температурах

На рис. показан специальный сосуд Дьюара, предназначенный для оптических измерений в магнитном поле. Для того чтобы охладить его от комнатной температуры и ввести в него 2,5 л гелия, требуется около 5 л жидкого гелия. В темноте гелий сохраняется в криостате в течение 50 часов. При освещении изучаемого образца сильной вольфрамовой лампой это время может уменьшиться до восьми часов. Вакуум поддерживается маленьким масляным диффузионным насосом со скоростью откачки 100 л/сек. Сосуд с гелием был настолько хорошо изолирован, что насос можно было выключать более чем на 1 час. При этом вентиль между гелиевым сосудом и насосом закрывался. Это позволяет наполнять сосуд непосредственно у ожижителя и переносить его для исследований к магниту. Новые пенопластические материалы обеспечивают превосходную изоляцию тел неправильной формы. Пенообразная масса легко обрабатывается ножом, пилой или пробочным сверлом. Если воспрепятствовать возникновению конвекционных токов, то эта изоляция достаточна даже для жидкого гелия. Плотность пеноматериалов настолько мала, что они плавают в жидком гелии.

Здесь не представляется возможным описать устройство всего оборудования, необходимого для ожижения водорода и гелия. Но некоторые отдельные моменты необходимо отметить.



Специальный сосуд Дьюара для измерений в магнитном поле

В зависимости от упругости паров масла, применяющегося в компрессоре, даже при очень хорошей ловушке для масла некоторое количество масляных паров может проникать во встречные потоки и вымораживаться. Это приводит к двум неприятным последствиям: во-первых, к уменьшению коэффициента теплопередачи, а следовательно, и к. п. д. противотока и, во-вторых, к возможности засорения трубопроводов. Этот недостаток устраняют, прежде всего применяя масла. с низкой упругостью паров. Поэтому во всей установке необходимо применять масло^ обладающее большой вязкостью и низкой упругостью паров; такому требованию удовлетворяют только специальные сорта масел. Далее, первый трубопровод целесообразно сконструировать так, чтобы масло, осаждающееся в нем за время, в течение которого оно еще не успевает перейти в жидкость, собиралось в специальном «кармане», откуда его периодически можно было бы спускать. К. Клузиус предложил устанавливать перед ожижителем сосуд с адсорбирующим углем. Даже при невысокой температуре последний адсорбирует большую часть паров масла.

Водород, служащий для ожижения, должен быть очень чистым; в противном случае соединительные трубки и вентиль быстро будут засорены твердым воздухом. Так как большая часть жидкого водорода при атом процессе утрачивается, то необходимо периодически или приобретать новые порции очень чистого водорода, это, однако, затруднительно, или тщательно очищать обычный водород, имеющийся в продаже. К. Клузиус предложил следующее устройство, позволяющее применять обычный водород: к ожижителю параллельно стандартным трубкам высокого давления проводят систему трубок через такие же противоточники, охладители и т.п.; в эту систему в процессе циркуляции ожижаемого водорода дополнительно вводится из стальной бомбы некоторое количество водорода. В конечном счете эта часть проходит через конденсатор, который охлаждается водородом, поступающим из расширительного вентиля, соединяется с этим водородом и течет обратно в сторону низкого давления. В этом случае небольшое количество чистого водорода требуется только при пуске установки.

В Институте Херршингера спроектирована установка, которая позволяет увеличивать примерно на 30% производительность небольшого аппарата для ожижения воздуха: большая часть воздуха в аппарате не ожижается, а снова подводится противотоком к компрессору, так что последний при стационарной работе засасывает из атмосферы только ожижаемую долю воздуха. Компрессор может засасывать воздух не из атмосферы, а из резервуара, находящегося под давлением; если воспользоваться небольшим компрессором, то в этих 9,6% воздуха можно создать избыточное давление до 0,3 атм; в этом случае общая производительность компрессора, а следовательно, и ожижаемая часть увеличиваются в отношении 1:1,3.

В) Измерение низких температур

Для измерения температур до – 200° G пригоден пентановый термометр. Чтобы жидкость в его трубке не загустела, в исследуемую среду следует сначала погружать только шарик термометра, а затем уже и трубку. До температуры жидкого воздуха можно пользоваться термопарами. Вместо медно-константановой термопары лучше взять манганино-константановую, так как большая теплопроводность меди может привести к неточности измерений. Проволоку предварительно испытывают на однородность. Для этого берут кусок проволоки, протягивают его через жидкий воздух и с помощью гальванометра наблюдают появляющуюся на ее концах термоэлектродвижущую силу. Для интервалов температур между жидким воздухом и жидким водородом и между жидким водородом и жидким гелием применяется газовый термометр постоянного объема. Ha рис. показан схематически простой газовый термометр постоянного объема. Резервуар термометра T с помощью капилляра К соединяется с манометром М, имеющим шкалу давлений от 0 до 1 атм. Термометр наполняется при комнатной температуре водородом или гелием под давлением 1 атм и легко может быть проградуирован в -°К.

Американские угольные сопротивления, применяемые в качестве указателей уровня жидкости, могут прекрасно служить и в качестве термометров. В этом случае, однако, надо обращать внимание на то, чтобы количество джоулева тепла, выделяющееся в процессе измерения, было очень малым. Как было указано выше, удаляют бакелитовый изолирующий слой сопротивлении и их вклеивают при помощи лака в медную трубочку. Они не должны непосредственно соприкасаться с гелием, так как адсорбируют его и при этом меняется характеристика сопротивления.

Термометр градуируют путем сравнения с показаниями газовых термометров.

Очень точные измерения температур можно произвести с помощью термометра, в котором температура намеряется по давлению пара. Для большинства случаев вполне удовлетворительной оказывается простая конструкция, схематически изображенная на рис. Резервуар термометра T соединяется с одним коленом ртутного манометра Q, другое колено которого по желанию остается открытым или закрывается после того, как из него откачают воздух. Вследствие малого объема этого колена даже незначительное количество воздуха, проникающего в него или остающегося в нем после откачки, может привести к появлению больших ошибок в измерениях, поэтому здесь необходимо применять очень надежный кран с наклонно расположенными отверстиями и полой пробкой. Сосуд V необходим для того, чтобы при охлаждении имелся достаточный запас пара, так как в резервуаре термометра также происходит небольшая конденсация. Величину объема V подсчитывают в зависимости от газа в термометре и измеряемой температуры. Вследствие большого наружного объема показания термометра несколько вялы, так как в нем должны конденсироваться или испаряться большие количества пара. Если этот дефект желательно устранить, то для манометра и подводящей трубки можно применить капилляры, которые, однако, при низких температурах необходимо наполнять, а перед нагреванием вновь откачивать. Если хотят облегчить труд по наполнению отмеренным количеством пара, то последний необходимо впускать медленно. Термометр считается достаточно наполненным, если давление в нем сохраняется неизменным после двукратного дополнительного введения небольшого количества пара.

В случае применения закрытых криостатов для самых низких температур можно при медленной откачке определять температуру по упругости пара над жидкостью, так как задержка кипения едва ли здесь будет происходить. Вместе с тем, если теплый газ сжимается, то температура в нижней части сосуда Дьюара, несмотря на хорошее перемешивание, может оказаться на несколько градусов ниже, чем температура на поверхности; в связи с этим при необходимости повысить температуру лучше это делать с помощью маленькой нагревательной спирали, располагая ее в самой нижней части сосуда Дьюара. При работах с жидким воздухом необходимо помнить, что вследствие изменения его состава нет однозначной зависимости между давлением пара и температурой. По этой причине необходимо применять закрытые кислородные термометры.

Г) Сосуды Дьюара, сифоны и вентили с вакуумной рубашкой

Лучшими сосудами для жидкого воздуха могут служить термосы из закаленного стекла, имеющиеся в любом хозяйственном магазине. Большие сосуды для транспортировки жидких газов изготовляются из металла. По желанию их можно изнутри посеребрить, благодаря чему потери на испарение значительно уменьшаются.

Сосуды для транспортировки гелия изготовляются совершен но так же, как дьюаровские сосуды для магнитных исследований. Только тонкостенная трубка на верхнем конце делается существенно длиннее. Благодаря этому улетучивающийся гелий препятствует притоку тепла через стенки трубки. В сосуде емкостью 15 л за сутки испаряется около 0,25 л жидкого гелия!

Весьма желательно точно знать уровни жидкости до и после выливания части жидкого гелия. Этой цели служит тонкостенная трубка диаметром 1 мм из нейзильбера, имеющая раструб па конце, закрытый резиновой мембраной. Если трубка находится в газе, то очень легко возникают низкочастотные акустические колебания, наличие которых легко ощутить непосредственно пальцами. Если эту трубку медленно опускать вертикально, то колебания прекращаются в момент соприкосновения трубки с поверхностью жидкости. Этот способ позволяет легко определить уровень жидкости с точностью ±1 мм. Метод применим и к жидкому водороду, но неприменим к жидкому воздуху.

Небольшое давление, необходимое для переливания сифоном жидкого гелия, лучше всего получить легким нажатием рукой на небольшую грушу.

Д) Автоматическая регулировка температуры

Температура в криостатах поддерживается постоянной с помощью регулировки тока через сопротивление, находящееся на дне сосуда. В настоящее время регулирование тока почти во всех случаях осуществляется автоматически. Радиотехническое угольное сопротивление в жидком гелии включается в одно из плеч мостика Уитстона, питаемого переменным током. Выходное напряжение мостика усиливается, выпрямляется фазовым детектором и подводится к небольшому усилителю мощности, а от него – к нагревателю. Мостик регулируется так, что при достижении желаемой температуры на его выходе возникает маленький сигнал нужной фазы, вызывающий соответствующий ток в цепи нагрева. Вентиль, ведущий к насосу, устанавливается таким образом, что в нагревателе развивается необходимая мощность. При уменьшении температуры мощность нагревателя растет, при увеличении температуры мощность нагревателя падает. Если температура увеличивается настолько сильно, что сигнал на выходе моста имеет обратную фазу, то фазовый детектор препятствует прохождению этого сигнала к усилителю мощности. Обеспечение в течение часа постоянства температуры гелиевой ванны с точностью 0,001° К не вызывает трудностей. Вместо угольных сопротивлений можно применять также полупроводниковые. При более высоких температурах жидкого азота применяют термисторы.