

Лабораторная работа №531.

Высокотемпературная сверхпроводимость (ВТСП)

Открытие явления сверхпроводимости

Сверхпроводимость была открыта в 1911 году, когда Камерлинг-Оннес обнаружил что электрическое сопротивление ртути падает до нуля при температуре жидкого гелия. Температура перехода в сверхпроводящее состояние зависит от материала. Спустя 75 лет температуры сверхпроводящих переходов для известных веществ находились в диапазоне 10-20К. [1]¹

Высокотемпературная сверхпроводимость открыта в Цюрихе Беднорцем и Мюлером в 1986 году. Они обнаружили резкое падение удельного сопротивления в соединениях LaBaCuO при температурах порядка 30К [2]. Позднее, путем оптимизации состава этих соединений критическая температура перехода в сверхпроводящее состояние T_c была повышена до 37К, а при давлении – и до 50К, а высокотемпературные сверхпроводники получили аббревиатуру ВТСП. В 1987 году в Америке, Японии и Китае почти

одновременно были синтезированы ВТСП соединения YBaCuO_c $T_c \cong 90\text{К}$ [2, 3]. В 1993

году в Московском университете и в Цюрихе были синтезированы соединения HgBaCaCuO с критической температурой 135К [4, 5]. Это к настоящему времени рекордно высокое значение T_c для веществ в обычных условиях. Но это не предел. Так, под высоким гидростатическим давлением критическая температура соединений HgBa₂Ca₂Cu₃O_{8+ δ} может быть повышена до 165К [6,7]. Комнатнотемпературная сверхпроводимость (КТС), по мнению В. Л. Гинзбурга, вполне реальна. Стимулированные открытием Беднорца и Мюллера поиски высокотемпературной сверхпроводимости привели к открытию ряда новых интересных сверхпроводников. Среди них рутаниты Sr₂RuO₄, кобальтаты Na_{0.3}CoO₂(1.3H₂O), диборид магния MgB₂ и др. Повышенное внимание в последнее время привлекает новый класс высокотемпературных железосодержащих сверхпроводников типа SmFeAsO_{1-x}F_x и FeSe [8,9], для которых максимальная к настоящему времени критическая температура составляет 57К, однако это, по-видимому, не предел. Вместе с тем, внимание к слоистым купратам не ослабевает, так как именно у них критическая температура перехода в сверхпроводящее состояние пока наивысшая [10].

В сверхпроводящем состоянии сопротивление образца электрическому току равно нулю не приблизительно, а строго. Поэтому по сверхпроводящей замкнутой цепи ток может сколь угодно долго циркулировать не затухая. Самое длительное существование незатухающего сверхпроводящего тока — около двух лет — было зафиксировано в Англии (этот ток циркулировал бы в кольце и поныне, если бы не перерыв в снабжении лаборатории жидким гелием, вызванный забастовкой транспортных рабочих). Даже спустя два года не было замечено никакого ослабления тока.

Следующим фундаментальным свойством сверхпроводящего состояния, обнаруженным в 1933 году, оказался так называемый эффект Мейснера—Оксенфельда: полное «выталкивание» массивным сверхпроводником магнитного поля из своего объема.

Сверхпроводник является абсолютным диамагнетиком, что делает возможным применение явления левитации – парение сверхпроводника над магнитом, вследствие диамагнитного отталкивания.

Сущность феномена сверхпроводимости оставалась совершенно необъяснимой с точки зрения классической теории металлов, а квантовая теория в то время (после открытия этого явления в 1911 году) лишь начинала создаваться. Была предложена так называемая феноменологическая двухжидкостная модель, в которой принималось сосуществование в сверхпроводящем металле двух сортов электронов: обычных, взаимодействующих с решеткой, и особых, сверхпроводящих, с решеткой по каким-то причинам не взаимодействующих. Это позволило братьям Х. и Ф. Лондонам написать уравнения электродинамики сверхпроводника, описывающие эффект Мейснера—Оксенфельда и некоторые другие свойства, однако микроскопическая природа сверхпроводимости оставалась загадкой.

Открытие в 1938 году П.Л.Капицей явления сверхтекучести — протекания жидкого гелия без какой-либо вязкости через сколь угодно тонкие капилляры при температурах ниже 2,18 К — и последующее объяснение этого явления Л.Д.Ландау породили надежды на скорое понимание феномена сверхпроводимости. Оказалось, что при низких температурах в системе атомов гелия, являющихся квантовыми частицами с целым спином, происходит их накапливание на самом низком энергетическом уровне. Ландау показал, что при этом в энергетическом спектре возбуждений появляется характерная щель, приводящая к возможности сверхтекучего состояния. Это чисто квантовое, однако проявляющееся в макроскопическом масштабе, явление позволило Ландау назвать жидкий гелий «окном в квантовый мир».

Механически перенести ту же идеологию на сверхпроводимость, т.е. трактовать ее как сверхтекучесть электронов в металле, не удалось. Дело в том, что поведение квантовой системы электронов (частиц с полужелтым спином — так называемых фермионов) кардинально отличается от поведения системы атомов гелия (частиц с целым спином — бозонов). Здесь и при нулевой температуре могут возникать возбуждения со сколь угодно малыми энергиями, а, следовательно, не выполняется сформулированный Ландау критерий сверхтекучести. Естественное желание свести задачу к предыдущей наталкивало на мысль создать из двух электронов-фермионов один составной бозон с суммарным целым спином, после чего реализовать для сверхпроводимости схему сверхтекучести по Ландау. Однако этому, очевидно, мешало кулоновское отталкивание между двумя электронами, пусть даже и сильно экранированное в электронейтральном металле.

Прошло еще десять лет, и в 1950 году был открыт так называемый изотопический эффект, который впервые указал на связь явления сверхпроводимости с кристаллической решеткой металла. Стоит выделить публикации английского физика [Герберта Фрелиха](#), который в 1950 году первым указал на существенную роль влияния ионов на электроны в возникновении сверхпроводимости. Из своей идеи ученый смог вывести заключение о том, что критическая температура в семействе [изотопов](#) данного сверхпроводника должна быть обратно пропорциональна квадратному корню массы иона M (молекулярной массы), то есть $T_c \sim M^{-\alpha}$ (значок « \sim » обозначает пропорциональность), где $\alpha = 0,5$. Проще говоря, чем больше молекулярная масса сверхпроводящего вещества, тем меньше его критическая температура. Такая зависимость получила название «изотопический эффект», или «изотоп-эффект». В том же году Эммануэль Максвелл [обнаружил](#) изотопический эффект в [изотопах ртути](#), что явилось веским доказательством правильности гипотезы Фрелиха. Позже изотоп-эффект был открыт и у других сверхпроводников. Чуть позже Х. Фрелих и Дж. Бардин независимо показали, что взаимодействие электронов с колебаниями решетки — фононами — может приводить к притяжению. Это притяжение в принципе может даже эффективно превышать кулоновское отталкивание между электронами, однако не

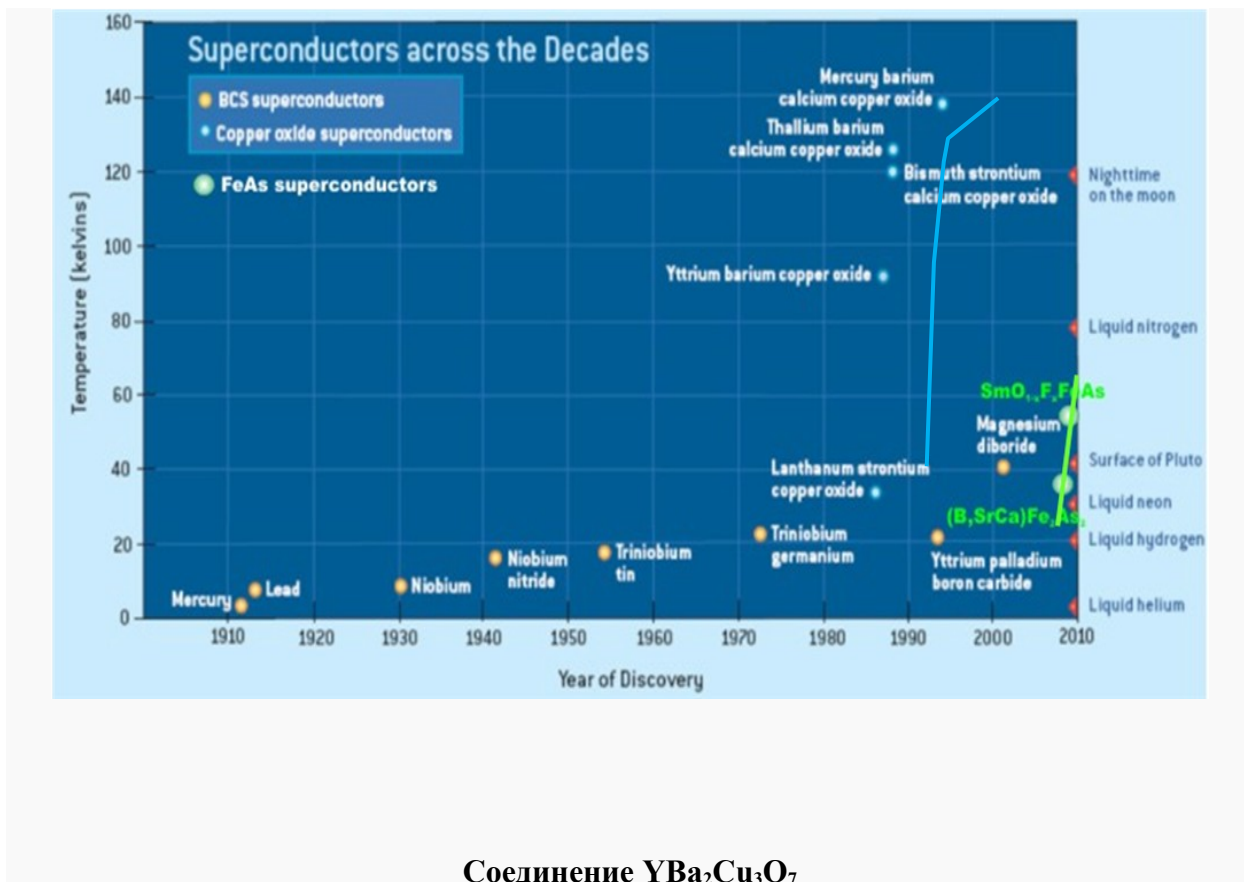
следовало забывать об огромных кинетических энергиях электронов, казалось бы, разрывающих найденную слабую связь. Составные бозоны снова не получились.

В том же 1950 году на основе накопленного экспериментального материала и развития теоретических представлений о физике твердого тела, зиждущихся на применении квантовой механики и статистической физики, В.Л.Гинзбург и Л.Д.Ландау создают новую феноменологическую теорию сверхпроводимости - так называемую теорию Гинзбурга-Ландау. Эта теория оказалась настолько провидческой и успешной, что и сегодня является мощным инструментом исследования сверхпроводимости, несмотря на прошедшие 50 лет и последующее создание микроскопической теории сверхпроводимости.

В 1957 году американскими учеными Дж.Бардином, Л.Купером и Дж.Шриффером собираются воедино упомянутые выше намеки и идеи и формулируется последовательная микроскопическая теория сверхпроводимости. Явление сверхпроводимости действительно оказалось связанным с возникновением в металлах притяжения между электронами. Природа этого притяжения носит сугубо квантовый характер. Большие кинетические энергии электронов, обусловленные особенностями основного состояния квантовой системы фермионов, не помеха: спаривание возникает не между самими электронами, а между низкоэнергетическими возбуждениями в этой системе — квазичастицами. Они имеют тот же заряд, что и электрон, и некоторую эффективную массу, однако в металлической фазе их энергии могут быть сколь угодно малы. Притяжение приводит к перестройке и этого спектра и к «открытию» в нем так необходимой для выполнения критерия сверхтекучести Ландау щели. В качестве нестройной аналогии можно привести пример двух шариков, лежащих на резиновом коврике. Если эти шарики далеки друг от друга, то каждый из них деформирует коврик, образуя вокруг себя лунку. Если же положить сначала один шарик, а затем недалеко от него другой, то их лунки сольются в одну и шарики скатятся вместе на дно общей лунки. Часть квазичастиц (обычно, после введения в теорию, их снова называют электронами) при достаточно низких температурах как бы объединяются в связанные (так называемые куперовские — по имени их первооткрывателя) пары, которые, пребывая в особом, квантовом состоянии, переносят электрический ток без потерь энергии. Размеры таких пар в атомном масштабе весьма велики - они могут достигать сотен и тысяч межатомных расстояний. Таким образом, сверхпроводимость — не что иное, как макроскопическое квантовое явление.

Создание теории сверхпроводимости послужило мощным импульсом ее целенаправленного исследования. Без преувеличения огромный прогресс был достигнут в получении новых сверхпроводящих материалов. Важную роль сыграло тут открытие А.А. Абрикосовым нового класса сверхпроводников (так называемых сверхпроводников второго рода), качественно отличавшихся от уже известных своим весьма необычным поведением в магнитном поле. Если ранее считалось, что магнитное поле не может проникнуть в сверхпроводящую фазу, не разрушив ее (и это действительно верно почти для всех чистых металлов), то Абрикосов теоретически показал, что существует и другая возможность — магнитное поле может проникать при определенных условиях в сверхпроводник в виде вихрей тока (вихрей Абрикосова), сердцевина которых переходит в нормальную фазу, периферия же остается сверхпроводящей! В соответствии с поведением сверхпроводников в магнитном поле их стали делить на сверхпроводники первого рода (старые) и второго (открытые Абрикосовым). Важно, что сверхпроводник можно перевести из первого рода во второй, «испортив» его примесями или другими дефектами.

Сегодня уже получены десятки различных соединений, переходящих в сверхпроводящее состояние при высоких, по сравнению с рекордом 1973 года, температурах. Некоторые из них вы найдете в приведенной здесь таблице 1.



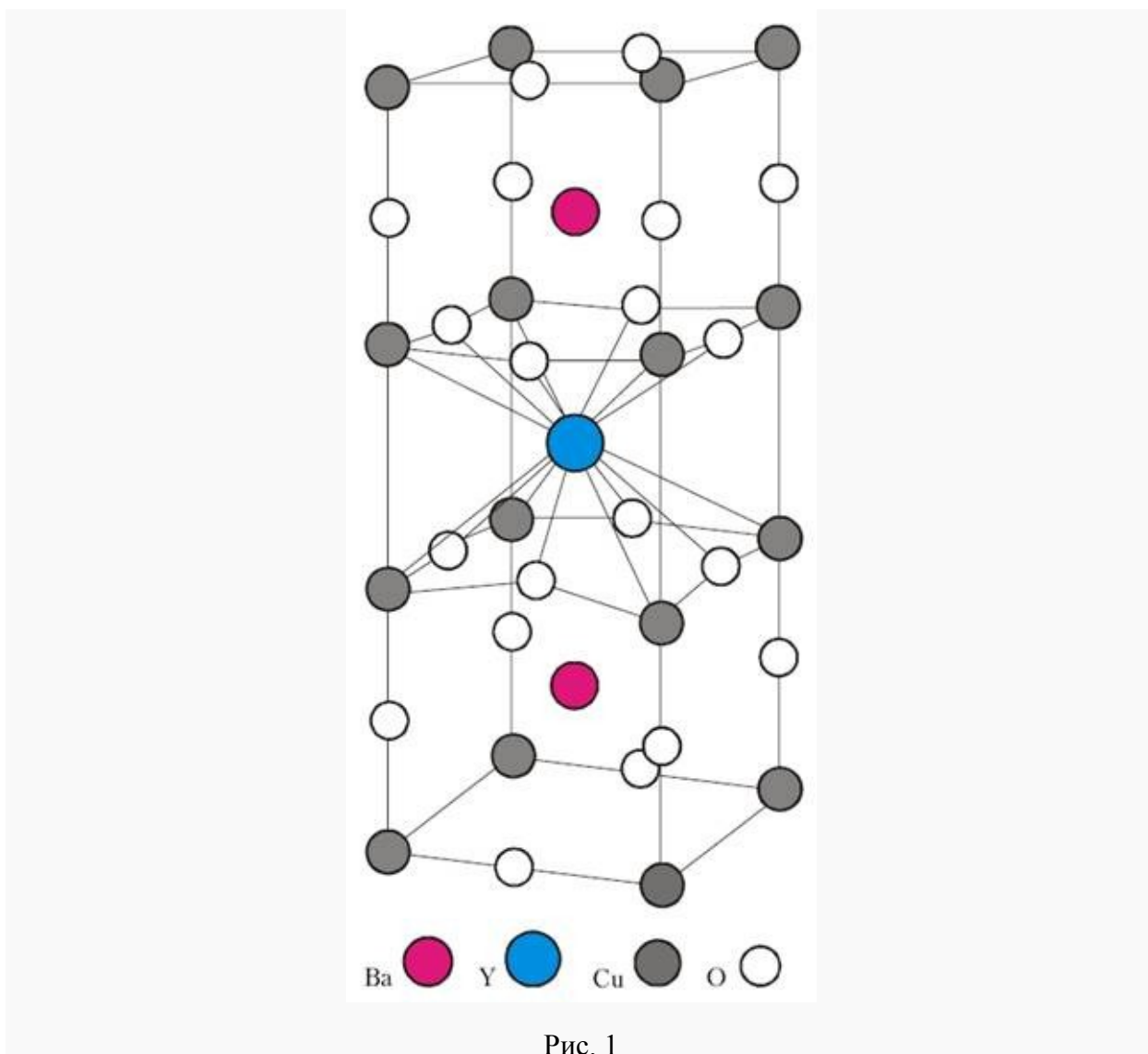
Хотя в понимании свойств высокотемпературных сверхпроводников за последние годы достигнут значительный прогресс, природа самой высокотемпературной сверхпроводимости остается загадкой. Существует по крайней мере двадцать противоречащих друг другу теорий, претендующих на объяснение высокотемпературной сверхпроводимости, в то время как нужна одна, единственно правильная.

Общей характеристикой высокотемпературных сверхпроводников является их слоистая структура. В настоящее время, пожалуй, наиболее изученным высокотемпературным сверхпроводником является соединение $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, его кристаллическая структура приведена на рисунке 1. Как хорошо видно, атомы меди и кислорода выстраиваются в плоскости, перемежаемые другими атомами. В результате проводящие слои чередуются с изолирующими, и движение носителей заряда (которыми, как правило, являются дырки, а не электроны) носит так называемый квазидвумерный характер: носители могут легко перемещаться внутри слоев CuO_2 , в то время как их перескоки на соседние слои происходят сравнительно редко. Куперовские пары также оказываются локализованными именно в этих слоях.

Так, ряд физиков полагают, что куперовские пары в этих сверхпроводниках образуются за счет своего рода магнитного флуктуационного взаимодействия. Указанием на это служит тот факт, что в кристаллах $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ с содержанием кислорода меньше номинального ($x = 1$) критическая температура падает (рис.2; правая кривая), равно как и концентрация свободных электронов. При $x < 0,4$ мы уже имеем дело с диэлектриком, в котором, однако, при достаточно низких температурах наблюдается магнитное упорядочение атомов меди. Магнитные моменты соседних атомов меди оказываются

сориентированными антипараллельно, и результирующая намагниченность кристалла остается равной нулю. Такого рода магнитный порядок хорошо известен в физике магнетизма и называется антиферромагнитным (см. левую кривую на рисунке 2; здесь T_N — так называемая температура Нееля, т.е. температура перехода в антиферромагнитное состояние).

Можно было бы думать, что и в сверхпроводящей фазе атомы меди сохраняют флуктуирующий магнитный момент, который и ответственный в конечном счете за возникновение сверхпроводящего притяжения между электронами. Такого рода механизм связан с особыми свойствами атомов меди, которые могут пребывать в магнитном или немагнитном состояниях в зависимости от их валентности.



Тот факт, что во всех высокотемпературных сверхпроводниках присутствуют слои **Cu–O**, казалось бы, является аргументом в пользу данной теории. Однако, в 2006 году были открыты железосодержащие сверхпроводники на основе FeAs-соединений, например, $\text{SmFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$ с $T_c = 56 \text{ K}$ [11а=[Э. Курмаев](#), [Ю. Изюмов](#) "Высокотемпературные сверхпроводники на основе FeAs-соединений" Издательство: [Регулярная и хаотическая динамика](#) ISBN 978-5-93972-747-1; 2009 г. 312 стр] «Магических» атомов меди там нет, а

в сверхпроводящем соединении типа FeSe ($T_c \sim 40$ K) [11a] нет и кислорода, что делает бесполезной наработанную в сверхпроводящих купратах интуицию. -

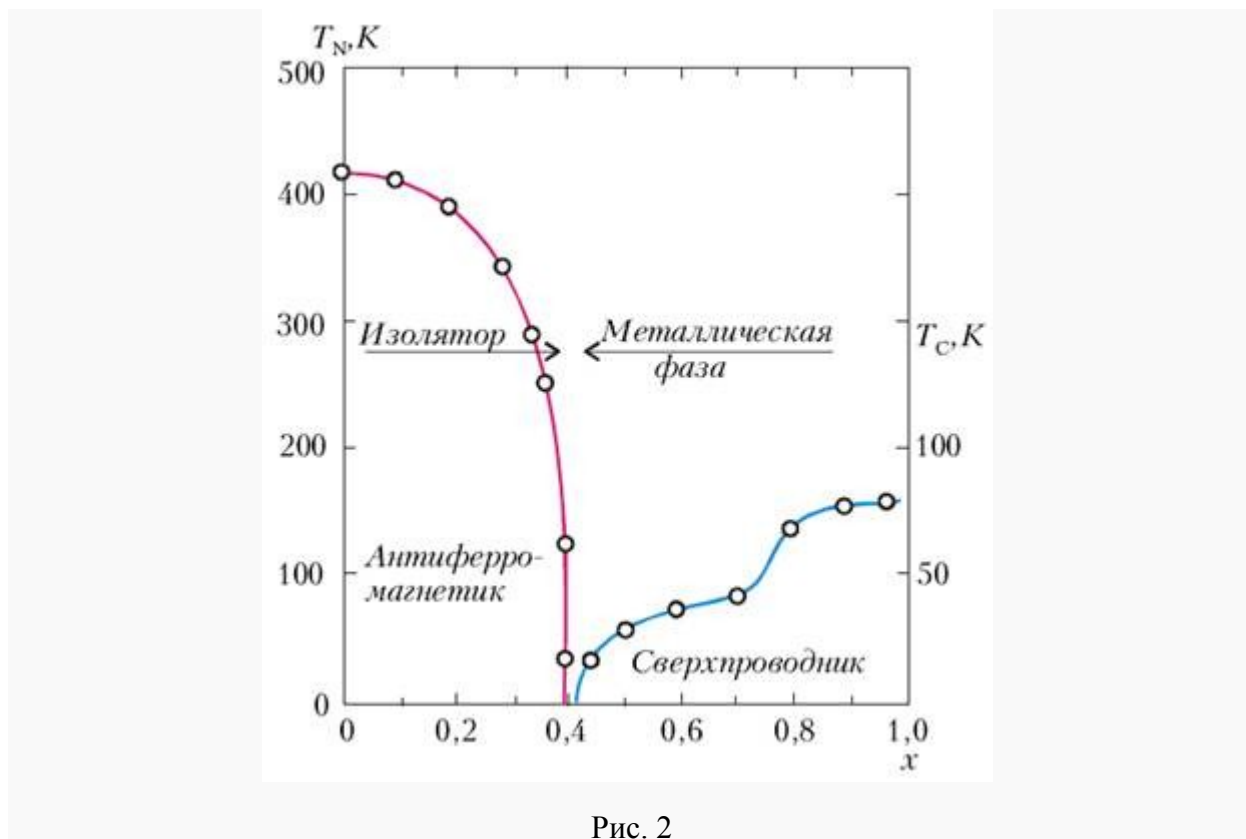


Рис. 2

Квазидвумерный характер электронного спектра высокотемпературных сверхпроводников, по-видимому, является ключевым для понимания микроскопической природы этого замечательного явления, что пока остается делом будущего. Однако уже сегодня создана замечательная по своей красоте феноменологическая теория вихревого состояния высокотемпературных сверхпроводников в магнитном поле, которая оказалась настолько интересной и богатой различного рода эффектами, что, по сути дела, выделилась в самостоятельную область физики — физику «вихревого вещества». И в ней квазидвумерность электронной жизни явилась определяющей. Действительно, ввиду квазидвумерности электронного движения, вихри Абрикосова оказываются как бы набранными из элементарных вихрей, локализованных, вслед за куперовскими парами и самими электронами, в проводящих слоях. При низких температурах эти элементарные вихри, получившие на физическом жаргоне название «блинов», благодаря слабому притяжению между ними выстраиваются в линию, а затем уже эти линии формируют вихревую решетку.

По мере повышения температуры вихревые линии из-за тепловых флуктуации все больше и больше извиваются, и при некоторой температуре вихревая решетка плавится, примерно так же, как обыкновенный кристалл. Таким образом, в высокотемпературном сверхпроводнике с повышением температуры упорядоченную решетку Абрикосова сменяет неупорядоченная фаза «вихревой жидкости», состоящая из хаотически расположенных, извивающихся и перепутывающихся между собой вихревых линий. Интересно, что при дальнейшем повышении температуры (но находясь все еще в сверхпроводящей фазе) вихревые линии могут «испаряться» — распадаться на

элементарные вихри, положения которых в каждом сверхпроводящем слое будут хаотическими и совершенно независимыми от конфигурации вихрей в соседних слоях. Наличие различного рода неоднородностей, неизбежное в реальных кристаллах, еще более усложняет картину переходов между различными вихревыми формами.

Критические параметры и применение ВТСП

Для технических приложений важны следующие три параметра сверхпроводников: критическая температура (T_c), критический ток (J_c), критическое магнитное поле (H_{2c}), а также технологическая простота изготовления гибких проводов.

1) Критическая температура перехода в сверхпроводящее состояние (T_c) должна быть выше температуры сжижения азота (77К). Провода из ВТСП, помещенные в заполненные жидким азотом трубы, могут передавать электроэнергию без потерь. Получение и хранение жидкого азота достаточно дешево и безопасно.

2) Критическое значение тока (J_c) – это максимальное значение тока, которое не разрушает сверхпроводимость. Оно должно быть достаточно большим. На заре исследований по ВТСП использовались керамические образцы, и значение этого параметра было мало (см. таблицу 2), поэтому отношение технологов к купратам было достаточно скептическим. Отношение фирм разработчиков изменилось, после того как они освоили технологию упаковки “слой к слою”, так как значение критического тока резко возросло.

3) Критическое значение поля (H_{2c}) – это максимальное значение магнитного поля, которое не разрушает сверхпроводимость. Купратные сверхпроводники относятся к классу сверхпроводников второго рода. По мере нарастания напряженности магнитного поля оно проникает в толщу сверхпроводника в виде вихрей Абрикосова. Критическое поле образования вихрей – это H_{1c} . Затем, по мере нарастания напряженности, размеры вихрей растут, и при достижении напряженности H_{2c} сверхпроводимость разрушается.

Ясно, что этот параметр тоже должен быть достаточно большим. В первые годы исследований по ВТСП (в 1986-89 годах) критическое поле H_{2c} составляло всего 0.01Т. Как видно из таблицы 1, уже к 1996 году были изготовлены гибкие кабели длиной около 50 метров и более с критическими значениями $J_c \cong 10^6$ А/см и $H_{2c} \cong 6$ Т. Были изготовлены электромоторы с мощностью порядка 200 лошадиных сил. Обзор применений ВТСП к 1995 году приведен в [11]. Технологические применения стали еще более привлекательными, когда было освоено изготовление сверхпроводящих интерференционных устройств (СКВИД) высокой чувствительности, легких электромоторов (легче их аналогов на обычных проводах в 7 раз!), томографов на сверхпроводящих магнитах, динамических синхротронных токоприемников, фильтров для беспроводной связи. Обзор достижений на 2007 год приведен в [12]. С новейшими достижениями в области перспективных технологий с использованием высокотемпературных сверхпроводников можно познакомиться в экспресс-бюллетене “ПерсТ”: <http://perst.issph.kiae.ru> или по адресу: <http://perst,issp.ras.ru>

Большое внимание технологов привлекает новый класс высокотемпературных сверхпроводников типа $\text{SmFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$ [8,9,11a]. Для них наивысшая к настоящему времени T_c составляет 57К, однако в отличие от купратов железосодержащие ВТСП более технологичны. Длины опытных сверхпроводящих кабелей уже достигают километров. Осталось поднять критическую температуру выше 77К.

Таблица 2. Достижения технологов по улучшению критических параметров купратных сверхпроводников

Годы	J_c , А/см	H_{2c} , Т	длина кабеля
1986-1989	10	0.01	-
1990-1993	1000	1	1 метр
2012	2500	-	1500 метров

Отсутствие теоретического объяснения явления высокотемпературной сверхпроводимости, конечно, не останавливает поисков практических применений этих материалов. Основная трудность на этом пути заключается в «плохой технологичности» имеющихся высокотемпературных сверхпроводников: они оказались весьма хрупкими и непригодными для важнейшего технологического процесса обработки металлов — прокатки. Однако уже сейчас ряд компаний поставляют на мировой рынок кабели из высокотемпературных сверхпроводников длиной в несколько километров. Их изготавливают, наполняя трубку из серебра или другого хорошего металла порошком высокотемпературного сверхпроводника, а затем прокатывая и отжигая ее. Сейчас в США и во Франции уже функционирует ряд опытных линий передач электроэнергии по подземному кабелю из высокотемпературного сверхпроводника. Созданы также первые моторы и генераторы на базе высокотемпературных сверхпроводников. Нет сомнения, что сфера применения этих материалов будет расширяться. И можно надеяться на открытие более совершенных высокотемпературных сверхпроводников.

Скажем теперь несколько слов о перспективах. Они поистине фантастичны. На повестку дня ставятся многие из предложенных ранее глобальных проектов — высокотемпературные сверхпроводники делают их рентабельными.

- Так, сейчас в линиях электропередач теряется от 20 до 30 процентов всей вырабатываемой в мире электроэнергии. Применение высокотемпературных сверхпроводников для передачи электроэнергии сможет полностью эти потери исключить.
- Все проекты термоядерного синтеза базируются на использовании гигантских сверхпроводящих магнитов для удержания высокотемпературной плазмы от касания стенок камеры. Для поддержания их в сверхпроводящем состоянии расходуются если не реки, то ручьи жидкого гелия. В недалеком будущем их можно будет перевести на азотное охлаждение.
- Огромные сверхпроводящие катушки смогут служить накопителями электроэнергии, снимающими пиковые нагрузки в потреблении электроэнергии.
- Основанная на применении сверхпроводящих джозефсоновских элементов сверхчувствительная аппаратура для снятия магнито-кардиограмм и магнито-энцефалограмм может прийти во все больницы.
- Будет создано новое поколение сверхмощных компьютеров на сверхпроводниковой элементной базе, охлаждаемых жидким азотом.

- Между городами со скоростью 400 - 500 километров в час помчатся экспрессы на магнитной подушке, создаваемой сверхпроводящими магнитами.

Опишем достижения в последнем направлении:

Японский поезд на магнитной подушке «Маглев» («магнитная левитация») поставил 24 декабря 1997 года мировой рекорд скорости для поездов. Находясь на высоте 10 сантиметров над желобом, выстланным сверхпроводящими магнитами, он развил скорость 550 километров в час. «Маглев» остается экспериментальным поездом, сейчас для опытов строится новый путь длиной 18 километров. С аналогичным магнитным поездом экспериментируют в Германии, но он поднимается над полотном дороги только на два сантиметра. А рекорд скорости среди обычных поездов на колесах держит французский поезд TGV, он уж давно ходит по расписанию через всю Францию, а по тоннелю через Ла-Манш – и в Англию. В 1991 году TGV достиг скорости 515,3 километра в час.

В 2003 году китайцы не только запустили в космос человека, но и создали поезд на магнитной подушке. Шанхайский экспресс развивает скорость 430 км/ч. Двигается всего в полтора сантиметрах над направляющим рельсом, он движется бесшумно. На нем можно преодолеть 30 км от центра Шанхая до международного аэропорта Пудунг за 8 минут. Он разгоняется до скорости 320 км/ч за 2 минуты. Как и японский поезд «Маглев» он использует эффект электромагнитной левитации. Электромагнитные силы удерживают поезд в воздухе и одновременно стабилизируют его в горизонтальном и вертикальном направлениях. Частота, мощность и направление электромагнитного поля в рельсе управляют движением поезда, а левитация поддерживается за счет аккумуляторных внутренних батарей, которые заряжаются во время движения. У поезда не двигателя. Это первый регулярный поезд на магнитной подушке, а не экспериментальная модель. [13]



Рис.3. Шанхайский экспресс

Литература

- Квант. Сверхпроводимость. Буздин А., Варламов А. Страсти по сверхпроводимости в конце тысячелетия //Квант. — 2000. — № 1. — С. 2-8.
<http://www.physbook.ru/index.php/Kvant>.
- Bednorz J.G. and Muller K.A. Possible high Tc superconductivity in Ba-La-Cu-O system // Z. Phys. B-Condensed Matter, 1986, 64, 189-193.
- Плакида Н.М. Высокотемпературные сверхпроводники // Международная программа образования, М., 1996, 288 с.
- Fossheim K., Sudbo A. Superconductivity, Physics and Applications // John Wiley & Sons. Ltd., 2004, 333 pp.
- Putilin S.N., Antipov E.V., Chamaissen O., Maresio M. Superconductivity at 94K in HgBa₂CuO₄+ // Nature, 1993, 362, 226-227.
- Shilling A., Contoni M., Guo J.D., Ott H.R. Superconductivity above 130K in the Hg-Ba-Ca-Cu-O system //Nature, 1993, 363, 56-57.
- Bennemann K.H., Ketterson J.B. Superconductivity: Conventional and Unconventional Superconductors //Springer, 2008, 1, 762 pp.
- Bennemann K.H., Ketterson J.B. Superconductivity: Novel Superconductors // Springer, 2008, 2, 805 pp.
- Изюмов Ю.А., Курмаев Э.З. // УФН, 2008, 178, 1307-1334.
- МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОННОГО СТРОЕНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ, М.В. Еремин Казанский государственный университет Наноструктуры. Математическая физика и моделирование, 2009, том 1, № 2, 59–79
- Lubkin G.V.Applications of High-Temperature Superconductors Approach the Marketplace // Physics Today,1995, 48 (3), 20-23.
- Molozemov A.P., Mannhart J., Scalapino D. High-Temperature Cuprate Superconductors Get to Work //Physics Today, 2005, 58 (4), 41-47.
<http://physics03.narod.ru/Interes/Doclad/poezd1.htm>
-

Практическая часть

Определение температуры перехода в сверхпроводящее состояние для высокотемпературного сверхпроводника

Сверхпроводник, используемый в данной работе $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$.

Экспериментальная установка для изучения свойств высокотемпературного сверхпроводника при температуре жидкого азота.

Техника безопасности

Также как термос может лопнуть, если туда налить горячую воду, так и сосуд Дьюара может взорваться, если он наполнен жидким азотом. По этой причине будьте очень осторожны при работе с жидким азотом. Азот, в большом количестве входящий в состав воздуха, которым мы дышим, не токсичен. Тем не менее, большое количество жидкого азота, находящегося в малом объеме может представлять опасность. Однако, этой опасности можно легко избежать, если обеспечить достаточную вентиляцию и приток свежего воздуха в помещение во время проведения эксперимента. Никогда не помещайте предметы в жидкий азот и не трогайте охлажденные предметы голыми руками. Избегать контакта жидкого азота с кожей. Это может привести к ожогу.

Измерительный модуль

Измерительное устройство, содержащее сверхпроводник, температурный датчик на пластинке, помещается в жидкий азот.

Электрическая схема сверхпроводника и платинового сопротивления приведена на рисунке 1.

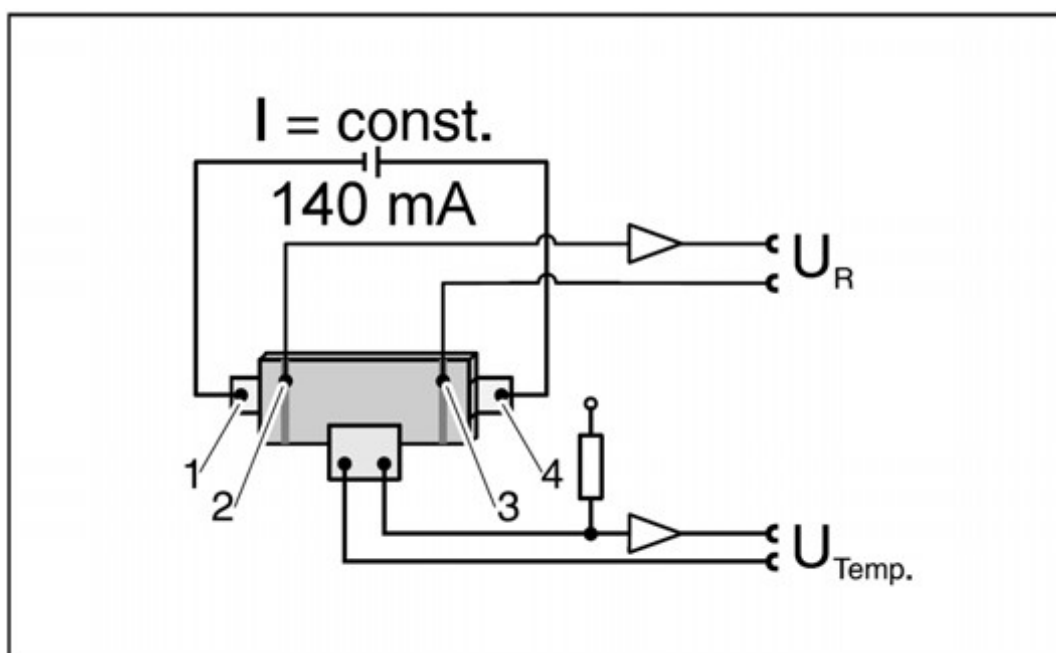


Рис. 1. Электрическая схема измерительного модуля.

Техническое описание измерительного модуля

Высокотемпературный сверхпроводник $YBa_2Cu_3O_7$.

Температурный датчик платина-иридиевое сопротивление, имеющее сопротивление 100 Ом при 0 С

Медные пластинки с точками соединения 1 и 4 для подачи постоянного тока.

Провода, подсоединённые в точках 2 и 3 для измерения напряжения.

Устройство, собирающее данные

На рис. 2 показано устройство, используемое для сбора данных

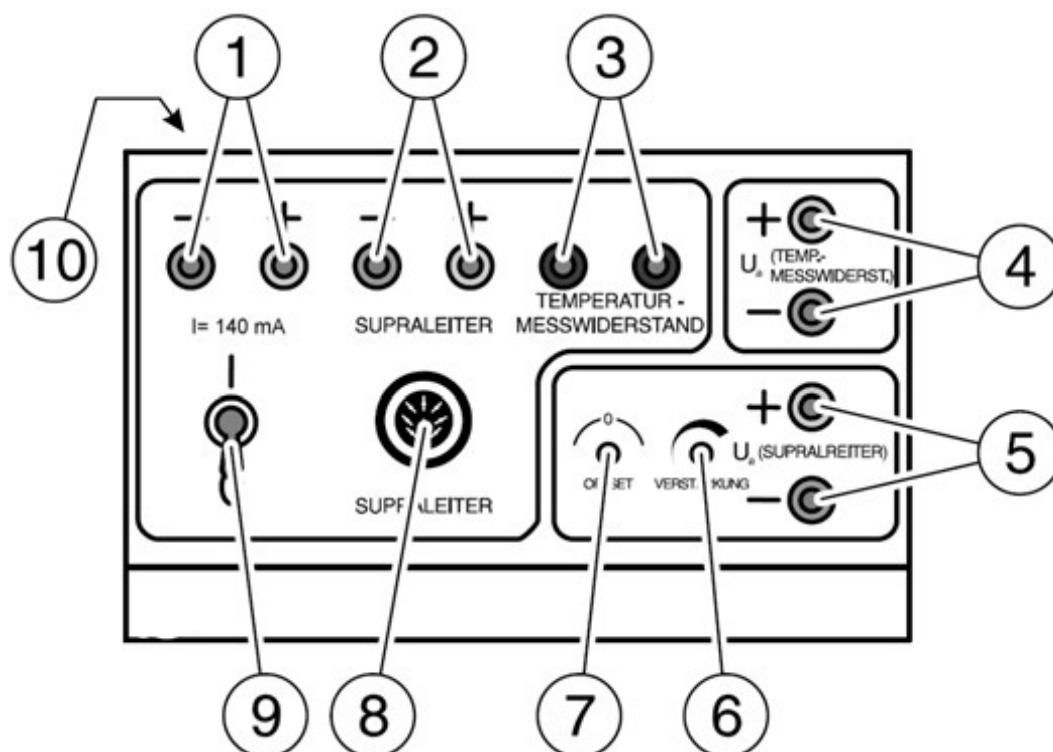


Рис. 2 Измерительное устройство

- 1 Выходные клеммы стабилизатора тока
 - 2 Входные клеммы для измерения напряжения
 - 3 Входные клеммы для датчика температуры
- Разъемы 1-3 используются для подключения не штатных сверхпроводников.
- 4 Выход для измерения температуры
 - 5 Выход для измерения напряжения (U_a)
 - 6 Регулировка усиления
 - 7 Баланс
 - 8 Подключение штатного измерительного модуля
 - 9 Кнопка включения-выключения

10 Разъем для подключения измерительного устройства к сети

Емкость для жидкого азота

Пластиковая коробка из плотного полиуретана используется как сосуд для жидкого азота.

Выполнение эксперимента

Эксперимент проводится с использованием персонального компьютера и программы CASSY-LAB.

1. Принести жидкий азот в сосуде Дьюара из криогенного корпуса КФУ (двор главного здания) если его нет в лаборатории.
2. Подключите измерительный модуль в гнездо 8
3. Подключите устройство, собирающее данные, в сеть через блок питания (гнездо 10)
4. Подключить устройство к интерфейсу CASSY: выход 4 “Messwiderstand” (температурный датчик) подключить к выходу A, подключить к U (не к I). Выход 5 “supraleiter” (сверхпроводник) подключить В.
5. Положить измерительный модуль в полиуретановый блок в углубление.
6. Запустить программу CASSYLab, активировать входы A и B нажатием на них, выбрать диапазон $-0.3V$ $0.3V$ ”Averaged values”. Установить измерительный интервал 200 ms.
7. Создать “new quantity”, и задать формулой напряжение “ $-UA1*1000$ ” и шкалу температур от -200 до 30 °C.
8. Создать “new display”, с температурой по оси x и напряжением UB1 по оси y как на рисунке 3.
9. Начать запись данных эксперимента (F9)
10. Заполнить полиуретановый блок жидким азотом до уровня, когда алюминиевый корпус будет полностью закрыт жидким азотом. В течение

эксперимента сохранять уровень жидкого азота неизменным и добавлять азот по мере необходимости.

11. Когда падение напряжения достигнет 0 (примерно при температуре -180°C , см. Рис. 3), закончить эксперимент.
12. Записать на компьютер полученные графики и значения. Остатки жидкого азота вылить обратно в сосуд Дьюара.
13. Определить по полученным графикам температуру перехода сверхпроводника в сверхпроводящее состояние.

Экспериментальные результаты

Рис. 3 показывает падение напряжения как функцию температуры. Когда температура перехода достигнута, электрическое сопротивление падает, поэтому напряжение резко падает до 0.

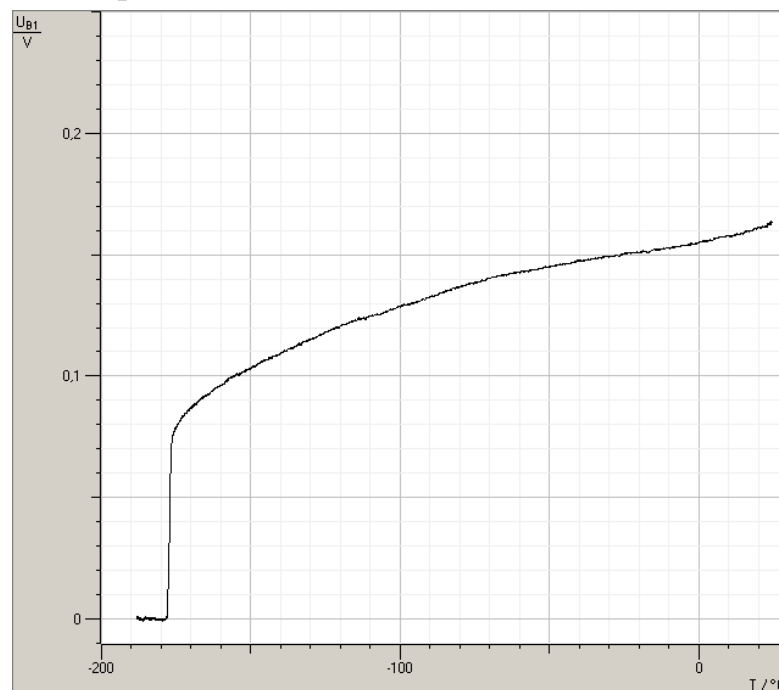


Fig. 3: Электрическое напряжение как функция температуры.

Рис. 4 показывает зависимость температуры и напряжения от времени, при $t=0$ измерительный модуль помещается в жидкий азот. По истечении приблизительно 600 секунд (10 минут) сверхпроводник охлажден достаточно для перехода в сверхпроводящее состояние.

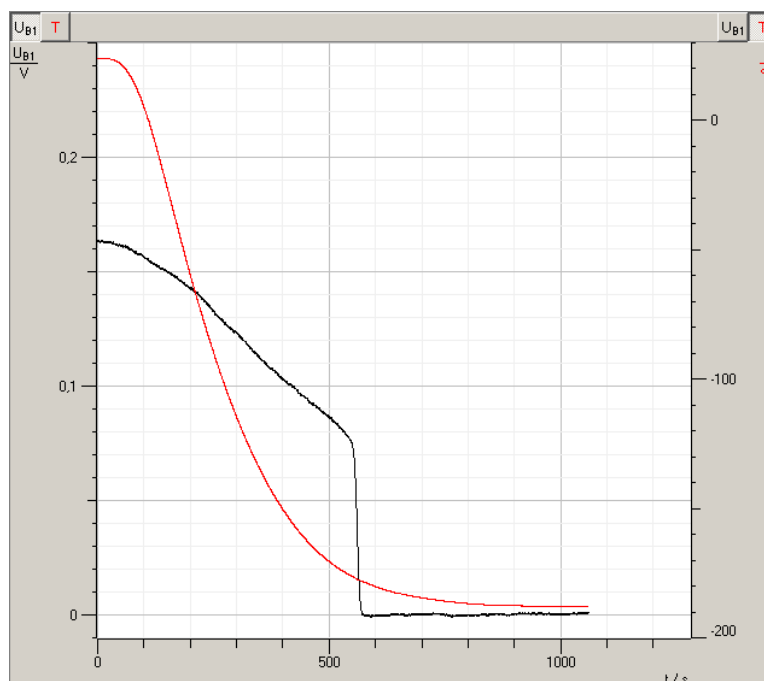


Рис 4: Температура и напряжение в зависимости от времени.

Хранение жидкого азота

Сосуд Дьюара — сосуд, предназначенный для длительного хранения веществ при повышенной или пониженной температуре. Перед помещением в сосуд Дьюара вещество необходимо нагреть или охладить. Постоянная температура поддерживается пассивными методами, за счет хорошей теплоизоляции и/или процессов в хранимом веществе (например, кипение). В этом основное отличие сосуда Дьюара от термостатов, криостатов.

Современные конструкции

Современные сосуды Дьюара (дьюары) конструктивно выполнены следующим образом: внутренний и внешний сосуды делают из алюминия или нержавеющей стали. Теплопроводность материала не важна, а прочность и вес играют большую роль. Горловина соединяет внутренний и внешний сосуды. В дьюарах объемом до 50 л внутренний сосуд крепится только на горловине, и она испытывает большие механические нагрузки. Также к ней предъявляются высокие требования по теплопроводности. То есть горловина должна быть прочной, но тонкой. В обычных сосудах горловину делают из

нержавеющей стали. В высококачественных сосудах Дьюара горловина изготавливается из прочного армированного пластика. При этом возникает проблема вакуумноплотного крепления металла и пластика. Снаружи внутренний сосуд покрывается адсорбентом, который при охлаждении поглощает остаточные газы из вакуумной полости. Для уменьшения теплопотерь внутренний сосуд покрывают дополнительной теплоизоляцией. К крышке дьюара, для снижения конвекционной теплопередачи прикрепляют пенопластовый цилиндр, который негерметично закрывает горловину. Вакуумную полость откачивают до давления примерно 10^{-2} Па. Внутренние поверхности полируют для уменьшения теплопотерь на излучение.

Современные сосуды Дьюара имеют низкие потери от испарения: от 1,5 % в сутки для больших емкостей, до 5 % в сутки — для малых объемов.

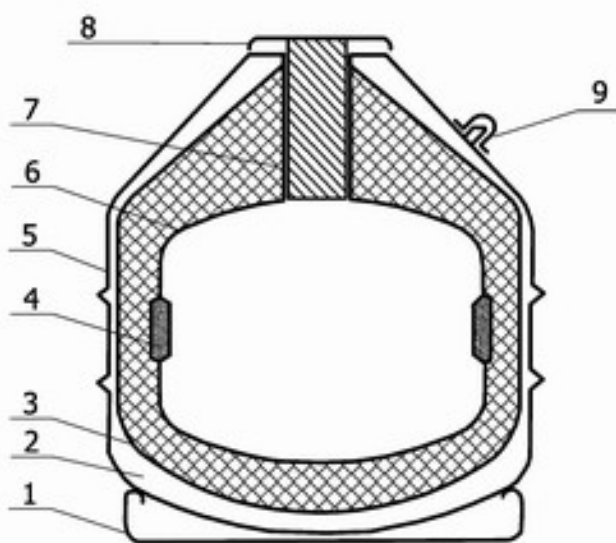


Рис.5 Схема сосуда Дьюара

1— подставка; 2— вакуумированная полость; 3— теплоизоляция; 4— адсорбент; 5— наружный сосуд; 6— внутренний сосуд; 7— горловина; 8— крышка; 9— трубка для вакуумирования