

## Основные этапы развития сверхпроводимости

АЛИЕВСКИЙ Б.Л.

*Открытое 100 лет назад явление сверхпроводимости прошло в своем развитии ряд этапов, основные из которых отмечены в 2011 г. юбилейными датами – это 50-летие прикладной (технической) сверхпроводимости и 25-летие высокотемпературной сверхпроводимости. Дан краткий исторический обзор исследований этого уникального физического явления.*

**Ключевые слова:** *сверхпроводимость, первооткрыватели, обзор исследований*

Сверхпроводимость – замечательное физическое свойство многих металлов, некоторых сплавов и интерметаллических соединений, а также керамических материалов. К настоящему времени сверхпроводимость нашла применение в электрофизике, электротехнике, электроэнергетике, электромеханике, электронике, метрологии и ряде других отраслей техники и научных исследований. Сверхпроводимость имеет широкие перспективы дальнейшего развития, её научных и прикладных аспектов. Как недавно отметил профессор Е.Ю. Клименко [5, 6], в 2011 г. отмечается тройной юбилей сверхпроводимости.

**Открытие физического явления сверхпроводимости.** Явление открыто в 1911 г. голландским ученым Гейке Камерлингом-Оннесом (1853–1926), руководителем кафедры экспериментальной физики Лейденского университета [1]. Учёный развивал исследования в области низкотемпературного эксперимента [2]. Оборудование его лаборатории позволяло изучать в широком диапазоне криогенных температур все известные к началу XX в. ожиженные газы: кислород при  $T=90$  К (впервые получен Кальете и Пикте в 1877 г.); азот при  $T=77$  К (получен Врублевским и Ольшанским в 1883 г.); неон при  $T=27$  К; водород при  $T=20,4$  К (получен Дьюаром в 1898 г.). Наконец, 10 июля 1908 г. Камерлинг-Оннес впервые в мире осуществил ожижение гелия при  $T=4,2$  К, а к началу 1911 г. смог получить температуру гелия около 1 К.

В это время ученый исследовал электрическое сопротивление различных металлов при криогенных температурах. Наибольший эффект удалось получить у ртути: благодаря низкой точке плавления ( $-39$  °С) её удавалось посредством нескольких

*Superconductivity, a phenomenon that was discovered 100 years ago, has passed several stages in its development. Fifty years of applied (engineering) superconductivity and 25 years of high-temperature superconductivity are the main stages, which were celebrated in 2011. A brief historical review of investigations of this unique physical phenomenon is given.*

**Key words:** *superconductivity, discoverers, review of investigations*

циклов испарения и последующей конденсации почти полностью очищать от примесей. В процессе исследований Камерлинг-Оннес отметил резкое уменьшение сопротивления ртути вблизи точки 4,2 К, причем дальнейшее снижение температуры на узком интервале примерно 0,02 К приводило к практически полному исчезновению электрического сопротивления.

В апреле 1911 г. на заседании Нидерландской академии наук Камерлинг-Оннес сообщил о результатах эксперимента. Открытие произвело сенсацию в научных кругах. В 1913 г. Камерлингу-Оннесу была присуждена Нобелевская премия по физике за исследование свойств веществ при низких температурах и получение жидкого гелия. Обнаруженное впервые для ртути физическое явление обращения электрического сопротивления в нуль получило название сверхпроводимости.

В 1914 г. Камерлинг-Оннес экспериментально установил существование длительно не затухающего электрического тока в короткозамкнутой сверхпроводящей цепи, размещенной в криостате с жидким гелием. За последующие годы были найдены критические значения параметров (температуры  $T_k$ , магнитной индукции  $B_k$ , плотности транспортного тока  $J_k$ ), при превышении которых сверхпроводимость исчезала, материал переходил в нормальное состояние.

Область существования сверхпроводящей фазы в трехмерном пространстве иллюстрируется объемом, ограниченным координатными плоскостями и криволинейной поверхностью, отсекающей на осях координат отрезки  $T_k$ ,  $B_k$ ,  $J_k$ . В течение нескольких десятилетий были известны только такие металлы – идеальные сверхпроводники 1-го рода, у

которых значения  $B_k$ ,  $J_k$  оставались неприемлемо низкими для каких-либо технических приложений. Выяснилось, что наряду с нулевым сопротивлением сверхпроводники 1-го рода характеризуются ещё одним фундаментальным свойством – идеальным диамагнетизмом [3–5]. Согласно эффекту Мейсснера–Оксенфельда (открыт в 1933 г.) при  $B < B_k$  магнитное поле не проникает в сверхпроводник ( $T < T_k$ ) вследствие действия поверхностных экранирующих токов.

**50-летие технической (прикладной) сверхпроводимости.** Повышение критических параметров  $B_k$ ,  $J_k$  началось с момента открытия сверхпроводников 2-го рода в 1957 г. К ним относятся неидеальные сверхпроводящие материалы – сплавы и интерметаллические соединения, в которых могут чередоваться локальные зоны с мейсснеровской фазой и фазой проникновения магнитного поля. В 1961 г. Дж. Кунцлер (США) предложил способ изготовления сверхпроводящих проволок из интерметаллида  $Nb_3Sn$  (станнид ниобия) с высокими критическими параметрами. Из смеси порошков ниобия и олова, размещенной в ниобиевой трубке [4], методом протяжки получали круглый провод заданного диаметра для намотки соленоида. Интерметаллическое соединение образовывалось в процессе отжига соленоида при температуре порядка 1000 °С. В соленоиде было получено магнитное поле с индукцией 6 Тл. Впоследствии технология проводов  $Nb_3Sn$  была усовершенствована, неизменным оставался только металлургический принцип изготовления.

Появились проволоки из сверхпроводящих сплавов ниобия с цирконием ( $Nb-Zr$ ) или с титаном ( $Nb-Ti$ ), обладающие хорошими пластическими качествами, что позволило выполнять отжиг до операции намотки соленоидов. В итоге освоение производства длинномерных проводов и их применение в качестве обмоточных изделий и кабельных конструкций привело к появлению новой промышленной отрасли – технической сверхпроводимости, развитие которой началось в 1961 г.

Современные провода имеют композитную структуру для обеспечения требуемых электродинамических свойств. Многожильные сверхпроводящие скрутки дискретно встроены в стабилизирующую матрицу из меди или бронзы. Отечественной промышленностью выпущены по металлургической технологии композитные провода на основе сплава  $Nb-50\% Ti$  марки ПНТ диаметром 0,5–1 мм и марки НТ-50 прямоугольного сечения от 2 мм×2 мм до 5 мм×2 мм. Созданы композитные провода на основе соединения  $Nb_3Sn$  марки ПНО круглого сечения диаметром 1 мм и в виде шин прямоугольного сечения от 0,16 мм×1,93 мм до 30 мм×3 мм, а

также провода на основе ванадиево-галлиевого соединения  $V_3Ga$  марки ПВГ диаметром от 0,23 мм до 0,47 мм.

В СССР в 1970–80-х годах на базе указанных проводов разработаны и созданы многочисленные образцы сверхпроводящей электрофизической аппаратуры от соленоидов до магнитных систем токамаков, сверхпроводящие обмотки возбуждения синхронных электрических машин и машин постоянного тока разноименнополюсных и униполярных [1, 8–10], МГД-генераторов [7]. В качестве отдельных примеров применения сверхпроводимости в электромеханике можно назвать экспериментальный синхронный компенсатор мощностью 20 МВ·А, пущенный в опытную эксплуатацию в Ленэнерго (ВНИИЭлектромаш); двигатель постоянного тока мощностью 10 МВт (Электротяжмаш, г. Харьков); униполярный генератор постоянного тока мощностью 480 кВт с жидкометаллическим натриево-калиевым токосъёмом (МАИ). Ряд электрических машин переменного и постоянного тока на сверхпроводниках построен за рубежом [5, 8, 10]. Техническая сверхпроводимость в мире к середине 1980-х годов достигла высокого уровня, который характеризуется параметрами крупномасштабных разработок многих видов электротехнического оборудования [7–10].

Параллельно с экспериментальными развивались теоретические исследования сверхпроводимости. С позиций макроскопического описания явления сверхпроводимости разработана теория Ф. Лондона и Г. Лондона; создана более универсальная теория ГЛАГ (Гинзбург – Ландау – Абрикосов – Горьков). На основе микроскопического подхода Бардиным, Купером и Шриффером опубликована теория БКШ (1957 г.), известна также теория Н.Н. Боголюбова с сотрудниками. Создатели теории БКШ в 1972 г. удостоены Нобелевской премии по физике.

Наиболее весомый вклад в развитие низкотемпературной сверхпроводимости в СССР внесли научно-исследовательские организации ИАЭ им. Курчатова, ИВТАН, ВНИИЭлектромаш, ВНИИЭМ, ВНИИКП, НИИНМ им. Бочвара, ВЭИ, ЭНИН, НИИЭФА им. Ефремова, РТИ, ФИАН, НИИГелиймаш и др., а также электротехнические предприятия «Электросила», ХЭМЗ, Электротяжмаш, опытный завод ВНИИЭМ и др. Работы выполнялись в соответствии с координационными планами ГКНТ и АН СССР [1]. Непосредственное руководство работами осуществлялось академиками И.А. Глебовым, Н.Н. Шереметьевским, чл.-корр. АН Н.А. Черноплёковым, академиком АН УССР Б.И. Веркиным и др.

**25-летие высокотемпературной сверхпроводимости.** Рассмотренные выше сверхпроводящие материалы имеют критическую температуру в гелиевом диапазоне 4,2–18 К.

Известны немногие соединения, полученные в виде кристаллических образцов или коротких отрезков провода, которые переходят в сверхпроводящее состояние при температуре жидкого или кипящего водорода при нормальном атмосферном давлении, например  $Nb_3AlGe$ ,  $Nb_3Ge$  и  $Nb_2Si$ . Усилия исследователей были направлены на поиски материалов с повышенной критической температурой, поскольку внешний или внутренний теплоприток мощностью 1 Вт в гелиевый бак с температурой 5–6 К требует для компенсации испаряющегося гелия затрат мощности на валу компрессора холодильной установки около 0,7 кВт. Затруднения в эксплуатации криостатированных магнитных систем определяются малой теплотой испарения гелия  $R \approx 20$  кДж/кг при температуре 4,3 К, а также его повышенной текучестью, что усложняет конструкцию криостатов.

Американский физик У. Литтл на основании расчетов согласно теории БКШ указал в 1964 г. на возможность существования сверхпроводимости при повышенных температурах у некоторых материалов типа металлоорганических соединений, которые могут быть синтезированы на базе цепей крупных молекул дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК). Одновременно в СССР В.Л. Гинзбург и Д.А. Киржницем была предложена двухмерная модель для сверхпроводящей поверхности вещества, отличающаяся от одномерной цепной модели У. Литтла. Далее В.Л. Гинзбург теоретически обосновал структуру высокотемпературного сверхпроводящего материала, которая представлялась в виде чередующихся слоев диэлектрика и металлической пленки. Подобные материалы до настоящего времени не реализованы.

В 1986 г. сотрудники Швейцарского отделения фирмы IBM Д. Беднорц и К. Мюллер (г. Цюрих) сообщили о существовании сверхпроводящего перехода в керамическом соединении оксидов лантана, бария и меди при температуре кипящего водорода или неона  $T \approx 30$  К. Это открытие ввиду большой перспективности было удостоено Нобелевской премии по физике за 1987 г. К настоящему времени в различных странах (России, США, Англии, КНР, Японии и др.) исследованы физико-химические свойства целой группы металлооксидных керамик [10, 11], обладающих свойством сверхпроводимости при температурах  $T \leq 125$  К, включая диапазоны жидкого и кипящего азота и природного газа. Такие материалы проявляют свойства сверхпроводников 2-го рода. Они получили название

высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП), которые изучаются с 1986 г.; ведутся разработки сверхпроводящих проволок и шин для обмоточных изделий и кабелей на основе ВТСП.

Наиболее распространенным технологическим методом производства ВТСП керамик служит спекание измельченной смеси порошков оксидов различных металлов на воздухе при  $T > 1000$  К. Керамика в виде кристаллов встраивается в стабилизирующую матрицу из серебра, провода изготавливают металлургическим способом протяжки.

При азотных температурах провода имеют критические параметры  $B_k$ ,  $J_k$ , которые существенно меньше, чем у низкотемпературных сверхпроводников (НТСП), однако при водородных температурах параметры ВТСП  $B_k$ ,  $J_k$  значительно повышаются и становятся сравнимы с таковыми для НТСП. Из-за сложности технологии современные ВТСП провода достаточно дороги, поэтому экономическая целесообразность их технического применения требует соответствующих обоснований.

В последние полтора десятилетия получило развитие прикладное направление применения массивных (объемных) ВТСП в электромеханике и транспортных устройствах магнитного подвеса [12, 13]. Созданы синхронные электродвигатели (гистерезисные, реактивные, с возбуждением от постоянных магнитов) погружного исполнения с охлаждением жидким азотом в диапазоне мощностей 0,1–100 кВт. Разработчиком является Московский авиационный институт, который сотрудничает с НИИ электромеханики (г. Истра), НИИ НМ, ВЭИ и рядом зарубежных организаций.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **История** электротехники/Под ред. И.А. Глебова. – М.: Изд-во МЭИ, 1999.
2. **Криогенная техника**/Под ред. В.Г. Фастовского. 2-е изд. – М.: Энергия, 1974.
3. **Казовский Е.Я., Карцев В.П., Шахтарин В.Н.** Сверхпроводящие магнитные системы. – Л.: Наука, 1967.
4. **Алиевский Б.Л.** Применение криогенной техники и сверхпроводимости в электрических машинах и аппаратах. – М.: Информстандартэлектро, 1967.
5. **Сверхпроводящие машины и устройства**/Пер. с англ. под ред. Е.Ю. Клименко. – М.: Мир, 1977.
6. **Уилсон М.** Сверхпроводящие магниты/Пер. с англ. под ред. Е.Ю. Клименко. – М.: Мир, 1985.
7. **Зенкевич В.Б., Сычев В.В.** Магнитные системы на сверхпроводниках. – М.: Наука, 1972.
8. **Глебов И.А., Данилевич Я.Б., Шахтарин В.Н.** Турбогенераторы с использованием сверхпроводимости. – Л.: Наука, 1981.
9. **Криогенные электрические машины**/Под ред. Н.Н. Шереметьевского. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
10. **Сверхпроводниковые электрические машины и магнитные системы: Учебное пос. для вузов по специальности**

«Электромеханика»/Под ред. Б.Л. Алиевского. – М.: Изд-во МАИ, 1993.

11. **Физические** свойства высокотемпературных сверхпроводников/Под ред. Д.М. Гинзберга. – М.: Мир, 1990.

12. **Ковалев Л.К.** Гистерезисные ВТСП-машины (моторы и генераторы). – Новости ВТСП, 1992., т. 5.

13. **Ковалев Л.К., Ковалев К.Л.** Электрические машины с объемными ВТСП. – М.: Изд-во МЭИ, 2007.

*Автор: Алиевский Борис Львович окончил в 1956 г. электромеханический факультет Московского энергетического института. Докторскую диссертацию по электрическим машинам защитил в 1989 г. в Московском авиационном институте (МАИ). Профессор кафедры электроэнергетических, электромеханических и биотехнических систем МАИ.*