

М.И. Баранов

АНТОЛОГИЯ ВЫДАЮЩИХСЯ ДОСТИЖЕНИЙ В НАУКЕ И ТЕХНИКЕ. ЧАСТЬ 10: ОТКРЫТИЕ И ИЗУЧЕНИЕ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ МАТЕРИАЛОВ

Наведено короткий науково-історичний нарис з усесвітньої історії відкриття і вивчення явища надпровідності матеріалів, що знайшло широке застосування в різних галузях науки і техніки.

Приведен краткий научно-исторический очерк из всемирной истории открытия и изучения явления сверхпроводимости материалов, нашего широкого применения в различных областях науки и техники.

"Для человека иметь удовлетворение в своей специальности и что-то сделать – это великое счастье. Вот почему я считаю себя человеком счастливой судьбы".

Академик РАН, лауреат Нобелевской премии по физике за 2003 год – В.Л. Гинзбург, 2009 год

ВВЕДЕНИЕ

Одним из выдающихся научных открытий в мире стало обнаружение явления сверхпроводимости вещества (первоначально у ряда металлов), при котором происходит резкое падение (практически до нуля) его удельного электрического сопротивления $\rho(T)$ вблизи определенной температуры T_c , называемой температурой перехода материала в сверхпроводящее состояние [1]. Вещества, которые обладают такими свойствами, получили название сверхпроводников того или иного рода. В настоящее время известно до 1000 наименований различных материалов (чистых металлов, всевозможных сплавов и керамик), обнаруживающих свойство сверхпроводимости [1, 2]. Практическое отсутствие у сверхпроводников электрического сопротивления вызывает в токоведущих частях силового электрооборудования, изготовленных на их основе с применением низких температур, минимальные тепловые потери энергии, обусловленные протеканием по ним переменного (импульсного) или постоянного электрического тока. Данный практический эффект от использования сверхпроводников в современных электрических машинах (аппаратах) объектов электроэнергетики и электротранспорта, токопроводах обмоток мощных электромагнитных систем для научно-технологических целей и кабельных линиях электропередачи является определяющим при технико-экономическом обосновании целесообразности их выбора и применения в подобных устройствах. В период наступления на нашей планете режима глобального ресурсо- и энергосбережения реальное использование такого физико-технического явления как сверхпроводимость приобретает особую значимость.

1. ПЕРВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ МЕТАЛЛОВ

Появление в мире нового направления в науке – физики низких температур было связано, прежде всего, с именем выдающегося нидерландского физика-экспериментатора Хейке Камерлинг-Оннеса (рис. 1), с 1882 по 1923 годы трудившегося в Лейденском университете на разных должностях: профессора, руководителя физической лаборатории и ректора [2]. В

1894 году им в данном университете на основе физической лаборатории была создана крупная Лейденская криогенная научно-исследовательская лаборатория, фактически ставшая со временем в составе этого известного европейского учебного заведения всемирно известным научно-исследовательским институтом.



Рис. 1. Выдающийся нидерландский физик и организатор науки Хейке Камерлинг-Оннес (1853-1926 гг.)

Отметим, что в 1892 году известным английским физиком Джеймсом Дьюаром (1842-1923 гг.) был изобретен сосуд для длительного сохранения сжиженных при низких температурах газов ("сосуд Дьюара"), являющийся сегодня необходимым атрибутом любой криогенной лаборатории, а в 1898 году им был получен в небольшом количестве жидкий водород H (с температурой кипения 20,3 К) [2]. Несжиженным газом к концу 19-го столетия оставался только гелий He , к "штурму" которого многие годы упорно и тщательно готовился нидерландский ученый Х. Камерлинг-Оннес. После "завоевания" им в своей лаборатории кислорода O (с температурой кипения 90,2 К) и получения в 1906 году на новом лейденском оживителе жидкого водорода H в объемах до 4 л/час при рабочем давлении до 200 атм перед Х. Камерлинг-Оннесом открылся путь к абсолютному нулю температур [2]. Обусловлено это было тем, что единственным подходящим для охлаждения гелия He хладагентом был на то время жидкий водород H , которого теперь у Х. Камерлинг-Оннеса было в достаточном количестве. Добыв из монацитового песка путем его прокаливания 360 л газообразного гелия, он в июне 1908 года после нескольких месяцев напряженной работы с помощью метода, примененного им при оживлении водорода H , и использования эффекта Джоуля – Томсона получил жидкий гелий He (с температурой кипения 4,2 К) в объеме до 60 см³ [2]. Не случайно Х. Камерлинг-Оннес в связи с оживлением гелия He говорил [2]: "...В этом удачном эксперименте и человек и машина выложились до конца". Ожи-

жение гелия *He* стало в научном мире событием огромного значения: криогениками Лейденской лаборатории была открыта новая область температур вблизи абсолютного нуля, в которой можно было проводить изучение новых физических свойств различных веществ. Дальнейшие события в мировой науке подтвердили существование в этой области сверхнизких температур совершенно неожиданных и загадочных явлений, существенно повлиявших на представления физиков об устройстве микромира. Заметим, что в 1913 году Х. Камерлинг-Оннес за "исследование свойств тел при низких температурах и получение жидкого гелия" был удостоен Нобелевской премии по физике [2]. Поэтому овладев интервалом гелиевых температур в единицы градусов Кельвина, Х. Камерлинг-Оннес со своими сотрудниками сразу с 1908 года приступил к комплексным электрофизическим исследованиям поведения физических тел в условиях воздействия на них сверхнизких температур, достигших у него к 1910 году уровня 1,04 К, а к 1922 году – 0,83 К [2, 5]. На рис. 2 приведен общий вид Лейденской криогенной лаборатории, в которой Х. Камерлинг-Оннес совместно со своим талантливым учеником-физиком Гиллесом Холстом (1886-1968 гг.) в 1911 году открыл новое в науке физическое явление – исчезновение электрического сопротивления у ртути *Hg* при температуре $T_c=4,19$ К [2, 3]. Схема этого широко известного в области техники и физики низких температур эксперимента представлена на рис. 3.



Рис. 2. Внешний вид Лейденской криогенной лаборатории (фото 1922 года), носящей с 1932 года и по сей час современное название – Лаборатории Х. Камерлинг-Оннеса [2]

Согласно рис. 3 при помещении цилиндрического соленоида из ртути *Hg* в сосуд Дьюара с жидким гелием *He* и пропускании по нему постоянного электрического тока от аккумулятора (ключ 1 замкнут, а ключ 2 – разомкнут) вокруг соленоида возникало биполярное постоянное магнитное поле, на которое чутко реагировала магнитная стрелка компаса, расположенного вне сосуда Дьюара со стеклянными стенками. В данном простом опыте было установлено то, что после механической коммутации указанных ключей (ключ 2 замкнут, а ключ 1 – разомкнут) в электроцепи соленоида без аккумулятора неограниченно долго поддерживался постоянный электрический ток и соответственно наблюдалось существование вокруг его витков внешнего постоянного магнитного поля.

В связи с обнаруженным в описанном выше опыте новым физическим фактом Х. Камерлинг-Оннес в свое время написал следующее [2]: "...В интервале температур 4,21–4,19 К сопротивление ртути уменьшилось очень резко и при 4,19 К вообще исчез-

ло". Ему стало ясно, что при гелиевой температуре "...ртуть переходит в новое состояние, которое вследствие его необычных электрических свойств может быть названо сверхпроводящим состоянием" [2]. Активно продолжая изучение низкотемпературных свойств иных чистых металлов, Х. Камерлинг-Оннес в 1912 году открыл сверхпроводимость у олова *Sn* и свинца *Pb*, а в 1919 году совместно с учеником В. Тьюном – у таллия *Tl*, урана *U* и индия *In* [1, 4].

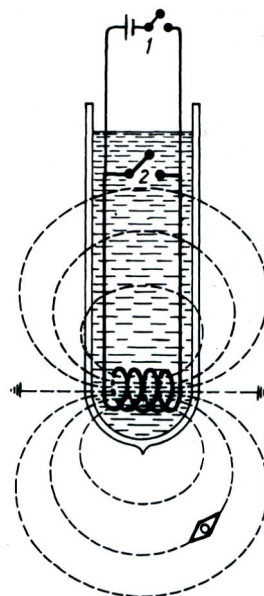


Рис. 3. Схема низкотемпературного опыта Х. Камерлинг-Оннеса и Г. Холста от 1911 года, в котором была открыта сверхпроводимость в витках соленоида из ртути *Hg* [2]

Интересным фактом в указанных опытах Х. Камерлинг-Оннеса с металлами, погруженными в жидкий гелий *He*, является то, что в них его интересовало, прежде всего, их остаточное удельное электрическое сопротивление ρ_0 при приближении температуры T к абсолютному нулю, приведенное на рис. 4 и характерное для меди *Cu*. Из данных рис. 4 видно, что чем выше температура T , тем больше удельное электрическое сопротивление ρ меди, тем сильнее колеблются в узлах ее кристаллической решетки атомы (положительные ионы меди) и тем большую помеху они представляют для дрейфующих в ней свободных электронов и соответственно для электрического тока, обусловленного этими отрицательно заряженными носителями электричества. Он знал, что чем меньше в исследуемом образце металла дефектов (примесей), тем меньше и его остаточное удельное сопротивление ρ_0 . Вот поэтому для первых опытов при гелиевых температурах им была выбрана именно ртуть *Hg*, которую в то время можно было довести до большей степени чистоты, чем иные известные проводящие материалы. Заметим, что его предварительные низкотемпературные опыты с такими хорошими проводниками как золото *Au*, платина *Pt* и медь *Cu*, широко используемыми как тогда, так и сейчас в электротехнике, не позволили установить ему в них явления их сверхпроводимости, возникающего скачком при понижении температуры. Тонкие исследования показали, что такой переход вещества из нормального состояния в

сверхпроводящее наблюдается в некотором узком интервале температур (рис. 5). При этом "трение" движущихся свободных электронов на узлах кристаллической решетки металла исчезает независимо от "чистоты" исследуемого образца. Но чем образец "чище" (меньше примесей), тем резче скачок электрического сопротивления. Ширина этого скачка в самых "чистых" образцах будет меньше сотой доли градуса.

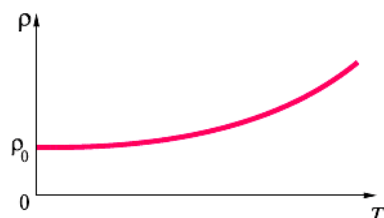


Рис. 4. Классическая зависимость удельного электрического сопротивления $\rho(T)$ для меди Cu от ее температуры T [4]

В 1913 году Х. Камерлинг-Оннес ввел в физику новые термины "сверхпроводимость" и "сверхпроводник" [2]. В этом же году он обнаружил разрушение сверхпроводимости вещества пропусканием через него электрического тока определенной величины, а в 1914 году – установил исчезновение этого свойства у вещества за счет действия на него (сверхпроводящее вещество) внешнего сильного магнитного поля. Позже в 1925 году в Лейденской криогенной лаборатории было установлено, что в аксиальном магнитном поле сопротивление сверхпроводящих сплошных цилиндрических образцов восстанавливается скачком в очень узком интервале индукции магнитного поля, а в 1926 году Х. Камерлинг-Оннес и его ученики показали, что критическое значение тока для сверхпроводника непосредственно связано с критическим уровнем напряженности магнитного поля. В 1922 году он со своим талантливым учеником В. Тюйном уточнил температуру перехода свинца Pb в сверхпроводящее состояние, оказавшуюся равной около $T_c=7,26$ К [2]. На следующем этапе низкотемпературных исследований открытого Х. Камерлинг-Оннесом сверхпроводящего состояния вещества были выполнены эксперименты со сверхпроводящими катушками и кольцами. Им был создан первый сверхпроводящий магнит на основе катушки из свинцовой проволоки, создающий в воздухе магнитное поле с индукцией в 400 Гс= $0,04$ Тл. Отметим и то, что он обнаружил в сверхпроводящей электрической цепи с использованием свинцовой проволоки незатухающие в течение нескольких часов постоянные электрические токи. Это дало ему возможность разработать новый сверхчувствительный метод определения малых электросопротивлений [2]. В 1914 году Х. Камерлинг-Оннес экспериментально показал, что незатухающий электрический ток в сверхпроводящей цепи может быть возбужден заряженной электрической батареей и выключен путем механического разрыва данной сверхпроводящей электрической цепи [2]. Явление сверхпроводимости для различных весьма чистых металлов, открытое в период 1911–1926 годов в Лейденской криогенной лаборатории ее основателем Х. Камерлинг-Оннесом и его сотрудниками, было совершенно неожиданным

физическим фактом и не могло быть объяснено существовавшими тогда теориями классической физики.

Опыты Х. Камерлинг-Оннеса от 1911 и 1924 годов указывали на существование максимума плотности жидкого гелия He при температуре $2,19$ К и свидетельствовали о скачкообразном изменении удельной теплоемкости, происходящем в жидком гелии при указанной температуре [2]. Он близко подошел к открытию существования жидкого гелия He в двух фазовых состояниях: выше температуры перехода $2,19$ К – в состоянии гелий I, а ниже этой температуры – в состоянии гелий II. обстоятельное изучение этих необычных физических свойств жидкого гелия He в 1928 году выполнил ученик Х. Камерлинг-Оннеса – известный нидерландский физик Виллем Кеезом (1876–1956 гг.), который в 1935 году совместно с дочерью-физиком А. Кеезом обнаружил необычно высокую теплопередачу в жидком гелии II (сверхбольшой скачок его теплопроводности при переходе через λ - точку), заполняющем узкие теплопроводы (щели) [2, 6].

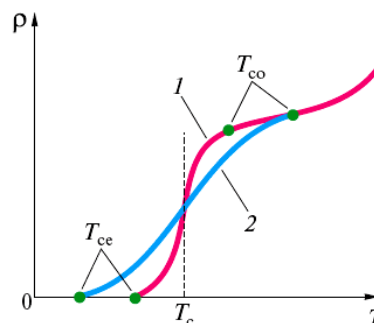


Рис. 5. Температурная зависимость удельного электрического сопротивления $\rho(T)$ для двух сверхпроводящих образцов металла (для более "чистого" металла – кривая 1 и более "грязного" металла – кривая 2) [4]

Согласно данным рис. 5 критическая температура T_c обозначает середину перехода вещества в сверхпроводящее состояние, когда его удельное электрическое сопротивление ρ падает наполовину по сравнению с нормальным состоянием. На кривых рис. 5 начало этого падения величины ρ обозначено символом T_{co} , а окончание – T_{ce} . Отсутствие электросопротивления у вещества является не единственной отличительной чертой его сверхпроводимости. Другим важным отличием сверхпроводников от идеальных проводников является проявление в них эффекта Мейснера, открытого в 1933 году известными немецкими физиками Вальтером Мейснером (1882–1974 гг.), портрет которого приведен на рис. 6, и Робертом Оксенфельдом (1901–1993 гг.) [2, 7]. Физическая суть эффекта Мейснера заключается в практически полном вытеснении магнитного поля из объема проводника при переходе его материала в сверхпроводящее состояние (рис. 7). При этом в сверхпроводнике с рабочим током имеется приповерхностная плотность электрического тока, распределенная на его некоторой крайне малой глубине Δ_M [7]. Впервые природа эффекта Мейснера была объяснена известными английскими физиками – братьями Фрицем (1900–1954 гг.) и Хейнцем (1907–1970 гг.) Лондонами на основе по-

лученного ими в 1935 году уравнения Лондонов, являющегося элементом их феноменологической теории сверхпроводимости вещества в слабых магнитных полях [2, 7, 8].



Рис. 6. Известный в области техники и физики низких температур немецкий ученый Вальтер Мейснер (1882-1974 гг.)

При этом Ф. и Х. Лондоны теоретически показали, что в массивный сверхпроводник магнитное поле проникает на некоторую глубину от поверхности Δ_M – на так называемую лондоновскую глубину проникновения магнитного поля, составляющую для металлов фиксированную величину порядка 0,01 мкм [7, 8].

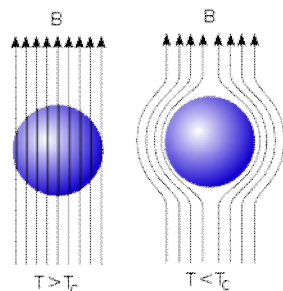


Рис. 7. Схематическое изображение поведения линий магнитной индукции B внешнего поля при отсутствии (картинка слева при $T > T_C$) и проявлении (картинка справа при $T < T_C$) в материале проводящего шара эффекта Мейснера [7]

Одной из ярких современной иллюстрацией проявления эффекта Мейснера в сверхпроводнике является левитация постоянного магнита вблизи его поверхности, приведенная на рис. 8 [7, 8]. Для реализации в воздухе подобной левитации постоянного магнита выбранный материал (например, высокотемпературную сверхпроводящую керамику, имеющую критическую температуру до $T_C=100$ К [8]) за счет его охлаждения низкотемпературным хладагентом (например, жидким азотом N) приводят в сверхпроводящее состояние. Далее на плоскую поверхность этого сверхпроводника кладут небольшой постоянный магнит. Из-за проявления в этом случае в сверхпроводнике эффекта Мейснера и соответственно выталкивания магнитного поля из области его сверхпроводящей фазы магнит как бы отталкивается от неподвижного сверхпроводника и "всплывает" над ним. После этого магнит продолжает легко "парить" над поверхностью сверхпроводника до тех пор, пока внешние температурные или электромагнитные воздействия не выведут сверхпроводник из сверхпроводящей фазы. Опыты, подобные приведенному на рис. 8, показывают, что в магнитных полях с индукцией порядка 0,001 Тл

смещение вверх постоянного магнита от поверхности сверхпроводника составляет до 10 мм [7, 8]. При увеличении индукции (напряженности) магнитного поля вплоть до критического уровня, характерного для каждого вида сверхпроводника, постоянный магнит будет подниматься над ним на еще большую высоту [8].



Рис. 8. Внешний вид постоянного магнита, левитирующего в воздухе над охлажденным жидким азотом N (с температурой кипения в 77,4 К) сверхпроводником из керамики [7]

Именно благодаря эффекту Мейснера физики поняли, что сверхпроводимость вещества – квантово-механическое явление, определяемое сложным поведением его квантовых микрообъектов – свободных электронов в кристаллической решетке этого вещества [8]. Кроме того, этот эффект стимулировал исследование критического уровня магнитного поля – значения магнитной индукции B_C (напряженности H_C), выше которого сверхпроводник находится в нормальном состоянии (рис. 9). Физикам стало известно, что при уменьшении температуры T сверхпроводника величина H_C возрастает в первом приближении как [1, 9]: $H_C = H_0[1 - (T/T_C)^2]$, где H_0 – максимальное значение критической напряженности магнитного поля.

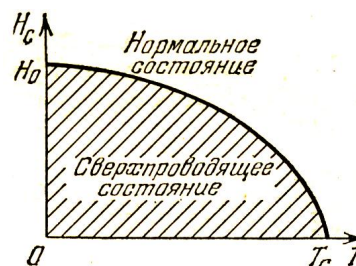


Рис. 9. Зависимость критической напряженности H_C магнитного поля от температуры T сверхпроводника [1, 9]

В ходе этих работ было установлено, что критические значения магнитной индукции B_C обычно лежат в интервале от нескольких десятков гауссов до нескольких сотен тысяч гауссов в зависимости от сверхпроводника и его металлофизического состояния [8]. Критическое поле сверхпроводника меняется с температурой, уменьшаясь при ее повышении. При температуре перехода T_C критическое поле равно нулю, а при абсолютном нуле оно максимально (см. рис. 9). Внешнее магнитное поле, более слабое, чем критическое, не проникает в толщу сверхпроводника, являющегося формально идеальным диамагнетиком. При внешней напряженности магнитного поля более величины H_0 сверхпроводящая фаза вещества скачкообразно переходит в нормальное состояние и сверхпроводимость в нем исчезает [1]. Сверхпроводимость никогда не наблюдается в структурах, в которых существует ферромагнетизм или антиферромагнетизм.

2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ МАТЕРИАЛОВ

Первые попытки физиков по объяснению экспериментальных данных из области сверхпроводимости вещества носили феноменологический характер: они базировались на искусственных предположениях или нестрогих модификациях существующих теорий классической физики и имели целью достижение согласия с экспериментом. Примером таких попыток может служить двухжидкостная модель [9], в которой постулируется то, что при температуре перехода T_C некоторая часть электронов проводимости вещества приобретает способность двигаться, не испытывая сопротивления со стороны атомов его кристаллической решетки. Эта модель объясняла температурную зависимость критического поля, критический ток в сверхпроводнике и глубину проникновения Δ_M магнитного поля, но ничего не давала для физического понимания самого явления сверхпроводимости [7, 8].

Определенный прогресс в физике сверхпроводимости был достигнут в 1935 году, когда английские физики-теоретики, братья Ф. и Х. Лондоны предложили сверхпроводимость рассматривать как макроскопический квантовый эффект [9]. Заметим, что до этого физикам были известны только квантовые эффекты, наблюдающиеся в атомных масштабах, то есть на расстояниях порядка 10^{-10} м. Упомянутые физики Лондоны так модифицировали классические уравнения электромагнетизма, что из них вытекали: эффект Мейснера, бесконечная электропроводность сверхпроводника и крайне ограниченная глубина проникновения Δ_M в него магнитного поля. Далее в 1950 году английский физик-теоретик Герберт Фрелих (1905-1991 гг.) построил теорию сверхпроводимости, основанную на электронно-фононном взаимодействии, и предсказал экспериментально подтвержденный в будущем изотопический эффект, при котором температура перехода T_C вещества в сверхпроводящее состояние зависит от массы изотопов его атомов [2, 9]. Напомним читателю, что фонон – это квант колебательной энергии кристаллической решетки вещества [1, 2]. На взгляд автора, данная модель сверхпроводимости (модель Фрелиха) явилась ключевым теоретическим положением в дальнейших изучениях и уточненных построениях в скором времени (в 1957 году) выдающимися американскими физиками-теоретиками Джоном Бардиным (1908-1991 гг.), Леоном Купером (1930 года рождения) и Джоном Шриффером (1931 года рождения) общепринятой на сегодня микроскопической теории сверхпроводимости (теории БКШ, удостоенной в 1972 году Нобелевской премии по физике) [2, 9]. В этой связи пионерская модель Фрелиха, базирующаяся на упомянутом выше электронно-фононном взаимодействии в материале сверхпроводника, заслуживает более подробного рассмотрения и описания на основании известных литературных источников [2, 9]. Согласно модели Фрелиха свободные электроны могут притягиваться друг к другу за счет их взаимодействия с атомами решетки вещества, называемого электронно-фононным взаимодействием. Механизм такого взаимодействия коротко заключается в следующем. Сво-

бодный электрон, движущийся в кристаллической решетке вещества, искажает ее. Это искажение обусловлено взаимодействием между отрицательно заряженными электронами и положительно заряженными атомами (ионами) решетки. Поэтому движущийся через указанную решетку свободный электрон "сближает" ее заряженные атомы (рис. 10).

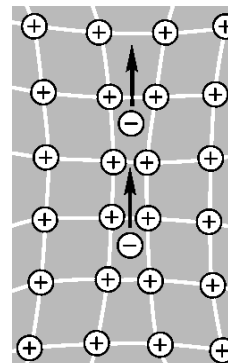


Рис. 10. Схематическое изображение электронно-фононного взаимодействия в решетке материала сверхпроводника [9]

Второй свободный электрон, следующий за первым, втягивается в "суженную" межатомную область решетки под усиленным действием ее положительного заряда. Энергия первого свободного электрона, затрачиваемая на "деформацию" решетки, передается без потерь второму члену этой электронной ("куперовской") пары. Такая электронная пара движется по кристаллической решетке вещества сверхпроводника, обмениваясь энергией через атомы этой решетки, но не теряя при этом своей энергии в целом. Электроны этой пары достаточно удалены друг от друга (на расстоянии от $50 \cdot 10^{-9}$ м до 10^{-6} м [9]). На таких расстояниях взаимное отталкивание свободных электронов мало по сравнению с их электронно-фононным взаимодействием, в результате чего электроны эффективно притягиваются друг к другу. Заметим, что согласно современным данным в 1 см^3 вещества число таких электронных пар составляет около 1020 [9]. Развивая эту упрощенную модель Фрелиха для сверхпроводника, в 1956 году физик Л. Купер из Иллинойского университета (США) теоретически показал, что если свободные электроны притягиваются друг к другу, то, сколь бы слабым ни было это притяжение, они должны "конденсироваться" в связанное состояние. Именно притяжение между двумя свободными электронами и должно было приводить, по его мнению, к образованию перемещающихся в кристаллической решетке сверхпроводника связанных электронных пар (эффект Купера [2, 9]), получивших в дальнейшем название "куперовских" пар. Эти электронные пары, движущиеся внутри металла, образуют при его охлаждении электронный жидкий микроконденсат решетки вещества. В этой связи в основе теоретического объяснения явления сверхпроводимости вещества, предложенного в 1957 году Дж. Бардиным, Л. Купером и Дж. Шриффером, и было заложено представление об образовании в нем электронных "куперовских" пар, представляющих собой подобие "двухэлектронной молекулы". Радиус такой электронной пары (услов-

ной "молекулы") равен примерно 300 ангстрем [9], что намного больше расстояния между соседними атомами решетки вещества сверхпроводника в несколько ангстрем. Поэтому неоднородности кристаллической решетки материала с размерами не больше десятка ангстрем не представляют собой препятствия для свободного течения жидкого электронного конденсата из "куперовских" пар. Именно из-за этого потеря энергии на узлах (ионах) решетки материала сверхпроводника и не происходит. А раз в нем (таком материале) нет потерь энергии от протекания по нему электронного тока, то значит он и не обладает электрическим сопротивлением. В этом, по мнению указанных авторов, и заключается физическая причина возникновения сверхпроводимости в веществе [2, 9].

3. ВКЛАД РОССИЙСКИХ ФИЗИКОВ В ИЗУЧЕНИЕ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ МАТЕРИАЛОВ

В 1950 году выдающимися российскими физиками-академиками Львом Давидовичем Ландау (1908-1968 гг.) и Виталием Лазаревичем Гинзбургом (1916-2010 гг.) была построена феноменологическая теория сверхпроводимости (теория Гинзбурга-Ландау), основанная на фазовых переходах вещества [2, 10]. Данная теория позволила объяснить ряд свойств сверхпроводников и впоследствии стала основой для создания теории сверхпроводников 2-го рода. Однако указанная теория Гинзбурга-Ландау не раскрывала детального физического механизма сверхпроводимости материала. В 1952 году на основе упомянутой теории Гинзбурга-Ландау выдающимся российским физиком-теоретиком Алексеем Алексеевичем Абрикосовым (1928 года рождения, академик АН СССР с 1987 года) была выдвинута идея о существовании в сверхпроводниках 2-го рода сверхтонких областей нормальной фазы [2]. В 1957 году А.А. Абрикосовым была построена теория магнитных свойств сверхпроводящих сплавов, использующая представление "смешанного" состояния в сверхпроводниках 2-го рода (одновременное наличие в них нормальной и сверхпроводящей фаз) [2]. Позднее им же был произведен детальный теоретический расчет структуры этого "смешанного" состояния в сверхпроводниках 2-го рода. Оказалось, что нормальные области в них зарождаются в форме тонких нитей ("вихрей Абрикосова" [2]), пронизывающих сверхпроводящий образец и имеющих толщину, сравнимую с глубиной проникновения магнитного поля Δ_m в сверхпроводник этого рода. При увеличении напряженности внешнего магнитного поля концентрация таких нитей в нем возрастает [11]. За разработку подобной теории сверхпроводников 2-го рода А.А. Абрикосов в 1966 году был удостоен престижной Ленинской премии СССР [2]. Кроме того, А.А. Абрикосов в 1960 году совместно с российским физиком Львом Петровичем Горьковым (1929 года рождения, академик АН СССР с 1987 года) разработал теорию сверхпроводников с магнитными примесями и предсказал явление бесщелевой сверхпроводимости вещества [2]. Следует указать, что Л.П. Горьков в период 1968-1970 годов совместно с российским физиком-теоретиком Герасимом Матвеевичем Элиашбергом (1930 года рождения, академик РАН с 2000 года) построил микроскопическую теорию

нестационарных процессов в сверхпроводниках [2]. Отметим и то, что Г.М. Элиашберг в 1960 году разработал теорию электронно-фононного взаимодействия в сверхпроводниках (см. раздел 2) при конечных температурах и обобщил упомянутую выше теорию сверхпроводимости Гинзбурга – Ландау [2, 11]. В дальнейшем он установил эффект усиления сверхпроводимости материала внешним высокочастотным электромагнитным полем. В этом ряду достижений российских физиков в области сверхпроводимости отметим и феноменологическую теорию сверхтекучести вещества, разработанную в 1958 году В.Л. Гинзбургом (академик АН СССР с 1966 года, рис. 11) с российским физиком-теоретиком Львом Петровичем Питаевским (1933 года рождения, академик РАН с 1990 года) – теория Гинзбурга-Питаевского [2, 11]. Здесь необходимо заметить, что результаты российских физиков в изучении сверхпроводимости вещества были признаны международной научной общественностью. Об этом свидетельствует заслуженное присуждение академиком В.Л. Гинзбургу и А.А. Абрикосову Нобелевской премии по физике за 2003 год [2].

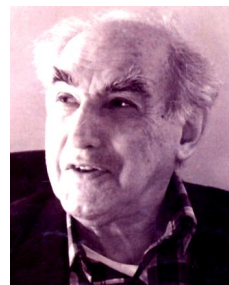


Рис. 11. Выдающийся российский физик, академик РАН Виталий Лазаревич Гинзбург (1916-2010 гг.)

В 1960 году В.Л. Гинзбург в рамках работ по углубленному изучению конденсированного состояния вещества и теории фазовых переходов II рода в нем вывел критерий применимости теории среднего поля (критерий Гинзбурга) [2]. С 1964 года этот научный мэтр активно занимался в Физическом институте им. П.Н. Лебедева АН СССР (ФИАН) разработкой теоретических проблем высокотемпературной сверхпроводимости материалов [12-14]. Продолжая перечисление важных научных результатов российских физиков в области низкотемпературной проблематики следует указать и разработанную Л.Д. Ландау в период 1940-1941 годов в Институте физических проблем (ИФП) АН СССР квантовую теорию сверхтекучести жидкого гелия II [2, 6], положившую начало физике квантовых жидкостей и концепции квазичастиц. В 1956 году им была существенно развита теория таких жидкостей, получившая в теоретической физике название теории ферми-жидкостей [1, 2]. В 1962 году Л.Д. Ландау за пионерские исследования по теории конденсированных сред и жидкого гелия была присуждена Нобелевская премия по физике. В этом же ряду низкотемпературных исследований поведения вещества находятся и уникальные эксперименты выдающегося российского физика, академика АН СССР с 1939 года Петра Леонидовича Капицы (1894-1984 гг.), проведенные им в 1937 году в ИФП АН СССР при температуре жидко-

го гелия ниже критической 2,19 К. Эти исследования привели его к открытию сверхтекучести жидкого гелия II [2, 6]. Им экспериментально было установлено, что жидкий гелий II состоит из двух компонент – сверхтекучей и нормальной. Эти важные результаты активно стимулировали создание Л.Д. Ландау квантовой теории жидкого гелия. В 1978 году академик П.Л. Капица за фундаментальные исследования и открытия в области техники и физики низких температур был удостоен Нобелевской премии по физике [2, 6].

4. КЛАССИФИКАЦИЯ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЕРХПРОВОДНИКОВ

В зависимости от поведения сверхпроводников в магнитном поле их различают на [1, 2, 9]: сверхпроводники 1-го и 2-го родов. **Сверхпроводники 1-го рода** (как правило, все чистые металлы, кроме переходных) характеризуются скачкообразным переходом в сверхпроводящее состояние и обладают одной критической напряженностью H_C магнитного поля, при которой наблюдается этот переход. Значения критической температуры T_C и критической напряженности H_C магнитного поля у них малы. Укажем, что максимальные значения T_C и H_C в этой группе сверхпроводящих материалов имеет свинец Pb ($T_C = 7,2$ К, а $H_C = 65$ кА/м), а минимальное – вольфрам W ($T_C = 0,01$ К, а $H_C = 0,1$ кА/м) [1,9]. Такие значения величин T_C и H_C для сверхпроводников 1-го рода затрудняет их практическое использование при решении различных электротехнологических задач. Для сверхпроводников 1-го рода характерным является четкое проявление в них эффекта Мейснера (см. раздел 1). Низкие значения критической напряженности H_C у сверхпроводников 1-го рода существенно ограничивают в них плотность электрического тока. Поэтому большинство сверхпроводящих металлов для электротехнических целей применить пока не удастся. В этой группе сверхпроводников 13 химических элементов проявляют свои сверхпроводящие свойства при сверхвысоких давлениях. Среди них имеются и такие полупроводники как [1, 9]: кремний Si , германий Ge , селен Se , теллур Te , сурьма Sb и др. **Сверхпроводники 2-го рода** (как правило, все интерметаллические соединения и сплавы) переходят в свое сверхпроводящее состояние не скачкообразно, как сверхпроводники 1-го рода, а в некотором интервале температур [1, 9]. Значения T_C и H_C у них больше, чем у сверхпроводников 1-го рода. В этой связи у сверхпроводников 2-го рода различают нижнее значение критической напряженности H_{C1} магнитного поля и верхнее критическое значение такого поля H_{C2} . При достижении напряженностью магнитного поля величины H_{C1} начинается проникновение магнитного поля в материал этого типа сверхпроводника. Его свободные электроны, вектор скорости которых оказывается перпендикулярным вектору напряженности H_{C1} , под влиянием электродинамической силы Лоренца начинают двигаться внутри материала сверхпроводника по окружности. Так в нем возникают вихревые нити, ствол (канал) которых остается нормальным (несверхпроводящим материалом), вокруг которого движутся свободные электроны, обеспечивающие сверхпроводимость

его остального материала. В результате действия указанного нами физического микромеханизма материал сверхпроводника 2-го рода обладает как сверхпроводящей составляющей проводимости, так и нормальной проводимостью (см. раздел 3 – нити или "вихри Абрикосова"). Поэтому-то в таких сверхпроводниках токи полностью не вытесняются на поверхность образца (эффект Мейснера в чистом виде не проявляется), а образуют цилиндрические каналы, пронизывающие его весь объем. В центральных областях таких цилиндрических каналов "куперовских" электронных пар нет и поэтому в этих каналах сверхпроводимость отсутствует. При возрастании напряженности магнитного поля и достижении ею более высоких значений $H_{C2} > H_{C1}$ указанные каналы токовых нитей расширяются и сближаются между собой, что и приводит к разрушению сверхпроводящего состояния материала сверхпроводника 2-го рода. При достижении критического значения напряженности поля (величины H_{C2}) магнитное поле полностью проникает в объем такого сверхпроводника. Например, значения H_{C2} для таких сверхпроводников 2-го рода как Nb_3Sn и $PbMo_6S$ составляют около 105 Э (8,35 кА/м) [1, 9]. Достаточно высокие уровни магнитного поля, которые способны выдерживать сверхпроводники 2-го рода без разрушения своей сверхпроводящей фазы, позволяют использовать их в различного типа устройствах для создания сильного магнитного поля – системах магнитной подвески транспортных средств, устройствах удержания высокотемпературной плазмы в термоядерных реакторах и др. Сверхпроводники 2-го рода, имеющие структурные неоднородности (дефекты решетки и примеси), называются "**жесткими**" **сверхпроводниками** [1, 9]. Иногда такие сверхпроводящие материалы выделяют в самостоятельную группу – **сверхпроводники 3-го рода**. К "жестким" сверхпроводникам относится большая группа сплавов на основе ниобия Nb и ванадия V : например, такие как $Nb-Ti$, $V-Ga$, $Nb-Ge$ [9-11]. Тонкие пленки из сверхпроводниковых металлов алюминия Al , висмута Bi и ниобия Nb также являются "жесткими" сверхпроводниками. Внутри этих сверхпроводников движение магнитного потока сильно затруднено дефектами и кривые их намагничивания обнаруживают сильный гистерезис. Именно "жесткие" сверхпроводники, у которых электрическое сопротивление принимает близкое к нулю значение вплоть до очень сильных магнитных полей, представляют практический интерес с точки зрения их использования в технических приложениях. Их применяют для изготовления сверхпроводящих обмоток мощных магнитов и других целей. Существенным недостатком сверхпроводников этой группы является их хрупкость, сильно затрудняющая изготовление из них проволоки или ленты для обмоток сверхпроводящих магнитов. Особенно это относится к соединениям типа V_2Ga и Nb_3Sn [1, 9]. В настоящее время все вещества, переходящие в сверхпроводящее состояние, условно разделяют на два больших класса [1, 9]: **низкотемпературные** и **высокотемпературные сверхпроводники**. К **низкотемпературным сверхпроводникам** (T_C не более 25 К) относят: некоторые чистые металлы и сплавы, ряд

полупроводников и интерметаллических соединений типа NbN и TaC . К **высокотемпературным сверхпроводникам** принадлежат керамики на основе оксида меди Cu (например, $Tl_2Ca_2Ba_2Cu_3O_{10}$ с $T_C=127$ К [9]) и другие оксидные сверхпроводники. Отметим, что особое значение в оксидных высокотемпературных сверхпроводниках имеет состояние кислородной подрешетки – концентрация, структурное положение и подвижность атомов кислорода O в их кристаллической структуре. Сверхпроводимость вещества носит фундаментальный характер и согласно современным научным данным ее природа и характеристики во многом еще недостаточно исследованы [3, 12-14].

5. НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ СОВРЕМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ

С учетом данных, приведенных выше в разделе 2, нам уже стало известным то, что в сверхпроводнике взаимодействие свободных электронов друг с другом происходит в результате обменного фононного взаимодействия через атомы (ионы) кристаллической решетки его материала. Поэтому сверхпроводимость должна наблюдаться у веществ, характеризующихся сильным взаимодействием электронов проводимости с узлами (ионами) их кристаллической решетки и поэтому являющимися относительно плохими проводниками в обычных температурных условиях. Если взаимодействие свободных электронов с кристаллической решеткой вещества слабое (случай, когда вещество является хорошим проводником), то перехода в сверхпроводящее состояние такого вещества (например, меди Cu , серебра Ag и золота Au) ученым зарегистрировать так и не удалось [9]. В этом случае малое сопротивление указанных хорошо проводящих материалов указывает на слабое взаимодействие в них свободных электронов с атомами решетки таких веществ. Такое слабое электронно-фононное взаимодействие не создает вблизи абсолютного нуля температуры достаточного межэлектронного притяжения, способного преодолеть кулоновское отталкивание свободных электронов. В этой связи в таких веществах и не наблюдается переход в сверхпроводящее состояние. Современные данные свидетельствуют о том, что образованию сверхпроводящего состояния в полупроводниках и диэлектриках препятствует малая концентрация в них свободных электронов [8, 9]. Тем не менее, в материалах с большой диэлектрической проницаемостью силы кулоновского отталкивания между свободными электронами в значительной мере ослаблены. Поэтому некоторые из диэлектрических материалов также проявляют свойства сверхпроводников при низких температурах. Примером здесь может служить титанат стронция $SrTiO_3$, относящийся к группе сегнетоэлектриков [8, 9]. В ходе изучения свойств сверхпроводимости у металлов было установлено, что ряд полупроводников можно перевести в сверхпроводящее состояние добавкой больших концентраций легирующих примесей. Определенной кульминацией исследований сверхпроводимости стали опыты американского физика Джона Кюнцлера (1923 года рождения), выполненные в 1960 году [2]. Они продемонстрировали, что проволока из сплава Nb_3Sn при $T=4,2$ К в магнитном поле с напря-

женностью 88 кЭ (индукция – 8,8 Тл) пропускает постоянный ток плотностью 1 кА/мм² [2, 11]. Следует указать, что в период с 1911 по 1986 годы в мире были исследованы до тысячи сверхпроводящих металлов и сплавов, но наивысшая измеренная температура сверхпроводящего перехода T_C в них составляла всего 23,2 К (для пленочного соединения-металлоида Nb_3Ge) [8, 9]. Для охлаждения до такой температуры требовался дорогостоящий жидкий гелий He . Поэтому в указанные годы наиболее успешные практические применения сверхпроводимости оставались на уровне научных лабораторных экспериментов, для которых не требовалось больших количеств жидкого гелия He .

В 1986 году Карлом Мюллером (Швейцария) и Йоханнесом Беднорцем (Германия), работавшими в Цюрихской исследовательской лаборатории ИВМ, был открыт новый тип сверхпроводников, получивших название высокотемпературных [9, 10]. Ими было обнаружено, что керамический проводник, построенный из атомов лантана La , бария Ba , меди Cu и кислорода O , имеет температуру перехода T_C в сверхпроводящее состояние, равную около 36 К [10]. Отметим, что в марте 1987 года в ФИАН на основе соединений иттрия Y , бария Ba , меди Cu и кислорода O были созданы сверхпроводники из керамических материалов с весьма высокой температурой перехода T_C . Так, для образцов из высокотемпературной сверхпроводящей иттриевой керамики $YBa_2Cu_3O_7$ температура перехода T_C достигала 93 К [9, 10, 12]. Вскоре исследовательскими группами в разных странах мира были получены керамические материалы с температурой перехода T_C от 90 до 100 К [9], которые способны оставаться сверхпроводниками 2-го рода в сильных магнитных полях с индукцией до 200 тысяч гауссов (до 20 Тл [1]). В 1988 году японскими физиками была синтезирована высокотемпературная сверхпроводящая керамика $Bi-Sr-Ca-Cu-O$, имеющая температуру перехода $T_C = 120$ К [12]. По состоянию на январь 2006 года рекорд по уровню температуры перехода T_C принадлежал открытому в 2003 году высокотемпературному сверхпроводящему керамическому соединению на основе ртути Hg , бария Ba , меди Cu и кислорода O , для которого значение T_C было равно 135 К [10]. При давлении $350 \cdot 10^3$ атм это соединение является сверхпроводником при температуре перехода T_C до 164 К [10]. Основным достоинством этих керамических материалов является то, что их можно изучать и технологически использовать при низкотемпературном охлаждении сравнительно недорогим жидким азотом N .

6. НЕКОТОРЫЕ ИЗВЕСТНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СВЕРХПРОВОДНИКОВ

Учеными лаборатории сверхпроводимости всемирно известного ФИАН в свое время для потребностей микро- и радиоэлектроники бывшего СССР были созданы микрополосковые СВЧ-резонаторы из сверхпроводящих сплавов Nb_3Sn и Nb_3Ge , надежно работающие в жидком водороде H до температуры 21 К [12]. Укажем, что в 1978 году советскими учеными была запущена термоядерная установка "Токамак-7", содержащая сверхпроводящие обмотки для создания сильного аксиального магнитного поля, удерживаю-

щего высокотемпературную плазму в ее рабочем тороидальном объеме [2]. При создании в Харьковском физико-техническом институте (ХФТИ) в период 70-х годов XX века для поисковых исследований в области термоядерного синтеза мощных стеллараторов типа "Ураган-2" (рис. 12) были также использованы сверхпроводящие токопроводящие системы [2, 15]. В создаваемой в Российской Федерации установке термоядерного синтеза нового поколения "Токамак-15", в рабочем объеме которой должна накапливаться огромная магнитная энергия величиной до 600 МДж [16], обойтись без использования эффекта сверхпроводимости вещества просто невозможно.

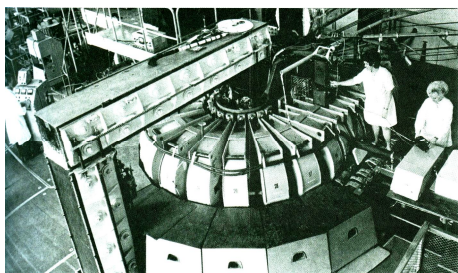


Рис. 12. Общий вид мощной исследовательской термоядерной установки ХФТИ стеллараторного типа "Ураган-2" [2]

Явление сверхпроводимости уже практически используется в проходящих ныне ходовые испытания скоростных поездах "Maglev" (Япония), использующих эффект магнитной левитации на сверхпроводниках (см. рис. 8) [16]. В данных поездах применяются мощные бортовые магниты, приподнимающие локомотив и вагоны поезда над уложенными на земле специальными рельсами. Такой электротранспорт на сверхпроводящей магнитной подвеске оказывается высокоскоростным (достигнутые скорости составляют уже до 500 км/ч) и энергетически эффективным. Американская фирма "Локхид" к примеру построила сверхпроводящий электромагнит, который весит 85 килограммов и создает сильное постоянное магнитное поле напряженностью в $15 \cdot 10^3$ Э (магнитная индукция – 1,5 Тл) [8, 9]. Крупнейшие сверхпроводящие магниты с магнитным полем в (30-40) тысяч эрстед (3-4 Тл) и габаритным размером порядка 4 м уже работают в ряде научно-исследовательских ускорительных лабораторий Европы и Америки. Для проведения физических исследований твердых тел, молекул, атомов и ядер необходимы сильные магнитные поля в малых объемах. Сверхпроводящие магниты оказываются здесь незаменимым физическим инструментарием и поэтому они сейчас широко используются во многих физических лабораториях мира. К настоящему времени созданы сверхпроводящие электромагниты с напряженностью постоянного магнитного поля до 170 тысяч эрстед (магнитная индукция – 17 Тл) [8, 9]. В 1963 году усилиями сотрудников Института металлургии им. А.А. Байкова АН СССР и ФИАН на основе ниобий-циркониевого сплава была создана сверхпроводящая проволока, примененная в сверхпроводящих соленоидах для получения сильных магнитных полей с напряженностью до 250 кЭ (индукция – 25 Тл) [11].

Сверхпроводники открывают совершенно новые

возможности при создании вычислительной техники. Незатухающий ток в сверхпроводящих системах и их элементах позволяет создавать идеальные запоминающие устройства с огромной памятью, способные хранить колоссальное количество информационных данных и выдавать их с фантастической скоростью. Уже получены металлические сплавы, сохраняющие сверхпроводимость при (18-20) К [8, 9]. Считается, что создание механически прочного вещества, которое обладало бы сверхпроводящими свойствами при температуре хотя бы в 150 К, может привести к подлинной революции в электротехнике и электроэнергетике. Сверхпроводники 1-го и 2-го родов нашли активное применение при разработке и создании в Европейском центре ядерных исследований (CERN, Швейцария) уникального Большого адронного коллайдера (БАК), предназначенного для встречного ускорения мощных протонных пучков [9, 17]. С их помощью в БАК были изготовлены сверхпроводящие цилиндрические элементы уникальной магнитной системы длиной 27 км, удерживающей в глубоком вакууме протонные пучки на заданной траектории, и сверхпроводящие кабели (рис. 13) системы энергообеспечения электромагнитов ускорительного кольца БАК. Сейчас в некоторых странах мира начинается активное использование энергосберегающих силовых кабелей питания, созданных американской компанией *American Superconductor (AMSC)* и изготовленных из многожильного электропровода на основе высокотемпературного сверхпроводника (*High Temperature Superconductor – HTS*) [16]. Первая и наиболее протяженная на сегодня силовая кабельная линия на основе *HTS* была проложена в 2008 году на американском острове Лонг-Айленд (США, штат Нью-Йорк). В настоящее время по этой сверхпроводящей электросети передается электроэнергия мощностью 774 МВт [16].



Рис. 13. Внешний вид не- и сверхпроводящих электрических кабелей, используемых в мощных ускорителях заряженных частиц Европейского центра ядерных исследований CERN (сверху – обычные силовые кабели для Большого электронно-позитронного коллайдера; внизу – сверхпроводящие кабели для Большого адронного коллайдера) [9, 17]

Отметим и то, что в США сейчас реализуется проект *Tres Amigas Project*, который должен связать три электроэнергетические сети с применением *HTS* и создать первый национальный рыночный центр возобновляемой электроэнергии ("*renewable energy market hub*") [16]. Укажем, что согласно [16] крупнейший на сегодняшний день в мире заказ на поставку сверхпроводящих кабелей марки *HTS* недавно был размещен компанией *LS Cable* в Южной Корее. Для

энергетики будущего важно иметь новые эффективные способы хранения и передачи электроэнергии. Сверхпроводники при решении подобных крупных научно-технических задач могут оказаться весьма перспективными. Ученые Висконсинского университета (США) уже разработали проект системы для длительного хранения больших запасов электроэнергии. В соответствии с данным проектом гигантская сверхпроводящая электрическая катушка диаметром более 100 м должна быть установлена в специальном туннеле, пробитом в скальных породах. В ней с помощью жидкого гелия *He* будет поддерживаться температура, близкая к абсолютному нулю. Незатухающий электрический ток в витках такой сверхпроводящей катушки обеспечит создание и запасаение в ее рабочем объеме гигантской энергии порядка $4 \cdot 10^{11}$ Дж [18]. В настоящее время во всем мире активно ведутся проектно-конструкторские работы по созданию крупных электрических машин: турбо- и гидрогенераторов со сверхпроводящими обмотками и системами их возбуждения [8, 9]. Другой реальной областью применения в настоящее время сверхпроводников являются магниторезонансные сканеры *MRI*, которые можно найти во многих больницах по всему миру. В них используются небольшие магнитные катушки со сверхпроводящей электрообмоткой для создания вращающегося магнитного поля, которое в итоге и формирует детальное изображение частей человеческого тела [16]. В металлообрабатывающей индустрии огромные механизмы, называемые "устройствами для нагрева заготовок" ("*billet heater*"), используют электроэнергию для разогрева тугоплавкого металла обрабатываемых заготовок примерно до температуры 1000 °С. Делается это для смягчения металла перед его обработкой. Применив высокотемпературную сверхпроводимость, немецкие компании *Bultmann GmbH* и *Zenergy Power* совместно разработали электромагнитное устройство для нагрева подобных заготовок [16]. Разработанное сверхпроводящее устройство продемонстрировало 80 %-ный выигрыш в энергетической эффективности по сравнению с существующими механизмами подобного технологического назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. – М.: Наука, 1990. – 624 с.
2. Храмов Ю.А. История физики. – Киев: Феникс, 2006. – 1176 с.
3. Гинзбург В.Л. К истории открытия и изучения сверхпроводимости // Вопросы истории естествознания и техники. – 1980. – № 1. – С. 44-56.
4. <http://biographera.net/biography.php?id=176>.
5. Камерлинг-Оннес Х. О наинизшей температуре, достигнутой до настоящего времени // Успехи физических наук. – 1924. – Том 4. – С. 240.
6. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 2-х томах. Том 1: Электрофизика и выдающиеся физики мира. – Харьков: Изд-во НТУ "ХПИ", 2008. – 252 с.
7. <http://ru.wikipedia.org/wiki/B5>.
8. <http://bibliotekar.ru/100otr/34.htm>.
9. http://www.krugosvet.ru/enc/nauka_i_tehnika/tehnologiya_i_promyshlennost/sverhprovodimost.html.

10. <http://ru.wikipedia.org/wiki/Сверхпроводимость>.
11. <http://elementy.ru/lib/430825/430827>.
12. Головашкин А.И. Экспериментальные исследования по сверхпроводимости в ФИАНе // История науки и техники. – 2009. – № 4. – С. 62-68.
13. Гинзбург В.Л., Киржниц Д.А. Проблема высокотемпературной сверхпроводимости. – М.: Наука, 1977. – 400 с.
14. Гинзбург В.Л., Андрушин Е.А. Сверхпроводимость. – М.: Альфа, 2006. – 240 с.
15. Юферов В.Б., Друй О.С., Скибенко Е.И. и др. Сверхпроводящие магнитные системы сложной формы и высокой плотности транспортного тока // Электротехника и электромеханика. – 2003. – № 2. – С. 81-89.
16. <http://www.ibm.com/news/ru/ru/2011/04/18/r727593j41411x46.htm>.
17. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 8: Создание ускорителей заряженных частиц // Электротехника и электромеханика. – 2012. – № 3. – С. 3-10.
18. <http://www.physbook.ru/index.php/M>.

Bibliography (transliterated): 1. Yavorskij B.M., Detlaf A.A. Spravochnik po fizike. – M.: Nauka, 1990. – 624 s. 2. Hramov Yu.A. Istoriya fiziki. – Kiev: Feniks, 2006. – 1176 s. 3. Ginzburg V.L. K istorii otkrytiya i izucheniya sverhprovodimosti // Voprosy istorii estestvoznaniya i tehniki. – 1980. – № 1. – S. 44-56. 4. <http://biographera.net/biography.php?id=176>. 5. Kamerling-Onnes H. O nainizshej temperature, dostignutoj do nastoyaschego vremeni // Uspehi fizicheskikh nauk. – 1924. – Tom 4. – S. 240. 6. Baranov M.I. Izbrannye voprosy `elektrofiziki: Monografiya v 2-h tomah. Tom 1: `Elektrofizika i vydayuschiesya fiziki mira. – Har'kov: Izd-vo NTU "HPI", 2008. – 252 s. 7. <http://ru.wikipedia.org/wiki/B5>. 8. <http://bibliotekar.ru/100otr/34.htm>. 9. http://www.krugosvet.ru/enc/nauka_i_tehnika/tehnologiya_i_promyshlennost/sverhprovodimost.html. 10. <http://ru.wikipedia.org/wiki/Sverhprovodimost>. 11. <http://elementy.ru/lib/430825/430827>. 12. Golovashkin A.I. `Eksperimentalnye issledovaniya po sverhprovodimosti v FIANE // Istoriya nauki i tehniki. – 2009. – № 4. – S. 62-68. 13. Ginzburg V.L., Kirzhnic D.A. Problema vysokotemperaturnoj sverhprovodimosti. – M.: Nauka, 1977. – 400 s. 14. Ginzburg V.L., Andryushin E.A. Sverhprovodimost'. – M.: Al'fa, 2006. – 240 s. 15. Yuferov V.B., Druj O.S., Skibenko E.I. i dr. Sverhprovodyaschie magnitnye sistemy slozhnoj formy i vysokoj plotnosti transportnogo toka // Elektrotehnika i elektromehanika. – 2003. – № 2. – S. 81-89. 16. <http://www.ibm.com/news/ru/ru/2011/04/18/r727593j41411x46.htm>. 17. Baranov M.I. Antologiya vydayuschiesya dostizhenij v nauke i tehnike. Chast' 8: Sozdanie uskoritelej zaryazhennykh chastic // Elektrotehnika i elektromehanika. – 2012. – № 3. – S. 3-10. 18. <http://www.physbook.ru/index.php/M>.

Поступила 17.06.2011

Баранов Михаил Иванович, д.т.н., с.н.с.

НИПКИ "Молния"

Национальный технический университет

"Харьковский политехнический институт"

61013, Харьков, ул. Шевченко, 47

Тел. (057) 7076841, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

Baranov M.I.

An anthology of outstanding achievements in science and technology. Part 10: Discovery and research on superconductivity of materials.

A brief scientific and historical essay on the history of discovery and research on the phenomenon of superconductivity of materials widely applied in various fields of science and technology is given.

Key words – history, superconductivity of materials, application domains.