

УДК 165.04

DOI: 10.15372/PS20210307

В.М. Мамедов, И.А. Архаров**МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ
ТЕОРИИ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ**

В статье дается краткая характеристика этапов развития теории сверхпроводимости, начиная от феноменологической теории Ф. и Х. Лондонов, сформированной в начале 1930-х годов, и ее модернизаций Л.Д. Ландау, В.Л. Гинзбургом, А.А. Абрикосовым и заканчивая новейшей теорией, созданной Г. Фрелихом и Л. Купером.

Актуальность данной работы связана с проблемами, которые возникали в процессе развития сверхпроводниковой теории. В статье показано влияние уровня развития криогеники, которая в середине прошлого столетия столкнулась с недоверием со стороны научного сообщества, вызванным созданием крионики – технологии для сохранения биологических материалов животных и людей в течение длительного времени с последующим «оживлением». В разгар противостояния СССР и США в 1989–1990 гг. после открытия высокотемпературных сверхпроводников правительство США выделяло большие средства на разработки в области сверхпроводимости для нужд Министерства обороны. То есть наряду с соглашениями о разоружении и об использовании мирного атома ставились вопросы о применении сверхпроводимости во благо, а не для разрушения.

Ключевые слова: философия науки; сверхпроводимость; криогеника; крионика; сверхтекучесть; теоретическая физика

V.M. Mamedov, I.A. Arkharov**METHODOLOGICAL ASPECTS OF DEVELOPMENT
OF THE THEORY OF SUPERCONDUCTIVITY**

The article briefly describes the stages in the development of the theory of superconductivity, beginning with the phenomenological theory of brothers London formulated in the early 1930s, its modernization by L.D. Landau, V. L. Ginzburg and A.A. Abrikosov and ending with the latest theory created by G. Fröhlich and L. Cooper.

The relevance of the work is related to the problems that arose in the development of the theory of superconductivity. The influence of the level of the development of cryogenics is shown; in the middle of the last century, the latter faced the distrust of the scientific community caused by the creation of cryonics – a technology for preserving biological material of animals and humans for a long time, followed by “revival”. At the height of the confrontation between the USSR and the United States in 1989–1990, after the discovery of

high-temperature superconductors, the US government allocated large funds for developments in the field of superconductivity for the Department of Defense needs. That is, along with agreements on disarmament and the use of the peaceful atom, there raised questions about the use of superconductivity for good, but not for the destruction.

Keywords: philosophy of science; superconductivity; cryogenics; cryonics; superfluidity; theoretical physics

Открытие сверхпроводимости

К исследованию свойств материалов, в частности металлов, было приковано внимание научного сообщества в период активного развития физики в конце XIX – начале XX в. Наиболее интересным был вопрос о температурной зависимости удельного сопротивления металлов. На тот момент была сформирована гипотеза о том, что удельное сопротивление прямо пропорционально температуре, и экспериментальные данные это подтверждали. Поэтому при стремлении температуры к абсолютному минимуму удельное сопротивление также должно стремиться к нулю. Однако существующая в то время теория об электронном характере проводимости металла влекла другие выводы: при стремлении температуры к абсолютному минимуму электроны теряют свободу перемещения и связываются с атомами металла, и, следовательно, удельное сопротивление при уменьшении температуры должно, наоборот, стремиться к бесконечности. Наряду с этими гипотезами существовала еще одна: сопротивление металлов при близких к нулю значениях стремится к некоторому постоянному ненулевому значению [4].

Многообразие гипотез вызывало стратификацию в научном мире и формирование множества теорий, которые так или иначе объясняли поведение температурной зависимости удельного сопротивления. Проблема заключалась в том, что для экспериментального исследования требовались чистые металлы, чтобы примеси не искажали наблюдаемые результаты, и на тот момент такой была только ртуть, очищенная многократной дистилляцией.

К 1911 г. в Лейденской лаборатории был построен оживитель гелия и накоплено достаточное количество жидкого гелия для проведения экспериментов. Х. Камерлинг-Оннес изготовил проволоку путем замораживания ртути в стеклянной трубке и провел серию замеров ее свойств при различных температурах. В результате этих замеров было установлено, что удельное сопротивление ртути плавно уменьшается с понижением температуры, а при температуре около 4 К резко принимает нулевое значение. Камерлинг-Оннес назвал это новое, ранее неизвестное состояние

сверхпроводимостью. Позже оказалось, что в это состояние могут переходить не только многие металлы, но и сплавы, при этом не обязательно, чтобы металл был чистым.

Проведение опытов с жидким гелием на тот момент было доступно ограниченному кругу ученых, поэтому именно Камерлинг-Оннес и его сотрудники открыли сверхпроводимость свинца, олова и др., а также многие ранее неизвестные свойства сверхпроводников [2]. Например, был обнаружен переход из сверхпроводящего состояния в нормальное не только при повышении температуры, но и при помещении проводника в сильное магнитное поле. Уже в тогда удалось показать два из трех критических параметров: критическую температуру и критическое магнитное поле. Критическую скорость ввода тока получают намного позднее.

По-прежнему оставался открытым вопрос о том, исчезает ли сопротивление вовсе или достигается его значительное уменьшение. Абсолютный ответ на этот вопрос получить не удалось бы из-за низкого качества метрологического оборудования и разного рода погрешностей. В попытках дать ответ на него Камерлинг-Оннес реализовал эксперимент: из сверхпроводящего материала было изготовлено кольцо-соленоид, в которое был запущен ток. В процессе наблюдения за магнитным полем, создаваемым протекающим током, было установлено, что оно не убывает по экспоненциальному закону из-за имеющегося конечного ненулевого сопротивления, а остается постоянным в течение длительного времени. Для большей доказательности Камерлинг-Оннес перевозил соленоид из Лейдена в Кембридж, тем самым демонстрируя полученный результат.

После открытия сверхпроводимости за следующие 75 лет критическая температура в диапазоне от 0,012 до 11,3 К была обнаружена у 40 чистых металлов, нескольких сотен соединений и сплавов. С учетом уровня температуры было понятно, что охлаждение этих сверхпроводников может быть осуществлено только с помощью жидкого гелия.

В 1986 г. было сделано важное открытие: оказалось, что керамика (соединение окислов лантана, бария и меди) имеет критическую температуру «всего» 35 К. Все мировое научное сообщество приступило к изучению свойств различных керамик, и через год был найден сверхпроводник с температурой перехода 92 К [7]. Позднее были найдены ртутные керамики с критической температурой порядка 140 К.

Азотный барьер был преодолен, появилось новое направление исследований – высокотемпературная сверхпроводимость. Технические и технологические достижения криогенной техники могли обеспечивать

охлаждение таких проводников с относительно небольшими затратами энергии. Прикладная высокотемпературная сверхпроводимость нашла применение в создании электрических генераторов большой мощности, аккумуляторов электроэнергии, линий электрических передач и т.д.

Классические теории сверхпроводимости

В первые 20 лет с момента открытия явления сверхпроводимости экспериментальные исследования постоянно и значительно опережали теорию. Только в середине 30-х годов XX в. немецкие физики братья Ф. и Х. Лондоны сделали первые попытки создания феноменологической теории. Ими было предложено уравнение, описывающее поведение сверхпроводника с током, помещенного в магнитное поле.

Созданная братьями Лондонами теория была дополнена и впоследствии названа классической. Она постулировала известные на тот момент экспериментально наблюдаемые свойства сверхпроводящих материалов. Фундаментальными, наиболее значимыми свойствами, характеризующими электродинамику, можно считать отсутствие электрического сопротивления и вытеснение магнитного поля из объема, занятого сверхпроводником.

Еще тогда было понятно, что экспериментальное определение сопротивления материала не гарантирует равенство этой величины нулю. Можно лишь утверждать, что сопротивление образца ниже уровня чувствительности метрологического оборудования. Камерлинг-Оннес определил, что при переходе в сверхпроводящее состояние сопротивление образцов снижалось минимум в 10^{12} раз. Современное измерительное оборудование показывает, что удельное сопротивление образцов снижается минимум в 10^{18} раз [4]. Однако в плане практического применения такой перепад сопротивления позволяет обеспечивать работу сверхпроводящих систем после ввода тока в течение долгого времени.

В рамках классической теории был введен принцип квантования магнитного потока, который связывает постоянную Планка и заряд частицы, называемой квантом магнитного потока, или флюксоидом. Принцип квантования стал одним из главных достижений классической теории, поскольку предполагал, что энергия магнитного поля превышает кинетическую энергию заряженных частиц в проводнике. Некоторые ученые высказывали гипотезу, что принцип квантования не в полной мере учитывает механизмы переноса сверхпроводящего тока и переносчиками этого тока на самом деле являются электронные пары. Эти гипо-

тезы были интуитивными, но не могли быть строго обоснованы теоретически, хотя были вскоре доказаны американскими учеными Б. Дивером и В. Фербенком [10].

Следует отметить, что помимо развития индивидуальной теоретической базы сверхпроводимости и объяснения возникающих эффектов, требовалось отстаивать справедливость каждой теории с точки зрения классической термодинамики, которая имела большой авторитет в научном сообществе.

Нелокальная электродинамика. Теория Гинзбурга – Ландау

Связь между электрическим током в сверхпроводящем материале и связанным с ним магнитным полем в классической теории определялась уравнением Лондонов. Поскольку плотность электрического поля зависит от характеристик магнитного поля, американский ученый Б. Пиппард в 1953 г. заметил, что в сверхпроводниках должен наблюдаться эффект некой пространственной неопределенности в положении и скорости электронов проводимости, которая объясняется тем, что в момент воздействия на заряженную частицу электрического поля эта частица уже имеет некоторую ненулевую скорость, вызванную тепловым движением. Поэтому дополнительный ток, связанный с направленным перемещением этой частицы, возникнет в точке, координаты которой не совпадают с точкой приложения электрического поля. Отсюда следует, что связь между напряженностью электрического поля и плотностью тока является, вообще говоря, нелокальной и наблюдается нарушение закона Ома в дифференциальном виде.

Пиппард сделал предположение, что нарушения закона Ома могут быть заметны только на расстояниях, сравнимых с длиной свободного пробега электрона в проводнике, т.е. нескольких десятков нанометров. Для количественного описания характерного расстояния, на котором сверхпроводящий электрон реагирует на изменение внешнего магнитного поля, им была введена такая характеристика, как параметр порядка или длина когерентности сверхпроводника. Физический смысл этой характеристики – скорость изменения концентрации сверхпроводящих электронов.

Продолжили развивать теорию Пиппарда В.Л. Гинзбург и Л.Д. Ландау, которые ввели параметр, характеризующий отношение глубины проникновения магнитного поля в сверхпроводник к глубине когерент-

ности Пиппарда. Было установлено, что параметр Гинзбурга – Ландау существенно зависит от чистоты металла. Так, для особо чистых металлов этот параметр много меньше единицы, а для загрязненных – несколько десятков. Преимущественно все высокотемпературные сверхпроводники имеют значения параметра Гинзбурга – Ландау порядка сотен и тысяч [14].

Параметр Гинзбурга – Ландау был введен не случайно, от его величины зависят значения поверхностной энергии сверхпроводника, которая может принимать отрицательные значения, когда параметр меньше единицы, и положительные – в противном случае. На этом основании было проведено разделение всех сверхпроводников на два типа, обладающих существенно отличными свойствами. Все сверхпроводники с параметром Гинзбурга – Ландау, большим единицы, относят к сверхпроводникам первого рода, а с меньшим единицы – к сверхпроводникам второго рода.

Установлено, что сверхпроводники первого рода не могут эффективно использоваться в электротехнике, поскольку незатухающие токи протекают только у границы раздела сверхпроводящей и нормальной фаз, которая для этих сверхпроводников отсутствует вовсе или имеет минимальную толщину. Сверхпроводники второго рода, напротив, имеют широкую границу раздела фаз, поскольку это энергетически выгодно. Сверхпроводящая фаза в таких материалах дробится на индивидуальные чередующиеся нормальные и сверхпроводящие зоны. Внешнее магнитное поле будет проходить через нормальные участки этого материала. Незатухающие токи могут проходить по всему объему проводника, так как граница раздела может занимать весь объем проводника. Для проводников второго рода эффект Мейснера на макроскопическом уровне не выполняется и магнитное поле проникает в проводник уже с малых ненулевых значений. Такие сверхпроводники активно применяются в силовых электротехнических системах.

А.А. Абрикосов в своих работах показал, что в результате действия сил отталкивания и направления токов вихри в сверхпроводнике в смешанном состоянии выстраиваются в правильную треугольную решетку. Впоследствии было установлено, что повышение магнитного поля приводит к сближению вихрей и в момент, когда расстояние между центрами вихрей становится равным диаметру нормального участка, они соединяются и образуют макроскопическую нормальную область. В этом случае сверхпроводимость разрушается, а поле, при котором происходит слияние вихрей, называют вторым критическим полем.

В 1963 г. Д. Сан-Жам и П. Де Жен установили, что на границе сверхпроводник – изолятор в параллельном магнитном поле существует сверхпроводящий слой порядка длины когерентности Пиппарда вплоть до напряженности поля, которое называют третьим критическим полем, причем напряженность этого поля больше напряженности второго критического поля в 1,695 раза [10].

Микроскопическая теория сверхпроводимости

Теоретические результаты, следующие из дополненной нелокальной теории Пиппарда, не объясняют природу сверхпроводимости, а все создаваемые новые теории сверхпроводимости так или иначе опираются на положения, введенные Лондонами. Ученые осознавали потребность в принципиально новой отправной точке, на основе которой можно было бы сложить теорию, не опираясь на два базовых свойства сверхпроводников. Поэтому в течение следующих 15 лет теория сверхпроводимости развивалась медленно: накапливались экспериментальные данные, совершенствовались метрологическое оборудование и криогенная техника.

Постепенное накопление экспериментальных данных о свойствах материалов при низких температурах происходило в основном в ходе изучения кристаллической решетки сверхпроводящих материалов рентгеноскопическим анализом, исследования изотопического эффекта (температура перехода у изотопов вещества обратно пропорциональна массе, возведенной в некоторую степень), изучения коэффициента отражения электромагнитного излучения от поверхности сверхпроводящих материалов.

На основании этих исследований и теорий, созданных в области сверхтекучести, формировалось понимание микроскопических процессов в сверхпроводящих материалах. Поскольку имелись средства для рентгеноскопического анализа, было установлено, что при переходе из нормального состояния в сверхпроводящее кристаллическая решетка металлического образца не изменяется. Это натолкнуло на мысль, что природу сверхпроводимости следует искать не в свойствах кристаллической решетки, а в явлениях, происходящих в электронном газе при низких температурах. Так феноменологическая теория Лондонов отошла на второй план, а давно созревающая микроскопическая теория была на подходе.

Изотопический эффект указывал на то, что ионная решетка в большей степени влияет на свойства сверхпроводника. Начиная с 1938 г.

П.Л. Капицей активно развивается теория сверхтекучести, которая опирается на статистику Бозе – Эйнштейна и явление Бозе-конденсации [10]. Изучаются свойства квантовой жидкости He^3 , атом которого имеет полуцелый спин и, следовательно, является фермионом, поэтому жидкая фаза этого вещества не может быть сверхтекучей. Позднее Д. Ли, Д. Ошерофф и Р. Ричардсон показали переход третьего изотопа гелия в сверхтекучее состояние при температуре 0,002 К. Это явление было объяснено: при сверхнизких уровнях температуры атомарный изотоп третьего гелия объединяется в молекулярный, который имеет нулевой суммарный спин и способен переходить в сверхтекучую фазу. Поскольку термин «квантовая жидкость» может быть применен не только к жидкостям, но и к более плотным коллективным частицам, то и электронный газ в металлах также может рассматриваться в качестве квантовой жидкости.

Большинство ученых замечали очевидную схожесть явления сверхтекучести и сверхпроводимости, но не могли объяснить тот факт, что электроны сами по себе имеют полуцелый спин и являются фермионами, т.е. не могут быть сверхтекучим Бозе-конденсатом.

Следующим важным этапом в развитии микроскопической теории стало введение модели свободных электронов проводимости, которые слабо взаимодействуют как друг с другом, так и с узлами кристаллической решетки. То есть эта модель предполагает аналогию между поведением электронов и поведением молекул газа в классической термодинамике, и это позволяет говорить об относительно редких столкновениях между электронами, в результате которых могут изменяться их энергия и скорость. Считалось, что электрон в промежутке между столкновениями движется с неизменной скоростью, как свободная частица. Но все это происходит внутри плотно упакованной ионной решетки. Однако такое допущение было оправданным, поскольку, во-первых, масса ионов значительно превосходит массу электронов и, во-вторых, ионная решетка периодична, поэтому существуют некоторые выделенные направления, вдоль которых электрон не встречает сопротивления со стороны ионов в узлах решетки.

Такая модель позволяла воспользоваться математическим аппаратом квантовой механики, представляя волновой характер движения частиц. При этом волновая функция частиц будет удовлетворять уравнению Э. Шредингера, введенному в 1926 г. Статистический характер заполнения энергетических уровней показывает, что при низких температурах почти все электроны обладают энергией Ферми и их скорость имеет величину порядка 10^6 м/с.

Помимо рассмотрения электронов проводимости, ученые обратили внимание и на физические явления, происходящие в кристаллической решетке сверхпроводника. В рамках классической теории твердого тела кристалл представляется в виде периодической решетки, узлами которой могут быть нейтральные атомы или положительно заряженные ионы, причем последнее наиболее характерно для металлов. Силами взаимодействия между ионами являются силы кулоновского отталкивания. Так как кристаллическая решетка погружена в электронный газ, весь кристалл оказывается электрически нейтральным.

Поскольку между соседними ионами возникает сильное взаимодействие, ионы совершают коллективные колебания относительно положения равновесия. И эти колебания происходят даже при минимально возможной температуре с минимально возможной энергией. Тогда возникающее в кристаллической решетке возмущение распространяется по кристаллу со скоростью звука, и оно описывается квантовой механикой как представление о фононах – квазичастицах, переносящих энергию и импульс в объеме кристалла.

Опираясь на рассуждения, изложенные выше, и применив аппарат квантовой механики, П. Дебай определил температуру (температура Дебая), когда энергия фононов приобретает максимальное значение (энергия Дебая). Определение температуры Дебая имело большую значимость для изучения сверхпроводимости, поскольку ниже этой температуры все эффекты в кристаллической решетке описываются в основном законами квантовой механики [4].

В 1950 г. Г. Фрелих на основании экспериментальных результатов, указывающих на важную роль взаимодействия электронов и ионов кристаллической решетки в возникновении сверхпроводимости, показал, что при низких температурах такое взаимодействие может привести к образованию сил притяжения между двумя электронами. Эта идея вызвала большой резонанс, поскольку притяжение двух одинаковых зарядов считалось невозможным, и позволила значительно приблизиться к пониманию природы сверхпроводимости. Было дано следующее объяснение. При нулевой температуре свободный электрон с некоторым импульсом перемещается по кристаллу, в какой-то момент он сталкивается с узлом ионной решетки. В результате этого возникают упругие колебания с некоторой частотой или формируется фонон с некоторыми энергией и импульсом. Этот возникший в результате рассеяния электрона фонон поглощается другим свободным электроном, который изменит свои энергию и импульс.

В данном случае полностью выполняется закон сохранения импульса и энергии.

В 1956 г. Л. Купер указал, что возникновение силы притяжения между двумя электронами может привести к образованию так называемого связанного состояния [2]. Такие связанные состояния были названы куперовскими парами. Каждая пара, образованная двумя электронами с полуцелыми спинами, будет обладать целым, а вообще говоря, нулевым спином. Это позволяет говорить о том, что совокупность таких пар в сверхпроводнике формирует квантовую жидкость, которая подчиняется статистике Бозе – Эйнштейна. При переходе в сверхтекучее состояние эта квантовая жидкость может беспрепятственно и без взаимодействия с решеткой кристалла перемещаться в объеме сверхпроводника. Поскольку жидкость образована заряженными частицами, ее перемещение будет сопровождать незатухающий электрический ток.

Микроскопическая теория сверхпроводимости известна в научном мире как теория Бардина – Купера – Шриффера, так как именно эти ученые внесли значительный вклад в ее развитие. Позже было установлено, что существует предельное значение переносимого сверхпроводником тока, которое называется током распаривания. Этот ток может иметь значения порядка тысячей килоампер на квадратный сантиметр, что на три-четыре порядка больше предельной плотности тока в медных проводниках.

Сверхпроводимость, криогеника и крионика

Получение искусственным способом низких температур начинается с 1740 г, когда М.В. Ломоносов описал и объяснил эффект охлаждения при смешении льда и поваренной соли. После этого с 1877 г. началось активное изучение методов адиабатного расширения для получения температур, близких к температурам насыщения газов, входящих в состав воздушной смеси. Уже через 12–15 лет стали применяться методы вакуумирования для получения более низких температур. В 1908 г. Камерлинг-Оннес получил жидкий гелий, а в 1919 г. вакуумированием гелия он получил температуру порядка 1 К [1].

Именно на этом этапе развития криогеники ученые смогли обнаружить ранее неизвестное явление – сверхпроводимость. Несмотря на достигнутый температурный уровень жидкого гелия, особо остро стоял вопрос снижения удельных затрат энергии. Обеспечение криостатирования на установленном температурном уровне требовало колоссальных затрат

энергии, повышения надежности машин и аппаратов, качества тепловой изоляции и развития вакуумной техники и вакуумных технологий. Также большое значение имело создание точного метрологического оборудования для фиксации термодинамических параметров с приемлемым уровнем точности.

Прикладная сверхпроводимость развивалась замедленным темпом. К тому моменту, когда сформированные теории объясняли большинство свойств сверхпроводников, их практическое применение было ограничено достижениями криогеники. Преимущественно как наука криогеника развивалась тогда, когда возникала необходимость в создании определенных условий для функционирования других систем, для определения макроскопических параметров фазовых переходов веществ и т.д. Это позволило криогенике всегда находиться в центре внимания научного сообщества и наполняться теоретическим и эмпирическим знанием.

В середине прошлого столетия на фоне активного развития криогеники стала развиваться крионика, которая подняла этические вопросы применения криогеники для сохранения биологического материала животных и людей в течение длительного времени с последующим «оживлением». В 1956 г. во Франции Л. Рэ продемонстрировал «оживление» сердца куриного эмбриона после его пребывания в жидком азоте в течение нескольких месяцев [5]. Книга Л. Рэ «Консервация жизни холодом» с подробным описанием методики обезвоживания и замораживания была переведена на русский язык и издана в 1962 г. Спустя два года Р. Эттингер издал книгу «Перспективы бессмертия» [8] и положил начало современной крионике.

Научное сообщество разделилось на два лагеря: тех, кто считает подобные эксперименты допустимыми, и тех, кто считает аморальным и лженаучным подобную спекуляцию на жизни и смерти. Это стало причиной недоверия к криогенным технологиям у общества и, как итог, причиной снижения темпов развития прикладной сверхпроводимости.

Сегодня существует большое количество коммерческих компаний, которые предлагают услуги по проведению криостазы головного мозга или всего тела. Этот процесс включает несколько этапов: 1) введение в сердечно-сосудистую систему химического раствора – криопротектора, который должен уменьшить повреждения тканей при замораживании; 2) постепенное охлаждение до температуры жидкого азота; 3) помещение в криостат для долгосрочного хранения;

4) ревитализацию через 50–125 лет, когда нанотехнологии будут способны восстановить поврежденные ткани, а органы, пострадавшие при жизни, будут выращены искусственно.

Для образованного человека не вызывает сомнения тот факт, что даже в случае введения криопротектора в кровеносную систему не существует режимов охлаждения, при которых удастся сохранить более 10–15% клеточных структур организма. Это хорошо изучено на заморозке мяса крупного рогатого скота, даже при применении технологии «шокового» охлаждения [9]. При этом мясо почти полностью теряет питательные качества и свойства «жизни».

Стоит отметить, что технология консервации биологического материала людей и животных в настоящее время позволяет сохранять и впоследствии воспроизводить из него потомство. В 2002 г. был рожден первый ребенок из биоматериала, подверженного консервации в течение более 20 лет.

С другой стороны, необходимо рассмотреть моральную сторону крионики, которая в настоящий момент опирается на фантастические представления о будущем, когда будут существовать технологии искусственного выращивания органов и нанотехнологии для восстановления поврежденных клеток. Зачастую люди, которые обращаются за подобными услугами, особо чувствительны к вопросу смерти – не только собственной, но и своих близких или домашнего питомца. Надежда сохранить и вернуть к жизни дорогого им человека ослепляет их, чем активно пользуются те, кто предлагает такие услуги, по сути – мошеннические. В Российской Федерации подобная деятельность давно привлекает внимание Комиссии по борьбе с лженаукой и фальсификацией научных исследований РАН.

Описанные обстоятельства послужили причиной переосмысления возможности применения и развития подобных технологий в рамках криогеники в целом. Внимание ученого сообщества не могло фокусироваться на локальных проблемах, в то время как поднимались такие серьезные темы, что не могло не сказаться на темпах развития наук, опирающихся на достижения криогеники.

Военное приложение сверхпроводимости

Для правительства США еще с середины прошлого столетия стало обычной практикой формирования правительственных программ развития и финансирования перспективных научных направлений и проектов,

имеющих общегосударственное значение. В подтверждение этого можно вспомнить манхэттенский проект, программу полета на Луну, создание инструментов на основе арсенида галлия и др. Поэтому программа исследования сверхпроводимости стала естественным продолжением устоявшейся политики.

В 1989 г. была представлена программа финансирования разработок в области сверхпроводимости. Основное участие в составлении этой программы принимал Комитет по материалам (Committee on Material, СОМАТ). В таблице показаны объемы средств, выделенных на финансирование этой программы. Особое внимание следует обратить на процентное соотношение средств, направленных на разработки для Министерства обороны, для Министерства энергетики и разработки в других областях.

Финансирование разработок в области сверхпроводимости
в США в 1988–1991 гг., тыс. долл. (%)

Статья расходов	Высокотемпературные сверхпроводники				Низкотемпературные сверхпроводники			
	1988	1989	1990	1991	1988	1989	1990	1991
Министерство обороны	43 700 (69,6)	58 000 (45,0)	75 200 (49,1)	61 500 (43,0)	16 100 (31,1)	15 000 (25,5)	20 000 (31,6)	13 200 (16,5)
Министерство энергетики	26 238 (28,3)	38 493 (29,9)	42 964 (28,1)	43 300 (30,3)	28 627 (55,3)	36 073 (61,2)	34 970 (55,2)	61 800 (77,4)
Другие направления	22 850 (24,6)	32 350 (25,1)	34 950 (22,8)	38 200 (26,7)	7 020 (13,6)	7 857 (13,3)	8 370 (13,2)	4 800 (6,1)
Итого	92 788	128 843	153 114	143 000	51 747	58 930	63 340	79 800

Источник: [3].

Из таблицы видно, что, во-первых, после открытия высокотемпературных сверхпроводников многократно возрос объем финансирования этого направления. Во-вторых, к финансированию были привлечены большинство федеральных ведомств, хотя основными заказчиками являлись Министерство обороны и Министерство энергетики. В-третьих, финансирование зачастую выделялось не компаниям или университетам, а конкретной группе исполнителей, т.е. поддерживались любые разработки в этой области.

К 1991 г. правительство США оценило потенциальные возможности сверхпроводниковых устройств. Стало понятно, что эти возможно-

сти не настолько велики, но многомиллионные вложения значительно способствовали развитию исследований сверхпроводимости.

Очевидно, задача программы финансирования состояла в изучении прикладных аспектов сверхпроводимости для последующего создания устройств и систем, обеспечивающих военное превосходство. К счастью, использование достижений прикладной сверхпроводимости в создании оружия не принесло успехов. Однако косвенно добиться желаемого эффекта все же удалось: были созданы сверхчувствительные детекторы магнитного поля, перспективные подвесы и приводы для транспорта, разработаны методы экранирования радиоактивного излучения при применении ядерного оружия. Последнее дает возможность допустить использование такого оружия, поскольку имеется защита от его воздействия.

* * *

После того как в 1911 г. Х. Камерлинг-Оннес открыл сверхпроводимость, долгое время не существовало никакого теоретического описания этого явления. Значительный вклад в развитие исследований сверхпроводимости внесли братья Ф. и Х. Лондоны, которые в 1935 г. сформировали феноменологическую теорию электродинамических свойств, положив в ее основу представление о диамагнетизме сверхпроводников. В 1953 г. Б. Пиппард высказал гипотезу о неопределенности пространственного положения и скорости электронов проводимости, тем самым определив новое направление в описании сверхпроводимости – нелокальную электродинамику.

Таким образом, можно сказать, что развитие теории сверхпроводимости протекало без формирования отчетливо выраженных противоборствующих лагерей. В какой-то момент большинству ученых стало понятно, что микроскопическая теория действительно отвечает на интересующие их вопросы. Однако основным фактором, мотивирующим к дальнейшим поискам, стало стремление объяснить первопричину такого сложного явления, как сверхпроводимость.

В ходе своего развития теория сверхпроводимости столкнулась с проблемами, которые повлияли на темпы ее развития. Так, в период Первой мировой войны в течение более семи лет не было никаких существенных продвижений в этой области, поскольку требовалось решать более важные вопросы. Отмечены влияние уровня развития криогенной техники и криогенных технологий, перспективы применения явлений сверхпроводимости в военной сфере и влияние этого фактора на финансирование науки.

Темп развития любой области науки в большой степени зависит от соответствия ее достижений запросам политического аппарата. Необходим аргумент, ответ на вопрос: зачем финансировать то, что не дает видимого результата здесь и сейчас или в обозримом будущем? Нужно понимать, что качественные изменения в науке возможны только при наличии достаточного финансирования. Для создания таких условий требуется стратегическое мышление у людей, которые влияют на это, что, к сожалению, бывает в действительности крайне редко.

Литература

1. Архаров А.М., Марфенин И.В., Микulin Е.И. Криогенные системы: Учебник для студентов вузов по специальности «Техника и физика низких температур»: В 2 т. Т. 1: Основы теории и расчета. – М.: Машиностроение, 1996.
2. Бардин Дж., Шриффер Дж. Новое в изучении сверхпроводимости / Пер. Н.И. Гинзбург; под ред. В.Л. Гинзбурга и Л.П. Горькова. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1962.
3. Казаков А.П., Фертман А.Д. Федеральная программа США по финансированию исследований в области сверхпроводимости в 1988–1990 гг. Высокотемпературная сверхпроводимость // Межотраслевой научно-технический сборник. – 1990. – № 3–4.
4. Калимов А.Г. Физические основы сверхпроводимости. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2007. – URL: <http://eb.arsu.kz:81/pdf/foreign/fl803201638.pdf> (дата обращения: 12.04.2021).
5. Пэ Л. Консервация жизни холодом. – М.: Медгиз, 1962.
6. Сверхпроводящее соединение ниобий-олово: Сб. статей / Пер. с англ. И.В. Бутова, В.Я. Пахомова, М.Г. Чудинова под ред. В.В. Шмидта. – М.: Металлургия, 1970.
7. Уилсон М. Сверхпроводящие магниты. – М.: Мир, 1985.
8. Эттингер Р. Перспективы бессмертия. – М.: Научный мир, 2002.
9. Kiani H., Zheng L., Sun D.-W. Ultrasonic Assistance for food freezing // *Emerging Technologies for Food Processing*. – Academic Press, 2014. – P. 495–513.
10. *Theory of High Temperature Superconductivity* / Ed. by S. Fujite, S. Godoy. – Kluwer Academic Publishers, 2001.

References

1. Arkharov, A.M., I.V. Marfenina & E.I. Mikulin. (1996). Kriogennyye sistemy: Uchebnik dlya studentov vuzov po spetsialnosti «Tekhnika i fizika nizkikh temperatur»: V 2 t. T. 1: Osnovy teorii i rascheta [Cryogenic Systems: Textbook for university students in the specialty “Low Temperature Technology and Physics”: In 2 vol. Vol 1: Fundamentals of Theory and Calculation]. Moscow, Mashinostroenie Publ.
2. Bardeen, J. & J. Schrieffer. (1962). Novoe v izuchenii sverkhprovodimosti [Recent Developments in Superconductivity]. Transl. by N.I. Ginzburg, ed. by V.L. Ginzburg & L.P. Gorkov. Moscow, Gosudarstvennoe izdatelstvo fiziko-matematicheskoy literatury [State Publishing House of Physical and Mathematical Literature]. (In Russ.).
3. Kazakov, A.P. & A.D. Fertman. (1990). Federalnaya programma SShA po finansirovaniyu issledovaniy v oblasti sverkhprovodimosti v 1988–1990 gg. Vysokotemperaturnaya sverkhprovodi-

most [US Federal Superconductivity Research Funding Program 1988–1990. High-temperature superconductivity]. In: *Vysokotemperaturnye sverkhprovodniki: Mezhdistsiplinarnyy nauchno-tekhnicheskiiy sbornik* [High-temperature Superconductors: Interdisciplinary Scientific and Technical Collection], No. 3-4.

4. *Kalimov, A.G.* (2007). *Fizicheskie osnovy sverkhprovodimosti* [Physical Foundations of Superconductivity]. St. Petersburg, St. Petersburg State University Publ. Available at: <http://eb.arsu.kz:81/pdf/foreign/f1803201638.pdf> (date of access: 12.04.2021).

5. *Rey, L.* (1962). *Konservatsiya zhizni kholodom* [Conservation of Life by Cold]. Moscow, Medgiz Publ. (In Russ.).

6. *Sverkhprovodyashchee soedinenie niobiy-olovo: Sb. statey* [Superconducting Niobium-Tin Compound: Collection of Works]. (1970). Transl. from English by I.V. Burov, V.Ya. Pakhomov & M.G. Chudinov, ed. by V.V. Schmidt. Moscow, Metallurgiya Publ. (In Russ.).

7. *Wilson, M.* (1985). *Sverkhprovodyashchie magnity* [Superconducting Magnets]. Moscow, Mir Publ. (In Russ.).

8. *Ettinger, R.* *Perspektivy bessmertiya* [The Prospect of Immortality]. Moscow, Nauchnyy Mir Publ. (In Russ.).

9. *Kiani, H., L. Zheng & D. Sun.* (2014). Ultrasonic assistance for food freezing. In: *Emerging Technologies for Food Processing*. Academic Press, 495–513.

10. *Fujite, S. & S. Godoy* (Eds.). (2001). *Theory of High Temperature Superconductivity*. Kluwer Academic Publishers.

Информация об авторах

Мамедов Владислав Марсельевич – инженер отдела ЭМ 2.1 НИИ ЭМ «Поршневые двигатели», аспирант кафедры Э-4 «Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения», Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5)
mamedov-vm@bk.ru

Архаров Иван Алексеевич – доктор технических наук, профессор, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5)
arkharov@bmstu.ru

Information about the authors

Mamedov Vladislav Marselevich – Engineer of the Department of the Research Institute «Piston Engines», postgraduate student of the Department «Refrigeration and cryogenic equipment, air conditioning and life support systems», Bauman Moscow State Technical University (5, 2nd Baumanskaya st., Moscow, 105005, Russia)
mamedov-vm@bk.ru

Arkharov Ivan Alexeevich – Doctor of Sciences (Technical), Professor, Bauman Moscow State Technical University (5, 2nd Baumanskaya st., Moscow, 105005, Russia)
arkharov@bmstu.ru

Дата поступления 05.08.2021