

ПЕТР ЛЕОНИДОВИЧ КАПИЦА – ОСНОВОПОЛОЖНИК ТЕХНИКИ СИЛЬНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Баранов М.И., д.т.н.

НИПКИ "Молния" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт"
Украина, 61013, Харьков, ул. Шевченко, 47, НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ"
тел. (057) 707-68-41, факс (057) 707-61-33, E-mail: nipkimolnija@kpi.kharkov.ua

Наведено короткий історичний нарис з проблеми отримання сильних постійних та імпульсних магнітних полів. Відзначено значний вклад визначного радянського фізика-експериментатора Капиці П.Л. в рішення даної проблеми.

Приведен краткий исторический очерк по проблеме получения сильных постоянных и импульсных магнитных полей. Отмечен значительный вклад выдающегося советского физика-экспериментатора Капицы П.Л. в решение данной проблемы.

*Выдающемуся физика XX столетия,
академику АН СССР Капице Петру
Леонидовичу посвящается.*

вещества ограниченного объема СПМП с напряженностью практически лишь до уровня не более 250 кЭ, то есть получать постоянные поля с магнитной индукцией до 25 Тл [1,2].

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы важное научно-прикладное значение приобрела техника сильных магнитных полей, ставшая по существу самостоятельной электротехнической дисциплиной, но не утратившая своих крепких "родовых" связей с классической электротехникой [1-4]. Данная область человеческих знаний по способам получения и достигаемым амплитудно-временным параметрам (АВП) напряженности магнитного поля может быть разделена на две существенно отличающиеся друг от друга по своей внутренней природе подобласти: техника сильных постоянных магнитных полей (СПМП) и техника сильных импульсных магнитных полей (СИМП) [1-3].

При создании СПМП обычно используются магниты постоянного тока с рабочими объемами для объектов испытаний, выполненные с нормальной или сверхпроводящей обмотками. Так, например, магнит с нормальной обмоткой Национальной магнитной лаборатории США, создававший в свое время в воздушном объеме рекордное постоянное магнитное поле напряженностью 226 кЭ [5], питается от генератора постоянного тока со средней мощностью в 10 МВт, который может развивать мощность и в 16 МВт, но только в течение одной минуты. При этом расход технической воды для охлаждения такого магнита составляет около 1800 л/мин. СПМП применяются в физических исследованиях, связанных с изменением магнитных моментов атомов и их ядер, элементарных частиц (электронов, позитронов и др.), а также с изучением свойств свободных электронов в твердом теле и носителей зарядов в низкотемпературной плазме. Кроме того, с помощью СПМП проводятся медицинские и биологические исследования, осуществляются эксперименты по циклотронному резонансу в ядерной физике, исследуются магнитоакустические эффекты и межзонные поглощения применительно к энергетическим уровням атомов в полупроводниках [1,5]. Существующие ныне методы генерирования магнитных полей и электротехнические материалы позволяют надежно создавать в твердых, жидких и газообразных



*Петр Леонидович Капица (1894г.–1984г.)
(Фото в период его работы в Кавендишской лаборатории
при Кембриджском университете)*

Мировой опыт в области СПМП и СИМП показал, что для создания магнитных полей напряженностью свыше 250 кЭ пригодными остаются только импульсные методы [2]. Впервые идею получения СИМП выдвинул и практически осуществил ее в 1923 году в Англии (г. Кембридж) наш соотечественник

Петр Капица [6]. В своих работах, ставшими классическими, Капица П.Л. получил СИМП миллисекундной длительности с рекордной на многие годы напряженностью до 350 кЭ в рабочем воздушном объеме соленоида не более 2 см^3 [6-9]. При помощи данных полей им были проведены обширные физические исследования ряда явлений, связанных с эффектами Зеемана и Пашена-Бака, изменением электропроводности большой номенклатуры металлов, поведением магнитной восприимчивости и магнитострикции различных материалов в СИМП, а также с изучением треков α -частиц в камере Вильсона [6-10]. Одним из важных научных результатов, полученных Капицей П.Л. в ходе этих исследований свойств различных веществ в СИМП, явилось открытие им в 1928 году линейного закона для изменения электрического сопротивления ряда металлов в СИМП [10].

Что касается современных областей применения СИМП, то к ним, в частности, можно отнести [3,4]: импульсные ускорители плазмы; сильноточные газоразрядные источники света; ускорители заряженных частиц для ядерных исследований; высокие электрофизические технологии (например, магнитно-импульсная обработка металлов; практическое использование эффектов электрического взрыва проводников большими импульсными токами и др.).

Остановимся ниже вкратце на наиболее важных событиях из личной и научно-технической жизни Капицы П.Л., а также на основных особенностях и путях получения им указанных выше СИМП.

ПЕТРОГРАДСКИЙ ПЕРИОД РАБОТЫ

Родился Петр Леонидович Капица 9 июля 1894 года в г. Кронштадте в семье военного инженера-строителя. В 1919 году закончил Петроградский политехнический институт и в этом же году начал свою учебно-научную деятельность в вышеуказанном институте на кафедре известного ученого-физика, профессора Иоффе А.Б. (в будущем академика АН СССР) в должности преподавателя физики на физико-механическом факультете. В 1916 году в своей первой оригинальной научной работе [11] Капица П.Л. разработал новый метод приготовления волластоновских нитей – тонких (толщиной менее одного микрона) платиновых или золотых проволочек, основанный на их протяжке в серебряной оболочке с последующим ее растворением с помощью применения процесса электролиза. В следующей работе [12] Капицей П.Л. была предложена оригинальная модель рентгеновского спектрометра. Далее совместно с Семеновым Н.Н. (будущим академиком АН СССР, лауреатом Нобелевской премии в области химии) Капица П.Л. разрабатывает экспериментальный способ определения магнитного момента атома, базирующийся на взаимодействии молекулярного пучка вещества с неоднородным магнитным полем [13].

КЕМБРИДЖСКИЙ ПЕРИОД РАБОТЫ

В 1921 году Капица П.Л. с группой российских ученых был командирован для научной стажировки в Англию, где он долгое время работал в Кавендишской научной лаборатории при Кембриджском университе-

те. Как известно, эту лабораторию в годы пребывания Капицы П.Л. за границей возглавлял всемирно известный физик, лауреат Нобелевской премии по химии за 1908 год Эрнст Резерфорд. В 1923 году в г. Кембридже Капица П.Л. успешно защищает докторскую диссертацию на тему "Прохождение α -частиц через вещество и методы получения магнитных полей". В этом же году ему была присуждена ученая степень доктора философии Кембриджского университета и он получает трехлетнюю стипендию имени Дж. К. Максвелла. Следует отметить, что на этот "заграничный период" работы приходятся основные технические достижения Капицы П.Л. в области получения СИМП и экспериментальных исследований в этих полях. В комплексе эти исследования заложили физико-технический фундамент для дальнейших научно-исследовательских работ в указанных областях науки и техники и сохраняют свою актуальность и по сей день.

В связи с тем, что в первой половине XX века основными источниками импульсного тока большой силы были магнитные индукторы, батареи аккумуляторов и специальные генераторы переменного тока [1,2], то Капица П.Л. вначале своих работ по проблеме СИМП предпринял попытку создания магнитного индуктора, состоящего из массивного железного сердечника и двух обмоток [1]. Первичная обмотка такого индуктора с большим числом витков включалась в цепь источника постоянного тока. Вторичная обмотка магнитного индуктора с малым числом витков подключалась к нагрузке-соленоиду, изготовленной из нормальной токопроводящей шины. Опыты по получению СИМП в соленоиде с таким магнитным индуктором не удалось из-за больших потерь магнитной энергии первичной обмотки с железным сердечником индуктора на мощную электрическую искру (дугу), образующуюся при размыкании механическим выключателем первичной обмотки магнитного индуктора с постоянным током.

Затем Капица П.Л. занялся конструированием специальных кислотно-свинцовых аккумуляторов с малой емкостью C_A и малым внутренним сопротивлением R_A . При разряде созданной им новой мощной батареи аккумуляторов на нагрузочное сопротивление $R_H=0,02 \text{ Ом}$, равное внутреннему сопротивлению батареи аккумуляторов $R_A=0,02 \text{ Ом}$, на нагрузке-соленоиде выделялась мощность примерно в 1 МВт при амплитуде разрядного тока, равной около 7 кА [1,7,14]. Созданная батарея аккумуляторов эксплуатировалась около одного года и с ее помощью в соленоиде, навитом медной лентой, при комнатной температуре $\theta_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ было получено СИМП напряженностью в 125 кЭ. При охлаждении медной ленты указанного соленоида жидким азотом АВП напряженности СИМП достигали до 250 кЭ при длительности получаемого импульса магнитного поля около 25 мс.

Далее Капица П.Л. для получения больших амплитудных значений напряженности СИМП совместно с английской фирмой "Метрополитен-Виккерс" конструирует специальный мотор-генератор, позволяющий получать в импульсе на нагрузке-соленоиде

(катушке без сердечника) равного генератору импеданса мощность не менее 50 МВт [9,14,15]. В данном генераторе механическая (кинетическая) энергия массивного ротора при замыкании обмотки генератора на малое нагрузочное сопротивление соленоида (режим близкий к короткому замыканию) превращалась в электромагнитную энергию в виде токового импульса большой амплитуды. Этот мотор-генератор или как его еще называют ротор-генератор, созданный под непосредственным техническим руководством Капицы П.Л., имел металлический ротор диаметром 0,5 м и весом 2,5 т, который мог вращаться со скоростью до 3500 об/мин. Ротор мотор-генератора приводился во вращение двигателем постоянного тока мощностью в 60 кВт. Каждая из двух обмоток возбуждения мотор-генератора питалась от собственного генератора постоянного тока мощностью 6 кВт. Собственный вес мотор-генератора составлял 13 т, а его изолированного бетонного фундамента – 30 т. Фундамент мотор-генератора покоился на скальном основании с вибропоглощающей подушкой из масколита–специального антивибрационного материала, изготавливаемого из войлока и пробки. Все это было необходимо для того, чтобы самортизировать электродинамический удар, возникающий при закорачивании на рабочий соленоид обмотки мотор-генератора. При испытаниях разработанного мотор-генератора в его нагрузке-соленоиде был получен максимальный импульсный ток в 72 кА при электрическом напряжении в 2,25 кВ, что соответствовало пиковой мощности 162 МВт [9,14]. При работе мотор-генератора соленоид с объектом исследования размещался в 20 м от него. Обмотка мотор-генератора с соленоидом соединялась при помощи надежно закрепленных и бифилярно расположенных шести массивных медных шин (по три к каждому изолированному друг от друга полюсу–потенциальному и токовому), в которых терялось до 4% общей мощности мотор-генератора [14].

Рабочий соленоид для мотор-генератора был разработан Капицей П.Л. совместно с известным английским физиком Дж. Д. Кокрофтом [14,16]. Соленоид конструировался таким образом, чтобы максимальная температура витков его токопроводящей обмотки (катушки) не превышала из тепловых условий работы ее изоляции 150°C. Токопроводящая обмотка была выполнена из ленты толщиной 5мм, материалом которой служил медно-кадмиевый сплав (медь Cu – 98%; кадмий Cd – 2%). Медно-кадмиевая лента была специально изготовлена английской фирмой "Томас Болтон". Добавка кадмия Cd уменьшала электропроводность ленты на 10%, но вчетверо увеличивала ее механическую прочность на разрыв. Плотность тока в витках токопроводящей обмотки соленоида при работе мотор-генератора достигала 5 кА/мм², а на стальной бандаж соленоида при получаемой амплитуде напряженности СИМП в 300 кЭ действовала электродинамическая сила в 140 т [14]. Опытное определение получаемого уровня СИМП производилось путем прямого измерения напряженности магнитного поля с помощью миниатюрной пробной катушки, электрический сигнал с которой

подавался на баллистический гальванометр. Экспериментальные результаты замеров напряженности СИМП в воздушном рабочем объеме соленоида записывались шлейфовым осциллографом на фотопленку. Используя сконструированные и изготовленные "в металле" мотор-генератор и соленоид, Капице П.Л. удалось многократно без разрушения соленоида получать СИМП напряженностью в 320 кЭ [9,14]. Форма импульса тока (магнитного поля) в соленоиде, в зависимости от схемы включения двух обмоток возбуждения мотор-генератора, могла быть синусоидальной или трапецеидальной. Для выполнения физических исследований в создаваемых СИМП было достаточно генерирования лишь их первых полуволн. Для их получения использовался синхронно работающий с мотор-генератором выключатель в цепи соленоида. Данный выключатель был изготовлен английской фирмой "Питер Хукер" из специальной высококачественной стали. Длительность полуволны импульсного тока (поля) в описываемых нами опытах Капицы П.Л. в Кавендишской лаборатории составляла в соленоиде примерно 10 мс. Достигнутый Капицей П.Л. уровень СИМП с помощью применения мотор-генератора в свое время был рекордным. В проведенных с его использованием экспериментах выделяющаяся в соленоиде электрическая мощность была практически в десять раз, а полученное магнитное поле в три раза больше, чем в аналогичных экспериментах Капицы П.Л. с аккумуляторами. Заметим, что в настоящее время в ведущих научных лабораториях мира получаемые АВП для СИМП составляют: по амплитуде напряженности магнитного поля– до 10 МЭ, а по длительности– порядка одной микросекунды [2-4]. Подобные сверхсильные магнитные поля, используемые прежде всего в экспериментальной физике (например, в атомной физике при исследовании деформации электронных оболочек атомов, в ядерной физике при изучении явлений квантовой электродинамики в случае применения электронов высоких энергий и др.), получают с помощью взрывных генераторов, основанных на сверхскоростном сжатии магнитного потока [3,4].

Учитывая превосходные как научные, так и организаторские качества Капицы П.Л., последний в конце своей весьма продолжительной заграничной командировки в Англию был назначен заместителем директора Кавендишской лаборатории при Кембриджском университете (директор лаборатории – Э. Резерфорд) по магнитным исследованиям. Успехи Капицы П.Л. в области исследований физических процессов при воздействии на вещество СИМП способствовали созданию в 1926 году в Англии специальной магнитной лаборатории в рамках научно-исследовательского подразделения, возглавляемого известным во всем научном мире ученым–физиком Э. Резерфордом. В этот период в 1929 году Капица П.Л. был избран членом-корреспондентом АН СССР. В этом же году он становится членом Лондонского Королевского общества – Английской Академии Наук. Петр Леонидович регулярно приезжал к себе на родину для чтения лекций и оказания научно-технических консультаций. Исследования Капицей П.Л. свойств металлов в

СИМП логически привели его к необходимости выполнения подобных работ и в области низких температур. По этой причине в г. Кембридже строится специальная научная лаборатория имени Монда Лондонского Королевского общества для проведения исследований различных материалов в СИМП с использованием низких температур. Директором данной лаборатории назначается Капица П.Л. Отметим, что свой первый гелиевый ожижитель Капица П.Л. построил именно в этой английской лаборатории.

МОСКОВСКИЙ ПЕРИОД РАБОТЫ

В 1934 году Капица П.Л. возвращается из Англии на свою родину и организует здесь в г. Москве Институт физических проблем АН СССР. Для нового института часть научного оборудования, включая созданные Капицей П.Л. в Кавендишской лаборатории и лаборатории Монда установки для получения СИМП и ожижения гелия, при активном содействии Э. Резерфорда была закуплена СССР в Англии. На определенное время дальнейшая научная деятельность Капицы П.Л. была связана практически с физикой и техникой низких температур. Важный этап этих работ завершился открытием Капицей П.Л. в 1937 году явления сверхтекучести жидкого гелия. Следует отметить то, что квантовая теория сверхтекучести вещества была разработана тесно сотрудничавшим с Петром Леонидовичем выдающимся советским физиком-теоретиком, академиком СССР, лауреатом Нобелевской премии по физике за 1962 год Ландау Л.Д., проработавшим не один год в нашем Харьковском политехническом институте на кафедре "Общей и экспериментальной физики". За успехи в данной области Капица П.Л. в 1939 году был избран действительным членом АН СССР. Позже в 1978 году за фундаментальные изобретения и открытия в области низких температур ему была присуждена Нобелевская премия по физике. Крупным инженерным достижением Капицы П.Л. в это время явилось его предложение по использованию турбинных установок для ожижения воздуха и получения из него кислорода, крайне необходимого для интенсификации ряда промышленных процессов (например, в металлургии). Его успехи на этом направлении трудовой деятельности были отмечены в 1941 году Государственной премией СССР за работу "Турбодетандер для получения низких температур и его применение для ожижения воздуха". В 1943 году Капице П.Л. за работы по исследованию жидкого гелия была присуждена очередная Государственная премия СССР. В трудное для академик Капицы П.Л. время (с 1946г. по 1955г.) он вне стен созданного им Института физических проблем обращается к совершенно новому для него классу физических задач – к разработке и созданию мощных СВЧ-генераторов непрерывного действия. В 1955 году Капица П.Л. возвращается на пост директора названного выше института и продолжает в более широком масштабе работы по электронике больших мощностей и физике плазмы. Последние 20 лет своей жизни Капица П.Л. посвятил изучению природы сильнооточного шнурового разряда в газах [14]. Данные работы были направлены на получение и изуче-

ние природы высокотемпературной плазмы, используемой в экспериментальных установках для термоядерного синтеза. Умер академик Капица П.Л. 8 апреля 1984 года. За свой активный многолетний труд, выдающийся вклад в развитие науки и техники Капица П.Л. был награжден двумя золотыми звездами Героя Труда, многочисленными орденами и удостоен ряда Государственных премий СССР. Велико и международное признание научных заслуг Петра Леонидовича Капицы. Он был, как мы уже указали, лауреатом Нобелевской премии, награжден многими золотыми медалями выдающихся ученых мирового сообщества и состоял членом около 30 Академий Наук и общепризнанных Научных Обществ ведущих зарубежных стран мира.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Карасик В.Р. Физика и техника сильных магнитных полей.-М.: Наука, 1964.-348с.
- [2] Физика и техника сильных магнитных полей. Сборник рефератов (1873-1968г.г.)/ Составители: С.А. Смирнов, А.В. Георгиевский, В.М. Юштина. М.: Атомиздат, 1970.-220с.
- [3] Техника больших импульсных токов и магнитных полей/ Под ред. В.С. Комелькова.-М.: Атомиздат, 1970.-472с.
- [4] Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля.-М.: Мир, 1972.-391с.
- [5] National magnet laboratory studies magnetism// Physics Today.-1966.-Vol.19.-№4.-p.81.
- [6] Kapitza P. Some observations on α – particle tracks in a magnetic field// Proceeding Cambridge Philosophy Society.-1923.-Vol. 21.-p.511.
- [7] Kapitza P. A method of producing strong magnetic fields// Proceeding Royal Society.-1924.-Vol. A105.-p.691.
- [8] Kapitza P., Skinner H.W.B. The Zeeman effect in strong magnetic fields// Proceeding Royal Society.-1925.-Vol. A109.-p.224.
- [9] Kapitza P. Further developments of the method of obtaining strong magnetic fields// Proceeding Royal Society.-1927.-Vol. A115.-p.658.
- [10] Капица П.Л. Экспериментальные исследования в сильных магнитных полях// Успехи физических наук.-1931.-Т.11.-Вып.4.-С.533.
- [11] Капица П.Л. Приготовление волластоновских нитей// Журнал русского физико-химического общества. Серия физическая.-1916.-Т.48.-Вып.9.-С.324.
- [12] Капица П.Л. Регистрирующий микрофотометр Коха// Вестник рентгенологии и радиологии.-1919.-Т.1.-С.54.
- [13] Капица П.Л., Семенов Н.Н. О возможности экспериментального определения магнитного момента атома// Журнал русского физико-химического общества. Серия физическая.-1922.-Т.50.-С.159-160.
- [14] Капица П.Л. Научные труды. Сильные магнитные поля.-М.: Наука, 1988.-461с.
- [15] Дорфман Я.Г. Проблема сильных магнитных полей и работы П.Л. Капицы// Успехи физических наук.-1929.-Т.9.-Вып.1.-С.79.
- [16] Cockroft J.D. Philosophy Transaction Royal Society.-1928.-Vol. A227.-p.317.

Поступила 23.02.2005