

УДК 537.312

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТОК В ПРИКЛАДНОЙ СИЛЬНОТОЧНОЙ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ (по материалам школы по сверхпроводимости "Курчатовец-98")

И. С. Байков

ГУП "Всероссийский научно-исследовательский институт межотраслевой информации – федеральный информационно-аналитический центр оборонной промышленности", Москва, Россия

В. С. Круглов

Институт сверхпроводимости и физики твердого тела, РНЦ "Курчатовский институт", Москва, Россия

Л. С. Ширшов

Институт физики высоких энергий, г. Протвино, Моск. обл., Россия

Дан краткий обзор докладов, представленных на школе "Курчатовец-98", по наиболее актуальным направлениям сильноточной сверхпроводимости, ее применениям и перспективам развития.

С 24 по 29 мая 1998 г. на базе РНЦ КИ "Курчатовец", вблизи г. Протвино, проходила Школа по сверхпроводимости (СП). Председатель оргкомитета — проф. В. Е. Кейлин, ученый секретарь — канд. техн. наук В. С. Круглов (РНЦ КИ).

Школа организована Институтом сверхпроводимости и физики твердого тела РНЦ "Курчатовский институт", Секцией сильноточной сверхпроводимости направления "Сверхпроводимость" Государственной научно-технической программы "Актуальные направления в физике конденсированных сред", Научным советом РАН "Научные проблемы использования сверхпроводимости в электротехнике и энергетике", Международной и Российской Академией электротехнических наук, Научно-техническим предприятием "Заря — РКЦ КИ" при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Министерства науки и технологии РФ.

На Школе было представлено 32 доклада-лекции, посвященных наиболее крупным и перспективным достижениям в области прикладной сильноточной сверхпроводимости, включая сверхпроводящие материалы (НТСП и ВТСП), сверхпроводящие магнитные системы и их всевозможные применения, сопутствующие проблемы криогенной техники. В ее работе участвовали почти 90 специалистов, представлявших 25 организаций России и зарубежья.

По традиции работу Школы открыл профессор В. Е. Кейлин, пожелав ученикам и учителям плодотворного обмена знаниями и идеями. М. Г. Кремлев (ИВТ РАН) напомнил исторические даты в развитии сверхпроводимости, динамичной области знаний. Явление сверхпроводимости было открыто в 1911 году Х. Камерлинг-Оннесом в процессе измерения проводимости ртути при сверхнизких температурах. Это фундаментальное открытие было неожиданным и в какой-то степени случайным, никто и не предполагал в те времена, что могут быть проводники без сопротивления.

Но совсем не случайно через 65 лет состоялась первая Школа по сверхпроводимости, которая прошла в подмосковном Звенигороде. К этому времени сверхпроводимость из явления экзотического перешла в фазу индустриального применения в физике высоких энергий и многих других отраслях энергетики. Вторая Школа состоялась в 1979 г. в Цахкадзоре (Армения). Затем хлопоты по организации взял на себя "Курчатовский институт", а финансовую поддержку в последние годы оказывают РФФИ и Миннауки.

Е. П. Красноперов (РНЦ КИ) доложил о перспективах исследований в сильных стационарных магнитных полях в КИ. Первые работы по достижению импульсных магнитных полей высокой напряженности относятся к началу 30-х годов. П. А. Капица создал установку в Кембридже, в Кавендишской лаборатории Э. Резерфорда, на которой с помощью импульсного генератора был достигнут рекордный на тот период уровень поля 30 Тл. Ф. Биттер в 1936 г. предложил конструкцию дискового соленоида, создающего стационарное магнитное поле, который известен сейчас под названием "биттеровского". Отличие магнита от прежних заключалось в том, что использовались штампованные медные диски с отверстиями для протока охлаждающей воды и радиальной прорезью, которая позволяла стопку таких дисков соединять через слюдяную пластину и образовать спиральную обмотку. Распределение тока в дисках обратно пропорционально расстоянию от центра. Для получения поля индукцией 10 Тл с электростанции подавалась мощность 1,7 МВт, которая выделялась в виде тепла, для отвода которого требовался расход воды 50 л/с. В нашей стране работы по получению импульсных магнитных полей ведутся в Красноярске и Москве. Для кратковременного получения больших магнитных полей выгодней использовать водоохлаждаемые магниты, а преимущества сверхпроводящих установок возникают в области стационарных полей. Но возможно и объединение этих магнитных систем разного типа в одной установке. Первый комбинированный соленоид, в котором внутренняя обмотка биттеровского типа из медных дисков является водоохлаждаемой, а внешняя выполнена на основе сверхпроводящего сплава NbTi, был испытан в ИАЭ имени И. В. Курчатова в 1972 г. Медный соленоид биттеровского типа создает поле 18 Тл. Открытая публикация об этой уникальной установке, изготовленной в НИИЭФА им. Д. В. Ефремова (С.-Петербург), была сделана в 1976 г., а создатели были отмечены Государственной премией. В настоящее время проводится модернизация оборудования с целью получения более высокого поля на основе обмоток из материала Nb₃Sn и NbTiTa. Несмотря на сложную ситуацию с финансированием, РНЦ КИ решил сохранить уникальную инструментальную базу физических исследований в сильных магнитных полях. После планируемого (на конец с.г.) изготовления ниобий-оловянной подсекции сверхпроводящей обмотки новый комбинированный магнит заменит устаревшую систему и сможет создать поле до 30 Тл. Для испытаний сверхпроводящих катушек, в том числе и из ВТСР, в октябре с.г. будет запущен водоохлаждаемый магнит с полем 9 Тл в отверстии диаметром 148 мм.

Курчатовский институт приглашает исследователей к сотрудничеству на имеющихся и строящемся оборудовании КИП Пользователям будут предоставлены уникальные возможности широких исследований на современном компьютеризированном оборудовании, в частности:

электрические измерения, в том числе и критические параметры сверхпроводников в диапазоне температур 0,6—300 К, токи до 1200 А;

магнитные измерения на магнитометре с двойной модуляцией и чувствительностью не хуже, чем у SQUID, и при $T > 100$ К;

калориметрия;

оптические измерения в видимой области (возбуждение — Аг лазер);

импульсные измерения ($\tau \sim 50$ нс) и измерения импеданса (до 40 МГц).

Все расходы по обеспечению работ КИ готов взять на себя.

С. А. Егоров (НИИЭФА), один из редакторов журнала *Superconductivity*, сделал доклад "Сверхпроводящие магнитные системы ИТЭР". Токамак ИТЭР (Международный экспериментальный термоядерный реактор) разрабатывается под эгидой МАГАТЕ на основе правительственных соглашений между Европейским Сообществом (ЕС), Россией, США и Японией силами четырех Национальных рабочих групп (НРГ) и Международной центральной рабочей группой (ЦРГ) ИТЭР.

Центральный соленоид (ЦС), обмотки тороидального и полоидального поля магнитной системы ИТЭР общей высотой 20 м, диаметром около 30 м и максимальным

магнитным полем до 13 Тл будут выполнены на основе Nb_3Sn и $NbTi$ сверхпроводников типа кабель-в-оболочке на рабочий ток до 60 кА. Вес только собственно композитных сверхпроводящих проводов в магнитной системе ИТЭР составит около 1900 т.

Российская НРГ принимает участие в проектировании практически всех компонентов и систем реактора, а также в НИР и ОКР, развернутых на инженерной стадии проекта, начатой в 1992 г. и завершаемой в настоящее время. Ключевым этапом НИР и ОКР по магнитной системе ИТЭР является Программа Модельных Катушек, имеющая целью:

создание опытно-промышленных линий для производства сверхпроводников ИТЭР; разработку-апробацию технологии изготовления магнитной системы ИТЭР из Nb_3Sn сверхпроводников по новому методу "намотка — отжиг — изолировка — переукладка", а также составных элементов магнитной системы, включая контактные соединения сверхпроводников, криогенную обвязку, конструкционные и электроизоляционные материалы;

демонстрацию работоспособности проводников ИТЭР (достаточно представительной длины) по величине рабочего тока, приложенного магнитного поля, скорости изменения магнитного поля и механической деформации, соответствующим рабочим для магнитной системы ИТЭР.

Вкладом Российской НРГ в Программу Модельных Катушек являются разработка и изготовление Модельной Катушки — вставки с проводником тороидальной обмотки (КВПТО) ИТЭР — однослойного соленоида, подлежащего испытаниям в магнитном поле до 13 Тл в составе Модельной Катушки ЦС ИТЭР на международном стенде в Институте атомной энергии (Япония). Проект КВПТО охватывает практически все направления НИР и ОКР по магнитной системе ИТЭР в России, в том числе:

верификацию критериев проектирования и методов электромагнитного и термодинамического анализа проводников ИТЭР (НИИЭФА);

разработку и опытно-промышленный выпуск партии Nb_3Sn базовых, металлокомпозитных проводников (стрендов), отвечающих требованиям ИТЭР (ВНИИНМ);

разработку технологии, создание и апробацию опытно — промышленных линий для хромирования стренд, многостадийной кабельной скрутки стренд и заключения кабеля длиной до 1 км в оболочку (ВНИИКП);

разработку технологии, создание и апробацию технологического оборудования для изготовления катушек магнитной системы ИТЭР по методу "намотка — отжиг — изолировка — переукладка" (НИИЭФА);

разработку-апробацию специальной конструкционной стали, радиационно-стойкой электроизоляции, контактных соединений сверхпроводников ИТЭР (НИИЭФА с исполнителями).

К настоящему времени в НИИЭФА разработан проект КВПТО, и апробирована на моделях и макетах технология изготовления КВПТО, во ВНИИНМ завершён выпуск 1 т стренд для проводника КВПТО, во ВНИИКП созданы линии для хромирования стренд и заключения кабеля в оболочку, изготовлены полномасштабные макетные проводники ИТЭР длиной 90 и 860 м, а также первый (пилотный) образец полномасштабного сверхпроводящего провода ИТЭР длиной около 12 м. В НИИЭФА разработана программа испытаний КВПТО, завершено создание уникального стенда для измерения потерь энергии в проводниках ИТЭР, начаты экспериментальные исследования пилотного образца сверхпроводящего провода ИТЭР.

О разработке оборудования и создании сверхпроводящего кабеля в оболочке из инкаллы для проекта ИТЭР сообщил В.Е. Сытников (ВНИИКП, г. Подольск) в докладе "Проводники типа "Cable-in-Conduit" для ИТЭР". Представляя докладчика, В. Е. Кейлин напомнил, что на первой Школе по сверхпроводимости в 1976 г. он был самым молодым участником, а в настоящее время — д-р физ.-мат. наук В. Е. Сытников является ведущим специалистом и координатором в международном сотрудничестве по использованию сверхпроводимости. Докладчик отметил, что рядом с Подольском создана уникальная линия протяженностью 1 км для затягивания сверхпроводящего

кабеля в оболочку. При разработке оборудования ставилась задача обеспечения погружения кабеля в трубу диаметром 40 мм (толщина стенки 1 мм). При небольшом свободном пространстве (зазор около 1 мм) на большой длине было необходимо "вставить нитку" с усилием не более 9 тс без использования смазки (которая при последующем отжиге может оказать негативное влияние на характеристики материала). Для избежания возможных изгибов трубы, что может привести к резкому возрастанию трения, юстировка системы производилась с помощью лазера. "Нитку" длиной 860 м удалось вставить с усилием около 3 тс в оболочку из сплава инкаллоу-908 (основную часть которого составляют Ni и Fe с небольшим количеством добавок Al и Ti). Отметим, что подобная линия имеется в Италии, но длина ее значительно уступает созданной в Подольске. Для центрального соленоида токамака ИТЭР требуется изготовить 140 т Nb_3Sn проводника. На первом этапе планируется изготовить модельную катушку, для чего необходимо изготовить 26 т сверхпроводящего кабеля. Этот заказ практически уже выполнен, изготовлено 24 т материала обмотки. Для самой большой обмотки ИТЭР требуется 870 т сверхпроводника, наиболее длинный отрезок кабеля составляет 1,4 км. Задача по изготовлению материала может быть решена содружеством стран, владеющих высокими технологиями. Докладчик прибыл на Школу из заграничной командировки и по просьбе собравшихся кратко охарактеризовал конференцию, посвященную вопросам перетекания токов в сверхпроводящих кабелях "Резерфордского типа". На этой конференции, состоявшейся в Голландии, было представлено около 100 докладов.

Третью часть сообщений составляли вопросы и проблемы, возникающие при разработке силовых ВТСП-кабелей для передачи электроэнергии. Эта отрасль наиболее бурно развивается в последнее время и можно надеяться на ближайшее внедрение ее достижений. Для уменьшения динамических потерь в сверхпроводящих проводах для ускорителей используют хром и никель, который на порядок дешевле хрома. Хромирование проводов позволяет снизить потери на вихревые токи, но хром — материал дорогой и токсичный. В конференции участвовало 120 человек, и такие "камерные" встречи позволяют более эффективно обсудить частные вопросы, нежели представительные конференции, поэтому планируется в будущем собирать их регулярно и проводить через два года.

П. И. Долгошеев (ВНИИКП) сделал доклад "Длинномерные ВТСП-материалы для транспорта переменного тока и результаты испытаний модели кабеля". При передаче электроэнергии в существующих системах ее теряется до 10%, что порождает "блуждающие токи" и нарушает экологию среды. Начало экспериментам по использованию сверхпроводимости для передачи электроэнергии было положено в 30-е годы, но реальная возможность появилась после открытия нового класса жестких сверхпроводников II рода. В 70-е годы приступили к использованию для этих целей Nb_3Sn , а наиболее последовательны в решении этой задачи Брукхейвенская Национальная лаборатория (BNL USA) и ВНИИКП, где созданы испытательные стенды и ведутся работы по созданию длинномерных кусков кабеля. Основную трудность составлял ввод тока в низкотемпературную среду. Для решения этой проблемы в Подольске были разработаны сверхпроводящие трансформаторы на ток 9 и 120 кА (1986 г.). Высокая стоимость сверхпроводящего кабеля, большая цена жидкого гелия и сложное криогенное оборудование привели к угасанию интереса к использованию низкотемпературных сверхпроводников. Открытие высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) в 1986 г. привело в последующем к получению длинномерных кусков кабеля, работающих при температуре жидкого азота (77 К). Но в связи с реформами, проходящими в экономике, и неустойчивым финансированием исследовательских работ за истекший период больших достижений не было. Дополнительной проблемой стал уход на пенсию старых специалистов, а молодежь осваивает тематику и делает пробные шаги. На сегодняшний день создан ВТСП-кабель, пропускающий до 1,5 кА, но ток в кабеле вытесняется в наружные повивы, где плотность тока становится повышенной. Неравномерное распределение тока приводит к тому, что внутренние

повивы не работают, и следует менять конструкцию кабеля. Выяснены основные принципы конструирования многоповивных жил ВТСП-кабелей с точки зрения достижения максимальной токонесящей способности и минимизации потерь электромагнитной энергии в сверхпроводящих и конструктивных элементах кабеля. Проанализированы многоповивные жилы, состоящие из 1—10 повивов. Показано, что традиционные конструкции с чередующимся направлением скрутки от повива к повиву целесообразно использовать только для двухповивной жилы. Жилы, содержащие большее количество повивов, следует скручивать либо в одну сторону с разными шагами, либо группами, изменяя направление скрутки только один раз. Только в этих случаях удастся получить сбалансированные конструкции, в которых при равномерном распределении токов отсутствуют межповивные электрические напряжения, а следовательно, кооперативные потери, и не требуется межповивной изоляции. Представлены рекомендации по достижению максимального значения критического тока как функции геометрии жилы.

И. Ф. Волошин (ВЭИ) сообщил о результатах исследований, связанных с задачей создания модели ВТСП-кабеля. Используемый сверхпроводник производства фирмы IGC (США) представлял собой 37-жильную Bi-2223/Ag ленту с конструктивной плотностью тока около 2 кА/см^2 при 77 К , $H=0$. Выполнены сравнительные измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) на постоянном и переменном токах, а также потерь энергии в лентах при различных ориентациях и частотах внешнего магнитного поля. Установлено, что в эквивалентных по геометрии условиях, когда экранирующий или транспортный ток заполняет менее половины сечения сверхпроводника ленты, величины потерь за цикл практически одинаковы как при возбуждении тока внешними постоянным или низкочастотным ($\leq 60 \text{ Гц}$) магнитным полем, так и при протекании транспортного тока низкой частоты ($\leq 60 \text{ Гц}$). При дальнейшем заполнении сверхпроводника током потери на транспортном токе растут заметно быстрее, чем гистерезисные, что связано, скорее всего, с ролью неоднородной ВАХ-ленты. Представлены также данные по анизотропии критической плотности тока в постоянном магнитном поле.

Исходя из данных предварительного анализа характеристик ВТСП-лент, разработана и создана модель жилы ВТСП-кабеля с токонесящей способностью до 1 кА эффективного тока. Прямая и обратная жилы коаксиального кабеля с шестью повивами (слоями) уложены на жестком каркасе диаметром 40 мм . Повивы имеют одинаковое число изолированных друг от друга ВТСП лент (примерно одинаковую токонесящую способность) и снабжены изолированными токовыми и потенциальными выводами за пределы наливного жидкоазотного криостата. Полное сопротивление каждого токового ввода составляет около $600 \text{ м}\Omega$. Каждый повив имеет 1 шаг скрутки на длине кабеля (5 м), углы скрутки в соседних слоях имеют разные знаки. Все повивы и их вводы изолированы друг от друга.

Испытания модели ВТСП-кабеля проведены на переменном токе I частотой 60 Гц до $1,2 \text{ кА}$ (эфф) при охлаждении жидким азотом (77 К). Потери энергии в кабеле при $0,5 < I < 1,2 \text{ кА}$ изменяются примерно как $I^{3,8}$ и составляют около 70 Вт при $I = 1 \text{ кА}$ (эфф). Выполнен теоретический расчет потерь в "длинном кабеле" для двух предельных ситуаций: токи во всех повивах кабеля одинаковы, отсутствует какое-либо регулирование загрузки повивов током. В модели реализуется промежуточный случай.

И. И. Акимов (ВНИИНМ им. А. А. Бочвара) сделал обзор "Современные высокотемпературные сверхпроводники". Сейчас в повестке дня стоит задача не гнаться за рекордами в отдельных образцах, а создать технологию изготовления ВТСП-материалов. Первым реальным применением ВТСП стал дисковый электродвигатель мощностью $2,5 \text{ кВт}$. Планируется продолжить работы по созданию массивных изделий на базе иттриевой керамики для гистерезисных электродвигателей большей мощности. В совместной работе с Подольским институтом кабельной промышленности был изготовлен кабель из ВТСП на ток 3 кА . Изготовлены композиционные токовводы из ВТСП на ток 1 кА для РНЦ КИ. Серебряная оболочка висмутовых токовводов

приводит к повышенному теплопритоку, в дальнейшем планируется добавить золото для снижения теплопроводности. Изучаются вопросы пайки таких материалов, и задача решается совместно со специалистами ИФВЭ в рамках программы по созданию тоководов большого адронного коллайдера ЛНС.

В. И. Панцырный (ВНИИНМ) доложил о современном состоянии разработки сверхпроводящих проводов на основе Nb_3Sn и $NbTi$. Сверхпроводящие материалы имели большой инкубационный период с момента открытия, который закончился в 60-е годы стараниями Кюнцлера и других сотрудников, впервые использовавших интерметаллическое соединение Nb_3Sn (получено отжигом порошка в трубе). Последующее крупномасштабное использование сверхпроводников связано с успехами в технологии изготовления новых материалов. Индустриальная физика начала 70-х годов способствовала улучшению характеристик сверхпроводников в процессе создания новых ускорителей и токамаков. Nb_3Sn и $NbTi$ не являются универсальным материалом, и существуют разные требования у разработчиков, например, магнитов для детекторов или отклоняющих диполей протонных синхротронов, что требует индивидуальной оптимизации свойств сверхпроводника для каждого конкретного случая. Токонесущая способность $NbTi$ зависит от структуры материала, и для повышения критического тока подбираются режимы холодной и горячей обработки сплава. В технологии изготовления следует контролировать исходные материалы и полуфабрикаты, следить за режимом промежуточных отжигов и холодного проката. Для достижения магнитных полей до 10 Тл предпочтение в последнее время отдается Nb-Ti-Ta. Достаточно дорогой тантал (стоимостью около 100 дол. за кг) используется для создания барьера поверх титановых жил, размещенных в медной матрице. В перспективе предстоит работа по созданию Nb_3Al , но отсутствие финансирования не позволяет приступить к экспериментам. Для токамака Т-15 был разработан кабель на основе Nb_3Sn , и в 1988 г. у нас была технология, позволяющая произвести до 40 т этого материала, что превышало возможности мирового сообщества. В рамках проекта ИТЭР нашей стране могут поручить производство 50 т Nb_3Sn , но в этом случае встанет необходимость развивать собственные производственные мощности из-за того, что Казахстан стал заграничным государством. В магнитном поле 12 Тл отдельные образцы Nb_3Sn позволяют получить плотность тока 1 кА/мм² в сверхпроводнике (без учета меди в сечении), а гарантированным уровнем можно считать 600 — 700 А/мм².

Свыше 9 тыс. томографов (общей стоимостью около 18 млрд. дол.) с обмотками из низкотемпературного сверхпроводника работают в мире, и рынок этих приборов близок к насыщению. В ближайшее время в Японии планируется запустить первую линию движения поездов со скоростью 500 км/ч, левитация состава и его движение будут осуществляться на базе сверхпроводящих обмоток.

Начиная с 1986 г. после открытия ВТСП-материалов обычные сверхпроводники отошли на второй план, их разработка скорее относится не к научным проблемам, а к технике и высоким технологиям. В ближайшее время ВТСП-материалы будут использованы в линиях электропередач и в качестве токоограничителей сети на случай аварии. В перспективе предстоит внедрение приборов на базе ВТСП в сотовой радиосвязи. Объем использования ВТСП в этой сфере представляется большим, и известные фирмы согласны финансировать разработки в этом направлении.

Своеобразным ответом криогеников на открытие ВТСП стала разработка микрохолодильников, так называемых криокулеров. Эту тему осветил В.И. Магарычский (МЭИ) в докладе "Криорефрижераторы на температурный уровень 4,2—120 К; современные достижения и перспективы". Постановку вопроса, волнующего заказчика на сегодняшний день, можно сформулировать в следующей форме: "что в целом дешевле — сложная и хрупкая обмотка на основе ВТСП, работающая в среде жидкого азота, или традиционный низкотемпературный сверхпроводник, охлаждаемый надежной и простой криогенной системой?" Лидерство среди криокулеров захватили газовые машины, работающие в цикле Мак-Магона. Прогресс идет по линии совершенствования технологии. Выпускаемые в Омске микрохолодильники на основе цикла Стирлинга

гарантируют около 9 тыс. ч работы. Микрокриогенная техника рассчитана на использование в бытовых условиях, например, в кабинете зубного врача, который не вникает в особенности прибора, а включает кнопку, гарантирующую получение холода. Масса установки составляет около 30 кг, а потребляемая мощность от сети не более 300 Вт. Криогенная система, работающая как домашний холодильник на основе компрессора, позволяет просто охлаждать и ВТСП-приборы, что позволяет совместить их использование и упростить использование в быту.

И. О. Щеголев (ИВТ РАН) доложил об экспериментальных результатах исследования спектра собственных частот плоского сверхпроводящего кабеля. Матричный метод применен к исследованию процесса затухания тока в плоском сверхпроводящем кабеле. Получен дискретный спектр собственных частот, каждая из которых определяет темп экспоненциального затухания соответствующего собственного тока. Хотя число собственных частот возрастает с увеличением размеров кабеля, их спектр остается конечным, поскольку максимальная и минимальная частоты стремятся к конечным пределам. Выполнен анализ собственных токов для предельных частот. Показано, что в области минимальных собственных частот собственные токи представляют собой долгоживущие длинные токовые петли. В области высоких частот распределение собственных токов в рядах кабеля является синусоидальным.

"Новые типы электрических машин с объемными ВТСП-элементами. Состояние разработок в мире и российские проекты" — тема обзора А. К. Ковалева (МАИ), который наглядно представил успехи наших специалистов в этой области. В настоящее время стоит вопрос о создании электрических машин с мощностью выше 100 кВт. Причем создание новых моторов не требует разработки ВТСП-проводов, так как во многих случаях достаточно использовать объемную намагниченность и полагаться на отработанные технологии по изготовлению массивных образцов. В ряде устройств ВТСП-материалы комбинируются с железом, что позволяет получить в якоре две ортогональные плоскости в которых, одна ось — ферромагнитная, а другая — диамагнитная. Созданы устройства для непосредственного преобразования тепловой энергии в механическую или электрическую.

Доклад А. В. Дударева (РНИИ КИ, ИСФТТ) был посвящен разработке и успешному запуску вигглера с полем 6 Тл для китайского источника синхротронного излучения NSRL. Обмотки типа рэйстрэк были выполнены на основе традиционного ниобий-титанового сплава, использование проводника на основе Nb_3Sn позволило бы получить 7,5 Тл. Систему запустили в рекордные сроки — за два дня, и китайцы не были готовы к такому повороту дел. Обычно изменения в магнитной структуре ускорителя приводят к длительной подстройке оборудования и аппаратуры. Для уменьшения расхода жидкого гелия система работает в режиме "замороженного" магнитного потока, который достигается при помощи сверхпроводящих ключей. Такое решение позволяет избежать тепловыделений в тоководах. Расход жидкого гелия за сутки составляет около 30 л при стоимости его порядка 10 дол./л. Большое значение поля при малом (< 20 см) магнитном периоде позволяет сместить спектр излучения в область жесткого излучения.

Доклад С. В. Шавкина (РНИИ КИ) был посвящен ориентационным зависимостям силы пиннинга и электрических полей в анизотропных сверхпроводниках. При исследованиях свойств сверхпроводников II рода существуют два принципиально различных подхода: микроскопический и феноменологический. Первый (например теория коллективного пиннинга или нелокальная электродинамика), основанный на конкретном учете свойств вихревой решетки и взаимодействии с центрами пиннинга, к сожалению, мало пригоден для анализа сверхпроводников с сильным анизотропным пиннингом. Наиболее успешной реализацией феноменологического подхода стали модель критического состояния Ч. Бина и ее разнообразные модификации. Автор изложил основные тезисы нового феноменологического подхода при описании анизотропного пиннинга, явившегося развитием модели критического состояния. Из модели определяются угловые зависимости плотности силы пиннинга при произвольной взаимной

правило, срок командировки определен месяцем. Путь этот проторен сотрудниками ИФВД (г. Троицк), представителями Черногловки, Урала и многих других мест. Оборудование лаборатории включает три биттеровских магнита на поля 10, 15 и 20 Тл (диаметр апертуры 22 мм). В импульсном (3 мс) магните можно достигнуть поля до 50 Тл. Сейчас работы ведутся в основном на сверхпроводящем магните. Бюджет лаборатории составляет около полумиллиона долларов.

Член-корреспондент РАН Н. А. Черноплеков (РНЦ КИ) сделал обзор о состоянии дел в развитии сильноточной сверхпроводимости. Ключом к созданию сверхпроводящих устройств являются материалы токнесущих элементов. За последние 20 лет были созданы сверхпроводящие материалы для электротехнических устройств, и прогресс в этой области значителен. Тем не менее в электротехнике сверхпроводимость не проявила себя в полной мере. Может быть, сказывается консерватизм этой отрасли, которой требуются проверенные временем решения, надежные при повседневном употреблении, а СП-материалы все еще не смогли доказать свою надежность и экономичность по сравнению с используемой в настоящее время техникой. В последнее время в России число занятых в электротехнической промышленности выросло в 1,5 раза, идут ремонтные работы, но отсутствуют новации. Физики смелее используют сверхпроводники в новых устройствах, и прогресс в развитии ускорительной техники связан именно с таким подходом. В 80-е годы были открыты фуллерены и ВТСП-материалы, что открыло новые горизонты для создания прогрессивных технологий и устройств. В будущем на основе фуллеренов (нового класса каркасных соединений углерода, открытого в 1985 году) и ВТСП-материалов начнут создаваться устройства молекулярной электроники. Хотя прошло более десятилетия со дня открытия высокотемпературной сверхпроводимости производство сильноточных ВТСП-материалов находится все еще в младенческом состоянии. Стоимость производства ниобий-титанового провода составляет около 1 дол. США за $\text{kA} \cdot \text{м}$, что примерно в 1000 раз дешевле технических ВТСП-проводов на те же параметры. Поэтому возможная экономия за счет удешевления системы охлаждения для ВТСП-проводников, работающих при более высоких температурах в технических установках, может оказаться достаточно малой по сравнению с ростом стоимости провода при замене НТСП на ВТСП. В современных крупных ускорителях и магнитных системах расходы на криогенику составляют $\sim 3\%$ при использовании НТСП-материалов и возможное сокращение их до $\sim 1\%$ за счет использования ВТСП-материалов не кажется актуальным.

Недостаточное и падающее год за годом финансирование на развитие сильноточной технической сверхпроводимости ограничивает возможности выполнения крупных проектов по созданию оборудования (стоимостью более миллиона долларов). На поддержку могут рассчитывать небольшие исследования, расчетные работы и сотрудничество с зарубежными партнерами.

S. Pradhan из Института плазменных исследований (IPR), расположенного в индийском научном центре, находящимся между г. Бомбеем и г. Дели, сообщил о состоянии сверхпроводящей магнитной системы для токамака SST-1. В последние годы Китай, Индия и Южная Корея проявили интерес к установкам управляемого термоядерного синтеза. Вырабатываемая электроэнергия, приходящаяся на жителя этих стран, достаточно низкая, а в этом регионе проживает, считай, добрая половина человечества, насчитывающая сегодня 5,8 млрд. человек. Всего 20 лет назад численность населения Земли составляла 4 млрд. и похоже, что технический прогресс отстает от роста потребностей общемирового населения. Органических запасов топлива не хватит развивающимся странам, чтобы догнать по энерговооруженности развитые страны; так, США потребляют сейчас более половины (около 60%) производимой в мире энергии. Страны Азии стараются войти в число стран с высокими технологиями и планируют испытать силы в создании установок управляемого термоядерного синтеза. Южная Корея планирует построить токамак с запасенной энергией 500 МДж, а Китай намерен создать установку с энергией тороидального поля 300 МДж. Под эту

программу Китай выделяет скромную сумму порядка 25 млн. дол., но имеются источники питания и помещения. Индия выделила около 50 млн. дол. на небольшой проект токамака с запасенной энергией в обмотке порядка 50 МДж. Для обмотки тороида сверхпроводящий кабель был произведен в Японии, и сейчас он транспортируется в Москву, поскольку изготовление катушек поручено РНЦ КИ.

S. Pradhan заметил, что когда он собирался в Россию, то коллеги пугали суровым климатом России. Но директор института успокоил их тем, что холод русские компенсируют своим гостеприимством. Погодные условия — явление проходящее, а знания позволяют выйти на новый уровень понимания природы вещей.

Вселяет надежду присутствие молодежи и то очевидное обстоятельство, что Школа по прикладной сверхпроводимости проходит уже третий год подряд после семилетних "каникул".

В программе Школы было заявлено 36 докладов, но ряд сообщений был вынесен на семинар, в частности, вопросы металлофизики ВТСП-материалов, которые были обсуждены достаточно подробно. "Круглый" стол состоялся по вопросам разработки и использования термоограничителей на базе ВТСП-экранов. В неформальной обстановке состоялся обмен мнениями о состоянии дел в области прикладной сверхпроводимости и перспектив использования высокотемпературной сверхпроводимости.

В организации работы школы — большая заслуга секции Научного совета РАН по применению сверхпроводимости в электротехнике и энергетике и ее руководителя Н. А. Черноплекова.

THE BASIC DIRECTIONS OF RESEARCHES & DEVELOPMENT IN APPLIED HIGH-CURRENT SUPERCONDUCTIVITY (HIGHLIGHTS OF THE SCHOOL ON SUPERCONDUCTIVITY, MAY 24—29, 1998 BASE "KURCHATOVETS", PROTVINO, RUSSIA)

I. S. Baikov

The All-Russian Research Institute of Interbranch Information — A Federal Informative and Analytical Center of The Defense Industry, State Unitary Enterprise, Moscow, Russia

V. S. Kruglov

Russian Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

L. S. Shirshov

Institute of High-Energy Physics, Protvino, Russia

A short review of the reports presented in the Spring School ("Kurchatovetch-98") on most advanced achievements in the fields of high-current superconductivity, its applications and future evolution is given.