Статья

Сверхпроводимость и управляемый термоядерный синтез (по итогам международных конференций EUCAS-2023 и MT-28)

В. С. Высоцкий[1*]

1 ОАО «Всероссийский научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт кабельной промышленности» (ОАО «ВНИИКП»), 111024, Москва, Россия
*e-mail: vysotsky@gmail.com

В сентябре 2023 года состоялись подряд две крупные международные конференции по технической сверхпроводимости. Европейская конференция по прикладной сверхпроводимости EUCAS-2023 (3–7 сентября в г. Болонья, Италия) и 28-ая конференция по Магнитным Технологиям (10–15 сентября в Экс-ан-Провансе, Франция). Впервые, после долгого ковидного перерыва, эти конференции проводились в очном формате. Участники конференций получили большое удовлетворение от возможностей личного общения после четырёх лет ковидных ограничений. Несмотря на известные сложности, автору статьи удалось побывать на обеих конференциях. В статье автор делится впечатлениями об организации и проведении конференций, о присуждённых премиях за научные достижения, а также обсуждает несколько интересных докладов, относящихся к использованию сверхпроводимости для управляемого термоядерного синтеза.

Ключевые слова: сверхпроводимость, высокотемпературная сверхпроводимость, приложения сверхпроводимости, магнитные технологии, управляемый термоядерный синтез.

1. Введение: конференции

Конференция EUCAS-2023. 16-я Европейская Конференция по Прикладной Сверхпроводимости: EUCAS-2023 [1] проходила с 3 по 7 сентября 2023 г. впервые за 4 года в очном формате. Предыдущая, 15-я конференция EUCAS-2021 проводилась командой российских организаторов в онлайн-формате [2, 3]. Для учёных всего мира, работающих в области прикладной сверхпроводимости и физики низких температур, это событие сродни открытым чемпионатам Европы в большом спорте.

Конференции EUCAS организуются раз в два года в одном из европейских городов, под эгидой Европейской Ассоциации по Прикладной Сверхпроводимости (European Society for Applied Superconductivity – ESAS) [4]. ESAS объединяет учёных и инженеров, работающих в области прикладной сверхпроводимости как в промышленности, так и в академических кругах Европы. Основной целью общества, прежде всего, является организация проводимых раз в два года Европейских конференций по прикладной сверхпроводимости (EUCAS). Кроме того, общество проводит или участвует в растущем круге других мероприятий, направленных на продвижение исследований и разработок в области прикладной сверхпроводимости, в том числе организуя школы молодых специалистов. Два года назад, после тщательного анализа ряда предложений, ESAS заключила договор с компанией SAS из Великобритании в качестве профессионального организатора конференций. А также заключили договор с хорошо известной всем «сверхпроводящим прикладникам» американской компанией Centennial Conferences на организацию публикаций трудов конференции в журнале IEEE Transactions on Applied Superconductivity [5].

В 2023 г. местом проведения EUCAS была выбрана Болонья. Организатором выступил Болонский Университет, один из старейших университетов Европы и всего мира, ведущий свою историю с 1088 г. На конференции 2023 г. было зарегистрировано 1062 участника, представлено около 850 докладов по всем сверхпроводящим направлениям: Электроника; Материалы; Крупномасштабные применения.

Организаторам конференции удалось получить поддержку от 6 итальянских организаций и спонсорство от 17 компаний по всему миру. Платиновыми спонсорами (т.е. с наибольшим финансовым взносом), помимо криогенной компании SHI Cryogenics Group, Sumitomo Cryogenics of Europe и энергетической компании ENI, выступила компания Faraday Factory Japan LLC, которая является фактически ребрендингом компании SuperOx Japan и имеет глубокие российские корни.

И очень приятно было узнать, что один из основателей и руководителей этой компании, наш человек, Сергей Ли, выпускник химического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова, получил от Совета по сверхпроводимости IEEE (IEEE CSC) [6] премию имени Джеймса Вонга за постоянный и значительный вклад в области материалов для прикладной сверхпроводимости.

Другой премией, вручённой на конференции, была премия Европейского сообщества прикладной сверхпроводимости в знак «признания выдающихся достижений в развитии знаний в области прикладной сверхпроводимости за последние пять лет». В этом году награда ESAS за выдающиеся достижения в области прикладной сверхпроводимости 2023 г. была вручена профессору Ликсингу Ю (Prof. Lixing You) из Шанхайского института микросистем и информационных технологий (SIMIT) Китайской академии наук (CAS), Китай. Также было приятно отметить, что в своей лекции после вручения премии проф. Л. Ю, упомянул проф. Григория Гольцмана (члена редколлегии нашего журнала) из Московского Государственного Педагогического Университета, как основателя той научной проблемы (однофотонные детекторы), за которые ему была вручена премия.

На конференции были представлены шесть пленарных докладов, часть из которых мы обсудим ниже.

В середине 2024 г. выйдет очередной том IEEE Transactions on Applied Superconductivity, где большинство докладов на конференции будут опубликованы после довольно строгого процесса рецензирования.

Проведение следующей, 17-й, конференции EUCAS-2025 запланировано в Порто (Португалия).

Конференция Магнитные Технологии МТ-28. Несмотря на своё название, конференция по Магнитным Технологиям на 90 %, если не больше, является «сверхпроводящей». И хотя здесь рассматриваются разнообразные аспекты технологий и магнитов различного типа (постоянных, водо-охлаждаемых и т.п.), сверхпроводящие магниты и магнитные аспекты применения сверхпроводимости для создания магнитных полей занимают львиную часть повестки этих конференций.

Конференции МТ организуются раз в два года поочерёдно в различных городах: в Америке, Европе и Азии. Организаторами конференции выступают Международный Оргкомитет (МО), Совет по сверхпроводимости IEEE (CSC IEEE) и принимающая организация. Конференция 2019 г. состоялась в Ванкувере (Канада). Предыдущая конференция МТ проводилась в 2021 г. в Японии в полу-онлайновом формате. Японские участники собрались лично в г. Фукуока на острове Кюсю, а остальные желающие участвовали в онлайн-формате из-за ковидных ограничений.

В этом году была очередь Европы. В 2019 г. в Канаде на совещании МО были представлены предложения Санкт-Петербурга от НИИЭФА им. Ефремова и Экс-ан-Прованса от Центральной Организации (ЦО) ИТЭР [7]. Конечно, мощь ИТЭР-а победила. Одним из факторов выбора была возможность посетить строящуюся площадку ИТЭР и увидеть воочию магниты ИТЭР-а до того, как они будут упакованы в вакуумный сосуд.

Таким образом, конференцию МТ-28 [8] 10–15 сентября 2023 г. принял Экс-ан-Прованс (далее — Экс). Этот небольшой город в 30 км к северу от Марселя является своего рода столицей ИТЭР-а, так как площадка строительства ИТЭР-а находится в ~30–40 мин на автомобиле от города. Многие сотрудники центральной организации ИТЭР живут в этом городе. А автор статьи неоднократно посещал Экс для регулярных совещаний, когда шло российское производство сверхпроводников для ИТЭР-а. Город Экс старинный (год основания 123 н.э.). По нему было приятно побродить, посидеть в кафе и ресторанах. Но во время конференции этого сделать не удалось, было много работы.

На МТ-28 было зарегистрировано 969 участников и представлено около 975 докладов (некоторые участники представляли несколько докладов). Хозяевами конференции выступили центральная организация ИТЭР и CEA — Комиссариат по Атомной Энергии Франции. Организаторам удалось собрать поддержку от 37 спонсоров.

На традиционной выставке была представлена 41 организация, что тоже было достаточно интересно и познавательно.

Традиционно конференция началась с вручения очередной премии Совета по Сверхпроводимости IEEE. В 2023 г. этой премии была удостоена проф. Таби Арндт (prof. Tabea Arndt) из Технологического Института в Карлсруе (KIT) в Германии. Премия была вручена за новаторский вклад и разработки в области высокотемпературных сверхпроводящих материалов и крупномасштабные применения сверхпроводимости.

Всего на конференции состоялось пять пленарных сессий, в каждой из которых было представлено от одного до трёх докладов, часть из которых обсуждается ниже.

Большая часть докладов конференции также будет опубликована в середине 2024 г. в очередном томе IEEE Transactions on Applied Superconductivity.

Проведение следующей конференции MT-29 запланировано в Бостоне (США) 2–5 июля 2025 г.

2. Строящийся ИТЭР

Одним из наиболее интересных моментов конференции было посещение строительства ИТЭР-а. Каждый день, начиная с воскресенья 10 сентября, от театра, где проходила конференция, на площадку ИТЭР-а отходило несколько автобусов. Принимали только заранее зарегистрированных участников строго по документам, которые проверяли при въезде на площадку. При этом требовался строгий дресс-код: никаких шорт и юбок, каблуков или босоножек — только закрытая обувь. И на площадке, после проверки документов и после облачения экскурсантов в жёлтые жилеты и каски (сотрудники ЦО ИТЭР носят синие каски), проводили экскурсию с рассказом о стройке, и что происходит со сборкой ИТЭР-а в данный момент. (см. рис. 1–3).

Это было одним из наиболее ярких впечатлений во время MT-28. Одно дело — читать, смотреть фотографии, и совсем другое дело увидеть воочию эти 18-ти метровые D-образные тороидальные катушки, висящие на креплениях над головой. Или полоидальные катушки диаметром от 9 до 24 м. При этом понимая, что в этих громадных изделиях есть и кусочек труда твоей команды и тебя самого.

Только для участников конференции была организована возможность заглянуть через одно из окон в центральную шахту ИТЭР-а и так же осознать размеры и величие будущей машины.

Всего было организовано около 450 визитов, т.е. практически половина участников смогла полюбоваться строительством одного из самых сложных и дорогих научных устройств XXI в. За что организаторам огромное спасибо.

Рис. 1. Взгляд из окошка в шахту ИТЭР-а (фото автора)

Рис. 2. Зал для изготовления и испытания полоидальных катушек: испытательный криостат и катушка диаметром 24 м (фото автора)

Рис. 3. Одна из 18 секций тороидальной катушки (фото автора)

3. Сверхпроводимость и управляемый термоядерный синтез

Уже давно всеми признано, что управляемый термоядерный синтез (УТС) невозможен без мощных магнитных систем, удерживающих плазму от контакта со стенками реактора. А создавать мощное магнитное поле в большом объёме — это главная задача сверхпроводимости, которая более-менее успешно решается уже много лет.

Первый токамак со сверхпроводящими обмотками Т-7 был построен в СССР в конце 1970-х годов в Курчатовском институте на основе обмоток из ниобий титана, стабилизированных электролитической медью [9]. Потом там же, в конце 1980-х был сооружён Т-15 на основе сверхпроводника Nb3Sn [10]. Несколько сверхпроводящих токамаков было построено в разных странах по всему миру. Один из наиболее успешных: Tore Supra — был запущен почти одновременно с Т-15 в 1988 г. и работает недалеко от строящегося ИТЭР-а в местечке Кадараш.

Поэтому совершенно естественно, что конференция по магнитным технологиям началась с доклада о состоянии работ крупнейшего на сегодняшний момент токамака со сверхпроводящей магнитной системой ИТЭР. Здесь нет необходимости говорить о подробностях ИТЭР-а, достаточно заглянуть на официальный сайт ИТЭР [8] или сайт российского Домашнего агентства ИТЭР [11].

На МТ-28 о состоянии работ по ИТЭР-у рассказал заместитель Генерального директора ИТЭР-а Ютака Камада (Yutaka Kamada).

Он достаточно полно доложил о состоянии работ и ходе строительства. Но только слегка коснулся некоторых проблем, в частности, о нарушении геометрии вакуумного сосуда и дефектов в сварке теплового экрана.

Рис. 4. Вид с высоты птичьего полёта на площадку строительства ИТЭР (с сайта ИТЭР [7])

Главное изменение в ходе работ, затребованное новым Генеральным директором Пьетро Барабаски — это предварительные испытания всех катушек ИТЭР-а перед их установкой. При этом все 18 тороидальных катушек должны быть испытаны при температуре 4,5 К и токе 68 кА – т.е. в полном объёме. Полоидальные же катушки должны быть испытаны при азотной температуре в основном для проверки изоляции. Тем не менее, российскую катушку PF1 предполагается испытать при гелиевых температурах и, желательно, с быстрым вводом-выводом тока.

Кроме того, остаётся открытым вопрос первой стенки, где предлагается замена запланированного, но токсичного бериллия, на вольфрам, который сильнее пылит и потребует большей накачки мощности в плазму. Есть много доводов в пользу как первого, так и второго решения. Пока вопрос обсуждается, но большинство склоняется к вольфраму, основываясь на опыте соседнего Tore Supra.

Международный Консультативный комитет по науке и технологиям ИТЭР-а (STAC) в начале октября подробно обсудил все проблемы и рекомендовал новый, двухступенчатый план работ по ИТЭР. Все проблемы в очередной раз отодвигают дату запуска ИТЭР-а к концу 2020-х гг., а полномасштабный запуск к концу 2030-х гг. Однако, несмотря на все задержки, проблемы, течи и смены конструкции первой стенки ИТЭР как-то идёт, ползёт вперёд.

Параллельно строительству ИТЭР-а в мире продолжаются работы и по новым устройствам УТС со сверхпроводящими магнитными системами.

Автор статьи хотел бы отметить сделанный на EUCAS-2023, доклад Dr. Aldo Di Zenobio, ENEA (Италия) «Проектирование и конструкция сверхпроводящей магнитной системы и состояние строительства установки ТДТ» [13], где под ТДТ подразумевается токамак диверторного типа. Этот доклад продемонстрировал значительное и серьёзное продвижение этого проекта. Разработка конструкции токамака и его магнитной системы практически закончена. Предполагается, что на этом токамаке можно будет генерировать различные конфигурации плазмы, что позволит проводить исследования различных конструкций диверторов.

Тороидальные обмотки токамака будут выполнены на основе прямоугольного кабеля-в-оболочке из проволок на основе ниобий-олова. Размеры и структура проводников находятся в процессе интенсивных исследования и испытаний на стенде Султан. Проволоку поставит южнокорейская компания Kiswire, которая поставляла проволоку для проекта ИТЭР. А проводник изготовит компания ICAS, которая изготавливала проводники для ИТЭР.

Полоидальные обмотки DTT, так же, как и в ИТЭР-е, будут выполнены на основе кабелей-в-оболочке из проволок на основе ниобий-титана.

А вот для центрального соленоида обсуждается гибридный вариант проводников с использованием высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) на основе лент второго поколения типа REBCO, но используемых при температурах жидкого гелия. Об этом ещё поговорим ниже.

Что важно, это хорошая организация работ, которую хотелось бы иметь и у нас. Был создан консорциум компаний для финансирования и управления проектом, где 70 % финансирования принадлежит ENEA – Итальянскому национальному агентству новых технологий, энергетики и устойчивого экономического развития, расположенному в 20 км на юг от Рима в г. Фраскати. Чётко распределены функции и обязанности участников проекта, строится специальное здание для машины. По планам проекта запуск первой плазмы запланирован на 2029 г., что опережает планы ИТЭР-а, который начали строить ещё в 2007 г.

А вот на конференции MT-28 наибольшее впечатление произвёл доклад наших китайских коллег на сессии «Альтернативные пути к коммерческому термояду», где были показаны пути развития китайских программ CFETR (China Fusion Engineering Test Reactor) и CRAFT, мысли американских и европейских исследователей по применению ВТСП для магнитных систем токамаков.

В Китае пошли по традиционному пути, который показан на рис.5.

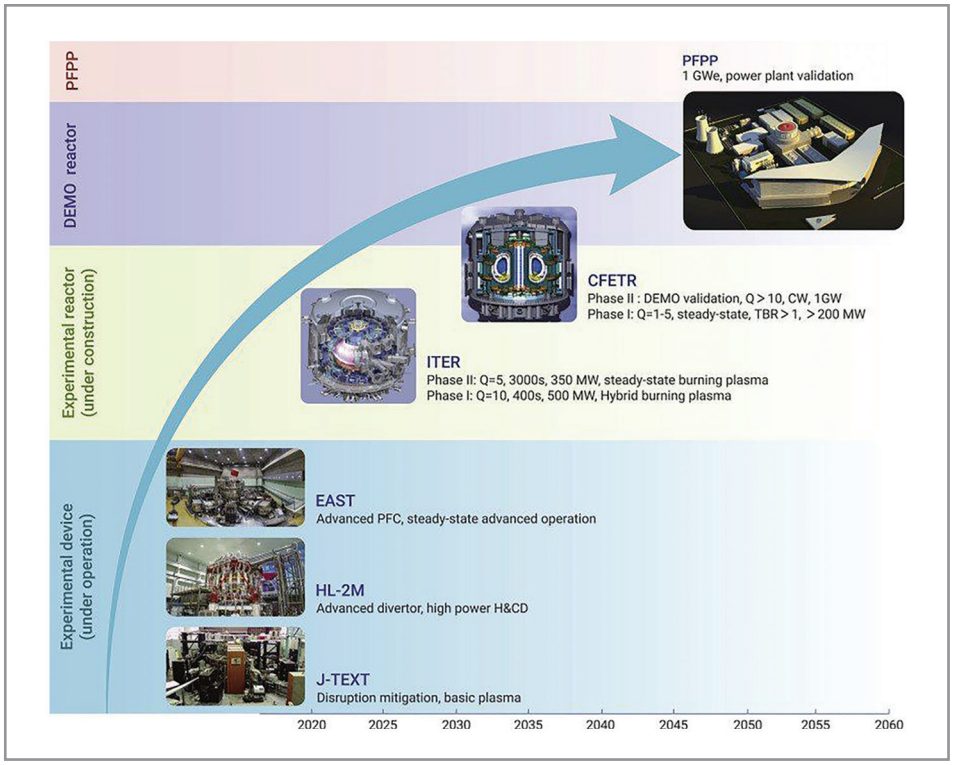

Рис. 5. Дорожная карта развития УТС в Китае [14]

CFETR — это новый китайский токамак, весьма близкий по размеру к ИТЭР-у, но с полем на сверхпроводящих тороидальных обмотках до 14,5 Тл (в ИТЭР-е — 12 Тл). Разработка основной конструкции тороидальной катушки на основе Nb_3Sn декларируется выполненной. Будет использована традиционная конструкция кабеля-в-оболочке на основе ниобий-оловянных сверхпроводников с повышенной плотностью тока. Уже начаты и проводятся испытания проводников на стенде СУЛТАН в Швейцарии.

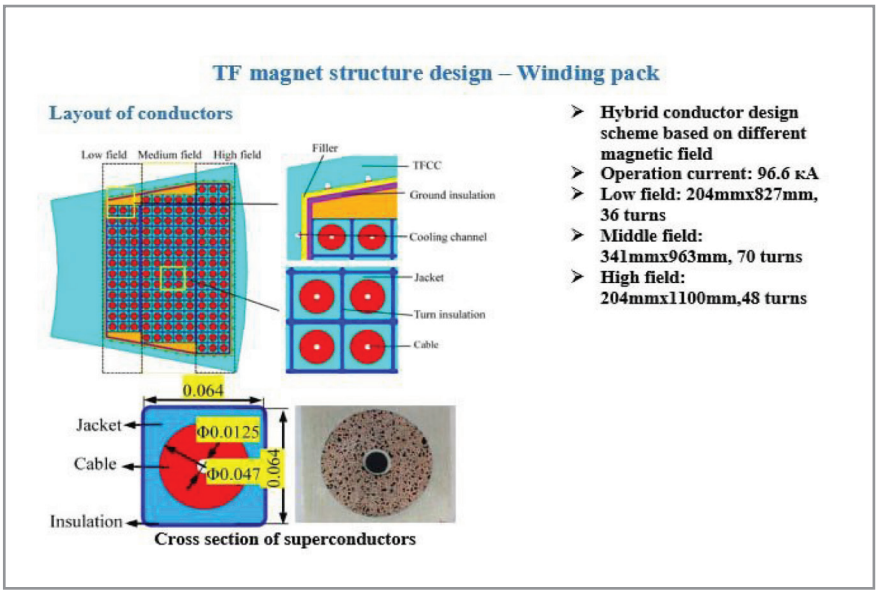

Рис. 6. Конструкция проводника и способ укладки обмоток тороидального поля токамака CFETR [14].

Для успешного продвижения по пути создания нового токамака строится специальный испытательный комплекс CRAFT (рис. 7)

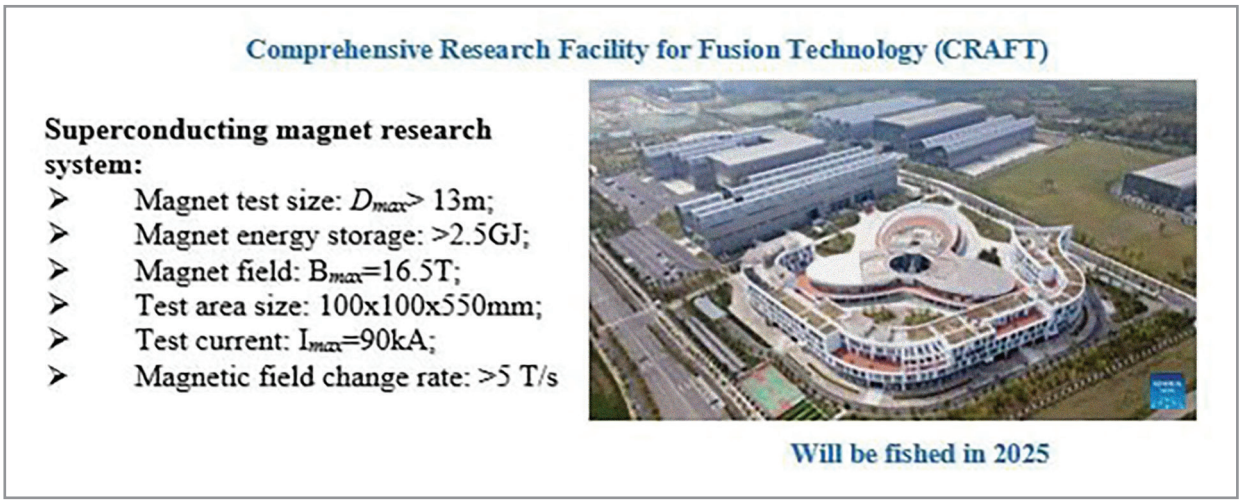

Рис. 7. Комплекс для всесторонних исследований технологий УТС в Китае [14]

В этом комплексе предусмотрены установки для испытания всех возможных элементов нового токамака, включая полномасштабные испытания тороидальных катушек. Запуск магнита на 15 Тл для испытания проводников и стенда для испытаний полномасштабных магнитов планируется на 2025 г.

А теперь перейдём к главным тенденциям по сверхпроводящим магнитам для УТС.

Главная современная тенденция в создании сверхпроводящих магнитов — это использование высокотемпературных сверхпроводников при температурах ниже 20 К, вплоть до гелиевых температур. При этом критические токи и поля ВТСП существенно превышают все, что можно выжать из обычных низкотемпературных сверхпроводников (НТСП) типа NbTi или Nb_3Sn. Эти сверхпроводники достигли своего предела и при необходимости создания устройств с полями выше 16–20 Тл в достаточно крупных объёмах без использования ВТСП задачу решить не удастся. В том числе и для магнитных систем УТС.

Во всём мире все большее внимание уделяется применению ВТСП для магнитных систем токамаков. Проводится, в принципе, разумная мысль, что увеличение магнитного поля при использовании ВТСП при пониженных температурах поможет уменьшить размеры и стоимость новых токамаков. Однако, после эйфории первого успешного испытания в 2021 году компании Commonwealth Fusion Science (CFS) большой D-образной катушки (1,9м×2,9 м) [15] и менее успешных последующих испытаний шум, по поводу ВТСП-токамаков слегка затих и идёт интенсивная исследовательская работа. На конференции MT-28 больших докладов с техническими подробностями представлено не было.

Тем не менее, этой же компанией в скором времени предполагается изготовление и испытание модельной катушки центрального соленоида на основе модифицированного проводника типа Viper, разработанного в CFS (рис. 8) [16]. Этот провод продемонстрировал потери в несколько раз меньше, чем в первоначальном варианте за счёт изолирующих прокладок между сегментами, кардинально снижающих кооперативные потери в токонесущем элементе.

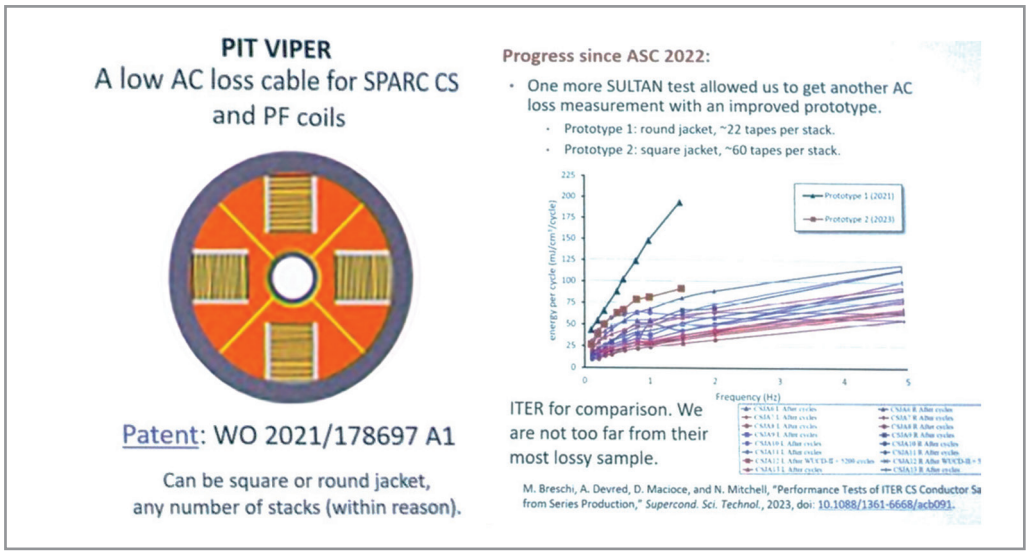

Рис. 8. Модифицированный проводник типа Viper [16] и снижение потерь в нем по сравнению с проводником без прокладок между секторами [17]

Интересными с точки зрения организации исследований и разработок были доклады о программах разработки магнитов в США. Созданы совместные организации и научные советы, которые предполагают общее и единое руководство направлениями исследований, в том числе и поиском финансирования. По проблемам УТС объединились практически все заинтересованные организации: Принстон, Флорида, Окридж, МИТ и др., собрались и обсудили, что надо делать. Основные выводы: нужны машины с большими полями, т.к. это сильно повышает эффективность установок. Требуется больше НИОКР-ов для выбора оптимальных направлений. Цель: определить возможные мощности и возможности установок УТС и работ без дублирования их по стране. Обсуждались выбор ВТСП материалов и надёжность их поставок. Основным направление материалов — ленты на основе REBCO или проволоки типа Bi-2212. Согласились, что требуется консенсус в целях и приоритетах, а также — выбор оптимальных конструкций проводников для самых разных типов устройств. Этот организационный подход впечатляет.

В докладе профессора Dennis White из Массачусетского Технологического Института было отмечено, что уже существует порядка десяти стартапов частных (!) компаний по разработке устройств УТС. При этом, правительство США запустило программу поддержки работ по термоядерному синтезу. Утверждалось, что все компании, занимающиеся магнитным удержанием, используют сверхпроводник типа REBCO. Именно возможность создания сверхпроводящих магнитов на основе лент типа REBCO, с гораздо более сильными магнитными полями, является

наиболее важным технологическим достижением в области термоядерного синтеза. Всё, что касается физики удержания плазмы, становится лучше при высоких значениях полей. При этом разработчики из частного сектора предлагают интегрированные и разнообразные решения для возможностей компактных систем с высокой удельной мощностью.

В завершение краткого обзора докладов по УТС, автор хотел бы отметить доклад проф. Сынён Хана (Prof. Seungyong Hahn) из Сеульского национального университета «Towards Controlled Insulation Techniques for Large Scale Applications of Superconducting Devices» (На пути к методам контролируемой изоляции для крупномасштабного применения сверхпроводящих устройств) на EUCAS-2023. Доклад посвящён чрезвычайно важной проблеме — возникновению и детектированию перехода в нормальное состояние сверхпроводящих магнитов на основе (ВТСП). Эта проблема как-то ускользала от внимания разработчиков ВТСП-магнитов, которые, получив в свои руки отличный ВТСП-проводник второго поколения на основе лент REBCO, начали строить все увеличивающиеся в размерах магниты, которые иногда перегорали в условиях, когда этого вроде бы не должно было быть. Проф. Хан обратил внимание на эти проблемы, которые совпадают с мыслями автора, о чем автор и рассказал дополнительно и в своём докладе на MT-28.

Обсуждение вопроса стабильности, детектирования перехода в нормальное состояние и защиты от его последствий ВТСП магнитов при низких температурах будет наверняка темой ещё многих статей в этом журнале.

4. Выводы

Рассмотрены вопросы использования сверхпроводимости для создания машин управляемого термоядерного синтеза по материалам международных конференций EUCAS-2023 и MT-28.

Решение проблемы УТС невозможно без использования сверхпроводящих магнитных систем всё увеличивающихся размеров. Поэтому строится ИТЭР и с замедлением, но идёт вперёд. В Италии на основе НТСП сверхпроводников — успешно продвигается токамак диверторного типа DTT. Запуск планируется на 2029 год. В Китае разрабатывают и готовятся строить новый токамак в основном на НТСП: CFETR. Параллельно стоится комплекс для всесторонних экспериментальных исследований всех аспектов машин УТС-CRAFT.

В США и в мире формируются общие программы развития термояда на основе магнитов с высоким полем. Правительство США поддерживает НИОКР и частные компании вкладывающиеся в разработки УТС на основе ВТСП проводников.

Проблема, детектирования перехода ВТСП магнитов и их защиты практически не решена. Эти вопросы требуют интенсивных исследований.

Литература

[1] UCAS-2023 // https://eucas2023.esas.org, 2023. URL https://eucas2023.esas.org
[2] В. С.Высоцкий, Электричество **1**, 69 (2022).
[3] В. С. Высоцкий, Электричество **6**, 75 (2022).
[4] ESAS // www.esas.org, 2023. URL: http://www.esas.org
[5] IEEE Transactions on Applied Superconductivity // ieeexplore.ieee.org, 2023. URL: https://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=77
[6] IEEE CSC // ieeecsc.org, 2023. URL: https://ieeecsc.org/meet-council
[7] *ИТЭР*, www.iter.org, 2023. URL: https://www.iter.org
[8] MT–28, mt28.aoscongres.com, 2023. URL: https://mt28.aoscongres.com/home!en
[9] Д. П. Иванов и др, Атомная энергия **45**, 171 (1978).
[10] Belyakov et al., Soviet Atomic Energy **52**, 103 (1982).
[11] J. L. Duchateau et al., Fusion Engineering and Design **81**, 2297 (2006).
[12] Проектный центр *ИТЭР*, www.iterrf.ru, 2023. URL: https://www.iterrf.ru.
[13] Dr. Aldo Di Zenobio et al., Design of the superconducting magnet system and status of the construction of the DTT facility, paper presented at EUCAS-2023, Bolonga, Italy. September 3–7, 2023.

[14] Jinxing Zheng et al., Research and Development Progress of Magnetic Confinement Fusion Superconducting Magnets in China, paper 5PL-1, presented at MT-28, Aix-en-Provence, France, September 10–15, 2023.
[15] Z. Hartwig et al., Overview of the SPARC Toroidal Field Model Coil Project // ASC-2022. Honolulu, Hawaii, November 2022.
[16] US Patent WO2021178697A1, 2021
[17] C. Sanabria et al., The SPARC Tokamak Central Solenoid Model Coil, paper 2OrM1-2, presented at MT-28, Aix-en-Provence, France, September 10–15, 2023.

Superconductivity and controlled fusion (review of the international conferences EUCAS-2023 and MT-28)

V. S. Vysotsky[1]

1 All-Russian scientific research and development cable institute («VNIIKP»), 111024, Moscow , Russia
e-mail: vysotsky@gmail.com

Высоцкий Виталий Сергеевич – доктор техн. наук, заместитель заведующего – научный руководитель отделения сверхпроводящих и криорезистивных кабелей, ОАО. «ВНИИКП», Москва, Россия.

Dr. Vitaly Vysotsky – Ph.D; Dr. of Sci. (habil.) Deputy head of Department at All-Russian Scientific Research and Development Cable Institute.

***