

Коллективом авторов из Частного учреждения «ИТЭР-Центр», ФГБУ «НИЦ «Курчатовский институт», АО «НИИЭФА», АО «СНСЗ» и ООО «Форсс Консалтинг», АО «ВНИИКП» и АО «НТЦ ФСК ЕЭС» с 1993 по 2023 год разработаны научная база, инновационные конструкции и комплексы технологий, реализовано промышленное производство и проведены испытания свойств на специально созданных стендах сильноточных сверхпроводящих кабелей, проводов и крупномасштабных сверхпроводниковых магнитных систем (СМС) на их основе для внутреннего и зарубежного рынков. За вышеуказанный период в отечественные и зарубежные организации было поставлено наукоёмких изделий на более чем 15 млрд. руб. в ценах 2022 г.

Результаты работы обеспечили практическое использование промышленности сверхпроводящих стрендов (сверхпроводников), параллельно созданной в Российской Федерации. Научно обоснованные и испытанные конструкции сверхпроводящих кабелей, проводов типа «кабель-в-оболочке» и сверхпроводниковых магнитных систем, созданная для их реализации промышленность и стендовая база обеспечили практическое применение и рынок для российских стрендов (сверхпроводников).

Работы выполнялись при финансовой поддержке Министерства по атомной энергии Российской Федерации, Федерального агентства по атомной энергии и Госкорпорации «Росатом», за счет бюджетного и внебюджетного финансирования. После подписания в 2007 году Соглашения о создании международной организации по термоядерной энергии для совместной реализации проекта ИТЭР большинство работ выполнялись в рамках государственных контрактов по тематике проекта ИТЭР.

Рекордные в мире для сверхпроводящих сильноточных проводов, а в РФ для сверхпроводниковых СМС характеристики были достигнуты в результате:

- комплексных расчетно-аналитических и конструкторско-технологических работ в обоснование и выполнение разработки российских инновационных конструкций кабельных скруток, проводов типа «кабель в оболочке» и сверхпроводниковой катушки для международного проекта ИТЭР;

- научного обоснования, создания и запуска в эксплуатацию технологических комплексов, обеспечивающих исполнение требований серийного производства

российских сверхпроводящих проводов и крупногабаритных СМС для проектов управляемого термоядерного синтеза (УТС) и физики высоких энергий (ФВЭ);

- постановки и обоснования научно-исследовательских задач по проведению квалификационных и приемо-сдаточных испытаний конструкционных материалов и конечных изделий, включая подготовку документов контроля качества, разработку программ и методик испытаний и создание испытательных стендов;

- создания высокотехнологичной промышленности для серийного выпуска наукоемкой продукции - высококачественных сверхпроводящих проводов и крупногабаритных СМС с организацией поставки за рубеж в интересах международного проекта ИТЭР.

Численно результаты работы могут быть описаны в значениях критических характеристик поставленных в серии во Францию высококачественных сверхпроводящих проводов для тороидальной обмотки токамака ИТЭР – ток 68 кА при индукции магнитного поля 11,8 Тл при температуре ниже 5 К; а также значениями весогабаритных и физических характеристик поставленной во Францию катушки PF-1 полоидальной магнитной системы токамак ИТЭР – диаметр 9350 мм, высота 2835 мм, масса 161 тонн, создаваемое магнитное поле 6,8 Тл.

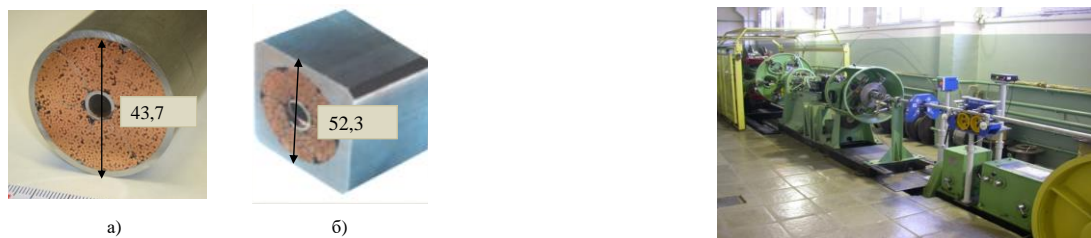


Рисунок 1 - Провода обмоток тороидального а) и полоидального б) полей, изготовленные на оборудовании АО «ВНИИКП»

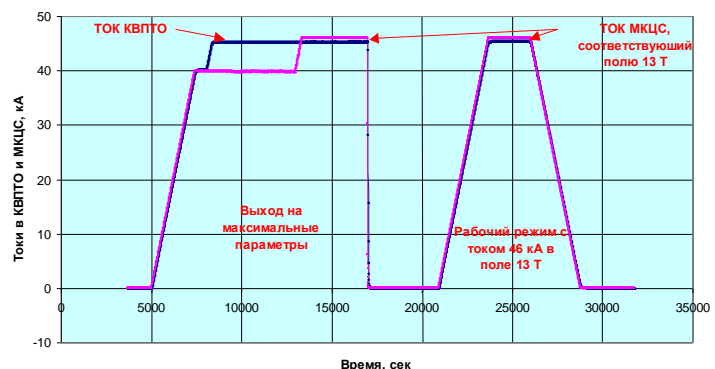


Рисунок 2 – КВППО, изготовленная кооперацией под управлением АО «НИИЭФА».

Испытания в Японии 46 кА в поле индукцией 13,1 Тл.

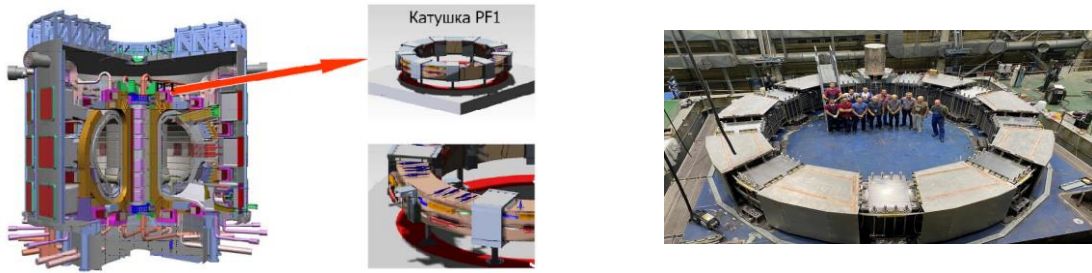


Рисунок 3 – Катушка PF-1, изготовленная кооперацией под управлением АО «НИИЭФА»

В ходе работы создано производство полного цикла для изготовления высококачественных сверхпроводящих проводов и крупногабаритных СМС, оснащенных уникальным технологическим оборудованием для изготовления механически устойчивых кабельных скруток из 1200 и более стрендов; а также для заключения в прочную цилиндрическую оболочку длиной до 1 км кабельных скруток диаметром до 50 мм.

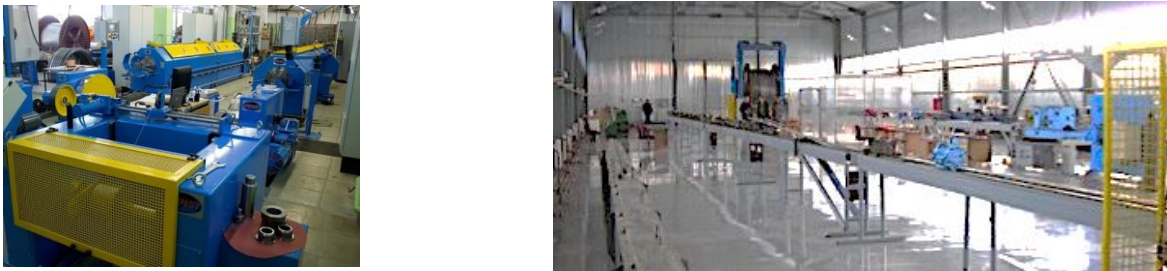
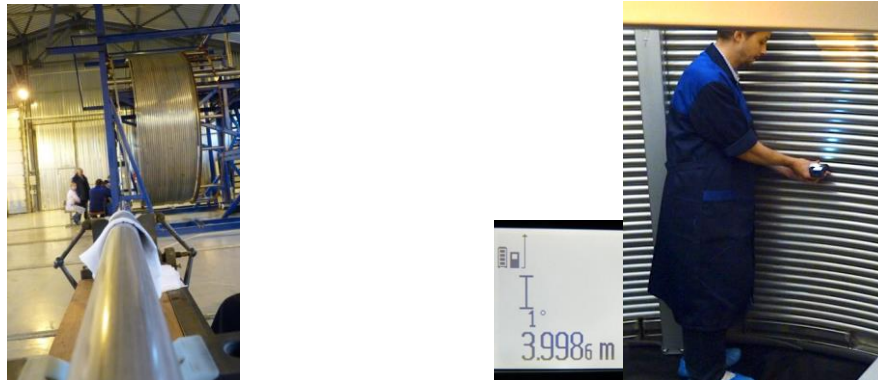


Рисунок 4 – Оборудование для скрутки пятой стадии и заключения кабеля в оболочку



а)

б)

Рисунок 5 – Намотка провода тороидальной обмотки ИТЭР а) и измерение диаметра 4 м транспортируемой спирали б). Прибор подтверждает допуск по диаметру витка +/-2 мм

**Всего специалистами АО «ВНИИКП» было изготовлено:**

- 28 тороидальных проводов электромагнитной системы ИТЭР общей длиной до 18 км;
- 22 км кабелей катушек полоидального поля, включая 16 штатных сверхпроводящих кабелей длиной 414 м для катушки полоидального поля PF1.

Введены в эксплуатацию в АО «СНСЗ» технологические комплексы для двухзаходной намотки и наложения электрической изоляции соленоидальных обмоток диаметром до 10 м; формирования и вакуумно-нагнетательной пропитки витковой и корпусной изоляции крупногабаритных сверхпроводниковых обмоток с используемой массой компаунда горячего отверждения до 50 т; изготовления электрических контактных соединений сверхпроводящих проводов с резистивностью менее 2 нОм.



Рисунок 6 - Участок намотки секций обмотки в «чистой комнате»

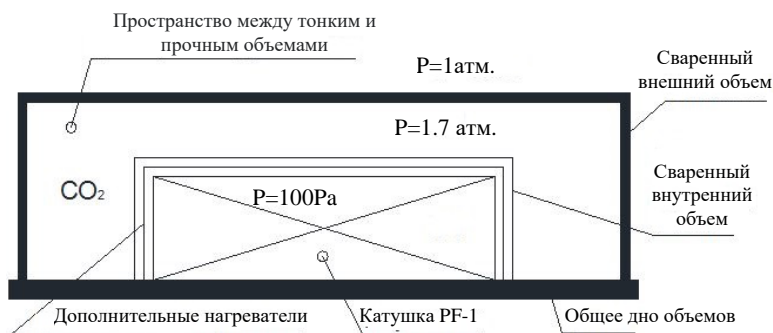


Рисунок 7 – ВВП катушки PF1



Рисунок 7 – Контактное соединение катушки PF1



Одновременно в ряде российских организаций были введены в действие уникальные по физическим параметрам стенды для квалификационных и приемочных испытаний сверхпроводящих проводов и сверхпроводниковых СМС, включая: испытания на герметичность в диапазоне температур 78-300 К с уровнями натекания по газообразному гелию менее  $10^{-5}$  Па·м<sup>3</sup>/с; высоковольтные испытания напряжением до 100 кВ, включая испытания по кривой Пашена; токовые испытания проводов и электрических контактных соединений в диапазоне токов до 80 кА, магнитных полей до 11,8 Тл, температур 4,2-300 К; определение токовой линии и магнитного центра крупногабаритных соленоидальных катушек.



а)



б)

Рисунок 8– Вакуумная камера а) и тестируемый провод в виде соленоида б) - провод ДАМІ-II диаметром 4 м, высотой 4 м и массой 10 т.



Рисунок 9 – Высоковольтные испытания напряжением до 100 кВ, включая испытания по кривой Пашена

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданная промышленность и стендовая база по изготовлению и испытаниям сверхпроводящих кабелей, проводов и крупноразмерных сверхпроводниковых магнитов конкурентоспособна на мировом уровне. Современная перспектива - использование разработанных технологий, созданных производств, испытательных комплексов и квалифицированного штата для реализации задач, направленных на создание крупномасштабного сверхпроводникового оборудования для энергокомплексов (сверхпроводниковые накопители энергии), установок УТС и ФВЭ с использованием сверхпроводников различных типов.

### Объемы внедрения

В 1998-2003 годах сверхпроводящие провода, созданные по российским технологиям для проектов УТС (ИТЭР), успешно прошли комплексную международную аттестацию в Швейцарии и Японии, показав лучшие среди европейских и японских производителей результаты прохождения циклических испытаний по сценарным условиям ЭМС ИТЭР.

Достигнутые успехи обеспечили возможность организации российского серийного производства сверхпроводящих проводов, в рамках которого в 2008-2013 годах было изготовлено и поставлено Заказчикам более 250 тонн продукции длинами от 415 до 780 м.

В 2022 году сверхпроводниковая катушка PF-1 прошла приемо-сдаточные испытания и была поставлена во Францию на площадку строительства ИТЭР.

Созданные и оформленные в виде результатов интеллектуальной собственности российские технологии, испытательные программы и методики полностью или частично используются на производственной и стендовой базах организаций заявителей.

В 2023 году технологии изготовления и проведения испытаний сверхпроводящих проводов типа «кабель в оболочке» были с успехом использованы в государственных контрактах и проектах Госкорпорации «Росатом», реализуемых в рамках третьего федерального проекта (ФПЗ) в составе комплексной программы по развитию атомной науки и технологий (КП РТТН).

**Краткая оценка новизны, отличающая данную работу (актуальность, эффективность, результативность)**

Созданные промышленность и стендовая база конкурентоспособны на мировом уровне и обеспечивают возможность создания уникальных установок различного сверхпроводникового оборудования масштабных проектов таких, как индуктивные накопители энергии гигаджоульного класса, ЭМС проектов мегасайенс УТС и ФВЭ, высокополевые медицинские томографы или системы размагничивания кораблей.

Фактически на территории ВНИИ КП, НИЦ «Курчатовский институт», АО «НИИЭФА» и АО «СНСЗ» в г. Санкт-Петербург создан кластер и подготовлен кадровый состав для реализации проектов мегасайенс в области магнитных и сверхпроводниковых технологий (рисунок 10).



Рисунок 10 – Производственное помещение для изготовления крупногабаритных магнитных систем

Созданные и оформленные в виде результатов интеллектуальной собственности российские технологии и испытательные программы и методики полностью или частично используются на производственной и стендовой базах организаций заявителей. В 2023 году технологии изготовления и проведения испытаний были с успехом использованы в государственных контрактах и проектах Госкорпорации «Росатом», нацеленных на создание российской сверхпроводниковой индустрии.

За период проведения работ с 1998 по 2023 годы было создано 29 РИД, оформлен 1 патент, опубликовано более 60 статей в рецензируемых журналах.

## **Достигнутый экономический и социальный эффект от внедрения.**

Важнейший социальный эффект – сохранение и развитие российского научно-производственного потенциала, обеспечивающего технологический суверенитет страны. При выполнении представляемой работы созданы современные российские наукоемкие производства, технологические линии и испытательные стенды для изготовления и испытания единичных длин сверхпроводящих кабелей и проводов, крупногабаритных сверхпроводниковых катушек и другого оборудования; создано более 200 высокотехнологичных рабочих мест с подготовкой основных производственных рабочих, высококвалифицированных научных сотрудников, инженеров и специалистов в организациях (АО «ВНИИКП», НИЦ «Курчатовский институт», АО «НИИЭФА», АО «СНСЗ» и др.), задействованных в выполнении работ по заявленной теме.

Участие Российской Федерации в международном проекте ИТЭР является экономически целесообразным, так как в соответствии с уставными документами Международного Проекта ИТЭР каждая сторона имеет право на получение безвозмездной лицензии на весь комплект технической и иной документации Проекта. Таким образом, вкладывая в стоимостном выражении в проект 9,09%, РФ получает 100% результатов работы международной команды. Выдвигаемая работа является вкладом РФ в создание электромагнитной системы. Этот вклад складывается из поставок:

- сверхпроводящих кабелей для магнитов полоидального поля (22 км в соответствии с Соглашением о Поставках 1.1.P6C.RF.01) и сверхпроводящих проводников для магнитов тороидального поля (18 км в соответствии с Соглашением о Поставках 1.1.P6A.RF.01.0.). Общая стоимость поставки порядка 130 (из которых 30 сверхпроводящие стренды) млн Евро;

- сверхпроводящей катушки PF-1, изготовленной в соответствии с Соглашением 1.1.P3A.01 RF при общей стоимости поставки 50 млн Евро.

Общая стоимость электромагнитной системы ИТЭР оценивается в 6,1 млрд. Евро из них стоимость разработки комплекта технической документации, который получает РФ, в 1,2 млрд. Евро.



Таким образом экономический эффект может быть оценен в 1,35 млрд. Евро или 129 млрд. руб. по текущему курсу.

### **Перспективы дальнейшего использования**

Современная перспектива - использование разработанных технологий, созданных производств, испытательных комплексов и квалифицированного штата для реализации задач, направленных на создание крупномасштабного сверхпроводникового оборудования для энергокомплексов (сверхпроводниковые накопители энергии), установок УТС и ФВЭ с использованием сверхпроводников различных типов.

Примером подобного проекта может являться новый российский Токамак Реакторных Технологий (ТРТ) со сверхпроводниковой электромагнитной системой, НИОКР которого стартовал в рамках третьего федерального проекта в составе комплексной программы по развитию атомной науки и технологий.