УДК 538.945

Обзор

Сверхпроводниковые токамаки и стеллараторы в 2026 году

Д. И. Шутова[1,*]

1 Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, 115409, Каширское шоссе, 31, Москва, Россия.
* e-mail: shutovadi@mail.ru

Поступила в редакцию 23.10.25, после переработки 14.11.25, принята к публикации 10.12.25.

Приведен краткий обзор основных действующих и проектируемых сверхпроводящих токамаков и стеллараторов в мире по состоянию на начало 2026 г. Особое внимание уделено их магнитным системам на основе низко- и высокотемпературных сверхпроводников. Приведен сравнительный анализ рабочих параметров плазменных установок разных стран. Подробно обсуждаются перспективы развития термоядерных программ Китая и США до 2060 гг.

Ключевые слова: токамак; управляемый термоядерный синтез; УТС; ВТСП-2; высокотемпературный сверхпроводник; ВТСП лента второго поколения; SPARC; ARC; CFETR; CFEDR; BEST; ASIPP; MIT; CFS; WEST.

DOI: 10.62539/2949-5644-2025-9-4-6-24

1. Введение

Мир нуждается в новых источниках энергии все острее. Население планеты, а вслед за ним, и общее энергопотребление постоянно растут. Углеводородная энергетика главным образом основана на исчерпаемых ресурсах и наносит урон экологии за счет выбросов углекислого газа в атмосферу. Атомные электростанции (АЭС), несмотря на свою эффективность, производят радиоактивные отходы, которые необходимо консервировать и обсуживать. Кроме этого, маловероятные, но, все же, случающиеся аварии на АЭС представляют серьезную угрозу.

Управляемый термоядерный синтез может стать безопасным, экологичным и эффективным методом, как для непосредственного получения электроэнергии, так и для переработки ядерного топлива в существующих топливных циклах атомной энергетики. По сравнению с резистивными плазменными установками для зажигания термоядерных реакций, токамаки, стеллараторы и открытые плазменные ловушки со сверхпроводниковыми магнитными системами обладают меньшей энергоемкостью и позволяют получать более высокие рабочие параметры (большая индукция магнитного поля, большая продолжительность поддержания «горения» плазмы, больший КПД). В качестве косвенного доказательства близкого коммерческого успеха в управляемом термоядерном синтезе эксперты приводят данные статистики. За 2024 г. частными компаниями по всему миру в исследования по УТС суммарно вложено более 7 млрд долл., причем прирост инвестиций за 2024 г. составил около 900 млн долл., т. е. более 14.5% [1].

2. Сверхпроводниковые токамаки и стеллараторы

Всего в мире к 2026 г. было построено около 300 экспериментальных токамаков. В Таблице 1 дан сравнительный анализ действующих и проектируемых токамаков со сверхпроводниковыми обмотками.

Накопленный опыт в создании токамаков на основе низкотемпературных сверхпроводников (НТСП) на экспериментальных установках Т7, Т15 (Россия), EAST (Китай), KSTAR (Корея) и др. привел к решению о постройке мега-установки ITER, сооружение которой потребовало объединения усилий ученых 35 стран, 15-ти лет разработок и финансирования в

20 млрд $.

В последние годы наблюдается впечатляющий прогресс в области производства коммерческих высокотемпературных сверхпроводников второго поколения (ВТСП-2) на основе редкоземельных керамических соединений REBCO (где RE — обозначение редкоземельного элемента Gd, Y и др). В REBCO сверхпроводящих лентах достигнуты плотности тока в 1000 А/мм^2 при 20 К в магнитном 20 Тл, и 2000 А/мм^2 при 4.2 К и 20 Тл [2]. Следует отметить, то размерные/объёмные параметры токамаков при одинаковых параметрах выходной мощности обратно пропорциональны четвертой степени поля на плазме. Это привело к всплеску интереса научного сообщества к проектированию компактных ВТСП токамаков с магнитным полем до 18–20 Тл на обмотке с рабочими температурами $T < 25$ К — область недостижимая до появления ВТСП.

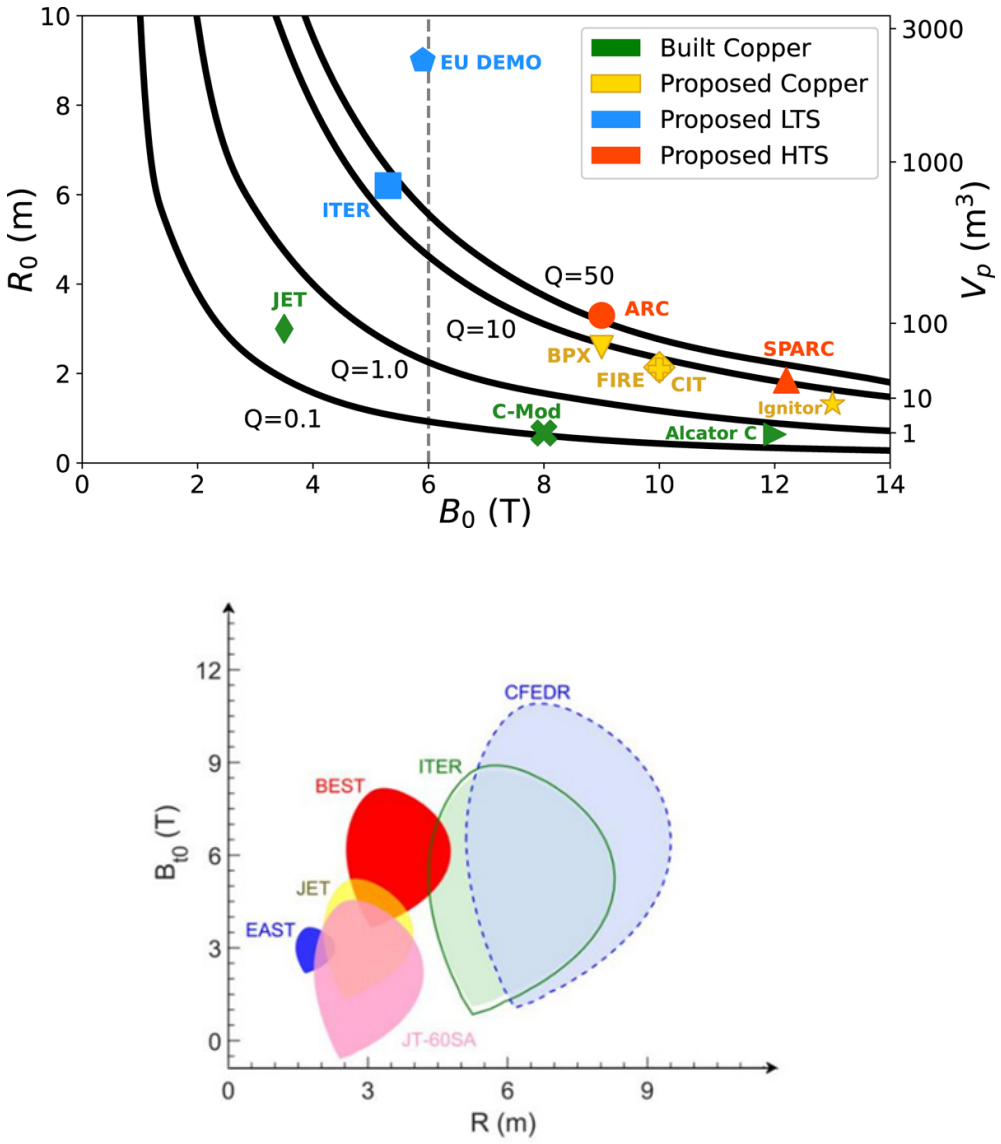


Рис. 1. Сравнение мировых токамаков в координатах главный радиус R_0 — поле на оси тора B_0 — КПД, на котором точками нанесены построенные и проектируемые токамаки на базе медных, НТСП и ВТСП-2 проводников [3, 4].

На рис.1 показаны расчетные кривые КПД сверхпроводящих и резистивных токамаков в координатах главный радиус (R_0) — поле на оси тора (B_0), на котором точками отмечены действующие и проектируемые установки. Видно, что если эффективность ITER $Q > 10$ долж-

на быть достигнута за счет наращивания размера установки, то на проектируемом в США ВТСП-2 токамаке SPARC собираются добиться схожих результатов путем наращивания магнитного поля тора.

Таблица 1. Действующие и проектируемые сверхпроводящие токамаки на начало 2026 г.

Установка	**Год**	**Место расположения**	**Параметры**	**Примечание**
Tore-Supra — 1988 – 2010 гг. (он же WEST после модернизации 2016 г.) [5, 6]	1988 – 2010 гг. 2016 – н.в.	Французский комиссариат по альтернативной и атомной энергии CEA, г. Кадараш, Франция	NbTi круглая обмотка тороидального поля B_0 = 3.7 Тл R_0 = 2.25 м I_p=1.7 МА	Первый токамак с вольфрамовым бланкетом. Несколько мировых рекордов по длительности удержания плазмы. В феврале 2025 г. плазма непрерывно удерживалась 22 минуты 17 секунд.
EAST (Experimental Advanced Tokamak) [7, 8] Первый полностью сверхпроводящий токамак	Пуск 2006 г. по н. в.	Институт физики плазмы китайской академии наук ASIPP, г. Хэфэй, Китай	Тороидальная обмотка из кабеля на основе NbTi российского производства B_0 = 3.5 Тл R_0 = 1.8 м I_p = 1 МА	2007 г. 400 с удержание плазмы с T = 10 млн. °С 2018 г 100 с удержание плазмы с T = 100 млн. °С 2022 г. плазма с T = = 70 млн. °С удерживалась 17 мин. В январе 2025 г. достигнут непрерывный разряд плазмы, продолжавшийся 1066 с (почти 18 минут). 2026 г. успешно поддерживалась стабильность плазмы при экстремальных плотностях, (преодолен предел Гринвальда в 1.3–1.65 раз).
BEST (Burning Plasma Experimental Superconducting Tokamak) [8]	Проектирование с 2021 г. Начало строительства 2023 г. по н.в.	Институт физики плазмы китайской академии наук, ASIPP, г. Хэфей, Китай	REBCO/ NbTi/Nb_3Sn B_0 = 3.6 Тл R_0 = 6.15 м I_p = 7 МА P_{fusion} = 10 – 200 МВт	В 2025 году завершена установка основания криостата. Q = 1–5 Пуск и первая плазма запланированы на 2027 г.

CFED (T) R (China Fusion Engineering Demo (Testing) Reactor) [4] В ранних публикациях через букву T (testing), в более поздних D – demo. Одна и таже установка на разных стадиях проектирования	Проектирование с 2011 г. по н.в.	Институт физики плазмы китайской академии наук, ASIPP, г. Хэфей, Китай	REBCO/ $NbTi/Nb_3Sn$ B_0 = 6.3 Тл R_0 = 7.8 м I_p = 15 МА P_{fusion} = = 200 МВт – 3 ГВт	Ориентирован на демонстрацию устойчивого выхода энергии с Q = 10 - 30
PFPP (Prototype Fusion Power Plant) [8]	Проект	Институт физики плазмы китайской академии наук, ASIPP, г. Хэфей, Китай	—	P_{fusion} = 1 – 3 ГВт 2040 – 2060 гг.
KSTAR [9] (Korean Advanced Research Superconducting Tokamak)	Пуск 2008 г. – по н.в.	Институт термоядерного синтеза, г. Тэджон, Южная Корея	$NbTi/Nb_3Sn$ B_0 = 3.5 Тл R_0 = 1.8 м	2020 г. 20 с удержание плазмы с T = 100 млн. °С 2024 г. 48 с удержание плазмы с T = 100 млн. °С В 2026 г. планируется добиться удержания продолжительностью 300 с. К 2040 г. Корея намерена создать демонстрационный термоядерный реактор K-DEMO.
SST-1 [10] (Steady State Superconducting Tokamak)	Пуск 2013 г. по н.в.	Институт физики плазмы, г. Гандинагар, Индия	NbTi B_0 = 3.0 Тл R_0 = 1.1 м	Первая плазма получена в 2013 г. с медными обмотками. В 2015 г., получены кратковременные ~ 500 мс импульсы плазмы при центральном поле 1.5 Тл.
Wendelstein 7-X [11] Самый мощный стелларатор в мире.	Пуск 2015 г. – по н.в.	Институт физики плазмы Макса Планка, г. Грайфсвальд, Германия	NbTi B = 3.0 Тл R = 5.0 м	Продолжительность импульса удержания плазмы с T = 130 млн. °С - несколько секунд.

Large Helical Device – LHD (“гелиотрон”) Первый крупный сверхпроводящий стелларатор [12]	Пуск 1998 по н. в.	Национальный институт термоядерных исследований (NIFS) Токи, Гифу, Япония	NbTi стабилизированный алюминием и медью R_2 – 3.9 м R_0 – 0.6 м B_0 – 3.0 Тл	Ведутся эксперименты по исследованию влияния скорости впрыска массы, плотности и мощности нагрева на продолжительность удержания плазмы.
Токамак JT60-SA (Superconducting Advanced Japanese Tokamak) [13] Крупнейший действующий сверхпроводящий токамак в мире.	Пуск 2021 г. – по н. в.	Японское агентство по атомной энергии,г. Нака, Япония	$NbTi/Nb_3Sn$ B_0 = 2.25 Тл R_0 = 3.0 м I_p = 5.5 МА P_{fusion} = 1.5 – 40 МВт	В декабре 2023 г. получена первая плазма стоком 1 МА с продолжительность импульса 11 с. Ожидается, что JT-60SA сможет создавать и удерживать высокотемпературную дейтериевую плазму до 100 с и генерировать тепловую мощность до 40 МВт.
ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) [14]	Сооружение с 2010 г. по н. в.	Французский ядерный центр Кадараш, Франция	$NbTi/Nb_3Sn$ B_0 = 5.3 Тл R_0 = 6.2 м I_p = 15 МА P_{fusion} = = 500 МВт	Закрытие криостата с электромагнитной и всеми вспомогательными системами запланировано на 2033 г., завершение сборки токамака и начало эксплуатации — на 2034 г., выход на режимы с полным магнитным полем и током — на 2036 г., а начало работы с тритием — на 2039 г. Режимы: 5 минут свыше 500 МВт термоядерной мощности с $Q > 10$ + Стационарные сценарии свыше 16 минут с $Q \geq 5$ с неиндукционным нагревом плазмы.
ST-25-HTS [15]	Пуск 2012 г. по н. в.	г. Калхэм, Великобритания	REBCO B_0 = 1.0 Тл R_0 = 0.25 м	В 2015 г. поступило сообщение о непрерывном удержании плазмы с невысокой температурой в течение 29 часов.

SPARC (Smallest Possible ARC) [3, 16] Компания Commonwealth Fusion Systems в сотрудничестве с Массачусетским Технологическим институтом (MIT). Частное финансирование	Проектирование с 2018 г. по н. в. Сборка 2021 г. – 2027 г.	Кампус Devens, штат Массачусетс, США	REBCO B_0 = 12.2 Тл R_0 = 1.85 м I_p = 8.7 МА P_{fusion} = = 140 МВт	Планируемая продолжительность импульса удержания плазмы — 10 с Q = 11. Рассчитан на 10 лет службы и 13 тыс. импульсов Может работать с инжекцией следующих газов: H, D, T, 3He, 4He, Ne, Ar, Kr, and Xe.
ARC (Affordable, Robust, Compact) [17]	Проектирование с 2014 г. по н. в.	Промышленный парк «Джеймс Ривер» в округе Честерфилд, штат Вирджиния,США	REBCO B_0 = 9.25 Тл R_0 = 3.3 м I_p = 10 МА P_{fusion} = = 270 МВт	Устойчивый выход энергии с Q = 13.6 Планируемое начало производства электроэнергии — 2035 г.
Токамак TRT (Токамак Реакторных Технологий) [18, 19]	Проект	Россия	REBCO/ $NbTi/Nb_3Sn$ B_0 = 8.0 Тл R_0 = 2.15 м I_p = 5 МА P_{fusion} = 1 – 50 МВт	Квазистационарные режимы (100-150 с) с водородной, гелиевой и дейтериевой плазмой при плотностях $n_e = 2 \cdot 10^{20}$ м$^{-3}$ и с короткими ($t < 10$ с) разрядами с тритиевой плазмой при $Q > 2$.
Demo FNS (Demonstration Fusion Neutron Source) [20, 21] Гибридная установка, соединяющая в себе атомную энергетику и термоядерный синтез.	Проект	Россия	Nb_3Sn B_0 = 5.0 Тл R_0 = 3.2 м	Начало сооружения возможно к 2033 г. Проект токамака НТСП обмотками, являющийся источником 14 МэВ нейтронов для переработки отработанного топлива и получения электроэнергии.
HH70 [22, 23] Первый в мире действующий чисто ВТСП токамак.	Проектирование с 2022 г. Пуск июнь 2024 г.	г. Шанхай, компания Energy Singularity LTD, Китай		В 2025 г. достигнуто удержание плазмы в течение 335 с (~ 5.5 мин). Строительство следующего реактора компания планирует закончить к 2027-му, а прототип рентабельной электростанции с $Q > 10$ — к 2030 г.

Divertor Tokamak Test Facility (DTT) [24] Является частью Европейской термоядерной программы EUROFUSION.	Проектирование с 2015 г. н.в.	Итальянское Национальное агентство новых технологий по атомной и альтернативной энергетике (ENEA) Фраскатти, Италия	NbTi/Nb_3Sn B_0 = 6.0 Тл R_0 = 2.19 м I_p = 5.5 МА	Планируемая длительность импульсов 95 с В феврале 2026 г. начата стройка здания токамака. Идет изготовление обмоток, систем дополнительного нагрева плазмы, источников питания и т. д.

3. Термоядерная программа в Китае

Разработки Института физики плазмы Китайской академии наук (ASIPP), основанного в 1978 г. в городе Хэфэй провинции Аньхой, посвящены физике высокотемпературной плазмы, проектированию термоядерных реакторов, а также вспомогательным направлениям, таким как криогеника, сверхпроводящие системы, источники питания, диагностические системы и вакуумные технологии. План развития Китайской термоядерной программы в Хэфэе до 2060 гг. показан на рис. 2 [8].

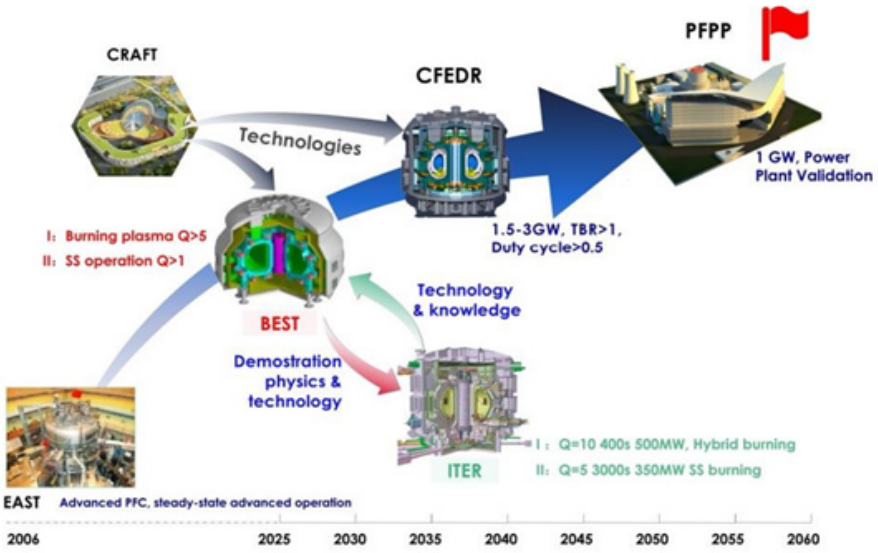


Рис. 2. Развитие термоядерной программы Китая в Институте Физики Плазмы Китайской Академии Наук (ASIPP) до 2060 гг.

На основе советского токамака Т7, купленного в 1990-е годы у Курчатовского института, ASIPP модернизировал и эксплуатировал ряд токамаков: HT-6B, HT-6M, HT-7. Затем был разработан и построен токамак EAST, использующий для изготовления тороидальных обмоток сверхпроводящий кабель-в-оболочке из российского NbTi. EAST часто попадает в новости науки и техники в качестве рекордсмена — рис. 3. В 2021 г. китайский токамак EAST достиг температуры плазмы 120 миллионов градусов Цельсия и удерживал этот показатель в течение 101 секунды. В январе 2025 г. на установке EAST был достигнут непрерывный разряд плазмы,

продолжавшийся 1066 секунд (почти 18 минут), уступив только французскому рекордсмену WEST с продолжительность удержания плазмы 22 минуты 17 секунд [5–6].

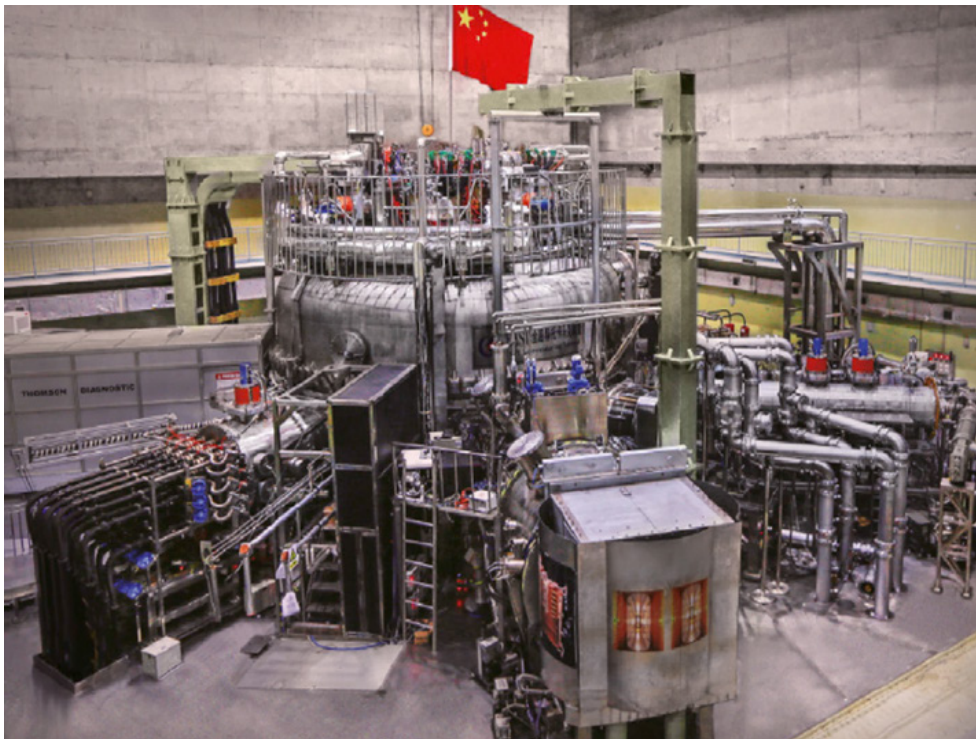


Рис. 3. Токамак EAST. Первый полностью сверхпроводящий токамак. ASIPP, Хэфэй. NbTi кабели в оболочке, B_0 = 3.5 Тл, R_0 = 1.8 м, I_p = 1 МА. Действует с 2006 г. по н. в.

Стоит отметить, что ASIPP отвечает более чем за 70 % китайских поставок для проекта ITER, включая такие компоненты, как полоидальная катушка магнитного поля № 6, корректирующие катушки, системы электропитания и диагностическое оборудование, облицовка каналов системы нейтральной инжекции пучков, прямоугольные сильфоны криостата и др.

В последние годы ASIPP ведет проектирование Китайского демонстрационного инженерного термоядерного реактора (China Fusion Engineering Testing (Demo) Reactor – CFET(D)R), который должен стать связующим звеном между экспериментальными токамаками и финальным Прототипом Термоядерной Электростанции (Prototype Fusion Power Plant — PFPP). Пояснение: в ранних публикациях аббревиатура CFEDR пишется через букву T (testing), в более поздних D (demo). Это одна и таже установка на разных стадиях проектирования. Далее CFEDR. Миссия CFEDR заключается в демонстрации высокого КПД (Q = 10–30), чистой выработки электроэнергии, а также в проверке материалов и компонентов в условиях высокого потока нейтронов.

В ноябре 2025 г. ASIPP под эгидой EuroFusion (европейский консорциум, объединяющий национальные институты термоядерных исследований, который координирует европейские усилия в области управляемого термоядерного синтеза, включая ITER и развитие собственных экспериментальных установок) сделал презентацию стратегии строительства токамака BEST (Burning Plasma Experimental Superconducting Tokamak). Это новый китайский сверхпроводящий токамак, предназначенный для работы с дейтерий-тритиевой (D–T) плазмой, строительство которого стартовало 30 июня 2023 года и, как ожидается, будет завершено во второй половине 2027 г. По своим масштабам токамак BEST займет промежуточное положение между JET и ITER. Он рассчитан на работу со стационарными режимами плазмы в магнитном поле B_0 = 6.15 Тл при объёме плазмы порядка 140 м³ (R_0 = 3.6 м, a = 1.1 м, плазменный ток до 7 МА). Суммарная мощность вспомогательного нагрева составляет 50 МВт и обеспечивается комбинацией систем инжекции нейтральных пучков и радиочастотного нагрева. После

ввода в эксплуатацию BEST станет крупнейшим в мире D–T токамаком до пуска ITER.

Отладка всех технологий BEST ведется на специально построенном испытательным комплексе CRAFT (Comprehensive Research Facility for Fusion Technology — Комплексная Исследовательская Платформа Термоядерных Технологий), который расположен в нескольких сотнях метров от места стройки токамака BEST в ASIPP. Сооружение платформы началось в сентябре 2019 года. Сегодня CRAFT включает около 20 специализированных стендов для сверхпроводящих магнитов, а также систем нагрева плазмы [19]. Иными словами, сегодня CRAFT — фактически работающий завод по производству компонентов токамаков [1].

Цели строительства BEST: достижение энергетического равновесия ($Q \geq 1$) в магнитном удержании D–T плазмы, формирование стационарных режимов, отработка тритиевого топливного цикла, а также исследование физики альфа-частиц и физики горящей плазмы ($Q \approx 5$).

Магнитная сверхпроводящая система BEST (рис. 4) состоит из:

— 16 Nb_3Sn катушек тороидального поля (TF) массой по 87.2 т каждая, изготовленных по технологии «кабель-в-оболочке». В областях с низким магнитным полем применяется стандартный для ITER Nb_3Sn кабель, а в областях с высоким полем — Nb_3Sn с повышенной плотностью тока;

— 7 катушек полоидального поля (PF), изготовленных из разных НТСП кабелей. Катушки № 1, № 6 и № 7 выполнены из Nb_3Sn, тогда как катушки № 2–5 изготовлены из NbTi, образуя оптимизированную по критическому току конфигурацию;

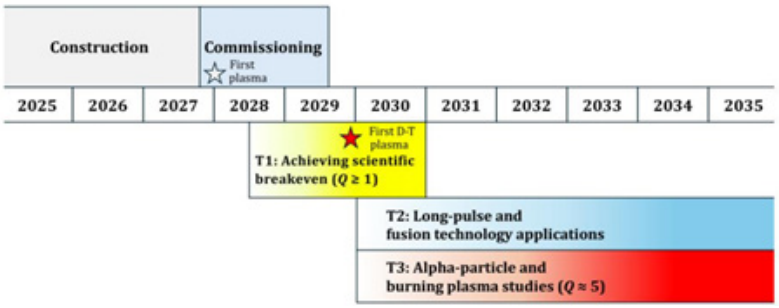
— центрального соленоида (CS), состоящего из 6 магнитов общей массой 180 т. Интересная особенность — хотя Китай полностью обладает домашней технологией изготовления НТСП кабелей с высокой плотностью тока, и делает ставку в УТС программе в основном на низкотемпературные сверхпроводники, внутренние секции каждого магнита центрального соленоида BEST будут намотаны из ВТСП-2. Номинальный ток CS составляет 46.5 кА, при этом достигаются пиковые значения магнитного поля 18.8 Тл (в ВТСП-2) и 12.4 Тл (в НТСП) соответственно.

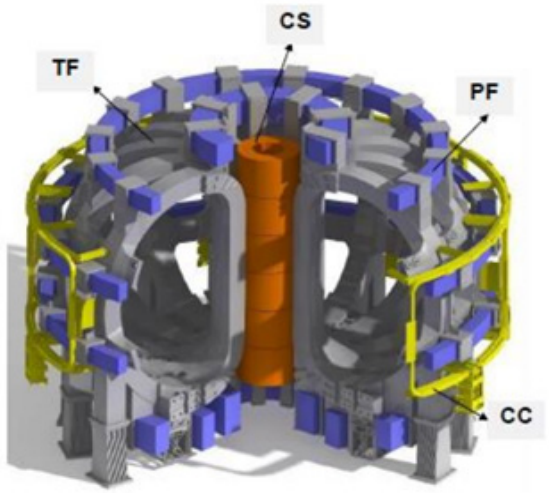
Суммарная масса магнитной системы BEST составит приблизительно 2000 тонн.

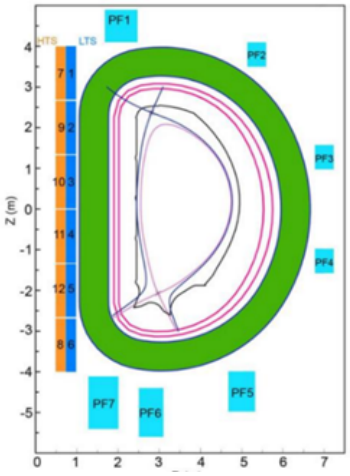
Следующим шагом китайской программы должен стать демо термоядерный реактор CFEDR, задуманные еще в 2011 г. Его реальное инженерное проектирование началось в 2017 [4]. Все PF, TF и катушки центрального соленоида CFEDR пока планируются из НТСП кабелей в оболочке — рис. 5. В 16 идентичных D-образных TF катушек заложено три типа кабелей: в области высокого магнитного поля до 14.7 Тл используется CICC на основе Nb_3Sn с повышенной плотностью критического тока; в области среднего поля с пиковым полем 11.1 Тл применяется Nb_3Sn кабель ИТЭРовского типа, а в области низкого поля (6.6 Тл) используется CICC на основе NbTi.

Магнит центрального соленоида CFEDR состоит из восьми соленоидов, намотанных с использованием Nb_3Sn с высоким критическим током. Также для CFEDR спроектировано семь полоидальных катушек (PF), при этом Nb_3Sn выбран для изготовления катушек PF1 и PF7, а NbTi — для остальных PF-катушек.

Модельная катушка центрального соленоида CFEDR, изготовленная с использованием Nb_3Sn кабеля в оболочке с высокой плотностью тока, была разработана в ASIPP в 2020 году. Макет вакуумной камеры CFETR в масштабе 1/8 сектора реального размера разрабатывается для отработки технологий сварки и неразрушающего контроля. Также изготовлен один сектор прототипа вакуумной камеры CFETR в масштабе 1/16. Работы на пути к коммерческой китайской термоядерной электростанции PFPP (Prototype Fusion Power Plant) с мощностью > 1 ГВт продолжаются. Появление такой демо-электростанции планируется Китаем на 2040 – 2060 гг.







Major radius, R_0	3.6 m
Minor radius, a	1.1 m
Elongation, k	1.88
Triangularity, δ	0.49
Plasma volume	142 m^3
Magnetic field, B_0	6.15T
Plasma current, I_p	up to 7MA
Auxiliary heating power (nominal power) ECRH ICRH LH NBI	 15MW (24MW) 10MW (16MW) 10MW (16MW) 12MW (15MW)
Tritium inventory	110 g

Рис. 4. Параметры сверхпроводящего токамака BEST (ASIPP, Китай). Пуск запланирован на 2027 г. REBCO/NbTi/Nb_3Sn, B_0 = 3.6 Тл, R_0 = 6.15 м, I_p = 7 МА, P_{fusion} = 10–200 МВт.

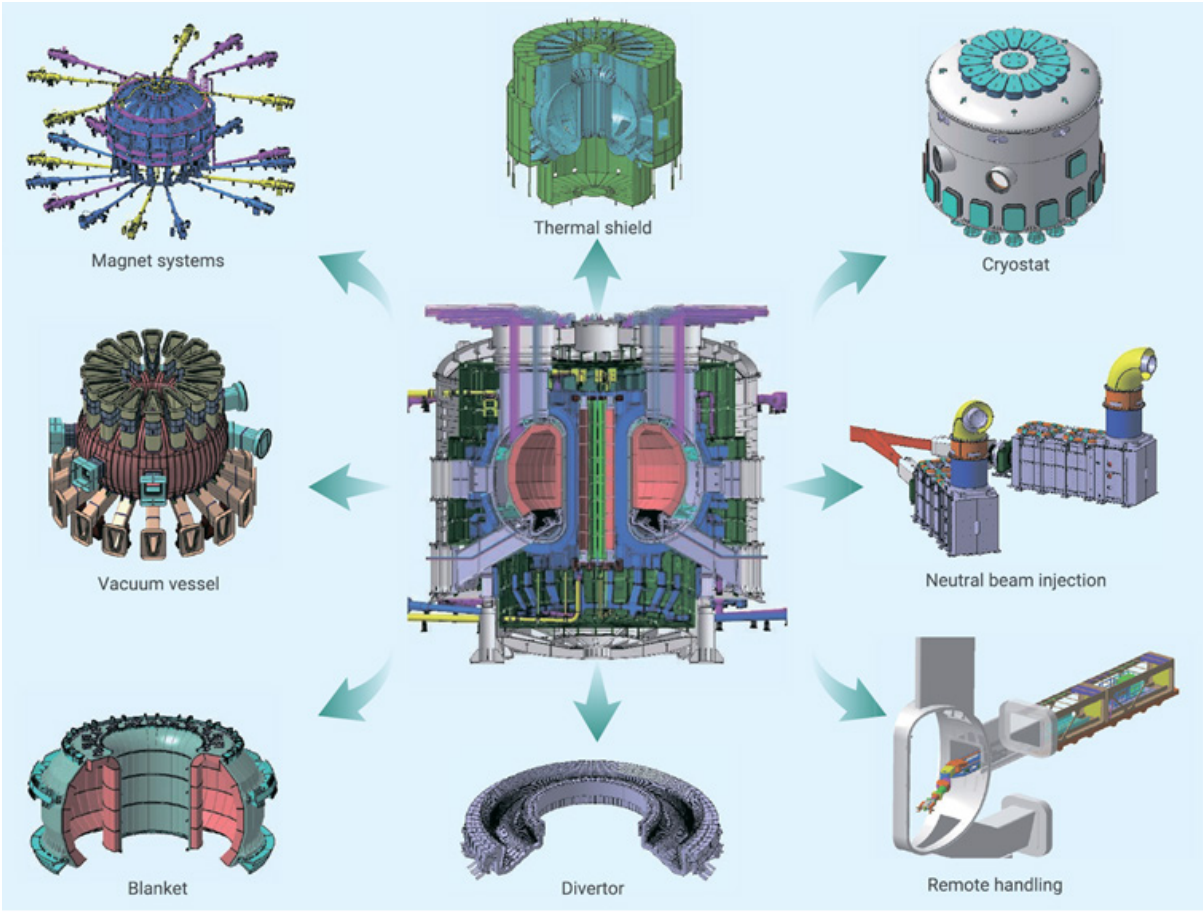


Рис. 5. Проект китайского демо реактора CFEDR. ASIPP, Хэфэй. НТСП кабели в оболочке. B_0 = 6.3 Тл, R_0 = 7.8 м, I_p = 15 МА, P_{fusion} = 200 МВт – 3 ГВт.

Интереса также заслуживают разработки коммерческой Шанхайской компании Energy Singularity [22], которая в 2022 г. начала проектирование, а в уже в июне 2024 г. получила первую плазму на первом в мире чисто ВТСП токамаке НН70 [23]. Магнитная система этого небольшого токамака состоит из 12 тороидальных, 6 полоидальных и 8 обмоток центрального соленоида — рис.6. Все обмотки выполнены в виде изолированных двойных ВТСП-2 галет разной формы и размера, импрегнированных эпоксидной смолой и косвенно охлаждаемых трубками с гелием при 20 К. Проводник состоит из пропаянного пакета, который состоит из двух ВТСП-2 лент шириной 10 мм, и двух медных лент шириной 12 мм. Производитель ВТСП-2 — Shanghai Superconductor Technology. После намотки двойные D-образные галеты тора вместе с трубками охлаждения заливаются эпоксидной смолой и завариваются в стальной корпус. Большой радиус тора составляет 0.7 м с магнитным полем на оси 0.6 Тл при токе 666 А. Полная индуктивность тора 6.48 Гн.Стенд токамака оснащен гелиевой системой охлаждения на 500 Вт при 4 К, способной снабжать магниты газообразным гелием при 20 К либо 50 К.

В 2025 г. достигнуто удержание плазмы в течение 335 с (~ 5.5 минут). Строительство следующего реактора компания планирует закончить к 2027-му, а прототип рентабельной электростанции с $Q > 10$ — к 2030 году.

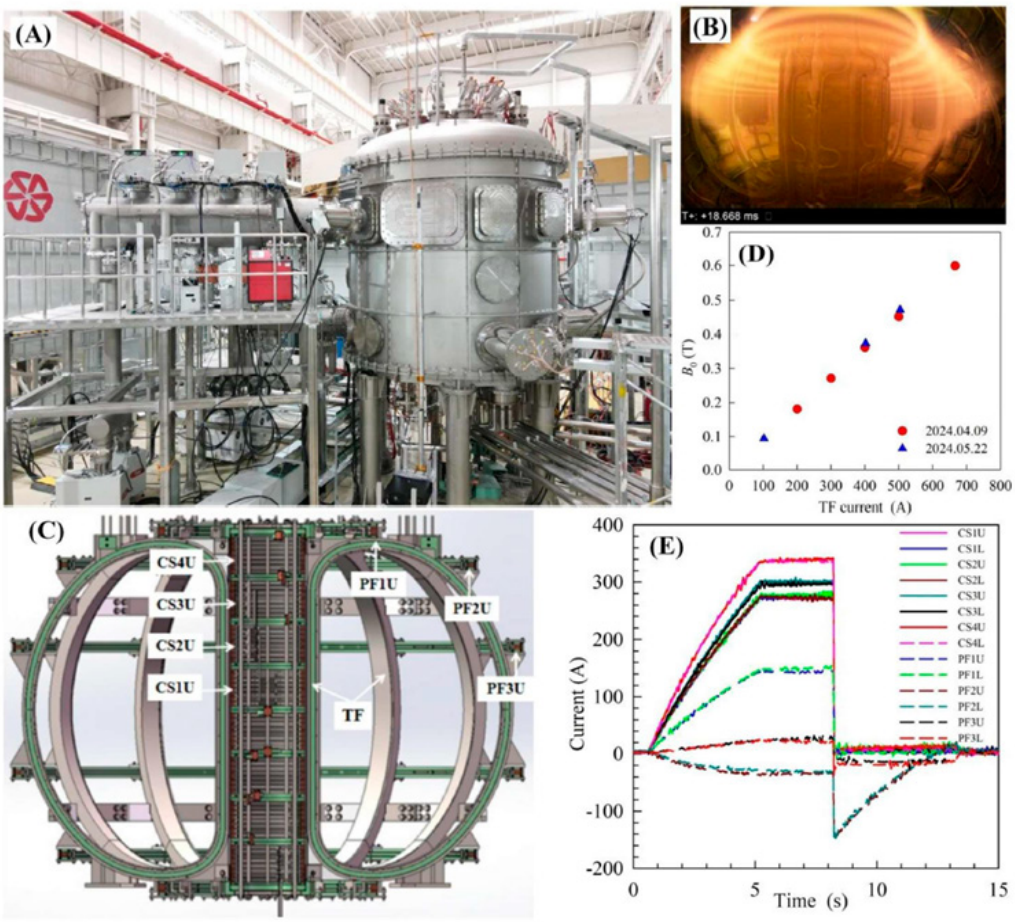


Рис. 6. Первый в мире действующий чисто ВТСП-2 токамак HH70. Китай. Компания Energy Singularity [22].

4. Термоядерная программа в Массачусетском Технологическом Институте (США): от тестового ВТСП-2 токамака SPARC к коммерческой термоядерной электростанции ARC.

Термоядерная тема в Массачусетском Технологическом Институте стартовала в США с начала 1970-х сразу после сообщений советских ученых о первых токамаках — рис. 7. Успешно отработали резистивные токамаки линейки Alcator (сокращение итальянских слов Alto Campo Toro, что обозначает «высоко-полевой тор»). Рекордсменом из них стал последний в линейке небольшой резистивный импульсный токамак Alcator C Mod (1991–2016) с магнитным полем до 8 Тл на оси, использующий двухкомпонентную плазму дейтерий + водород, либо гелий-3. Постройка Alcator C Mod обошлась Министерству энергетики США (DOE) в 200 миллионов долларов. В 2016 г. финансирование было прекращено из-за перенаправления денежных потоков на ITER, несмотря на то, что Alcator C Mod позволил получить рекордное на тот момент давление плазмы: 2.05 атм при поле на оси тора 5.7 Тл в импульсе 2 с и температуре плазмы 35 миллионов градусов.

В 2018 г. без особого шума была учреждена частная американская компания Commonwealth Fusion Systems (CFS), вышедшая из Массачусетского технологического института (рис. 7) [25]. Спустя всего 3 года в 2021 г. на весь мир нашумело сообщение об успешном испытании D-образной полномасштабной тестовой секции тора для ВТСП-2 токамака SPARC (Smallest Possible ARC), который уже в 2027 году должен стать первым в мире токамаком, способным производить больше энергии за счёт термоядерного синтеза, чем требуется для питания самого процесса $Q > 1$.

Строительство SPARC [26] ведётся в Девенсе, штат Массачусетс, США, там же расположена фабрика ВТСП-2 магнитов. Пожалуй, еще никогда строители токамаков не уделяли та-

кого большого внимания современным PR технологиям. Результат — привлечение рекордных 3 млрд долларов частных инвестиций. Благодаря успешной рекламе первых результатов испытаний тестовой D-образной секции тора SPARC авторам проекта удалось привлечь серьезное финансирование. В число инвесторов CFS вошли Breakthrough Energy Ventures Билла Гейтса, Khosla Ventures Винода Хослы, сингапурская Temasek, норвежская Equinor, американская Devonshire Investors, Google и другие.

Инвесторам SPARC обещают включение промышленных термоядерных электростанции ARC (Affordable, Robust, Compact) с $Q > 10$ и мощностью 200 МВт в энергетическую систему США уже в начале 2030-х годов. Подключение ARC к энергосети планируется в промышленном парке «Джеймс Ривер» в округе Честерфилд, штат Вирджиния. В 2025 г. CFS подписала прямое корпоративное соглашение о поставке Google 200 МВт электроэнергии, произведенной на термоядерной электростанции с реактором ARC. А компания Eni заключила с CFS соглашение на поставку в 2030-е гг. 400 МВт электроэнергии на сумму 1 млрд долл. США.

Сама по себе электрическая мощность 200 МВт скромна. Аналогичные значения для мощных угольных и атомных электростанций достигают нескольких гигаватт. Тем не менее, авторы проекта заявляют, что будущие коммерческие термоядерные ВТСП-2 электростанции не будут ограничены в возможности масштабировании мощности, а также обеспечат экологическую безопасность без углеродных выбросов и рисков радиоактивного заражения территорий.

Магнитная система SPARC спроектирована на основе ВТСП лент второго поколения с применением разных технологий изготовления магнитов постоянного (тор) и переменного (центральный соленоид и полоидальные обмотки) магнитного поля. В первом случае применяется технология штабелирования стальных D-образных каркасов, в которых утоплены нескрученные пакеты из ВТСП-2 лент с резистивно связанными витками. Во втором — изготовление галет, из многоленточных скрученных изолированных ВТСП-2 кабелей в оболочке. Все магниты имеют косвенное охлаждение с прокачкой гелия высокого давления по трубкам при $T = 20$ К. Всего для SPARC будет изготовлено 18 секций тора (TF), 6 магнитов центрального соленоида (CS) и 8 полоидальных обмоток (PF) — рис. 8.

В сентябре 2021 г. CFS сообщила об успешном испытании прототипа секции тороидального поля SPARC, на обмотке которой была достигнута напряженность магнитного поля 20.1 Тл при токе 40.5 кА/20 К [27] — рис. 7. В ходе эксперимента была испытана сборка из 16 D-образных ВТСП-2 обмоток на стальных каркасах, представляющих собой 1/18 тора SPARC. Вес секции составлял 10 тонн. На нее ушло 270 км ВТСП 2 ленты. Размер обмотки 1.9 х 2.9 м. На стопки REBCO лент действовала сила Лоренца 815 кН/м и почти 1 ГПа механического напряжения, воспринимался несущим корпусом из аустенитной нержавеющей стали Nitronic-50. Сопротивление пятнадцати внутренних разъёмных соединений между D-образными обмотками сборки колебалось в диапазоне 0.5–2.0 нОм при 20 К /12 Тл. Была продемонстрирована работоспособность REBCO токовводов на 50 кА и криогенной системы на базе криокулеров холодопроизводительность 600 Вт при 20 К при массовых расходах до 70 г/с и максимальном расчётном давлении 20 бар (абс.). В ходе намеренного, по словам команды CFS квенча при токе 31.5 кА тестовая секция тороидального поля получила локальные термические повреждения, при этом был собран ряд важных данных по пассивной защите неизолированных ВСТП-2 обмоток с резистивно связанными витками.

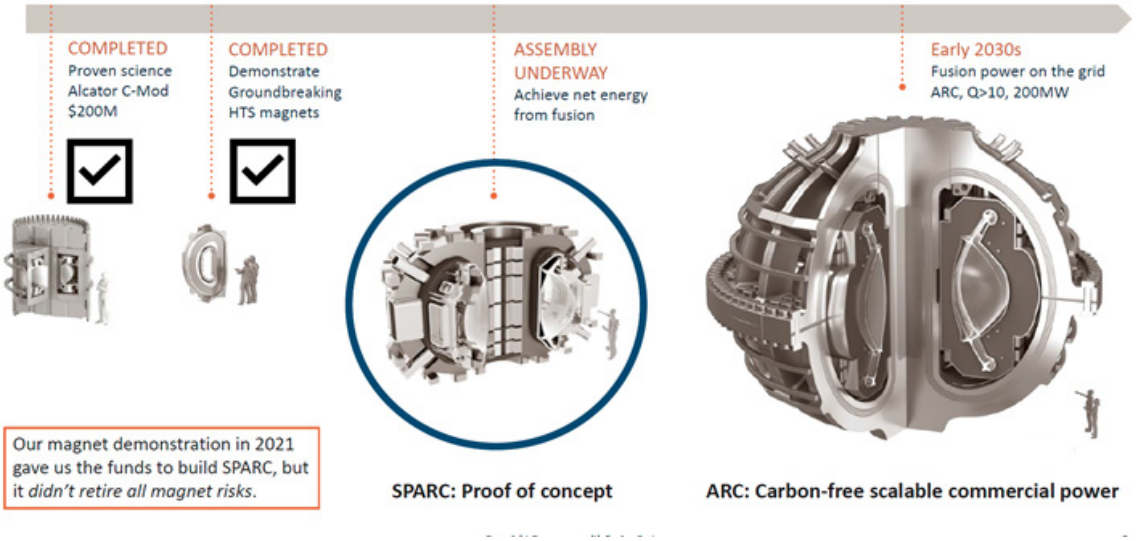
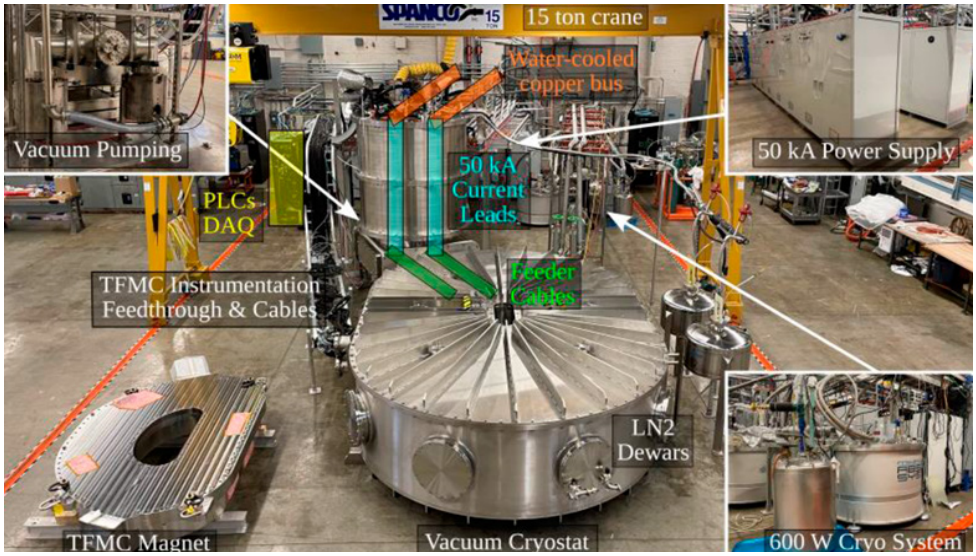


Рис. 7. Развитие термоядерной программы США в Массачусетском Технологическом Институте (MIT) и частной компании Commonwealth Fusion Systems (CFS).



Design Parameter	TFMC	TF Coil
Magnet mass [kg]	10,058	18,025
Magnet size [m]	1.9 x 2.9	3.0 x 4.3
Winding pack (WP) mass [kg]	5,113	7,975
WP minimum turn radius [m]	0.2	0.4
WP current density [A/mm2]	153	94
WP inductance [H]	0.14	0.59
WP amp-turns [MA-turns]	10.4	6.3
Terminal current [kA]	40.5 kA	31.3
Number of turns	256	200
Number of pancakes	16	16
Total REBCO [km]	270	270
Coolant type	Supercritical helium	
Coolant pressure [bar]	10 – 20	15
Operating temperature [K]	20	8 – 17
Peak magnetic field [T]	20.1	23
Peak Lorentz loading [kN/m]	822	750
Magnetic stored energy [MJ]	110	316

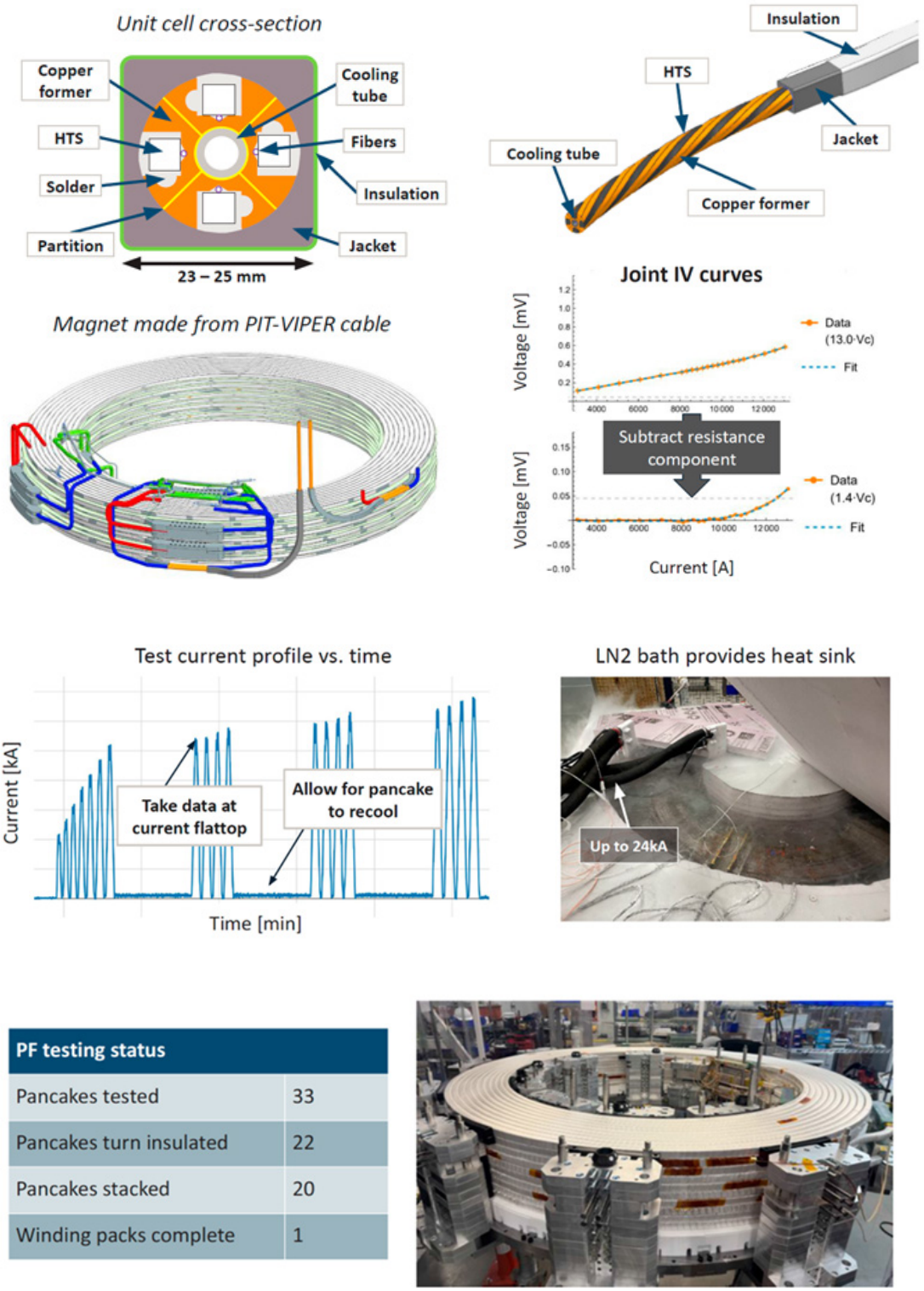
Рис. 8. Испытания прототипа TF D-образной секции тороидального поля SPARC на испытательном стенде MIT в 2021 г.

Сейчас в 2026 г. идет поточное изготовление секций тора, усовершенствованных после получения экспериментальных данных на тестовой обмотке 2021 г. Вынос первой серийной TF секции с фабрики ВТСП-2 магнитов и его доставка в зал SPARC состоялся в MIT Девенсе в декабре 2025 г. Секция TF обмотки медленно ехала несколько сотен метров в сопровождении духового оркестра, за ней понуро брели ~~родственники~~ создатели))). Видео можно посмотреть, перейдя по ссылке на сайт CFS [25].

Параллельно идет изготовление обмоток переменного поля. На рис. 9. показаны полоидальные обмотки SPARC, намотанные из ВТСП-2 кабеля PIT-VIPER. Рабочие параметра кабеля: 25 × 25 мм, 50 кА, индукция 25 Тл и скорость изменения магнитного поля 5 Тл/с. Конструкция подходит для масштабирования, в ней минимизированы потери на переменном токе и повышена механическая прочность. Данный вид кабеля будет использован в 14 обмотках полоидального поля и центрального соленоида SPARC. В настоящий момент испытаны 33 галеты и собрана 1 полоидальная обмотка [28].

Рис. 9. Сборка магнитной системы TF поля токамака SPARC. REBCO, B_0 = 12.2 Тл, R_0 = 1.85 м. Пиковое поле на обмотке до 25 Тл/20 К.

При производстве магнитов SPARC каждая ВТСП-2 галета из кабеля PIT-VIPER испытывается при 77 К с током до 20 кА, затем после сборки галет каждый магнит будет испытываться при охлаждении газообразным гелием при 20 К с током до 50 кА — рис. 10. Для того чтобы промерять критический ток в разных областях обмотки, галеты нагружают импульсами тока, превышающего I_c, с последующими отключениями на восстановление и остывание галеты. Перегрузка током на 5 кА превышающим критический ток ВТСП-2 галет SPARC не приводит к повреждениям обмотки в жидком азоте.



PF testing status	
Pancakes tested	33
Pancakes turn insulated	22
Pancakes stacked	20
Winding packs complete	1

Рис. 10. Твистированный ВТСП-2 кабель PIT VIPER и испытания полоидальных ВТСП2 обмоток SPARC.

В заключении стоит отметить, что совсем недавно, частная китайская компания Energy Singularity Fusion Power Technology (Шанхай) достигла мощности 21.7 Тл в высокотемпературном сверхпроводящем тороидальном магните для применения в токамаках. Технология выглядит похожей на технологию CFS [29].

Заключение

Похоже, у нас на глазах разворачивается решительная сверхпроводящая гонка термоядерных программ двух гигантов — США и Китая. В неравной схватке сошлись токамаки SPARC и BEST. Счет идет на месяцы. В то время как реализация проекта ITER все время отодвигается в туманные 2040 гг, оба проекта назначили 2027 г. решающим, пообещав управляемую термоядерную реакцию с Q > 1. В Америке делают смелую ставку all-in на ультра компактный токамак из ВТСП-2 с сильным полем. Китай идет по хорошо отлаженной НТСП технологии «большой радиус/низкое поле». Кто окажется прав — совсем скоро узнаем. Вот только кто бы не победил, в случае успеха все технологические решения тут же станут коммерческой тайной, как это уже было в случае с МРТ томографией. И когда кончатся углеводороды у нас останется 2 пути — покупать дорогое электричество за рубежом, или все-таки уже сейчас усердно работать над проектированием собственных термоядерных электростанций.

Благодарности

Автор от всей души благодарит профессора В. С. Высоцкого за внимание и ценные дополнения к статье.

Литература

[1] В. В. Ильгисонис, Энергетическая политика **11**, 20 (2025). DOI: 10.46920/2409-5516_2025_11214_20

[2] A. Molodyk, S. Samoilenkov, A. Markelov, P. Degtyarenko, S. Lee, V. Petrykin, M. Gaifullin, A. Mankevich, A. Vavilov, B. Sorbom, J. Cheng, S. Garberg, L. Kesler, Z. Hartwig, S. Gavrilkin, A. Tsvetkov, T. Okada, S. Awaji, D. Abraimov, A. Francis, G. Bradford, D. Larbalestier, C. Senatore, M. Bonura, A.E. Pantoja, S.C. Wimbush, N.M. Strickland, A. Vasiliev, Sci Rep **11**, 2084 (2021). DOI: 10.1038/s41598-021-81559-z

[3] A. Creely, M. Greenwald, S. Ballinger, D. Brunner, J. Canik, J. Doody, J. Zhu, Journal of Plasma Physics **86**, 865860502 (2020). DOI: 10.1017/S0022377820001257

[4] J. Zheng, J. Qin, K. Lu, M. Xu, X. Duan, G. Xu, J. Hu, X. Gong, Q. Zang, Z. Liu, L. Wang, R. Ding, J. Chen, P. Li, L. Xue, L. Cai, Y. Song, The Innovation **3**, 100269 (2022). DOI: 10.1016/j.xinn.2022.100269

[5] World Record Plasma Discharge in Tore Supra, EUROfusion // web.archeve.org, 2025. URL: https://web.archive.org/web/20160112215839mp_/https://www.euro-fusion.org/2002/08/world-record-plasma-discharge-in-tore-supra/

[6] Nuclear fusion: WEST beats the world record for plasma duration!, CEA // www.cea.fr, 2025 URL: https://www.cea.fr/english/Pages/News/nuclear-fusion-west-beats-the-world-record-for-plasma-duration.aspx

[7] J. Wei, W.G. Chen, W.Y. Wu, Y.N. Pan, D.M. Gao, S.T. Wu, Y. Wu, IEEE Transactions on Applied Superconductivity **20**, 556 (2010). DOI: 10.1109/TASC.2010.2040030

[8] Отчет EUROfusion «BEST research plan Report», v1.1 // euro-fusion.org, ноябрь 2025. URL: https://euro-fusion.org/wp-content/uploads/2025/11/BEST-Research-Plan-v1.1.pdf

[9] J.-G. Kwak, T. Rhee, H. Han, J.S. Kang, J.G. Bak, H.J. Ahn, IEEE Transactions on Plasma Science **48**, 1388 (2020). DOI: 10.1109/TPS.2020.2964776

[10] A.N. Sharma, U. Prasad, K. Doshi, P. Varmora, Y. Khristi, D. Patel, A. Panchal, S.J. Jadeja, V.L. Tanna, Z. Khan, D. Sharma, S. Pradhan, IEEE Transactions on Applied Superconductivity **25**, 4200107 (2015). DOI: 10.1109/TASC.2014.2363053

[11] T. Rummel, K. Risse, M. Nagel, T. Mönnich, F. Füllenbach, H. Bosch, IEEE Transactions on Plasma Science **46**, 1517 (2018). DOI: 10.1109/TPS.2018.2816399
[12] A. Iiyoshi, A. Komori, A. Ejiri, M. Emoto, H. Funaba, M. Goto, K. Ida, H. Idei, S. Inagaki, S. Kado, Nuclear Fusion **39**, 1245 (1999). DOI: 10.1088/0029-5515/39/9Y/313
[13] JT-60SA Construction, QST // www.qst.go.jp, 2020. URL: https://www.qst.go.jp/site/jt60-english/6599.html
[14] ITER Official Website // iter.org, 2025. URL: https://www.iter.org/
[15] A. Sykes, A.E. Costley, C.G. Windsor, O. Asunta, G. Brittles, P. Buxton, V. Chuyanov, J.W. Connor, M.P. Gryaznevich, B. Huang, Nucl. Fusion **58**, 016039 (2018). DOI: 10.1088/1741-4326/aa8c8d
[16] Z.S. Hartwig, R.F. Vieira, B.N. Sorbom, R.A. Badcock, M. Bajko, W.K Beck, B. Castaldo, C.L Craighill, M. Davies, J. Estrada, Supercond. Sci. Technol. **33**, 11LT01 (2020). DOI: 10.1088/1361-6668/abb8c0
[17] B.N. Sorbom, J. Ball, T.R. Palmer, F.J. Mangiarotti, J.M. Sierchio, P. Bonoli, C. Kasten, D.A. Sutherland, H.S. Barnard, C.B. Haakonsen, J. Goh, C. Sung, D.G. Whyte, Fusion Eng. Des., **100**, 378 (2015). DOI: 10.1016/j.fusengdes.2015.07.008
[18] А.В. Красильников, С.В. Коновалов, Э.Н. Бондарчук, И.В. Маазуль, И.Ю. Родин, А.Б. Минеев, Е.Г. Кузьмин, А.А. Кавин, Д.А. Карпов, В.М. Леонов, Р.Р. Хайрутдинов, А.С. Кукушкин, Физика плазмы **47**, 970 (2021). DOI: 10.31857/S0367292121110196
[19] В.Е. Сытников, С.А. Лелехов, А.В. Красильников, В.В. Зубко, С.С. Фетисов, В.С. Высоцкий, Физика плазмы **47**, 1087 (2021). DOI: 10.31857/S036729212111024X
[20] B.V. Kuteev, Yu.S. Shpanskiy, Nucl. Fusion **59**, 076014 (2019). DOI: 10.1088/1741-4326/ab14a8
[21] S.A. Lelekhov, A.V. Krasil'nikov, B.V. Kuteev, I.A. Kovalev, D.P. Ivanov, A.I. Ryazanov, M.I. Surin, S.V. Shavkin, V.S. Vysotsky, L.V. Potanina, G.G. Svalov, I.M. Abdyukhanov, M.V. Alekseev, A.S. Tsapleva, V.I. Pantsyrny, E.R. Zapretilina, I.Y. Rodin, A.A. Voronova, IEEE Transactions on Applied Superconductivity **28**, 4200305 (2018). DOI: 10.1109/TASC.2017.2768186
[22] Energy Singularity // energysingularity.cn, 2025. URL: https://www.energysingularity.cn/en/
[23] Z.Y. Li, Z.C. Pan, Q.J. Zhang, K.P. Zhu, C. Zhang, Z.W. Zhang, G. Dong, Y.M. Ye, Z. Yang, Superconductivity **12**, 100137 (2024). DOI: 10.1016/j.supcon.2024.100137
[24] DTT - Divertor Tokamak Test facility // www.dtt-project.it , 2025. URL: https://www.dtt-project.it/
[25] Commonwealth Fusion Systems // cfs.energy, 2025. URL: https://cfs.energy/
[26] A. J. Creely, M. J. Greenwald, S. B. Ballinger, D. Brunner, J. Canik et al., J. Plasma Phys. **86**, 865860502 (2020). DOI: 10.1017/S0022377820001257
[27] Z.S. Hartwig, R.F. Vieira, D. Dunn, T. Golfinopoulos, B. LaBombard et al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity **34**, 0600316 (2024). DOI: 10.1109/TASC.2023.3332613
[28] C. Sanabria, A. Radovinsky, C. Craighill, K. Uppalapati, A. Warner et al., Supercond. Sci. Technol. **38** (2024). DOI: 10.1088/1361-6668/ad7efc
[29] Z.Y. Li, Z.C. Pan, H.G. Yang, IEEE Transactions on Applied Superconductivity **35**, 4203006 (2025). DOI: 10.1109/TASC.2025.3573869

Superconducting tokamakas and stellarators in 2026

D. I. Shutova[1,*]

1 National Nuclear University MEPHI, Kashirskoe highway, 31, Moscow, Russia
* e-mail: shutovadi@mail.ru

A brief overview of some operating and planned superconducting tokamaks worldwide as of early 2026 is presented. The main focus is on magnetic systems based on low- and high-temperature superconducting windings. A comparative analysis of the operating parameters is provided. The prospects of fusion programs in China and the United States through 2060 are discussed in detail.

Keywords: tokamak, fusion, CTF; HTS-2; high-temperature superconductor; second-generation HTS tape; SPARC; ARC; CFETR; CFEDR; BEST; ASIPP; MIT; CFS; WEST.

Дарья Игоревна Шутова — научный сотрудник Национального ядерного университета МИФИ.

Darya I. Shutova — Researcher, National Nuclear University MEPHI.