

# Новые технологии для энергонезависимости и РЭА: опыт Китая

Андрей Кашкаров

В статье анализируются достижения Китая в сфере возобновляемой энергетики и технологий термоядерного синтеза, направленных на повышение энергонезависимости страны. Основное внимание уделено проектам токамаков, в частности, установке НН70, использующей высокотемпературные сверхпроводящие материалы для увеличения эффективности реакторов. Кроме того, рассматриваются разработки в области экологичного производства аккумуляторов, что способствует снижению затрат и повышению устойчивости энергетической системы.

*Никакое устройство, способное давать полностью бесплатную энергию, никогда не будет допущено на рынок.*

**Н. Тесла**

Уделяя внимание росту китайского производства в РЭА и смежных отраслях, уместно проанализировать инновационные разработки в материаловедении литий-ионных аккумуляторов и преобразователей возобновляемой электроэнергии, среди которых мощные термоядерные энергетические станции – токамаки.

Инвестиции в сферу возобновляемой энергетики (солнце, ветер, вода, иные источники и даже термоядерный синтез для электрогенераторных установок) обусловлены глобальной тенденцией ускорения развития экологических энергоустановок и экономическими преобразованиями. На глобальном уровне имеющиеся мощности не излишни, а скорее, недостаточны. Поэтому глобальный спрос на новые энергетические продукты постоянно растёт. По оценкам Международного энергетического агентства, со временем мировые продажи электроэнергии только вырастут, несмотря на уменьшение энергопотребления отдельными бытовыми устройствами и РЭА. Новые энергетические установки из возобновляемой энергии могут достичь суммарной мощности 627 ГВт в 2025 году и почти 880 ГВт к 2030 году. Это означает, что имеющиеся производственные мощности всё ещё далеки от удовлетворения потенциального рыночного спроса, особенно на новые энергетические продукты в развивающихся странах. Показатель потребления электроэнергии на душу

населения рассчитывается как отношение эквивалентной потреблённой электроэнергии в год к численности населения страны или региона. Данные приведены в кВт/ч. К сведению, лидером рейтинга с большим отрывом является островное государство Исландия с населением в 357 тысяч человек. Исландия опережает со значительным отрывом страны Евросоюза по произ-

водству электроэнергии. А в третью десятку входят ФРГ (7035 кВт/ч), Франция (6940 кВт/ч), Россия (6603 кВт/ч).

Несмотря на большое население, Китай находится только на 52 месте с показателем 3927 кВт/ч, а Бхарат (Индия) с населением в 1,5 млрд человек – на 108 месте с показателем всего в 810 кВт/ч. При этом доля от мирового производства электроэнергии в КНР велика и составляет 9,2%. То есть Китай преимущественно экспортирует электроэнергию. На рис. 1 представлена инфографика производства и потребления электроэнергии некоторых стран в мире.

Когда речь идёт об энергообеспечении, необходимо предусматривать вызовы завтрашнего дня. Это важно для энергетической независимости



Рис. 1. Инфографика производства и потребления электроэнергии



Рис. 2. Прогноз потребления электроэнергии в мире по данным Международного энергетического агентства

критической инфраструктуры и качества жизни людей. Имеет смысл обратиться к опыту европейских стран. К примеру, в Финляндии доля автономного обеспечения частных домохозяйств электроэнергией посредством возобновляемых источников достигает 55%, в Германии – до 80%. Этот сектор постоянно расширяется. Далее рассмотрим новации разработок в КНР, где энергонезависимости уделяют большое внимание. Прогноз потребления электроэнергии в мире до 2035 года, по данным Международного энергетического агентства, представлен на рис. 2.

### Новые достижения в разработках термоядерной электростанции в КНР

В КНР (и не только) продолжают работы по созданию мощной термоядерной электростанции (токамака) на основе технологии термоядерного синтеза для чистой энергии – высокотемпературного сверхпроводящего генератора Honghuang 70 (HH70). Управляемый ядерный синтез – это передовая технология с выдающимися преимуществами, такими как безопасный доступ к природным и практически неисчерпаемым энергоресурсам. Технология считается самой перспективной среди способов решения глобальных энергетических и экологических проблем и содействия глобальному устойчивому развитию стран.

### Искусственное солнце и его перспективы

Новые разработки КНР находятся в центре внимания глобальных исследований в области контролируемого ядерного синтеза с эффектом магнитного удержания. Они являются конкурентными в соревновании разработчиков основных мировых держав с развитой экономикой и интеллектуальным потенциалом, которое ведёт к внедрению инженерных инноваций в области энергетической независимости. Токамак не без оснований называют «искусственным солнцем» из-за оригинального метода генерации энергии, аналогичного солнечному. На фоне проблематики энергетического кризиса, актуальной в разных странах мира, термоядерный синтез в условиях естественных (природных) ограничений рассматривают как энергетическое решение, обеспечивающее



Рис. 3. Термоядерная электростанция HH70 (КНР)

человечеству почти неисчерпаемый, экологически чистый и условно недорогой источник энергии.

Отношение вырабатываемой электроэнергии к энергии потребляемой – важный технический параметр – коэффициент усиления для поддержания реакции синтеза ( $Q$ ) термоядерной электростанции. Для термоядерных устройств значение  $Q$  является важнейшим показателем, прямо связанным с энергетической эффективностью термоядерного реактора. По этому параметру определяют прирост выработки электроэнергии или КПД термоядерной электростанции. Значение  $Q > 1$  означает, что выходная энергия генератора больше, чем потребляемая им, необходимая для поддержания реакции. Пока максимальное уже достигнутое значение  $Q$  составляет 1,53. Напряжённость магнитного поля уже завершённой модели HH70 – 2,5 Тл. В качестве материала для сверхпроводящих катушек в HH70 применяется ReBCO (редкоземельный оксид бария-меди) – сравнительно недорогое в производстве соединение, позволяющее существенно сократить затраты на строительство термоядерных электрогенераторов. Достигнутые результаты показывают, что следующее поколение токамаков по занимаемому объёму будет на 98% меньше традиционных низкотемпературных предшественников. На рис. 3 представлен вид термоядерной электростанции HH70 (КНР). Фото из [1].

Разработчик устройства – шанхайская компания по термоядерной энергии Energy Singularity – не единственный коммерческий производитель сверхпроводящего токамака. Рабо-

ты по проектированию устройства начались в марте 2022 года. Тогда же были получены результаты научной проверки осуществимости технического решения. Окончание работ для усовершенствованной модели термоядерной электростанции запланировано на 2027 год. В 2018 году американская компания Commonwealth Fusion Systems (CFS) стала первой в мире, предложившей небольшое по размеру высокотемпературное сверхпроводящее устройство – токамак SPARC с  $Q \geq 10$ . Активное строительство SPARC началось в 2022 году, а завершение работ планируется в 2025 году. На рис. 4 представлен вид на строительную площадку демонстрационного комплекса термоядерной электростанции (фото из [5]).

Разрабатываются высокотемпературные сверхпроводящие D-образные магниты, чтобы достичь напряжённости магнитного поля в 25 Тл. Производственные испытания планируется завершить к концу 2024 года.

Компания Energy Singularity была основана в Шанхае в июне 2021 года и изначально сосредоточилась на исследовании коммерчески жизнеспособных высокотемпературных сверхпроводящих электростанций и программных систем управления ими. Акционерами являются компания miHoYo, разработчик китайской ролевой игры с открытым миром Genshin Impact, и китайский производитель электромобилей NIO. Промежуточная модель получила обозначение HH170, а после 2030 года Energy Singularity планирует строительство мощной термоядерной электростанции HH380.

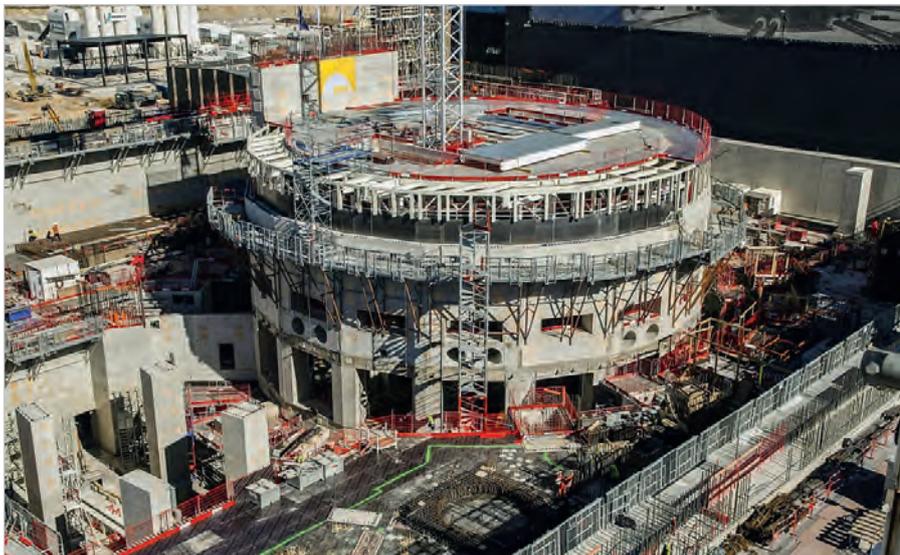


Рис. 4. Вид на строительную площадку демонстрационного комплекса термоядерной энергостанции, 2022 год

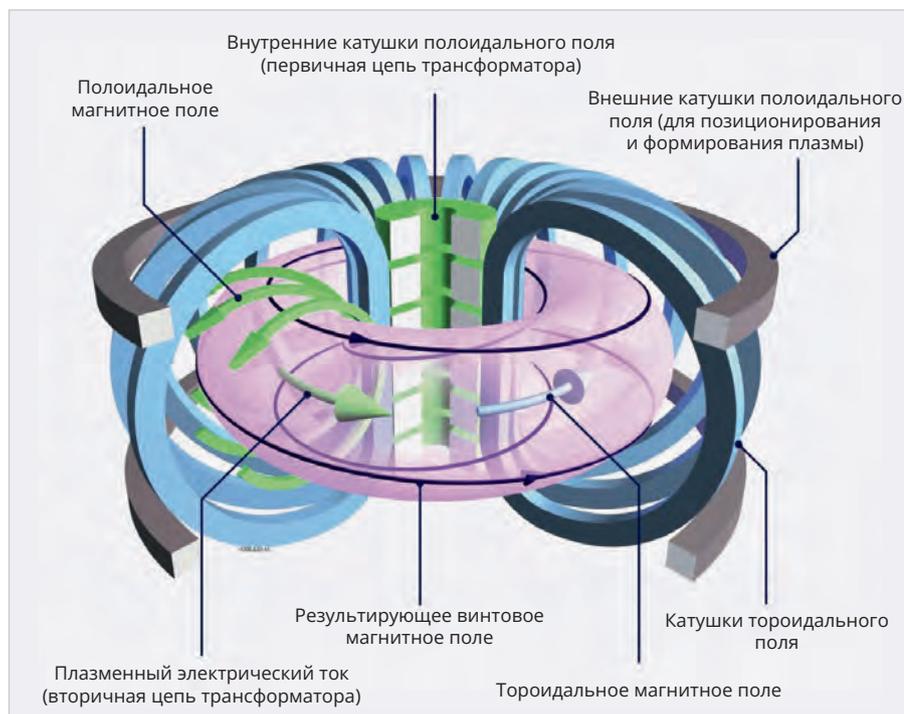


Рис. 5. Иллюстрация взаимодействия элементов токамака SPARS

Напряжённость магнитного поля генератора от Energy Singularity предполагает прирост в 110% относительно токамака SPARC, создаваемого MIT (Massachusetts Institute of Technology).

### Термоядерный реактор SPARC

SPARC – это токамак, разрабатываемый концерном Commonwealth Fusion Systems (CFS) в сотрудничестве с Массачусетским технологическим институтом (MIT) – Центром науки о плазме и термоядерного синтеза (PSFC). Установка SPARC строится на территории кампуса института в штате Массачусетс (США). SPARC насыщен сверхпро-

водящими обмотками на основе высокотемпературного сверхпроводника YBCO (Yttrium Barium Copper Oxide). На рис. 5 показана иллюстрация взаимодействия элементов токамака SPARC.

Преимущество установки заключается в сверхпроводящих магнитах из условно нового материала – стальной ленты, покрытой оксидом меди, иттрия-бария (YBCO). Это высокотемпературные сверхпроводящие магниты, сохраняющие сверхпроводимость при температурах до 77К (оптимально при 10К). Прототип катушки высокого поля получился удачным: при испытаниях в 2021 году впервые постав-

лен рекорд для высокотемпературных сверхпроводящих магнитов с напряжённостью поля 20 Тл при температуре 20К [6]. Ожидается, что полученная в результате реакции плазма будет генерировать минимум в 2 раза больше энергии, чем требуется для поддержания работы энергоустановки при высоких температурах (200 млн К), что даёт коэффициент усиления при термоядерном синтезе  $Q > 2$  при ожидаемом  $Q \approx 11$  [6]. Создание магнитов стало возможным благодаря высокотемпературной сверхпроводящей технологии – HTS. В сравнении со SPARC у продукта компании Energy Singularity диаметр – 90% от SPARC, а объём – около 70% от SPARC, то есть меньше прежнего, что позволяет снизить производственные затраты. Интересно, что ещё 4 года назад специалисты осторожно высказывались на эту тему, прикрываясь словами «может быть, он когда-нибудь станет действующим» [4].

Термоядерный реактор SPARC – это полномасштабный прототип мощной электростанции. Конструкция создаётся на основе концепции дуговой термоядерной электростанции [6]. По расчётам разработчиков, устройство способно вырабатывать до 140 МВт термоядерной мощности за 10 секунд, несмотря на относительно компактные размеры. Название энергоустановки разработчиками выбрано по смыслу фразы «наименьшая возможная дуга», где ARC означает «доступный, надёжный, компактный».

Некоторые технические характеристики энергоустановки (получены в [6]).

- Большой радиус 1,85 м.
- Малый радиус 0,57 м.
- Объём плазмы 20 м<sup>3</sup>.
- Магнитное поле 12,2 Тл.
- Мощность нагрева 25 МВт.
- Плазменный ток 8,7 млн лет.
- Температура плазмы  $80 \times 10^6$  К.

Отличие SPARC от других токамаков в использовании «высоких» магнитных полей. Современные магнитные системы способны генерировать поле со значением около 21–25 Тл на их поверхности и примерно 12 Тл в центре плазмы (в реакторе). Это почти в 4 раза сильнее, чем в действующем и крупнейшем в мире экспериментальном термоядерном реакторе JET, и в 2 раза выше, чем в строящемся совместном проекте КНР и Франции ИТЭР – Международном термоядерном экспериментальном реакторе, о котором скажем далее. То есть новейшая

установка сможет производить больше энергии при меньшем размере – на четверть меньше конструкции ИТЭР. Особенность строящегося устройства в том, что реактор мощностью 140 МВт будет выдавать энергию импульсами по 10 секунд. Но уже для следующих моделей рассчитывают на более продолжительные периоды.

Теперь же предполагают, что к 2027 году новая термоядерная электростанция станет самым маленьким токамаком в мире, способным достичь 10-кратного прироста выработки эквивалентного дейтерий-тритиевого прироста энергии  $Q > 10$ . Использование высокотемпературных сверхпроводящих материалов может уменьшить объём устройства еще примерно до 2% относительно традиционных низкотемпературных сверхпроводящих устройств, когда будет построена термоядерная электростанция с  $Q > 10$ . Причём построить сразу несколько генераторов хотят всего за 3–4 года [1]. На этом основании разработчики утверждают, что SPARC будет значительно меньше аналогов, а выработка энергии обойдётся дешевле.

### Прототипы и международное сотрудничество

Ранее Energy Singularity объявила о завершении строительства и вводе в эксплуатацию термоядерного реактора типа токамак Huanliu-3 (HL-3). Работы проводились под эгидой Китайской национальной ядерной корпорации (CNNC) в 2020 году. Токамак HL-3 (рис. 6, фото из [2]) – крупномасштабная научная разработка для управляемого ядерного синтеза, независимо спроектированная и разработанная Китаем. Так, в Поднебесной добились мирового прорыва в области повышения управляемости ядерного синтеза. Это не только китайское, но и международное достижение в разработке передовой структуры магнитного поля. В работах и исследованиях приняли участие 17 всемирно известных научно-исследовательских институтов и университетов, в том числе Французская комиссия по альтернативным источникам энергии и атомной энергии, а также Киотский университет в Японии.

В августе 2023 года HL-3 успешно доказал способность оборудования к высокому удержанию реакции (устойчивости и управляемости) при токе плазмы в 1 000 000 А, что и подтвердило значительный прогресс в эксплуа-



Рис. 6. Токамак Huanliu-3 (HL-3)

тационных возможностях китайских генераторов ядерного синтеза с магнитным удержанием и даже вывело страну на передовые позиции в мире. Китай активно участвует в строительстве крупнейшего и пока единственного в мире «искусственного солнца», известного как проект Международного термоядерного экспериментального реактора (ИТЭР), совместного проекта Китая и Франции. 29 февраля 2024 года ITER подписал новый контракт на сборку модуля вакуумной камеры производства концерна CNNC. По условиям достигнутого на уровне международного сотрудничества соглашения с французскими специалистами разработчики китайской компании будут отвечать за установку основного оборудования в проекте ITER [2]. В мае 2024 года китайский концерн CNNC и Electricite de France (Франция) совместно выпустили перспективную концепцию в формате рекомендаций по новым источникам энергии, что стало новой исторической вехой в двустороннем сотрудничестве в области ядерной энергетики. Благодаря схожести экспериментальных принципов эксплуатации токамака HL-3 стала платформой для решения ключевых технических проблем и для расширения исследований и разработок, а также для содействия развитию талантов разработчиков. Расширение международного сотрудничества в сфере развития электроэнергетики представляется важной идеей и перспективным направлением деятельности в создавшейся ситуации.

### Экскурс в историю

Что касается новых разработок энергоустановок на основе термоядерного

синтеза в США и КНР, то, может быть, уместно вспомнить мифы об особенностях храмового комплекса божества Ранганатхи в Индии (Бхарат). До сего дня не утихают споры о том, что на стенах и потолке храма – в камне – изображены детали мощного энергетического реактора спиралевидной формы, отчасти напоминающего статор электродвигателя. Кроме того, в том же храмовом комплексе есть любопытный колодец с водой, насыщенной тяжёлыми химическими соединениями. В промышленности для получения тяжёлой воды (воды, обогащённой дейтерием) используют процессы ионного обмена. Не прибегая к конспирологическим теориям, по логике которых на территории храмового комплекса предполагается наличие термоядерного генератора с охлаждением и утилизацией отходов, можно предложить читателям самостоятельно изучить эту тему и возможную, хотя и бездоказательную связь между новейшими разработками термоядерных энергетических генераторов и изображениями на стенах и потолке храма Ранганатхи на острове Шрирангам. Подробнее об этом можно узнать в [7]. Речь идёт об устройствах свободной энергии, «вечных двигателях», к примеру, таких как «Колесо Бхаскары». Никола Тесла однажды сказал: «Никакое устройство, способное давать полностью бесплатную энергию, никогда не будет допущено на рынок». Это может означать, что такие устройства будут существовать или существовали. Также это может значить, что уже скоро мы приблизимся к тому, чтобы проверить эту гипотезу выдающегося изобретателя.

## Причинно-следственная связь успеха

В КНР особенно внимательны к деталям процессов и аналитике. В смежных с производством радиоэлектроники отраслях накопили технические преимущества за счёт долгосрочных исследований и разработок, тем самым получив преимущества перед конкурентами и разработчиками из других стран. Упор сделан на производственные возможности, поддерживающие промышленные цепочки, маркетинг и логистическую сеть.

Глобальный спрос и предложение определяются свободным и регулируемым рынком. Разным мировым державам присущи свои сильные стороны в некоторых отраслях, которые определяют и соответствующие сравнительные преимущества. Пока торговое сотрудничество является взаимовыгодным, всё идёт хорошо. Конфронтация и спор не являются эффективными способами решения проблем. Поскольку мировая экономика находится в стадии восстановления, есть надежда, что в активном международном сотрудничестве удастся решить проблемы взаимовыгодным образом, чтобы достичь благоприятного технического и эволюционного развития.

## Новое в силовых АКБ для электромобилей

Конкуренция стимулирует производителей не только разрабатывать новые типы мощных электрогенераторных установок, но и улучшать технологии производства на рынке электромобилей и аккумуляторов. Компании-конкуренты ведут работы над созданием «сухой» технологии покрытия электродов как для анода, так и для катода уже более 10 лет. Помимо LG Energy Solution, Tesla, LG, Samsung и Volkswagen, исследованиями в этой области занимаются разработчики из Panasonic, CATL, EVE Energy, Svolt Energy Technology и других компаний. Новая технология сделает тяговые аккумуляторы более доступными без смены их химического состава. Так производство аккумуляторов станет более эффективным и экологичным. Классический метод покрытия катодов и анодов в АКБ наносит вред окружающей среде, поскольку используются токсичные химикаты и материалы. Технология предусматривает нанесение химических реагентов в жидком виде на электроды, которые затем высушива-

ются в печи длиной почти 100 метров при температуре около +200°C. Технология исключает использование растворителей и необходимость в длительном процессе сушки при высоких температурах. Это позволяет сократить расходы на энергию и оборудование, а также освободить место на производственных линиях. Переход на «сухую» технологию позволит снизить затраты на производство аккумуляторов на 17–30% [3]. Это позволит сделать аккумуляторы более доступными без изменения химического состава. Наравне с невиданными перспективами коммерциализации технологии в этом видят потенциальный «переворот» благодаря экономической эффективности и экологической безопасности.

Компания Tesla получила доступ к подобной технологии в 2019 году после приобретения компании Maxwell Technologies. Попытки внедрить её при производстве аккумуляторных ячеек типоразмера 4680 на предприятии в Техасе к прорывному успеху не привели. Американский производитель смог внедрить «сухой» метод покрытия только при выпуске анодов, а катоды приходилось выпускать по прежней технологии, так как химический состав катодов до сих пор не позволял применить новый метод их покрытия.

Тем не менее сухой метод производства электродов не требует использования специальных печей и позволяет более гибко распоряжаться пространством в производственных помещениях. Восстанавливать отработанные химикаты, как в случае с «мокрым» методом, тоже не требуется. Так взаимосвязанные компании Volkswagen и PowerCo внедряют новую технологию для снижения энергозатрат на выпуск электродов на 30%, при этом потребность в производственных площадях сокращается почти на 50%.

## Выводы

Разработки в области материаловедения, АКБ и термоядерных электростанций востребованы и конкурентны, их трудно переоценить на пути к ещё более совершенным энергоустановкам и в целом к низкоуглеродному, экологически безопасному будущему, чтобы поддержать устойчивое развитие энергетики и энергетической независимости государств на всех континентах. Вот почему высокотемпературная сверхпроводящая термоядерная энергоустановка значительно

повысит экономическую эффективность развития стран, качество жизни населения и ускорит коммерциализацию термоядерной энергии. Таким образом, пусть ещё не завтра, а через 10 лет, но мы и наши дети получим альтернативу условно небезопасным атомным электростанциям (АЭС) сопоставимой мощностью отдачи электроэнергии потребителям и условно небольшими размерами, то есть в перспективе – мощные силовые энергетические установки для выработки электроэнергии посредством управляемого электронными средствами термоядерного синтеза и с возможностью полностью автономной работы, а также размещения на небольших территориях. Введение в эксплуатацию термоядерных реакторов как силовых установок мощных электростанций приведёт к тому, что SPARC будет значительно меньше аналогов, а выработка энергии обойдётся дешевле. Это путь к энергонезависимой от внешних условий и ресурсов жизни людей и стран. Так, Китай получил признание в области разработки устройств высокотемпературного сверхпроводящего магнитного удержания термоядерного синтеза с использованием высокотемпературных сверхпроводящих материалов.

## Литература

1. China's commercial 'artificial sun' achieves first discharge. URL: <https://www.globaltimes.cn/page/202406/1314447.shtml>.
2. China achieves world-leading breakthrough in controlled nuclear fusion. URL: <https://www.globaltimes.cn/page/202406/1314078.shtml>.
3. LG намерено освоить экологичное производство батарей к 2028 году. URL: <https://sciencexxi.com/lg-namereno-osvoit-ekologichnoe-proizvodstvo-batarey-k-2028-godu/>.
4. MIT researchers confident their fusion reactor is “very likely to work». URL: <https://www.zmescience.com/science/mit-researchers-confident-their-fusion-reactor-is-very-likely-to-work/>.
5. Фото. URL: [https://ic.pics.livejournal.com/verola/27372819/957724/957724\\_original.jpg](https://ic.pics.livejournal.com/verola/27372819/957724/957724_original.jpg)
6. SPARC. URL: [https://translated.turbopages.org/proxy\\_u/en-ru.ru.c7798420-668ed210-064913a0-74722d776562/https/en.wikipedia.org/wiki/SPARC\\_\(tokamak\)](https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.c7798420-668ed210-064913a0-74722d776562/https/en.wikipedia.org/wiki/SPARC_(tokamak)).
7. Тайны Индии. URL: [https://www.youtube.com/watch?v=\\_49tdUc4j6Q](https://www.youtube.com/watch?v=_49tdUc4j6Q).