The background features a dark blue gradient with faint, light-colored technical diagrams. On the left side, there is a large circular scale with numerical markings from 140 to 260 in increments of 10. Several circular diagrams with arrows and dashed lines are scattered across the background, suggesting a technical or scientific theme.

# Термоядерный реактор

Безопасная энергия

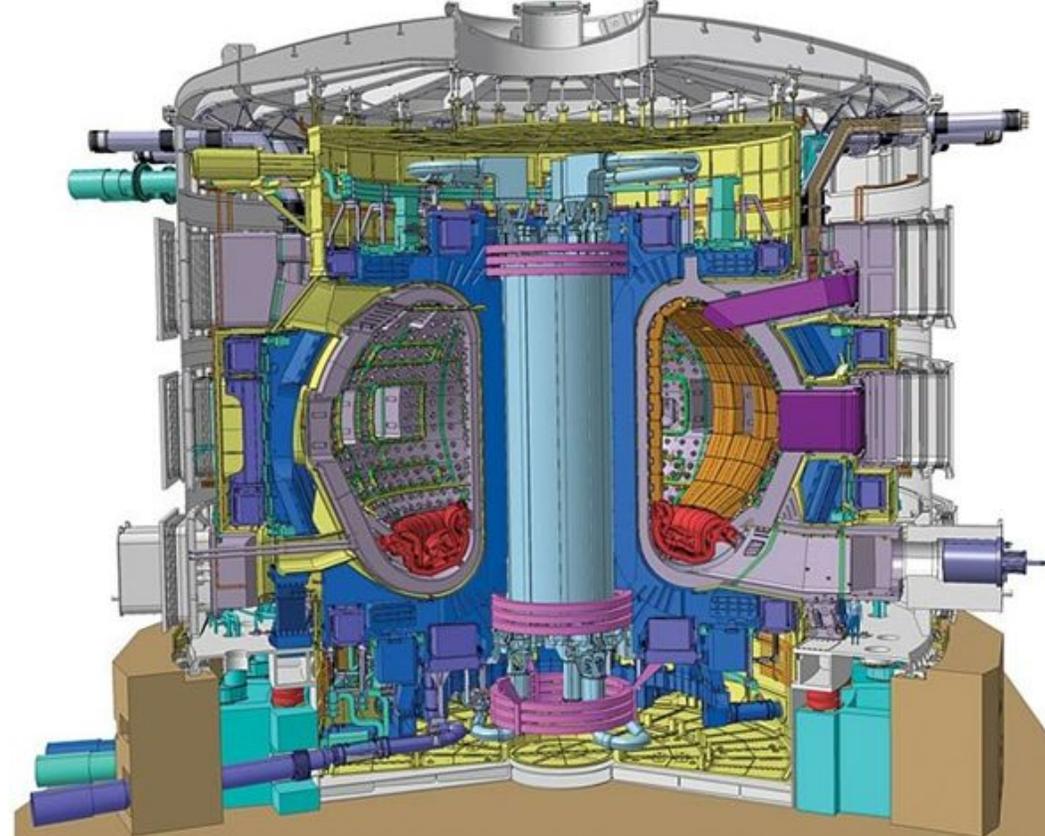
Половков анатолий

Управляемый термоядерный синтез — голубая мечта физиков и энергетических компаний, которую они лелеют не одно десятилетие. Заключить искусственное солнце в клетку — прекрасная идея. «Но проблема в том, что мы не знаем, как создать такую коробку», — говорил нобелевский лауреат пьер жиль де жен в 1991 году. Однако к середине 2018 года мы уже знаем как. И даже строим. Лучшие умы мира трудятся над проектом международного экспериментального термоядерного реактора ITER — самого амбициозного и дорогого эксперимента современной науки.

Такой реактор стоит в пять раз больше, чем большой адронный коллайдер. Над проектом работают сотни ученых по всему миру. Его финансирование запросто может перевалить за 19 млрд евро, а первую плазму по реактору пустят только в декабре 2025 года. И несмотря на постоянные задержки, технологические трудности, недостаточное финансирование со стороны отдельных стран-участниц, самый большой в мире термоядерный «вечный двигатель» строится. Преимуществ у него куда больше, чем недостатков. Каких? Рассказ о самой грандиозной научной стройке современности начинаем с теории.

## ЧТО ТАКОЕ ТОКАМАК?

Под действием огромных температур и гравитации в глубинах нашего солнца и других звезд происходит термоядерный синтез. Ядра водорода сталкиваются, образуют более тяжелые атомы гелия, а заодно высвобождают нейтроны и огромное количество энергии.



Современная наука пришла к выводу, что при наименьшей исходной температуре наибольшее количество энергии производит реакция между изотопами водорода — дейтерием и тритием. Но для этого важны три условия: высокая температура (порядка 150 млн градусов по цельсию), высокая плотность плазмы и высокое время ее удержания.

Дело в том, что создать такую колоссальную плотность, как у солнца, нам не удастся. Остается только нагревать газ до состояния плазмы посредством сверхвысоких температур. Но ни один материал не способен вынести соприкосновения со столь горячей плазмой. Для этого академик андрей сахаров (с подачи олега лаврентьева) в 1950-е годы предложил использовать тороидальные (в виде пустотелого бублика) камеры с магнитным полем, которое удерживало бы плазму. Позже и термин придумали — токамак.

Современные электростанции, сжигая ископаемое топливо, конвертируют механическую мощность (кручения турбин, например) в электричество. Токамаки будут использовать энергию синтеза, абсорбируемую в виде тепла стенками устройства, для нагрева и производства пара, который и будет крутить турбины.

Первый токамак в мире - советский Т-1. 1954 год

небольшие экспериментальные токамаки строились по всему миру. И они успешно доказали, что человек может создать высокотемпературную плазму и удерживать ее некоторое время в стабильном состоянии. Но до промышленных образцов еще далеко.

# Преимущества и недостатки термоядерных реакторов

Типичные ядерные реакторы работают на десятках тонн радиоактивного топлива (которые со временем превращаются в десятки тонн радиоактивных отходов), тогда как термоядерному реактору необходимы лишь сотни грамм трития и дейтерия. Первый можно вырабатывать на самом реакторе: высвобождающиеся во время синтеза нейтроны будут воздействовать на стенки реактора с примесями лития, из которого и появляется тритий. Запасов лития хватит на тысячи лет. В дейтерии тоже недостатка не будет — его в мире производят десятками тысяч тонн в год.

Термоядерный реактор не производит выбросов парниковых газов, что характерно для ископаемого топлива. А побочный продукт в виде гелия-4 — это безвредный инертный газ. К тому же термоядерные реакторы безопасны. При любой катастрофе термоядерная реакция попросту прекратится без каких-либо серьезных последствий для окружающей среды или персонала, так как нечему будет поддерживать реакцию синтеза: уж слишком тепличные условия ей необходимы.

Однако есть у термоядерных реакторов и недостатки. Прежде всего это банальная сложность запуска самоподдерживающейся реакции. Ей нужен глубокий вакуум. Сложные системы магнитного удержания требуют огромных сверхпроводящих магнитных катушек. И не стоит забывать о радиации. Несмотря на некоторые стереотипы о безвредности термоядерных реакторов, бомбардировку их окружения нейтронами, образующимися во время синтеза, не отменить. Эта бомбардировка приводит к радиации. А потому обслуживание реактора необходимо проводить удаленно. Забегая вперед, скажем, что после запуска непосредственным обслуживанием токамака ITER будут заниматься роботы.

К тому же радиоактивный тритий может быть опасен при попадании в организм. Правда, достаточно будет позаботиться о его правильном хранении и создать барьеры безопасности на всех возможных путях его распространения в случае аварии. К тому же период полураспада трития — 12 лет.

# Зачем нужен ITER и кто за него платит?

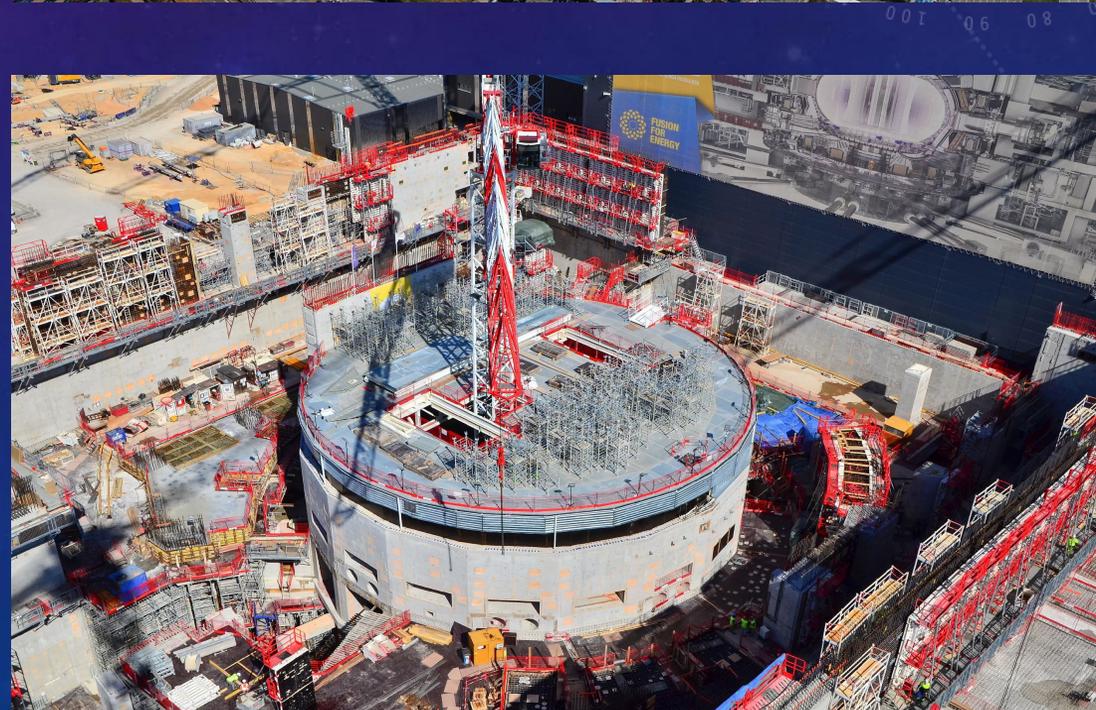
Токамак ITER станет первым термоядерным реактором, который будет вырабатывать больше энергии, чем необходимо для нагрева самой плазмы. К тому же он сможет поддерживать ее в стабильном состоянии намного дольше ныне существующих установок. Ученые утверждают, что именно для этого и нужен столь масштабный проект.

С помощью такого реактора специалисты собираются преодолеть разрыв между нынешними небольшими экспериментальными установками и термоядерными электростанциями будущего. Например, рекорд по термоядерной мощности был установлен в 1997 году на токамаке в Британии — 16 мВт при затраченных 24 мВт, тогда как ITER конструировали с прицелом на 500 мВт термоядерной мощности от 50 мВт вводимой тепловой энергии.

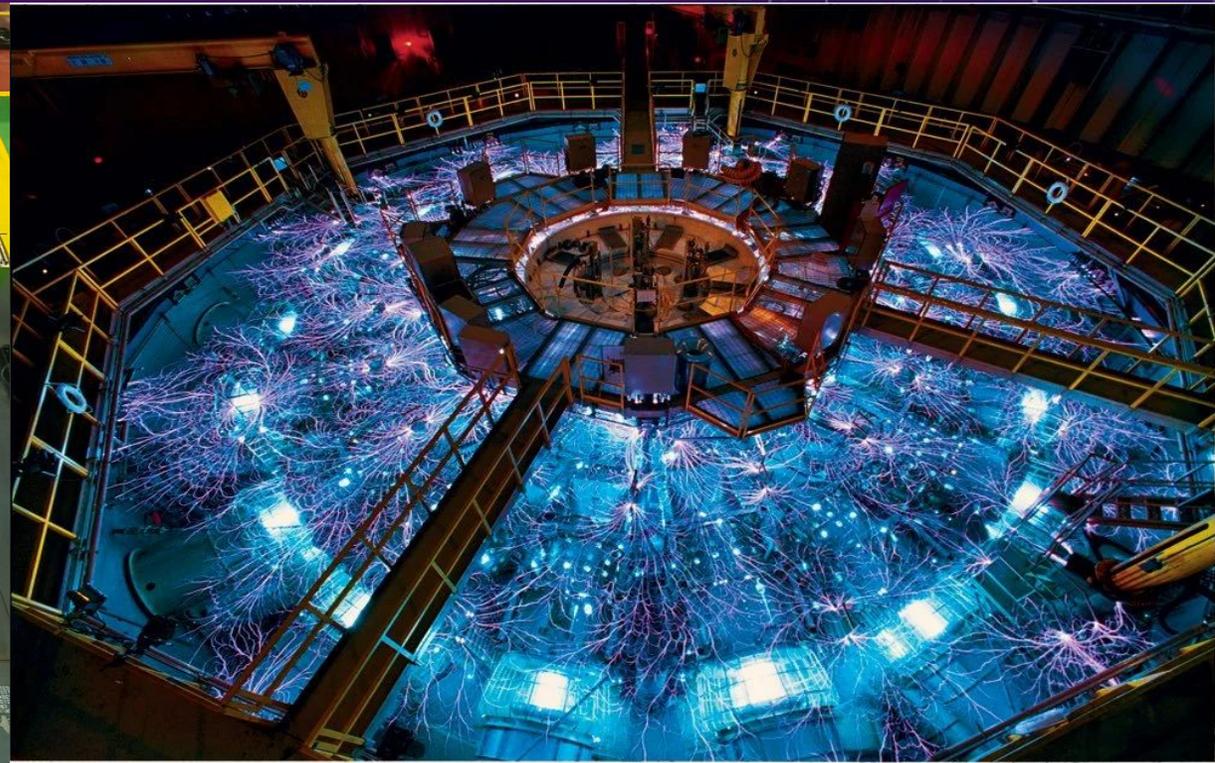
На токамаке будут испытаны технологии нагрева, контроля, диагностики, криогеники и дистанционного обслуживания, то есть все методики, необходимые для промышленного образца термоядерного реактора. Объемов мирового производства трития будет недостаточно для электростанций будущего. А потому на ITER отработают также технологию размножающегося blankets, содержащего литий. Из него под действием термоядерных нейтронов и будут синтезировать тритий.

Однако не стоит забывать, что это пуск и дорогой, но эксперимент. Токамак не будет оборудован турбинами или другими системами конвертации тепла в электричество. То есть коммерческого выхлопа в виде непосредственной генерации энергии не будет. Почему? Потому что это только усложнило бы проект с инженерной точки зрения и сделало бы его еще более дорогим.

Схема финансирования довольно запутанная. На стадии строительства, создания реактора и прочих систем комплекса примерно 45% расходов несут страны еврозоны, остальные участники — по 9%. Однако большая часть взносов — это «натура». Большинство компонентов поставляются в ITER напрямую от стран-участниц.



Они прибывают во Францию по морю, а из порта к стройплощадке доставляются по дороге, специально переделанной французским правительством. На 104 км «пути ITER» страна потратила 110 млн евро и 4 года работы. Трасса была расширена и усилена. Дело в том, что до 2021 года по ней пройдут 250 конвоев с огромными грузами. Самые тяжелые детали достигают 900 тонн, самые высокие — 10 метров, самые длинные — 33 метра.



Пока ITER не ввели в эксплуатацию. Однако уже существует проект электростанции DEMO на термоядерном синтезе, задача которой как раз и продемонстрировать привлекательность коммерческого использования технологии. Этот комплекс должен будет непрерывно (а не импульсно, как ITER) генерировать 2 гвт энергии.

Сроки реализации нового глобального проекта зависят от успехов ITER, но по плану 2012 года первый пуск DEMO произойдет не раньше 2044 года.

Спасибо за внимание

