

## Термоядерная энергетика: большой шаг вперед



**Научная группа СПбУ во главе с профессором Высшей школы фундаментальных физических исследований Физико-механического института (ФизМех) Владимиром Рожанским принимает участие в создании крупнейшего в мире Международного экспериментального термоядерного реактора. Если удастся создать термоядерный реактор, человечество получит практически неисчерпаемую «зеленую» энергию.**

Общество постепенно начинает осознавать, что ядерная энергетика, основанная на реакциях деления ядер, в будущем не будет столь распространена из-за экологических проблем, связанных с захоронением отходов, возможными авариями и т.д. Также ее коммерческая привлекательность значительно снижается из-за затрат, необходимых для вывода реакторов из эксплуатации. Этим недостатком лишена термоядерная энергетика.

### **Что такое токамак**

Энергетика будущего лежит в области управляемого термоядерного синтеза. Ученые всего мира ищут альтернативный путь получения энергии, и «сердцем» этих экспериментов является установка токамак, внутри которой удается «зажечь» (пока на доли секунды) рукотворное солнце – плазму. Первопроходческая роль России в исследованиях плазмы бесспорна: именно наши ученые Игорь Тамм и Андрей Сахаров заложили теоретические основы токамака. Токамак – это Тороидальная Камера с Магнитными Катушками, то есть установка магнитного удержания плазмы для достижения условий, необходимых для реакции управляемого термоядерного синтеза. При настолько высоких температурах любой газ переходит в состояние плазмы, и плазма в такой ловушке удерживается магнитным полем, которое создается специальными катушками. Токамак нацелен на демонстрацию на начальном этапе производства энергии термоядерного синтеза до 200 МВт и в конечном итоге на достижение уровня мощности в 1 ГВт.

Весной 2021 года в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт» создан и запущен термоядерный реактор Токамак Т-15МД – он стал первой за 20 лет новой термоядерной установкой, построенной в России. Токамак в Курчатовском институте не очень крупный. В мире существуют аналогичные установки, в том числе есть другой российский токамак «Глобус-М» в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе. Т-15МД отличается от остальных своим планом исследований. В частности, на этом токамаке будет исследована возможность использования токамака как источника нейтронов (если токамак все время нагревать, то он будет испускать нейтроны). Российские ученые планируют создать гибридный реактор. Это значит, что, если этот токамак станет частью атомной электростанции, и нейтроны удастся направить в ядерный реактор, то это значительно повысит эффективность атомной электростанции. В России подобные исследования проводятся впервые. В разработке токамака Курчатовского центра участвовала научная группа Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого во главе с профессором Высшей школы фундаментальных физических исследований Владимиром Рожанским. Ученые рассчитывали

параметры газового инжектора для токамака. В самое последнее время этой же группой проводятся расчеты для проектируемой в России новой установки ТРТ.

И наконец, усилиями ученых со всего мира на юге Франции сейчас строится крупнейший в мире экспериментальный термоядерный реактор ИТЭР (от англ. International Thermonuclear Experimental Reactor; ITER). Научная группа профессора Рожанского также принимает непосредственное участие в его создании. Сотрудники высшей школы, аспиранты и даже студенты имеют возможность работать над проектом мирового масштаба. В 2018 году профессор Владимир Рожанский стал членом Консультативного комитета по науке и технологиям ИТЭР.

### **Реакция термоядерного синтеза**

Профессор Рожанский поясняет, что история управляемого термоядерного синтеза связана в значительной степени с проблемой удержания плазмы в магнитном поле. В ней развиваются многочисленные неустойчивости, которые переводят плазму в турбулентное состояние, вызывают уход энергии из объема реактора и падение времени удержания. Более 50 лет понадобилось человечеству на решение этой проблемы. Один из способов – увеличить размеры реактора, поскольку время удержания плазмы растет пропорционально квадрату размеров. Самый большой термоядерный реактор ИТЭР будет иметь радиус около 6 метров.

«На Солнце идет управляемая термоядерная реакция, собственно, поэтому оно и светит. Это реакция синтеза легких ядер, но она может проходить только при очень высоких температурах – порядка 100 миллионов градусов и выше. На Солнце она достигается благодаря тому, что Солнце сжимается и нагревается под действием силы тяжести. В какой-то момент у ученых возникла идея создать искусственное Солнце на Земле. Это как раз то, что понимается под словами “управляемый термоядерный синтез”. В 50-е годы прошлого века в СССР был придуман токамак – тороидальная камера с магнитными катушками, в которой мог быть реализован управляемый термоядерный синтез. При настолько высоких температурах любой газ переходит в состояние плазмы, и плазма в такой ловушке удерживается магнитным полем, которое создается специальными катушками – отсюда и название. Постепенно создание токамаков охватило весь мир. Реакция термоядерного синтеза протекает благодаря дейтерию и тритию. Это изотопы водорода. Дейтерий содержится в воде – и пресной, и соленой. Что немаловажно, его легко оттуда извлечь. С тритием чуть сложнее – он реже встречается в природе. Ученые нашли выход из этой ситуации: в результате термоядерной реакции выделяются нейтроны, а вокруг реактора установлен бланкет из жидкого лития. Нейтроны, взаимодействуя с литием, дают реакцию, при которой выделяется тритий. Фактически настоящим топливом будет литий. Этих источников будет достаточно для работы токамак-реакторов», – отмечает профессор Владимир Рожанский.

### **Мы – в ИТЭР**

На токамаке ИТЭР впервые должна быть получена управляемая термоядерная реакция с так называемым положительным выходом. Это означает, что энергия, выделяющаяся при реакции, больше или, по крайней мере, равна затратам на нагрев плазмы в реакторе. Необходимо достичь температуры более 100 миллионов градусов! Планируется, что первая плазма на ИТЭР будет получена к концу 2025 года. Для получения к концу этого периода самоподдерживающейся термоядерной реакции потребуется еще 10-15 лет работы реактора.

Научная группа Высшей школы фундаментальных физических исследований СПбПУ уже многие годы занимается решением одной из основных проблем управляемого термоядерного синтеза – взаимодействием горячей термоядерной плазмы с материальными поверхностями установки токамака. Исследователи СПбПУ обнаружили новые эффекты, влияющие на поток энергии в реакторе. Теоретические предсказания подтвердились экспериментами на двух токамаках.

«Одна из основных проблем термоядерного синтеза связана с пристеночной плазмой: каким образом и какие примеси будут поступать в реактор, как будет перераспределяться мощность, которая идет из центральной зоны, и так далее. А точнее, с ее тонким соскабливаемым слоем (scrape-off layer). Понимание того, как устроен этот слой, знание физических процессов помогает прогнозировать плотность потока энергии на поверхности материала. В целом это влияет на возможность проведения управляемого термоядерного синтеза, потому что диверторные пластины реактора должны выдерживать огромные потоки энергии», – считает профессор Владимир Рожанский.

Научная группа исследовала электрические токи, протекающие в соскабливаемом слое пристеночной плазмы. Ученые провели теоретические расчеты и выполнили численное моделирование. Расчетные данные проверены экспериментально на двух токамаках – на токамаке в Институте физики плазмы им. Макса Планка в Германии, а также на российском токамаке «Глобус-М», который находится в Физико-техническом институте им. Иоффе.

«Благодаря моделированию и экспериментам на существующих токамаках нам удалось подтвердить теорию о механизмах образования соскабливаемого слоя в реакторе. Эксперименты на обоих токамаках полностью подтвердили наши теоретические расчеты. Поэтому мы можем делать прогнозы и экстраполировать эти данные на более крупные реакторы», – говорит профессор Рожанский.

Наши ученые создали численный код для моделирования параметров пристеночной плазмы токамаков. «Разработанный код называется SOLPS-ITER, он был принят в качестве основного в ИТЭР в 2017 году», – уточняет Владимир Рожанский. Сейчас он объявлен как официальный для расчета параметров пристеночной плазмы не только ITER, но и всех существующих установок, и рекомендован всем исследователям, занимающимся термоядерным синтезом для моделирования краевой плазмы токамака.

### **Моделируем самый большой в мире токамак**

Сейчас научная группа Политехнического университета при поддержке Представительства СПбПУ в Шанхае решает новую задачу – моделирование самого большого в мире токамака – термоядерной установки CFETR (Chinese Fusion Engineering Test Reactor).

Конструкция нового токамака и режимы его работы будут выбраны на основании расчетов, сделанных группой из Политеха совместно с коллегами из Научно-технического университета Китая и Института физики плазмы Академии наук города Хэфей. В 2025 году исследователи рассчитывают получить управляемую термоядерную реакцию с положительным выходом энергии, а запустить токамак планируется в 2030 году.

Профессор Рожанский объясняет: «Китайские коллеги обратились к сотрудникам ИТЭР с просьбой провести моделирование национального токамак-реактора. В ИТЭР заявили, что единственная научная группа, которая сможет это сделать, – из Петербургского Политеха. На основе расчетов, которые мы выполняем, китайские коллеги будут решать, как именно конструировать свой реактор и его элементы (дивертор, пластины и другое.) Под каждый токамак требуются свои расчеты. Китайская установка больше по размеру, требует применения не таких газов, как на ИТЭР, магнитное поле сильнее. Так что мы адаптируем наш пристеночный код под новый проект. Этот токамак, как и международный термоядерный реактор – это потенциальные источники энергии будущего, причем практически неиссякаемые».