Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Л. Белопухов, ИТЭР — сегодня, *Квант*, 2018, номер 10, 2–5

DOI: <https://doi.org/10.4213/kvant20181001>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением
<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 34.229.108.108

26 апреля 2023 г., 13:14:33

ИТЭР — сегодня

Л. БЕЛОПУХОВ

В СТАТЬЕ «ИТЭР – ЗЕМНАЯ ЗВЕЗДА» («Квант» №8 за 2018 г.) рассказывалось о возникновении идеи и о попытках воплощения ее в жизнь, приведших к созданию гигантского международного проекта ИТЭР. Самая крупная стройка XXI века приобрела уже такую известность, что сочетание букв «ИТЭР» перестали считать аббревиатурой, требующей расшифровки, а понимают как часть латинского *iter* (путешествие) – путь в энергетическое будущее человечества.

Советом ИТЭР официально заявлено, что пуск реактора состоится в 2025 году. На интернетовском сайте «ИТЭР сегодня» – сотни фотографий этой стройки. Имеются первые фотографии, когда в 2011 году был расчищен от леса и строго выверен по горизонтали целый комплекс огромных полей общим размером в несколько сотен футбольных полей. На сегодняшних снимках – грандиозная панорама самых разнообразных сооружений.

У этой панорамы есть центр – котлован круговой формы, в котором будет находиться главное сооружение установки, а

именно цилиндр диаметром 30 м и такой же высотой. Это – *криостат*, огромный холодильный термос, в оболочке которого будет поддерживаться температура порядка $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (73 К). Хладагентом будет жидкий азот, циркулирующий по трубчатым экранам, размещенным в оболочке криостата. Оболочку будут пронизывать сотни отверстий для трубопроводов ввода и вывода жидкого азота и электрических кабелей.

Внутри криостата – сердце реактора, вакуумная камера, давшая название всему устройству *токамак*. По форме она действительно представляет собою несколько искаженный тороид (тор), стоящий на поддоне и прикрытый сверху крышкой. Если строгий тороид напоминает собой баранку, то вакуумная камера реактора больше похожа на гигантский бублик или пончик, в котором периферия толще пустой центральной части. Кстати сказать, на английском научном сленге токамак так и называется *doughnut* – «пончик». Наружный диаметр этого пончика 19 м, внутренний 6 м, высота 11 м, общая масса 5000 т. Стенки вакуумной камеры выполнены из меди, упрочненной сталь-

ными деталями (делать их целиком из стали нельзя, ведь сквозь стенки камеры должны проникать внутрь магнитные поля, рождаемые магнитами, сердечники и обмотки которых расположены внутри криостата вокруг камеры). Особенно впечатляют тороидальные магниты, окружающие камеру, – как 18 лепестков еще нераспустившегося бутона. Магнитные поля проникают внутрь камеры сквозь медные «окна» и создают условия для сжатия и равновесия

DOI: <https://doi.org/10.4213/kvant20181001>

плазменного шнура, в котором и происходит термоядерная реакция.

В вакуумной камере (и внутри криостата) давление не должно превышать 10^{-4} Па, что в миллиард раз меньше атмосферного давления. Для создания такого вакуума в огромном объеме криостата и вакуумной камеры 400 насосов разного типа должны работать не меньше двух недель.

Стенки вакуумной камеры – двойные. Как и стенки криостата, они представляют собой охладительный термос, в котором хладагентом будет дистиллированная вода под давлением 4 МПа. Поступая с температурой 70 °С, вода с большой скоростью будет проходить сквозь стенки вакуумной камеры, нагреваясь до 120 °С и унося с собою основную часть энергии, выделяющейся в термоядерной реакции. При этом вода, покидая стенки камеры, еще только начинает закипать и шумит точь-в-точь, как начинающий закипать чайник. Этот шум будет тщательно контролироваться акустическими приборами – как показатель нормальной работы реактора. Активное кипение начинается, когда вода покидает камеру и ее давление начинает падать.

В токамаке не предусмотрено использование водяного пара для вращения турбин турбогенератора и получения электрического тока. Это не промышленный, а экспериментальный реактор. Он предназначен для отработки всех отдельных элементов термоядерного устройства. Поэтому пароводяная смесь после охлаждения, очистки и проверки на чистоту вновь будет поступать туда, где она отбирает тепловую энергию, – в «термосное» пространство стенок вакуумной камеры. В этом есть некоторое сходство с первыми атомными (плутониевыми) реакторами (1942 г., Чикаго, Э.Ферми; 1946 г., Москва, И.В.Курчатов).

Внутренние стенки вакуумной камеры, обращенные к плазменному шнуру, выложены 440 съемными *бланкетами* (одеялами). Каждая бланкета представляет собой сложную конструкцию из стали и меди с экраном площадью $1,5 \text{ м}^2$ и толщиной

10 мм, выполненным из бериллия – тугоплавкого и прочного металла, не взаимодействующего с нейтронами, а отражающего и замедляющего их.

Это и есть главные объекты токамака, принимающие на себя основную энергию термоядерной реакции – кинетическую энергию рождающихся нейтронов, имеющих огромные скорости порядка 20000 км/с. В результате многочисленных последовательных столкновений нейтроны передают свою энергию ядрам бериллия и замедляются. Бланкета нагревается, но не очень сильно (до 240 °С). Дальнейшему разогреву препятствует непрерывное омывание внутренней полости камеры водой, которая, нагреваясь, и уносит энергию реакции.

Тепловое излучение плазменного шнура, имеющего температуру 150 миллионов градусов, тоже дает немалый вклад в разогрев воды. Оставшаяся непоглощенной часть излучения проходит во внутреннее помещение к стенкам криостата и отдает свою энергию холодному жидкому азоту. Остается еще «хвостик» излучения – гамма-кванты. Для их поглощения криостат снаружи и сверху окружен мощной бетонной защитой толщиной от 1,5 до 3 метров.

Стоя за этой бетонной стеной, трудно будет представить, что внутри бушует термоядерный звездный жар. А там внутри – «стакан» криостата, окруженный разными трубами и механизмами. А внутри криостата – камера-бублик размером с трехэтажный дом, окруженная гигантскими магнитами. И если бы можно было заглянуть внутрь этого бублика, то там обнаружилось бы висящее в вакууме нестерпимо яркое кольцо водородной плазмы – источник термоядерной энергии. Как в сказке – сундук, внутри – шкатулка, в шкатулке – яичко, в нем – золотой перстень. Или, если угодно, – матрешки, каждая из которых, правда, не копирует предыдущую.

Ну, а что же строится вокруг центрального «сундука»? На снимках видны котлованы, фундаменты, стены многих сооружений и всюду – подъемные краны. А вокруг – складские помещения. Особенно

впечатляет огромное сооружение рядом с центром. Но это – всего лишь сборный цех, в котором сооружаются отдельные громоздкие детали криостата: поддон, крышка и стены холодильного «термоса». Оказывается, осуществлять надежную сварку этих деталей, состоящих из десятков отдельных стальных листов, можно только в их горизонтальном положении с тщательно проверяемым каждым сварным швом. После сварки гигантский кран будет перемещать эти детали на их постоянное место.

В этом году полностью подготовлено железобетонное основание для поддона криостата, который уже готов в соседнем здании и ждет установки на свое место. Подготовка железобетонного основания и всего фундамента под реактор – чрезвычайно ответственная операция. Ведь многотысячтонные криостат и вакуумная камера не должны испытывать ни малейших деформаций. Все возможные природные колебания грунта должны поглощаться и гаситься фундаментом и основанием.

Между поддоном криостата и его железобетонным основанием должно быть пространство для установки различных технологических устройств. Поэтому фундамент под криостатом имеет очень сложную форму, напоминающую корону. Строители так его и прозвали. Этим летом в ИТЭР-прессе было заявлено об окончании сооружения «короны». Она выполнена из совершенно необычного бетона. Его плотность в полтора раза больше, чем у обыкновенного строительного бетона. Впервые употребленный для него тяжелый гравий был доставлен из Лапландии.

Очень непроста проблема питания плазменного шнура топливом – смесью дейтерия и трития. ИТЭР, как и все предыдущие токамаки, – генератор энергии импульсного действия. Каждый импульс длится около 8 минут. За это время «сгорает» один грамм «топлива», такова масса плазменного шнура. А по выделяющейся энергии этот грамм эквивалентен 10 тоннам каменного угля. К концу импульсного периода температура в шнуре начинает падать – необходима подпитка.

Но при этом нельзя нарушать вакуум во всем криостате. Очередная порция топлива в виде «ледяных» шариков, имеющих температуру 10 К, выстреливается в вакуумную камеру. Одновременно с шариками в камеру вводится импульс высокочастотного электромагнитного поля, рождаемого специальными устройствами – электронно-циклотронными резонаторами (гиротронами). Поле частотой 50 МГц вводится в камеру через 60 окон, выполненных из поликристаллического искусственного алмаза (он прозрачен для такой частоты).

Поглощая энергию поля, шарики топлива ускоряются, ионизируются и затем под действием магнитного поля попадают в плазменный шнур, разогревая его до температуры начала термоядерной реакции. Вновь в шнуре 150 миллионов градусов и 46 тысяч ампер. Вновь нагреваются до кипения потоки воды внутри «лепестков» вакуумной камеры. И так повторяется сотни и тысячи раз, пока не придет пора заменять бериллиевые экраны в бланкетах, передающих энергию нейтронов воде и жидкому азоту, охлаждающему криостат.

Нельзя не остановиться на задаче создания в камере магнитных полей в десятки тесла. Для таких полей ток в обмотках магнитов должен быть не менее 60000 ампер. Это могут быть только сверхпроводящие обмотки. Используются сплавы ниобий–олово и ниобий–тантал, имеющие

нулевое сопротивление при температуре 3 К. Жгуты проводов называются *стрендами*. В один жгут в стренде скручиваются 5000 тончайших проволочек сплава (толщина каждой проволочки 6 микрометров), а 1440 стрендов скручиваются в кабель и помещаются в оболочку, внутри которой будет циркулировать жидкий гелий.

Россия уже произвела и доставила на строительную площадку 120 тонн таких кабелей для полоидальных магнитов. (Магнитное поле называется полоидальным, когда оно направлено вдоль линий, проходящих через полюсы сферической системы координат. Именно такое поле используется в токамаке для удержания плазмы в стабильном состоянии.) Их производство было организовано с нуля в 2010 году на Чепецком механическом заводе (г. Глазов, Удмуртия). В работе были задействованы и другие производства и научно-исследовательские институты, где разрабатывалось и создавалось необходимое оборудование. Совет ИТЭР высоко оценил этот вклад России в общее дело.

Для обеспечения непрерывного тока жидкого гелия и жидкого азота строится отдельное здание – «фабрика холода», где будут работать самые современные холодильные турбодетандеры и другие установки.

Очень важной задачей является выведение из вакуумной камеры главного продукта реакции – гелия. В нижней части камеры предусматриваются специальные устройства – *диверторы* (пепельницы). Часть диверторов занимают «кокосы». Так конструкторы ИТЭР прозвали слои активированного угля для поглощения ионов гелия, направляемых туда полоидальным магнитным полем. Дело в том, что наилучшим поглотителем гелия оказался уголь, полученный из сердцевин кокосовых орехов определенного вида. У диверторов есть и другие задачи. В конце каждого цикла нужно вывести из камеры недогоревшее топливо. Дейтерий и тритий разделяются и затем поступают на «фабрику» подготовки топлива.

Но основное количество топлива будет поступать в ИТЭР с заводов по производ-

ству дейтерия и трития, находящихся в других местах. Килограмм трития в настоящее время стоит 30 миллионов долларов, а ИТЭР будет расходовать полтора килограмма трития в месяц. Поэтому в проекте следующего реактора ДЕМО предусматривается получение трития непосредственно на реакторе при облучении нейтронами лития.

Задачей дивертора является и сбор бериллиевой пыли, возникающей на бланкетах во время работы реактора. Недопустимо попадание этой пыли в воздух, которым дышат люди. Во всех пунктах сбора бериллиевой пыли и ее эвакуации предусматриваются усиленные меры техники безопасности и тщательный контроль за их соблюдением.

Важнейшей частью проекта становится проектирование и разработка средств контроля и управления всеми технологическими процессами – «фабрики управления». Информация от нескольких сотен датчиков будет преобразовываться в цифровые интерфейсы, поступающие в контроллеры, языком которых будут протоколы, таблицы, диаграммы и т.п. Советом ИТЭР определено, что возглавлять эту работу и создавать большую часть контрольных приборов будут российские ученые и инженеры. Пожалуй, это будет самым существенным вкладом России в создание ИТЭР. В конце 2018 года в Москве состоится IV Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы информационных технологий, электроники и радиотехники» (ИТЭР–2018), в которой примут участие 26 научных организаций России и Казахстана.

Публикуемая статья – первый опыт популярного описания конструкции ИТЭР и современного состояния его сооружения. Автор старался ограничиваться минимумом сведений, необходимых для понимания сути дела. Но все равно этот минимум получился обширным и содержащим много количественных данных. Удалось ли при этом дать представление о масштабах проекта и его значении – судить читателю.